

EIA report

Deliverable 4.8

Release Status: Public

Authors: P. Canteli (IGME); L. Dal Fabbro, Y. Le Gallo (Geostock);
Rui Veloso, Pedro Madureira, Carlos Ribeiro, Júlio Carneiro (University of Évora);
Ana Delicado (ICS-UNL); Maria Helena Caeiro, João Casação (GALP); Soraia Vieira,
João Paulo Medeiros, Helena Adão, José Lino Costa (MARE, Marine and
Environmental Sciences Centre); Jesus Garcia-Crespo, Julio López, Jose Mediato,
Iván Moreno (IGME)

Date: 25/06/2026

Filename and Version:

Project ID Number: 101022664

PilotSTRATEGY (H2020- Topic LC-SC3-NZE-6-2020 - RIA)

1 Document History

1.1 Location

This document is stored in the following location:

Filename	
Location	

1.2 Revision History

This document has been through the following revisions:

Version No.	Revision Date	Filename/Location stored:	Brief Summary of Changes

1.3 Authorisation

This document requires the following approvals:

AUTHORISATION	Name	Signature	Date
WP Leader	Paula Canteli	PC	25/06/2026
Project Coordinator	Isaline Gravaud	IG	29/06/2026

1.4 Distribution

This document has been distributed to:

Name	Title	Version Issued	Date of Issue
			00/00/0000

© European Union, 2021

No third-party textual or artistic material is included in the publication without the copyright holder's prior consent to further dissemination by other third parties.

Reproduction is authorised provided the source is acknowledged.

P. Canteli; L. Dal Fabbro; Y. Le Gallo; Veloso, R.; Madureira, P.; Ribeiro, C.; Carneiro, J.; Delicado, A.; Caeiro, MH.; Casacão, J.; Vieira, S.; Medeiros, JP.; Adão, H.; Costa, JL.; Garcia-Crespo, J.; López, J.; Mediato, JF.; Moreno, I. 2026. EIA report. WP4-Deliverable D4.8, PilotSTRATEGY EU project (101022664)

Disclaimer

The information and views set out in this report are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union institutions and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information contained therein.

2 Executive summary in English

The objective of the WP4 is to provide complete information of the optimum development concept applicable to the proposed pilots of Paris Basin (FR), Lusitanian Basin (PT) and Ebro Basin (ES) to go ahead with the decision of whether this pilot is viable technically, commercially, considering social and environmental demands and in the existing European and local regulatory frame.

In particular, the Environmental Impact Assessment (EIA) aims to identify and assess the potential impacts associated with short-term and permanent CO₂ storage on the surrounding environment, with particular consideration of human health, biodiversity, water, soil, and the atmosphere. This task has been framed in accordance with the European Environmental Impact Assessment Directive (Directive 85/337/EEC and its subsequent amendments) and, where required, complemented by relevant national and local regulations. The objective is to collect the essential information necessary to support environmentally sustainable economic development and to provide the complete documentation required for obtaining a CO₂ injection permit.

The purpose of Deliverable D4.8, within the context of the pre-FEED phase, is to provide a preliminary assessment of the environmental framework, rather than an application of the Environmental Impact Assessment (EIA) regulation. The intention is to prepare the ground for future permitting processes by identifying early environmental considerations relevant to each region.

To increase the impact and usefulness of D4.8 at the local level, each regional report is provided in the local language, ensuring accessibility for regional stakeholders. In addition, a brief overview in English to support broader dissemination within the consortium among international partners is included in this Executive summary, and a complete English version for the Portuguese report is provided as Annex.

2.1 Executive summary of Paris Basin (France)

The present Environmental, Economic and Social Assessment is designed to support an application for a possible Exclusive Exploration Permit (PER) for a CO₂ pilot injection site, taking the case of the Grandpuits locality (France). It does not constitute an Environmental Impact Assessment (EIA). (An EIA would be required under a separate regulatory procedure, not required by French regulation for an Exclusive Exploration Permit).

This set of assessments supporting a CO₂ pilot injection study is part of the European research project PilotSTRATEGY (Horizon 2020), which aims to demonstrate the technical, environmental, and socio-economic feasibility of geological carbon dioxide (CO₂) storage in the Paris Basin.

Project Objectives and Context

In light of climate challenges and the urgent need to drastically reduce greenhouse gas emissions, Carbon Capture and Storage (CCS) represents a complementary technology to industrial

decarbonization efforts. According to the IPCC's Sixth Assessment Report, CCS is essential to achieving carbon neutrality by 2050.

The CO₂ pilot injection project for which PilotSTRATEGY collected data and performed analyses would test, on a pilot scale, the underground injection of 100,000 tonnes of CO₂ into the Dogger geological formation, located between 1,800 and 2,000 meters deep. This CO₂ pilot injection would be a research project, not a commercial operation, and would be limited in time and in injected volume.

This CO₂ pilot injection study concerns part of a European network of five possible sites (France, Spain, Portugal, Poland, Greece) investigated by PilotSTRATEGY to characterize deep saline aquifers for geological CO₂ storage. In France, the Grandpuits area was selected for such study due to its favorable geological conditions, its proximity to an industrial CO₂ source (the LAT Nitrogen plant), and the absence of subsurface usage conflicts.

Project Description and Work Plan

The present report addresses assessments that would be necessary to apply for an Exclusive Exploration Permit, a required regulatory step when envisioning a CO₂ pilot injection study. The theoretical assessment area covers approximately 121.5 km² across 20 municipalities. If authorized, CO₂ pilot injection study in the mentioned area would refine knowledge of the Dogger reservoir, test the safety of CO₂ confinement, and define the conditions for a potential future injection installation.

Two possible scenarios are considered:

- Main scenario: Off-site injection via a 3-km pipeline connecting the CO₂ source to the injection well;
- Alternative scenario: On-site injection using a highly deviated well (that is, a well whose access point is situated in a desirable surface area within or near-by the plant that is not at the strict vertical of the target in the reservoir).

Test injection of a limited volume of CO₂ would take place over a three-month period, followed by a monitoring phase of three to five years to confirm the stability and integrity of the projected storage site.

Important: The typical format of an assessment report is followed (see Section 3) – including the use of the present and the future verb tenses, instead of the conditional tense. Nonetheless, this report does not indicate that an exploration permit has been applied for or issued.

Environmental Analysis

The environmental assessment was carried out to identify and evaluate the potential effects of the pilot CO₂ injection project on the physical, natural, and human environments throughout the different phases of the project, including both construction works and injection operations.

The baseline study provides a comprehensive overview of the environmental context within the study area. Environmental issues were defined as sensitive environmental components that could potentially be affected by the project and therefore require specific consideration in project design and implementation.

Based on the vulnerability of these components, four levels of environmental concern were identified, none, low, medium, high. The analysis (Table 1) shows that the study area is characterized by:

- a largely anthropized environment with moderate environmental sensitivities,
- no major constraints related to climate, topography, air quality, or noise,
- several medium-level sensitivities linked mainly to water resources (hydrogeology, surface water, water uses), natural risks, technological risks, and existing infrastructure.

Importantly, no highly sensitive or prohibitive environmental issues were identified within the project perimeter.

The assessment then focused on the potential impacts of the project during both the construction phase (drilling, site preparation, transport activities) and the operational phase (CO₂ injection). The analysis targeted the main environmental issues identified during the baseline study, with particular attention paid to groundwater protection, surface water, natural habitats, and human activities.

Table 1 Impact level of the project

Environment	Main impacts	Impact level	Key measures	Residual impact
Physical environment	Deep drilling (≈1.8 km), pipeline / deviated well, crossing of aquifers, accidental CO ₂ release risk	Medium	Optimized routing, distance from existing wells, reinforced well integrity, technical controls, safety systems (ESD), monitoring and compliant plugging	Low
Natural environment	Temporary disturbance to fauna and vegetation during works	Low	Location outside protected areas, use of existing roads, adapted work schedule, noise/vibration monitoring, site restoration	Low
Landscape & heritage	Temporary visual impact from drilling rig; limited long-term landscape impact	Low	Avoidance of sensitive areas, landscape integration of wellhead, dismantling and site restoration	Low
Human environment	Temporary traffic, noise and vibration; transport and safety risks	Low	Setback from housing, reduced transport distances, stakeholder consultation, regulatory compliance, compensation if required	Low

For the physical environment, the project involves deep drilling to access the Dogger saline aquifer at a depth of approximately 1,800–2,000 m, well below all drinking water aquifers. The geological context, characterized by thick impermeable formations and the absence of faults, combined with a multi-barrier well design and controlled drilling techniques, ensures the isolation of groundwater bodies. As a result, the risk of CO₂ migration toward freshwater aquifers or the surface is considered negligible.

Regarding the natural environment, the planned injection site and associated infrastructure are located outside Natura 2000 sites and other protected areas. Although some sensitive natural environments, including rivers and a ZNIEFF area, are present within the wider study area, they will not be directly affected by the project. Potential impacts are mainly limited to temporary and localized disturbances during construction activities and are expected to be reversible.

For the human environment, the assessment identified potential short-term impacts related to construction works, such as noise, dust emissions, and increased traffic. These impacts will be limited in duration and managed through appropriate planning, monitoring, and compliance with regulatory thresholds. Any impact on agricultural activities will be addressed through compensation measures in line with applicable regional practices.

Considering the identified environmental issues, the characteristics of the project, and the different project phases, the impact assessment demonstrates that potential environmental impacts are limited and well understood. After implementation of avoidance, reduction, and compensation measures, residual impacts are expected to remain low across all environmental compartments.

The environmental assessment therefore concludes that the pilot CO₂ injection project is compatible with its environment and would have low impacts on the physical, natural, and human environments.

Economic and Social Analysis

It was found that the pilot project would have major scientific and strategic value for France and the European Union:

- It would contribute to securing the CO₂ capture and storage value chain.
- It would position France as a key player in geological storage.
- It would serve as a driver of innovation and training in low-carbon technologies.

Expected local benefits might include:

- Direct employment (drilling, environmental monitoring, maintenance) and indirect employment (service providers, logistics);
- The involvement of regional industrial and academic stakeholders;
- The enhancement of the territory's value within emerging CCS sectors.

Local stakeholder consultation, initiated during the study phase within the PilotSTRATEGY project, aims to ensure project transparency and the development of a sustainable relationship between study actors and local authorities and residents. Ongoing communication should continue throughout the subsequent project phases.

2.2 Lusitanian Basin (Portugal)

This deliverable constitutes the Preliminary Environmental Plan (PEP) that supports the environmental screening of the CO₂ storage pilot of the PilotSTRATEGY project in Portugal, located offshore from Figueira da Foz. The document aims to identify potential environmental risks and define preventive, mitigation and monitoring measures associated exclusively with the exploration phase, comprising 3D seismic acquisition and exploratory drilling of the injection well. Activities related to CO₂ transport, injection and operation are not included and will be subject to a dedicated environmental assessment procedure before implementation of the Pilot project.

The project area is located on the Portuguese continental shelf within the Lusitanian Basin and is characterised by environmental heterogeneity. Based on available baseline information, five benthic community types (A2, A3, B1, C1 and C2) were identified. Communities associated with fine and muddy sediments (C1 and C2) present higher sensitivity and lower resilience to physical disturbance,

while coarse sediment communities (A2 and A3) exhibit greater recovery potential and may serve as reference conditions.

The assessment indicates that seismic acquisition may generate temporary acoustic disturbance, while exploratory drilling constitutes the phase with higher potential environmental significance due to direct seabed interaction, sediment deposition and continuous noise. Provided that the proposed mitigation measures, seasonal planning constraints and the BACI-based monitoring programme are implemented, the exploration phase is considered environmentally acceptable for screening purposes.

This Preliminary Environmental Plan (PEP) does not replace or anticipate the need for a future Environmental Impact Assessment (EIA), should such a procedure be required under applicable legislation. The results presented are produced in the framework of a R&D project (PilotSTRATEGY), but can constitute the support for environmental screening, scoping and early regulatory decision-making for the exploration phase.

A complete English version is provided in the annex of this document.

2.3 Ebro Basin (Spain)

This report presents a preliminary assessment of the possible development of a geological CO₂ storage pilot in the Lopín structure, located in the Campo de Belchite, within the Ebro Basin, in Aragon. The document is technical and exploratory: it brings together geological, environmental, regulatory and socio-economic information available to assess the initial viability of the site and guide subsequent phases of study, without constituting a formal Environmental Impact Study for administrative processing.

The action is part of the European PilotSTRATEGY project, funded by Horizon 2020, which aims to improve the knowledge of deep saline aquifers as possible safe stores of CO₂ in southern and eastern Europe. In the Spanish context, Lopín is proposed as a case study to evaluate a deep Triassic formation, previously identified in IGME and ALgeCO₂ Plan works, and located in a region with geological potential, low population density and historical experience linked to underground activities.

The planned project is planned in a phased manner. In the first phase, geological and geophysical exploration would be carried out, including seismic campaigns, review of the geological model and drilling of an exploratory well. If the results are favorable, it would move towards a pilot or pre-commercial phase, with drilling and completion of an injector well and controlled injection of up to 100 kt of CO₂ for approximately three years. This phase would make it possible to check the response of the reservoir, the effectiveness of the sealing system and the necessary monitoring techniques before assessing a possible commercial development.

Geologically, the main reservoir is the Buntsandstein B1 unit, a Triassic sandy formation located at a depth of around 1,700–1,760 m, suitable for CO₂ storage under dense or supercritical conditions. The confinement system features a multi-barrier architecture, consisting of primary seals associated with Röt and Buntsandstein B2 facies, a local seal linked to the Muschelkalk M2 and a regional seal consisting of Keuper facies. The structure shows a potentially favorable geometry, although uncertainties persist about the lateral connectivity of the reservoir, the continuity of the deep units, the failure behavior and the permissible pressure during injection.

The study area is located between the provinces of Zaragoza and Teruel, in a rural and semi-arid environment characterized by gentle reliefs, predominance of rainfed crops, low population density and the presence of environmental values linked to steppe habitats. Although the site is not located within protected areas, in its surroundings there are relevant areas of the Natura 2000 Network and areas of interest for steppe birds, such as El Planerón and La Lomaza de Belchite. Also noteworthy is the Historic Site of Belchite, located outside the area of direct impact planned. No significant new access roads are planned, given that the area has sufficient accessibility from the existing road network.

From a hydrogeological point of view, no connection has been identified between the deep saline aquifer of the Buntsandstein and the surface aquifers with possible local use. Cenozoic formations generally have low to medium permeability, while Quaternary aquifers are mainly associated with river systems. In seismic matters, the area shows a very low natural seismicity; however, PilotSTRATEGY studies recommend maintaining a local seismic network during activity phases to properly characterize background seismicity, differentiate tectonic events from quarry explosions, and support storage monitoring.

The foreseeable environmental impacts are mainly concentrated in the exploration, construction and pilot operation phases. These include the temporary occupation and compaction of the soil, the removal of agricultural vegetation cover, the transit of machinery, the generation of dust, noise and light pollution, the risk of accidental spills, the disturbance to fauna, the possible alteration of steppe habitats and the temporary impact on the landscape. No significant impact is expected on permanent watercourses, flood zones, geological heritage, known archaeological sites, cattle trails, mountains of public utility or Natura 2000 Network areas, provided that the preventive and monitoring measures provided for are applied.

The proposed measures include the limitation of temporary occupation, the preferential use of existing accesses, the restoration of affected soils and surfaces, the proper management of waste and effluents, the prevention and response to spills, the control of dust and noise, the reduction of light pollution, the protection of natural drainage and revegetation with native species. In relation to fauna, prior surveys, the restriction of works during the nesting period of sensitive birds, speed limitation, the minimisation of off-road traffic and the coordination of possible compensatory measures with the competent environmental administration are considered essential.

Overall, the Lopín structure is of interest as a pilot site to evaluate the geological storage of CO₂ in the Ebro Basin. The available information suggests that the environmental impacts would be, on a preliminary basis, compatible or manageable through adequate planning, monitoring and application of preventive, corrective and compensatory measures. However, the continuity of the project should be conditional on the collection of new geological and seismic data, the verification of the warehouse-seal system, a detailed environmental assessment, compliance with the applicable regulatory framework and early and transparent participation of administrations, local communities and other stakeholders.

2.4 Upper Silesian Basin (Poland)

This deliverable shows the regulatory, environmental, and socioeconomic context for a proposed onshore CO₂ storage project in the Pągów–Milanów area (Upper Silesian Basin, Poland). The project follows a phased development approach, beginning with a pilot injection phase and potentially scaling to commercial operation, contingent on geological validation, environmental permitting, and financial feasibility.

Poland's legal framework for CO₂ storage is based on the EU CCS Directive (2009/31/EC), transposed into national law through the Geological and Mining Law (GML). Amendments adopted in 2023 represent a key milestone, as they allow onshore CO₂ storage, expanding eligible areas and reducing regulatory barriers. Despite this progress, CCS deployment in Poland remains nascent: no operational storage sites exist, infrastructure is undeveloped, and a dedicated national CCS strategy is still in preparation. The regulatory system requires multi-stage permitting, including geological work plans and environmental impact assessments (EIA), which can extend project timelines to around a decade.

The Upper Silesia region presents both opportunity and challenge. It has a high concentration of industrial CO₂ emitters and favourable geological conditions, but also significant environmental burdens and dense population, making public acceptance a critical factor. The project concept assumes CO₂ capture from industrial installations within 30–80 km, initially transported by tanker (pilot phase: ~30 kt/year) and later by pipeline (commercial phase: ~300 kt/year). Geological modelling suggests a storage capacity of ~31 Mt, with planned injection totalling ~7.5 Mt over both phases.

Environmental considerations are central. The project requires compliance with Poland's EIA framework, addressing land use impacts, transport-related disturbances, and subsurface risks such as leakage or induced seismicity. Long-term monitoring—extending at least 20 years post-closure—is mandatory. Given local sensitivities, stakeholder engagement, transparency, and clear communication are essential to build trust and acceptance.

A comprehensive monitoring strategy is proposed, combining subsurface (pressure, seismic, 4D imaging), surface (soil gas, groundwater, atmospheric measurements), and satellite-based (InSAR) methods. Risk mitigation measures include pressure control, well remediation, sealing interventions, and intensified monitoring if anomalies occur. Potential leakage pathways have been identified, with contingency plans aligned with international best practices.

Overall, the project is at a conceptual, pre-investment stage, with feasibility dependent on further geological verification, regulatory approvals, economic viability, and social acceptance.

2.5 Macedonia Basin (Greece)

Greece is progressively establishing a coherent and CCS-specific regulatory framework for the environmental permitting of Carbon Capture and Storage (CCS) projects. The adoption of Law No. 5216/2025 fully transposes Directive 2009/31/EC into Greek legislation system and, for the first time, recognises geological CO₂ storage as a distinct regulated activity, rather than assessing it indirectly under broader industrial or offshore categories. The law defines the full scope of CCS activities,

clarifies the legal status of CO₂ as non-waste, and introduces a clear distinction between pilot-scale storage (below 100 kt CO₂) and full-scale commercial operations.

Moreover, the National Climate Law (Law 4936/2022) requires the systematic integration of climate considerations into Environmental Impact Assessments (EIAs), including mandatory evaluation of greenhouse gas emissions, mitigation measures and long-term climate risks. CCS projects are now classified as Category A and Subcategory A1 and are subject to full EIA, and approval of Environmental Terms. Exploration permits, storage permits and environmental licensing are legally interconnected, forming a structured and sequential permitting pathway that covers exploration, operation, closure and post-closure stages, while strengthening the coordinating role of the competent CCS Authority (HEREMA).

The revised EIA content no longer focuses only on conventional environmental parameters to include lifecycle GHG emissions, long-term storage integrity, plume behaviour, leakage scenarios, monitoring plans, corrective measures, and post-closure obligations. This transition from a general EIA framework to a dedicated, climate-integrated CCS framework significantly enhances legal clarity, predictability and regulatory certainty for long-term subsurface projects.

In this deliverable, the Prinos CO₂ Storage Project is mentioned as a real-case on-going example of CO₂ geological storage under the new national legal framework. Prinos constitutes the first deployment of CCS in Greece within this updated regulatory environment and sets the foundations for future onshore developments. Its regulatory, environmental, and techno-economic structuring set the fundamentals for Western Macedonia and the Mesohellenic Trough, which were examined as pilot cases within the PilotSTRATEGY project. Overall, the strengthened and elaborated legislative framework creates clearer conditions for investment, risk management and long-term climate-aligned CCS development in Greece.

Contents

1	Document History.....	1
1.1	Location.....	1
1.2	Revision History.....	1
1.3	Authorisation.....	1
1.4	Distribution	1
2	Executive summary in English.....	3
2.1	Executive summary of Paris Basin (France)	3
2.2	Lusitanian Basin (Portugal).....	6
2.3	Ebro Basin (Spain)	7
2.4	Upper Silesian Basin (Poland)	9
2.5	Macedonia Basin (Greece).....	9
3	Paris Bassin (France)	16
3.1	Introduction	17
3.1.1	Description du projet PilotSTRATEGY	17
3.1.2	Contexte réglementaire français	19
3.1.3	Objet du mémoire environnemental, économique et social.....	19
3.2	Description de la zone d'étude	20
3.2.1	Contexte de l'étude	20
3.2.2	Objectif de l'étude	21
3.2.3	Séquence des travaux envisagés dans l'étude.....	21
3.2.4	Périmètre de l'étude.....	22
3.3	Analyse de l'état initial de la zone d'étude.....	24
3.3.1	Milieu physique	24
3.3.2	Topographie et relief	25
3.3.3	Milieu naturel	40
3.3.4	Patrimoine et paysage	48
3.3.5	Milieu humain	51
3.3.6	Risques naturels et technologiques	64
3.3.7	Permis de recherche, permis d'exploiter et concessions	72
3.3.8	Synthèse des enjeux environnementaux.....	74
3.4	Effets potentiels des choix de projet sur l'environnement et mesures associées	78

3.4.1	Effets des études et mesures incluses dans la demande théorique de permis	78
3.4.2	Evaluation préliminaire des incidences Natura 2000	83
3.4.3	Effets des travaux potentiels optionnels et mesures associées	83
3.4.4	Synthèse des impacts et mesures	85
3.5	Volet économique et social	90
3.5.1	Définition du périmètre de l'analyse socio-économique.....	90
3.5.2	Contexte géographique du périmètre	90
3.5.3	Etat des lieux de la situation économique et sociale à l'échelle du périmètre	91
3.5.4	Evaluation de l'impact du projet envisagé sur le territoire	104
3.6	Analyse des méthodes utilisées	111
3.6.1	Généralités.....	111
3.6.2	Recueil des données environnementales	111
3.6.3	Description des difficultés éventuelles	111
3.7	Annexes.....	113
3.7.1	Glossaire	113
3.7.2	Bibliographie	115
4	Lusitanian Basin (Portugal).....	117
4.1	Sumário executivo	118
4.2	Introdução.....	119
4.2.1	O projeto PilotSTRATEGY	119
4.2.2	Âmbito do documento.....	121
4.3	Enquadramento Regulamentar, Ambiental e Técnico do Local de Armazenamento de CO₂	122
4.3.1	Enquadramento legal e institucional para atividades CCS.....	123
4.3.2	Atividades durante a fase de prospeção.....	133
4.3.3	Caracterização da área de estudo	143
4.4	Identificação de Áreas Classificadas Potencialmente Afetadas	184
4.5	Identificação preliminar de riscos e impactos.....	187
4.5.1	Riscos e impactos associados à aquisição sísmica 3D	187
4.5.2	Impactes gerados pelas operações de perfuração	189
4.5.3	Impactes biológicos	190
4.6	Medidas de mitigação	197
4.6.1	Medidas de Mitigação Biológica	198
4.7	Plano de Monitorização	200

4.7.1	Plano de Monitorização das Comunidades Bentónicas	200
4.8	Análise de Lacunas	202
4.8.1	Componentes e indicadores de monitorização	202
4.9	Conclusões	202
4.10	Referências.....	204
5	Ebro Bassin (Spain).....	212
5.1	Resumen ejecutivo	213
5.2	Introducción	214
5.2.1	Objetivo y alcance del documento	214
5.2.2	Justificación del proyecto de almacenamiento geológico en el marco climático español	215
5.2.3	Proyecto PilotSTRATEGY.....	216
5.2.4	Marco legislativo	216
5.3	Descripción del proyecto.....	218
5.3.1	Descripción de las etapas propuestas	219
5.4	Localización	220
	Localización	221
5.4.1	Accesibilidad	221
5.4.2	Infraestructuras de la zona.....	222
5.4.3	Patrimonio histórico.....	222
5.5	Descripción del entorno socio-económico.....	226
5.6	Descripción del medio físico	228
5.6.1	Relieve.....	228
5.6.2	Clima	229
5.6.3	Paisaje y vegetación.	229
5.6.4	Suelo	230
5.6.5	Áreas protegidas	231
5.7	Descripción geológica	232
5.7.1	Contexto tectónico.....	232
5.7.2	Contexto estructural	234
5.7.3	Caracterización del reservorio y sello.....	235
5.8	Descripción hidrogeológica	236
5.8.1	Principales acuíferos	237
5.8.2	Inventario de puntos de agua	238

5.8.3	Propiedades hidrogeológicas	244
5.8.4	Usos locales de las aguas subterráneas.....	244
5.8.5	Interacción entre el acuífero salino almacén y los acuíferos superficiales	245
5.9	Condiciones sísmicas	245
5.10	Tratamiento de los principales impactos del proyecto.	247
5.10.1	Calidad atmosférica, población y salud.	247
5.10.2	Suelo, geología y geomorfología.....	247
5.10.3	Hidrología.	248
5.10.4	Flora y vegetación. Hábitats de Interés Comunitario (HIC).	249
5.10.5	Fauna.....	249
5.10.6	Espacios Naturales Protegidos. Red Natura 2000.....	251
5.10.7	Paisaje.	251
5.10.8	Patrimonio cultural. Vías Pecuarias y Montes de Utilidad Pública.	252
5.10.9	Sinergias y efectos acumulativos.	252
5.10.10	Seguimiento actividad sísmica	252
5.11	Conclusiones.....	252
5.12	Bibliografía	253
5.12.1	Legislación de interés	253
5.12.2	Enlaces de interés	254
5.12.3	Documentos de interés.....	255
6	Upper Silesia and West Macedonia environmental assessment frame	258
6.1	Upper Silesia Basin (Poland)	259
6.1.1	Introduction	259
6.1.2	Legislative background and scope	259
6.1.3	The proposed scenario for the DSA Pągów-Milanów (Upper Silesia Basin, Poland)	260
6.1.4	The framework of environmental assessment	261
6.1.5	Monitoring strategy and corrective measures	262
6.1.6	Summary.....	265
6.2	Macedonia Basin (Greece).....	266
6.2.1	Introduction	266
6.2.2	Legislative background and scope	266
6.2.3	Alignment with the National Climate Law (Law 4936/2022)	266
6.2.4	Scope of application.....	267
6.2.5	Changes to the content of Environmental Impact Assessments	267

6.2.6	Implications for environmental permitting	267
6.2.7	Relevance for CO ₂ storage and CCS projects	268
6.2.8	Linking the Law No. 5216/2025 with the techno-economic maturity of the Prinos CO ₂ Storage Project	270
7	Annex A: Preliminary Environmental Plan for Lusitania Basin- English version	271

3 Paris Bassin (France)

Mémoire Environnemental, Economique et Social
élaboré pour une demande hypothétique d'un pilote
d'injection de CO₂ dans le Bassin parisien

Author: E. POTTIER, C. ROUSSEZ, S. PEREZ, O. FRYSCHER (Suez)

Reviewer: Y. LE GALLO (Geostock), L. DAL FABBRO (Geostock), C. MAYS (Symlog)

3.1 Introduction

Le présent mémoire est élaboré dans le cadre des études menées par le projet PilotSTRATEGY sur des zones d'intérêts dans plusieurs pays.

3.1.1 Description du projet PilotSTRATEGY

3.1.1.1 *Projet de recherche européen PilotSTRATEGY*

Le projet PilotSTRATEGY est un projet de recherche européen, soutenu et financé par la Commission européenne dans le cadre du programme R&I Horizon 2020. Ce projet s'étend sur une période de 5 ans, de mai 2021 à avril 2026.

Le projet regroupe 16 partenaires européens (Royaume-Uni inclus), dont 5 partenaires français plus 3 partenaires comme tierce partie du partenaire Pole AVENIA.

Ce projet a pour objectif d'augmenter la maturité et la fiabilité de la caractérisation de cinq Aquifères Salins Profonds en Europe (DSA), en vue de leur utilisation pour le stockage géologique de CO₂.

Le projet se propose d'étudier 5 régions en Europe, déjà étudiées dans le cadre du projet H2020 CSA STRATEGY CCS depuis 2019 et pour lesquelles de potentiels schémas de développement de la technologie CCS avait été identifiée.



Figure 3-1 : Localisation des sites de développement de captage et de stockage de CO₂ en Europe du projet PilotSTRATEGY

Dans ces régions, la capacité de stockage des aquifères salins dans les formations géologiques déjà étudiées est estimée avec une plus grande précision pour une « caractérisation détaillée du système de stockage géologique ».

Le concept du projet est basé sur une approche pluridisciplinaire combinant :

- Une étude géologique complète quantitative et qualitative ;
- Une évaluation économique du concept de « Captage et Stockage géologique de CO₂ » (CSC) liés aux sites de stockage étudiés ;
- Une participation des parties-prenantes locales/nationales.

Une évaluation économique de type Classe IV est prévue pour analyser la viabilité du concept CSC sur les sites pilotes de stockage situés en France, au Portugal et en Espagne. Une proposition de pré-investissement est élaborée pour ces trois pilotes, tandis qu'un concept de développement est proposé pour les régions de Pologne et de Grèce.

Les travaux de caractérisation des formations géologiques et de modélisation et d'évaluation des risques de l'injection de CO₂ de chaque région sont coordonnés par le leader local du pays de la région. Ce coordinateur à l'échelle régionale est une Institution ou Organisation Publique. Ces organisations sans but lucratif partagent avec les autres partenaires la mission d'être transparentes et fiables envers les parties-prenantes locales concernant les actions du projet. Cette organisation doit garantir que les ressources numériques et données utilisées du projet soient « FAIR » (Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability).

3.1.1.2 Projet de pilote d'injection de CO₂ « France »

Le BRGM est le coordinateur du projet et le leader local pour la zone ciblée en France (Bassin de Paris) avec les partenaires français : IFPEN, GEOSTOCK, Symlog, Pole AVENIA, Vermilion et Arverne comme tierce partie.

GEOSTOCK a la charge de la conception et du design des installations du projet de pilote d'injection du CO₂ dans la zone d'étude France.

Le projet PilotSTRATEGY a pour objectif de collecter les données et d'élaborer les analyses et les modèles d'une qualité et d'un niveau de détail suffisant pour pouvoir servir, le cas échéant, à la construction future d'un site pilote de stockage de CO₂.

Les opérations de la construction d'un éventuel site pilote de stockage de CO₂ pouvant être menée par toute entreprise publique ou privée qualifiée, sous réserve d'obtenir au préalable un permis de recherche. Les participants au projet PilotSTRATEGY ne sauraient être les porteurs actuels ni futurs de ces opérations de construction.

Dans le cadre du projet PilotSTRATEGY, la zone d'étude France s'est focalisée sur la région autour de Grandpuits où se situe au démarrage du projet, une source importante de CO₂ associée à l'activité de l'usine LAT Nitrogen. Cette usine de fertilisants est le plus gros émetteur de CO₂ de la région. Il est cependant important de noter que le devenir de cette activité industrielle reste incertain en 2025, en raison des évolutions en cours concernant la stratégie industrielle de l'entreprise.

Via son procédé industriel (production d'hydrogène par reformage du méthane), ce site possède déjà une installation de captage, séparation et de purification du CO₂ avec plus de 450 000 tonnes par an d'émission, dont 300 000 tonnes sont ventilées dans l'atmosphère.

Le concept du projet de pilote étudié dans le cadre du projet PilotSTRATEGY envisagerait un stockage équivalent à ces émissions dans la limite de 100 000 tonnes de CO₂ afin de rester sous le seuil de la directive CCS définissant un projet commercial.

3.1.2 Contexte réglementaire français

Le stockage géologique de CO₂ est soumis à une réglementation européenne et française stricte. La Directive européenne, le Code de l'environnement ainsi que le Code minier permettent d'encadrer les projets de stockage de CO₂.

L'Union européenne a adopté la Directive CCS –2009/31/EC le 23 avril 2009 relative au stockage géologique de CO₂. L'objectif de ce document est d'instaurer un cadre juridique pour « le stockage géologique, en toute sécurité pour l'environnement, du dioxyde de carbone (CO₂) afin de contribuer à la lutte contre le changement climatique ». Les projets de stockage de CO₂ sont soumis à une étude d'impact environnemental selon l'annexe 1 de la directive EIA (2011/92/UE). Cette directive a été transposée en droit français par le décret n° 2011-1411 du 31 octobre 2011.

Les études menées dans le cadre du projet PilotSTRATEGY envisage une injection limitée à 100 000 tonnes de CO₂ sur une période de trois mois, ce qui le positionne dans un cadre de pilote, et n'est donc pas soumis à toutes les obligations de la directive CCS (JO L 140 du 5.6.2009, article 2 p. 120).

La recherche de formations géologiques aptes au stockage de CO₂ est encadrée par le Code de l'Environnement (Article R229-57) et nécessite un Permis Exclusif de Recherches (PER) délivré selon le Code Minier (Article L121-6).

Depuis le 1^{er} juillet 2024, l'octroi, la prolongation et l'extension d'un permis exclusif de recherches est précédé d'une analyse environnementale, économique et sociale (Article L114-1).

Un mémoire environnemental, économique et social prévu à l'article L114-2 du Code minier doit ainsi accompagner la demande de PER.

Le contenu de ce mémoire est décrit par l'article 7 du décret n° 2025-851 du 27 août 2025 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain.

3.1.3 Objet du mémoire environnemental, économique et social

L'article 7 du décret n° 2025-851 décrit le contenu du mémoire suivant :

1° Un volet environnemental contenant les éléments mentionnés au II de l'article R. 122-20 du code de l'environnement, afin d'identifier les enjeux environnementaux et de justifier la compatibilité du programme de travaux prévus par la demande de titre avec la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du code minier ;

2° Un volet économique et social détaillant l'intérêt scientifique et les principaux impacts, directs et indirects, sur un plan local et, s'il est pertinent, national de la réalisation du programme de travaux de recherches ou d'exploitation en termes de réduction de la dépendance de la France aux importations, de sécurisation des circuits d'approvisionnement, d'emploi, de retombées économiques et d'intégration dans le tissu industriel du territoire concerné, en précisant, le cas échéant, comment le programme de travaux s'intègre dans les orientations des documents de planification locaux ainsi que dans la politique nationale des ressources et des usages du sous-sol prévue à l'article L. 100-4 du code minier ;

3° Les éventuelles actions d'information et concertations organisées préalablement au dépôt de la demande ainsi que la manière dont il en a été tenu compte.

Le contenu des analyses prévues aux 1° et 2° du présent article est proportionné à l'importance, à la nature et au degré de précision des travaux envisagés dans la demande, à leurs incidences prévisibles sur les intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du code minier et à leurs conséquences économiques et sociales, autant qu'il est possible de les anticiper à ce stade.

Le mémoire a ainsi pour but d'évaluer les impacts potentiels du projet de pilote d'injection sur l'environnement, la société et l'économie locale et de caractériser les mesures d'évitement, réduction et compensation envisagées pour parer à ces impacts. Le volet environnemental vise à ériger l'état initial du site ainsi que les risques environnementaux associés au stockage de CO₂. Le volet économique vise à diagnostiquer la viabilité économique du projet et examiner les mesures pour en faire un apport positif à son contexte. Le volet social vise à examiner l'acceptabilité sociale du projet au niveau local, en identifiant les enjeux pour les populations riveraines, les acteurs économiques et institutionnels.

Le présent mémoire porte sur la zone d'étude qui serait concernée par la demande théorique de PER telle qu'envisagée dans le cadre des études menées au sein du projet PilotSTRATEGY.

3.2 Description de la zone d'étude

3.2.1 Contexte de l'étude

Le volume annuel mondial de tonne de CO₂ émis lié à l'énergie s'élève à 37 milliards de tonnes (giga-tonnes, **Gt**) en 2022 dont 3,4 Gt en Europe, et 300 millions de tonnes (**Mt**) en France laquelle compte ainsi moins de 10% du volume européen [1]. Chaque tonne de CO₂ émise accroît le réchauffement de la planète.

Les émissions se répartissent sur plusieurs secteurs avec un profil et une politique distincte [2] :

- Pour le transport (32 % du total France) et l'agriculture (19 %) les émissions sont à diminuer à la source;
- La technologie du captage et du stockage du CO₂ cible certains secteurs : l'industrie (18 %), la filière des déchets (4 %), et la production d'énergie (en France elle est très décarbonée à 11 % des émissions totales).

D'après le 6^{ème} rapport de synthèse du GIEC publié en mars 2023, le CCS (Carbon Capture and Storage) est une solution incontournable pour atteindre les objectifs de limitation du réchauffement climatique à +1,5°C [3].

La seule réduction à la source des émissions exigerait en effet des changements drastiques de mode de vie. L'objectif est fixé à 665 Gt de CO₂ captées et stockées d'ici 2100.

La réglementation européenne NZIA (Net Zero Industry Act) impose aux producteurs d'hydrocarbures de l'Union Européenne de contribuer aux objectifs de stockage de 50 Mt de CO₂ par an en 2030 [4].

Au niveau de la France, la stratégie prévoit de capter dans l'industrie 4-8 Mt CO₂/an d'ici 2030, 12-20 Mt CO₂/an d'ici 2040, et 30-50 Mt CO₂/an à l'horizon 2050 [5].

Dans le monde, il y a actuellement une quarantaine d'installations de captage et stockage de CO₂ en opération qui fonctionnent en toute sécurité, pour certaines depuis des dizaines d'années [6].

A l'échelle du projet, un pilote à Grandpuits pourrait déboucher sur un stockage des émissions de l'usine LAT Nitrogen à hauteur de 300 000 tonnes par an dans une phase commerciale si l'activité industrielle de l'usine était maintenue.

Dans le cadre du projet pilote, les installations de surface prévues seraient limitées et se concentreraient à proximité immédiate du site industriel de Grandpuits, en cohérence avec les infrastructures existantes. L'implantation est précisée en partie 7 du présent mémoire. Elle comprendrait notamment :

- une unité de compression du CO₂ avec éventuellement un caroduc ;
- une tête de puits et les installations associées ;
- un système de monitoring et de sécurité.

Les objectifs du pilote d'injection de CO₂ sont de :

- Préparer/développer un pilote accéléré à moindre coût pour prouver la faisabilité technique ;
- Minimiser l'empreinte du projet en surface pour les communautés locales ;
- Favoriser l'économie locale et le développement des communautés avoisinantes ;
- Construire un démonstrateur CCS de classe mondiale (présenter des solutions CCS et les avantages associés).

3.2.2 Objectif de l'étude

L'étude vise à évaluer la faisabilité d'un projet pilote d'injection de CO₂, dans la limite de 100 000 tonnes.

Ce document rassemble l'ensemble des éléments requis dans le cadre du mémoire environnemental nécessaire au dépôt d'un permis exclusif de recherche. Il n'a toutefois pas vocation à être déposé pour instruction ; son objectif est de centraliser les données en vue d'un éventuel futur porteur de projet.

PilotSTRATEGY et son partenaire Geostock interviennent pour conduire les études nécessaires, sans être les porteurs actuels ni futurs d'un projet pilote.

Une phase pilote constitue un essai à grandeur réelle : il s'agirait de construire un puits d'injection et de le tester avec une injection de CO₂ dans le sous-sol limitée à un volume de 100 000 tonnes sur la durée accordée.

L'évaluation du pilote devra ensuite permettre de vérifier si le test s'est bien déroulé, sans incident et en conformité avec la modélisation. Si l'essai s'avérait concluant, le futur porteur de projet devrait déposer une demande de concession pour procéder à une injection de CO₂ à une échelle commerciale.

3.2.3 Séquence des travaux envisagés dans l'étude

Dans le cadre de ce possible pilote d'injection, deux scénarios de travaux sur la zone d'intérêt étaient envisagés :

- Scénario principal: Injection hors-site à l'aide d'un pipeline de 3 km de long entre la source de CO₂ et la tête de puits et création d'un ouvrage légèrement dévié.

- Scénario alternatif : Injection à partir d'une tête de puits sur site et création d'un ouvrage fortement dévié.

Les études du projet pilote prévoient ensuite l'injection du CO₂ sur une durée prévisionnelle de 3 mois ainsi qu'une période de surveillance variant de 3 à 5 ans selon les scénarios.

3.2.4 Périmètre de l'étude

La zone étudiée en France dans le cadre du projet pilote d'injection de CO₂ se situe dans le Bassin parisien, en Seine-et-Marne (77).

La zone d'étude a été sélectionnée pour plusieurs raisons stratégiques :

- Elle repose sur la couche géologique du Dogger, connue localement pour ses propriétés favorables au stockage du CO₂ grâce aux travaux antérieurs réalisés notamment par des propriétaires de concessions pétrolières ;
- La zone choisie est entourée par les concessions pétrolières de l'entreprise Vermillon, exploitables jusqu'en 2040, année après laquelle l'exploitation sera interdite en France. Cela permettrait ainsi d'éviter des interférences éventuelles avec l'exploitation d'hydrocarbures dans la formation géologique du Trias ;
- Cette zone est également proche d'un site émetteur (usine LAT Nitrogen), où le CO₂ est déjà capté, ce qui pourrait permettre une optimisation logistique du transport vers le site de stockage ;
- L'absence d'installations géothermiques et d'autre ouvrages captant le Dogger à proximité du site limiterait par ailleurs les risques de conflit entre usages de la ressource du sous-sol.

Les coordonnées des sommets du périmètre et une cartographie de cette zone sont présentées dans le tableau (Tableau 3-1) et la figure suivante (Figure 3-2).

Tableau 3-1: Coordonnées des sommets de la zone d'étude

Sommets	X - RGF93 – Lambert 93 (m)	Y - RGF93 – Lambert 93 (m)
A	691 600	6 828 200
B	691 600	6 839 600
C	702 250	6 839 600
D	702 250	6 828 200

La zone d'étude couvre une superficie totale d'environ 121,5 km² sur 20 communes.

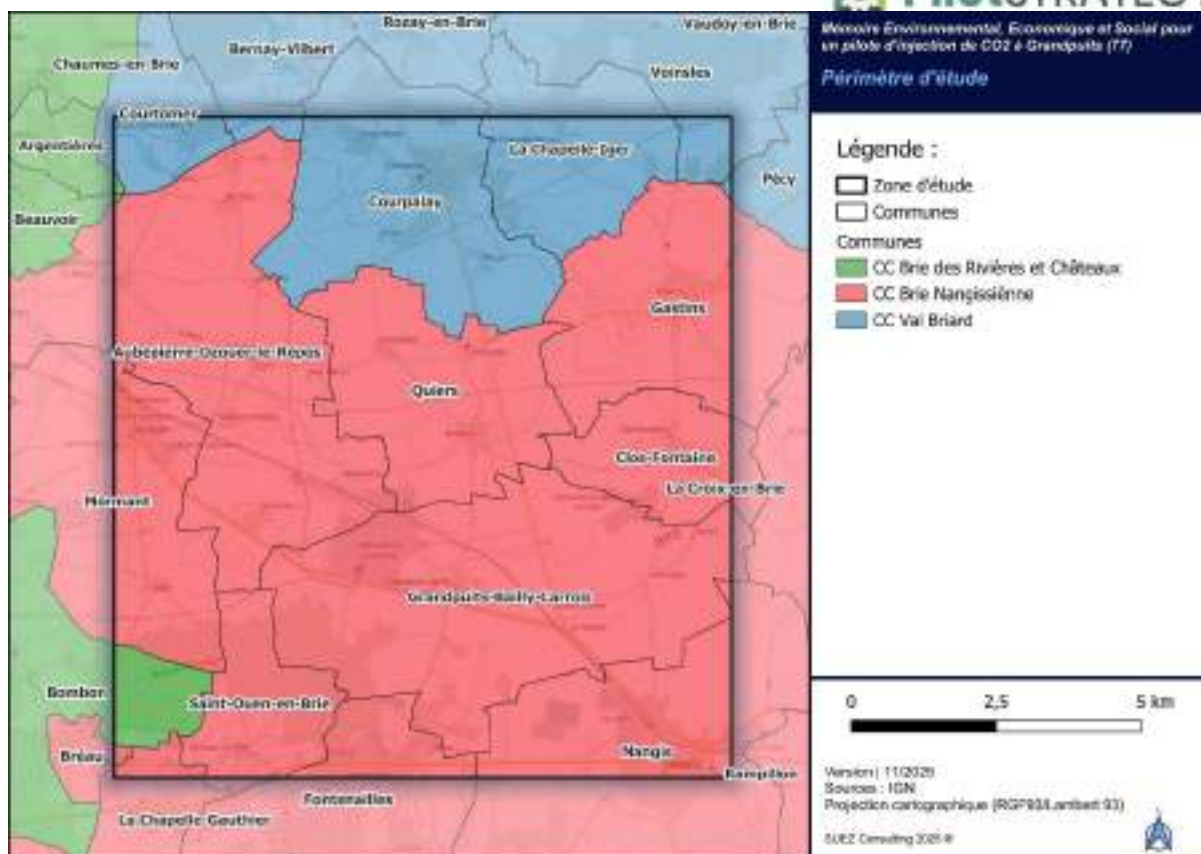


Figure 3-2 : Superficie occupée par la zone d'étude

Le Tableau 3-2 recense l'ensemble des communes recoupées par la zone d'étude. Environ 80 % de la zone d'étude est située sur des communes de la Communauté de Communes (CC) Brie Nangissienne (dont 20 % correspondant à la commune de Grandpuits-Bailly-Carrois), 18 % sur la CC Val Briard et 2 % sur la CC Brie des Rivières et Châteaux.

Tableau 3-2 : Liste des communes situées au sein de la zone d'étude

Communes	Code Insee	Superficie au sein de la zone d'étude (km ²)	Communauté de Communes
Argentières	77007	0.05	CC Brie des Rivières et Châteaux
Aubepierre-Ozouer-le-Repos	77010	20.54	CC Brie Nangissienne
Beauvoir	77029	0.02	CC Brie des Rivières et Châteaux
Bernay-Vilbert	77031	0.46	CC Val Briard
Bombon	77044	2.3	CC Brie des Rivières et Châteaux
Bréau	77052	0.08	CC Brie Nangissienne
Clos-Fontaine	77119	5.2	CC Brie Nangissienne

Communes	Code Insee	Superficie au sein de la zone d'étude (km ²)	Communauté de Communes
Courpalay	77135	12.51	CC Val Briard
Courtomer	77138	2.03	CC Val Briard
Fontenailles	77191	2.78	CC Brie Nangissienne
Gastins	77201	10.36	CC Brie Nangissienne
Grandpuits-Bailly-Carrois	77211	24.12	CC Brie Nangissienne
La Chapelle-Gauthier	77086	0.69	CC Brie Nangissienne
La Chappelle-Iger	77087	6.16	CC Val Briard
Mormant	77317	7.54	CC Brie Nangissienne
Nangis	77327	8.25	CC Brie Nangissienne
Pécy	77357	0.06	CC Val Briard
Quiers	77381	11.8	CC Brie Nangissienne
Saint-Ouen-en-bris	77428	5.48	CC Brie Nangissienne
Voinsles	77527	1.04	CC Val Briard

3.3 Analyse de l'état initial de la zone d'étude

3.3.1 Milieu physique

3.3.1.1 Facteurs climatiques

La région d'Ile de France dispose d'un climat qualifié d'océanique dégradé, caractérisé par des précipitations homogènes et régulières réparties au cours de l'année sans différence saisonnière. Le climat y est doux et tempéré avec un ensoleillement marqué par une couverture nuageuse plus prononcée autour des mois d'hiver.

Une station météorologique Météo France est située sur la commune de Grandpuits-Bailly-Carrois (77211001, Nangis-les-Loges) depuis 1992.

La normale annuelle des précipitations est de 704 mm/an (ce qui est légèrement inférieur à la moyenne nationale de 800 mm/an), et la température moyenne annuelle de 11,3°C.

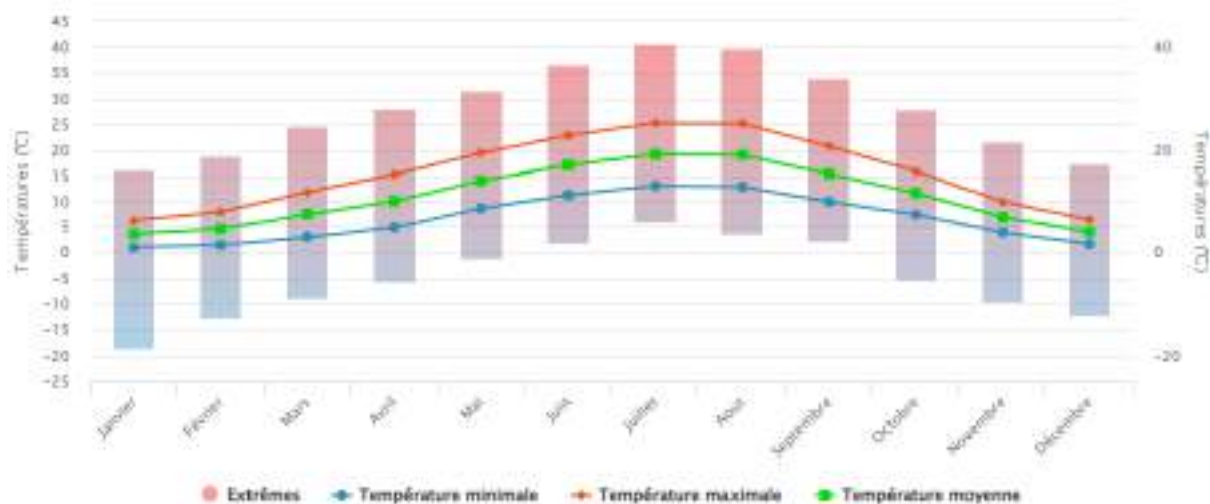


Figure 3-3 : Températures réparties annuellement dans la zone d'étude (période 1981-2010) [Infoclimat d'après Météo France]

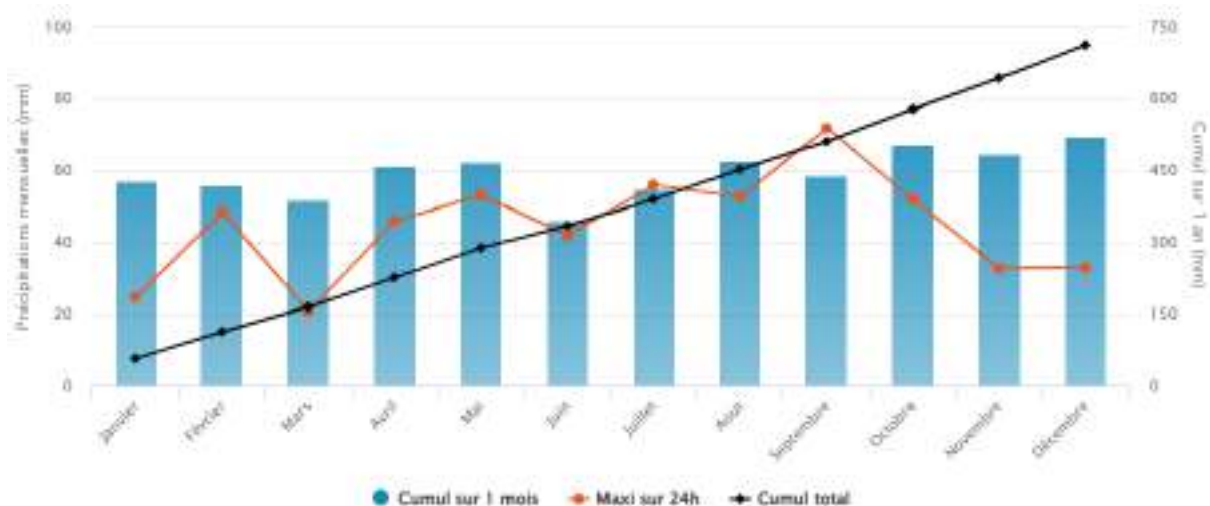


Figure 3-4 : Précipitations réparties annuellement dans la zone d'étude (période 1981-2010) [Infoclimat d'après Météo France]

L'évolution climatique sur les dernières décennies a entraîné l'apparition de phénomènes exceptionnels de plus en plus fréquents en Ile-de-France. L'augmentation annuelle du nombre de « nuits chaudes », et de vagues de chaleurs, la diminution du nombre de jours de gel et des vagues de froid, une augmentation du nombre de tempêtes et des épisodes de sécheresse.

Les températures ont en effet déjà augmenté de +2 °C en moyenne dans la région depuis le milieu du XX^e siècle et devraient atteindre +0,5 à +1 °C supplémentaires dès 2050 sans réduction des émissions de gaz à effet de serre.

3.3.2 Topographie et relief

La région Ile-de-France se situe sur le Bassin parisien, caractérisé par un relief peu accentué. La Seine-et-Marne est localisée sur un vaste plateau incliné, passant de 200 mètres d'altitude au nord-est à moins de 60 mètres au sud-ouest.

Localement, l'altitude de la zone d'étude varie d'environ 80 mNGF au nord-ouest dans la vallée de l'Yerres à plus de 130 mNGF sur le plateau au niveau de la commune de Grandpuits-Bailly-Carrois.

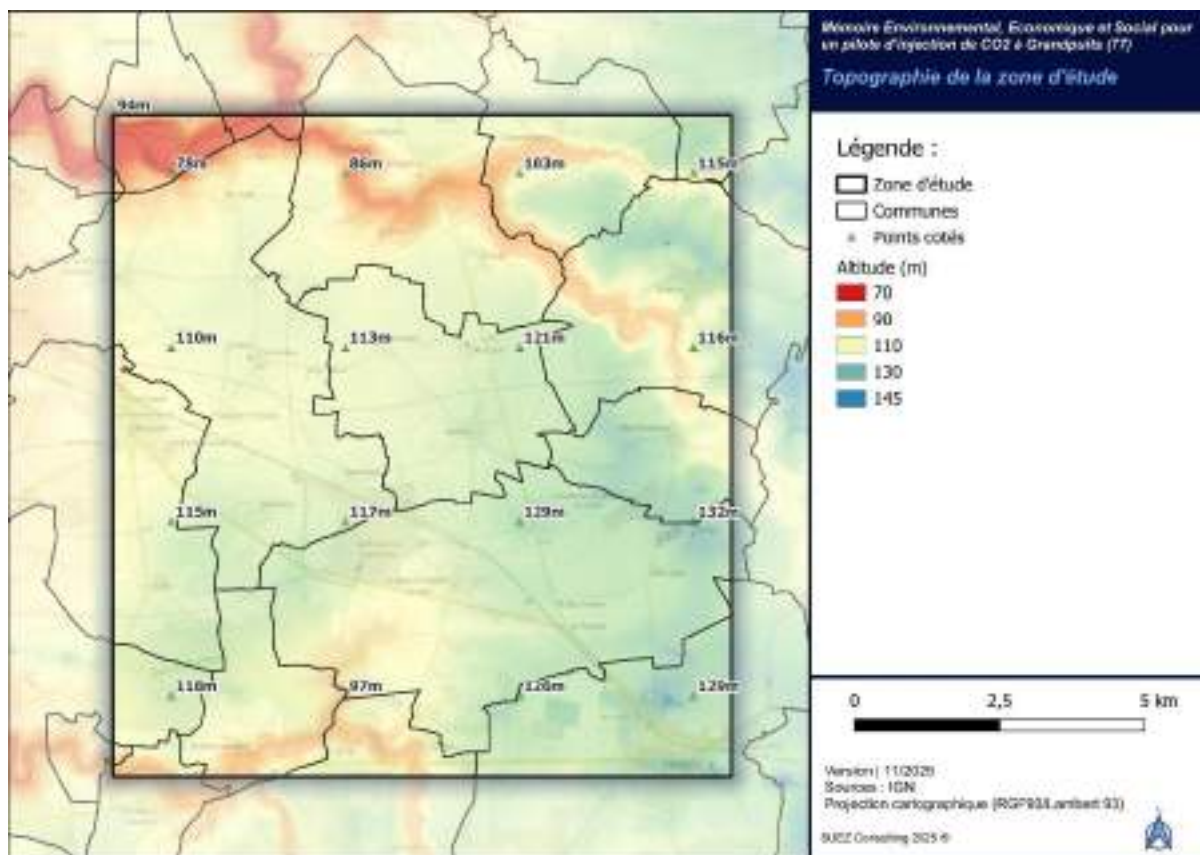


Figure 3-5 : Carte topographique de la zone d'étude

3.3.2.1 Géologie

3.3.2.1.1 Cadre géologique régional

Le secteur d'étude est situé sur les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} de Rozay-en-Brie (n°221) et Nangis (n°259).

L'extrait de la carte géologique de Rozay-en-Brie indique que l'on retrouve principalement à l'affleurement la formation des limons des plateaux (LP), recouvrant localement le calcaire de Brie (g1a). Quelques buttes témoins des sables et grès de Fontainebleau (g2) sont également visibles sur les points hauts du territoire.

Dans les vallées de l'Yerres et du Ru d'Ancœur, l'érosion laisse apparaître les argiles et marnes vertes (g1b), les marnes supragypseuses (e7b) ainsi qu'un dépôt d'alluvions modernes (Fz) localement présent dans le fond de vallée.

3.3.2.1.2 Contexte structural

Le Dogger repose sur les formations du Lias et du Trias. Le pendage général des assises crétacées et tertiaires localement est nord-ouest.

Une coupe d'un ouvrage profond existant au Dogger (BSS000UCFG) situé à Grandpuits au niveau de l'usine LAT Nitrogen figure ci-dessous (Figure 3-7).

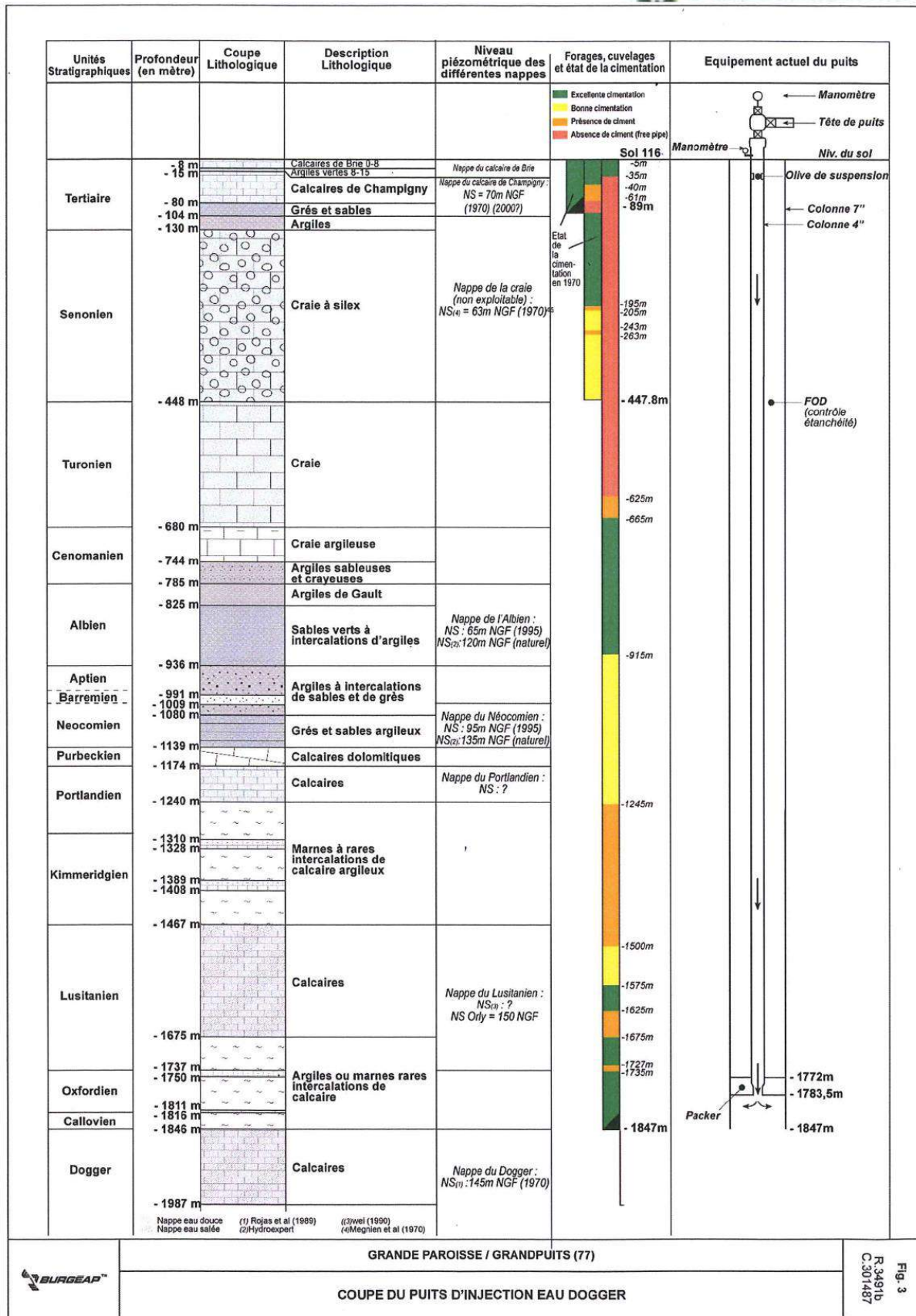


Figure 3-7 : Coupe d'un puits profond au Dogger existant au niveau de l'usine LAT Nitrogen

Les données de diagraphies (Figure 3-8) analysées dans le cadre du projet mettent également en avant une structure de couches similaire au niveau de la zone d'étude.

On retrouve notamment :

- La formation de couverture / caprock (couche permettant de confiner le CO₂)
 - Formation des Calcaires de l'Oxfordien
 - Formation des marnes du Callovo-Oxfordien

Profond de 1500 à 1850 m (350 m d'épaisseur), ces couches sont imperméables, continues et homogènes.

- La formation réservoir (couche cible de l'injection de CO₂) : Dogger
 - Formation de la Dalle Nacrée
 - Formation du Comblanchien
 - Formation de l'Oolithe Blanche

Profond de 1800 m à 2 000 m (150 m d'épaisseur), ces couches referment notamment l'aquifère salin des Oolithe blanche. Les eaux de l'aquifère sont très salines (23 g/l) et chaudes (70 à 75°C).

Une campagne d'acquisition sismique réflexion 3D réalisée en 2021/2023 dans le cadre du projet PilotSTRATEGY a permis de mieux appréhender les variations de géométrie du sous-sol, notamment la profondeur et l'épaisseur du réservoir et de la couverture ainsi que l'absence de faille notable (Figure 3-9).

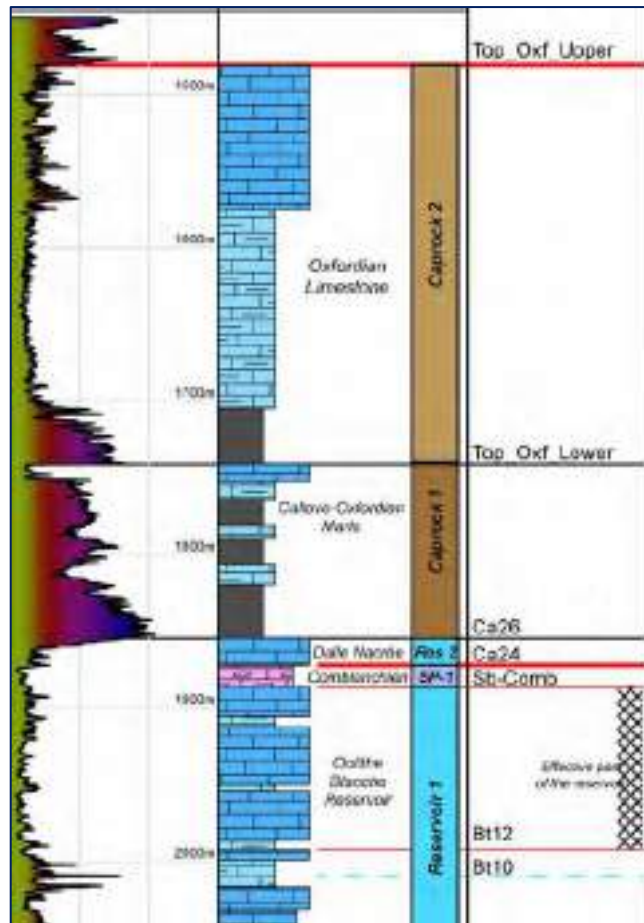


Figure 3-8 : Coupe stratigraphique du site de Grandpuits issue des données de diagraphie (BRGM)

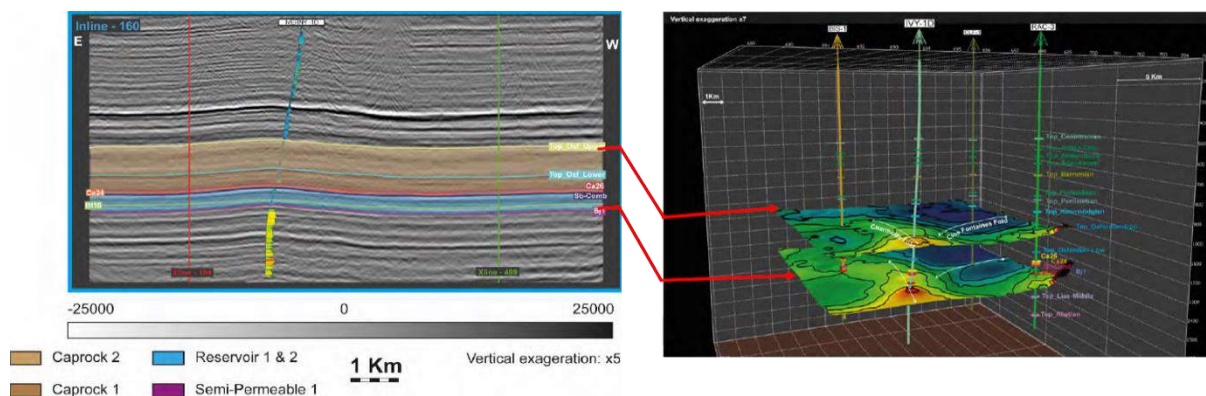


Figure 3-9 : Localisation du réservoir du Dogger issue des données sismiques (BRGM)

A partir de ces données sismiques 3D ainsi que de l'analyse par le BRGM des forages déjà réalisés et des diagraphies menées, un modèle numérique statique a été réalisé sur une superficie de 900 km²

autour de Grandpuits et qui s'étend jusqu'à 2,5 km de profondeur. Le modèle comprend 24 couches géologiques. Il permet de simuler la porosité du réservoir et de distinguer les zones les plus favorables à l'injection.

3.3.2.2 Hydrogéologie

3.3.2.2.1 Masses d'eau souterraines

On retrouve trois masses d'eau au niveau de la zone d'étude (Tableau 3-3)

Tableau 3-3 : Masses d'eau souterraines de la zone d'étude

Code	Nom de la masse d'eau
FRHG103	Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais
FRHG209	Craie du Senonais et Pays d'Othe
FRHG218	Albien-néocomien captif

Ces masses d'eau souterraines sont constituées de plusieurs nappes :

- Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais
 - La nappe de l'Oligocène

Il s'agit d'une nappe phréatique présent localement sur les plateaux au sein des sables de Fontainebleau et des calcaires de Brie. La hauteur mouillée de ce réservoir reste inférieure à 6 m. Cette nappe est très sensible aux précipitations et aux pollutions superficielles en l'absence de protection suffisante.

- La nappe de l'Eocène supérieur

Le réservoir comporte plusieurs aquifères séparées de niveaux marneux semi-perméables : le calcaire de Champigny et le calcaire de Saint-Ouen. Cet ensemble est recouvert par les marnes supra gypseuses et les marnes vertes, imperméables.

Il s'agit de la principale nappe exploitée pour l'alimentation en eau potable dans le secteur (captages de Nangis).

- La nappe de l'Eocène moyen et inférieur

Dans la zone d'étude, la nappe de l'Eocène moyen et inférieur constitue un aquifère semi-captif à captif, composé principalement des marnes, des Calcaires du Lutétien, ainsi que des Sables de l'Yprésien.

- Craie du Senonais et Pays d'Othe

La nappe de la craie est composée des formations crayeuses du crétacé supérieur. Cette formation n'est généralement productive que dans les zones fracturées et sous les vallées.

- Albien-néocomien captif

Les réservoirs de l'Albien et du Néocomien, d'âge crétacé inférieur, s'étendent sur deux tiers du bassin sédimentaire de Paris.

Ces nappes fortement captives sous les argiles du Gault vers le centre du bassin et sont donc particulièrement bien protégées des pollutions de surface au centre et sont par conséquent, de très bonne qualité.

La réserve en eau est importante, de l'ordre de 655 milliards de m³, mais son renouvellement est très faible, avec un temps de séjour moyen de plusieurs milliers d'années.

Cette ressource constitue donc une réserve stratégique d'eau potable à l'échelle de la région Ile-de-France et du bassin Seine-Normandie : elle est considérée comme une ressource ultime pour l'alimentation en eau potable en cas de crise majeure dans le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Seine-Normandie.

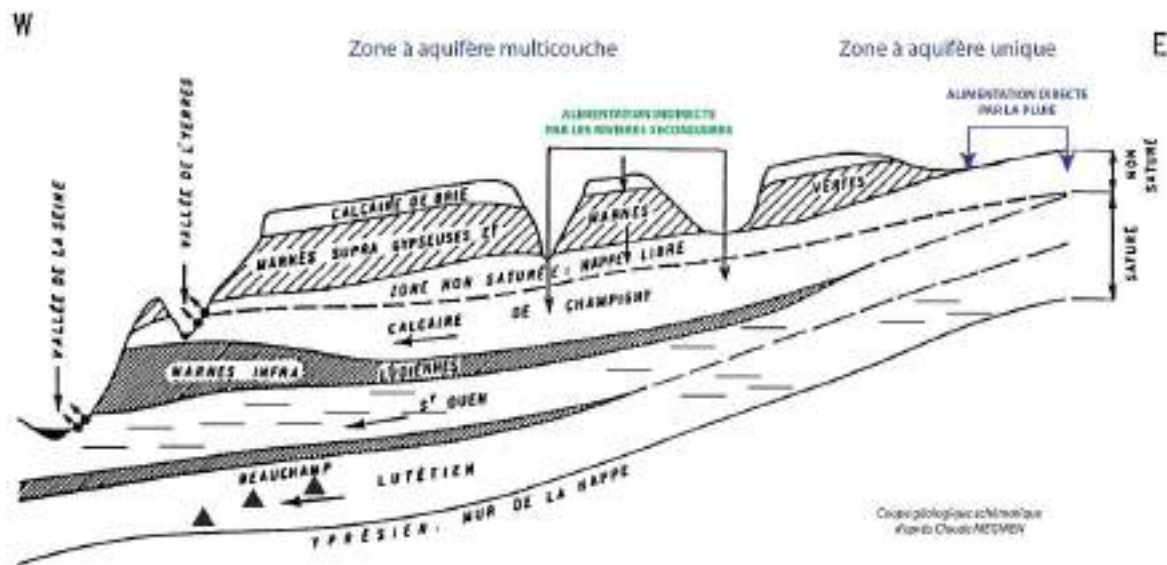


Figure 3-10 : Coupe hydrogéologique de la nappe de l'Eocène supérieur dans le Bassin parisien (DRIEAT)

3.3.2.3 Réservoir ciblé pour l'injection de CO₂

La nappe du « Dogger » correspond aux formations carbonatées du Jurassique moyen allant de la base du Bajocien au Callovien (-175 à -154 millions d'années) et situées entre 1 500 et 2 000 m de profondeur. Cette nappe est la principale source géothermique exploitée en région parisienne, avec une température de l'eau variant entre 47 à 85°C.

On y trouve trois réservoirs aquifères discontinus géographiquement :

- Le **réservoir principal** intègre les formations de la base du Callovien (dépôts bioclastiques et oolithiques) et du Bathonien (calcaires oolithiques et bioclastiques de la barrière) qui se dissocient en deux sous-ensembles de part et d'autre du sillon marneux : le réservoir principal Sud-Ouest et le réservoir Nord-Est au Nord de l'Yonne et de la Seine (dégradé localement par le faciès lagon) ;
- Le **réservoir secondaire** se développe dans des calcaires oolithiques et bioclastiques au toit du Bajocien ;
- Le **réservoir annexe** regroupe les formations calcaires oolithiques et bioclastiques à la base du Bajocien sur une épaisseur plus faible que précédemment (une dizaine de mètres).

Le réservoir principal du Bathonien comprend la formation de l'oolithe blanche. La densité des macropores ainsi que leur diamètre est très importante au sommet de la formation et diminuent vers

la base. La densité des vacuoles est très forte dans l'ensemble de la formation. On observe également une forte densité de grandes fractures. Il existe une bonne corrélation entre ces paramètres et l'existence du faciès oolithe blanche très productif.

3.3.2.4 Hydrologie

3.3.2.4.1 Généralités sur les cours d'eau

Le réseau hydrographique de la zone étudiée a une structure dendritique. Les communes de la zone d'étude sont parcourues par un réseau de rus et ruisseaux, affluents de l'Yerres et du Ru d'Ancœur. Ceux-ci se jettent à leur tour dans la Seine, respectivement au niveau de Villeneuve-Saint-Georges et de Melun.

Les principaux cours d'eau de la zone d'étude sont :

- L'Yerres située au nord-ouest de la zone d'étude ainsi que son affluent l'Yvron ;
- Le ru d'Avon situé au centre de la zone d'étude.
- Le ru d'Ancœur et l'Almont au sud de la zone d'étude.

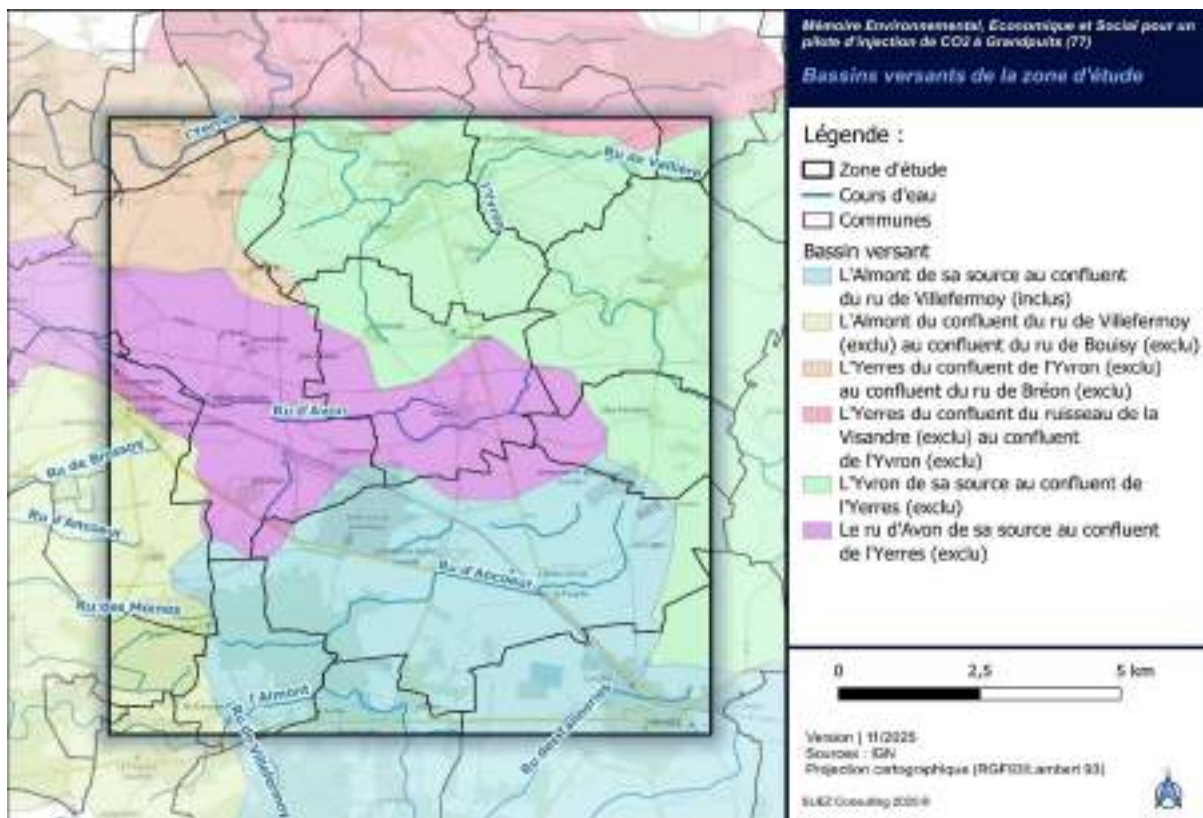


Figure 3-11 : Bassins versants de la zone d'étude

Deux stations hydrométriques sont situées à proximité de la zone d'étude :

- à Courtomer sur l'Yverre au nord-ouest du périmètre ;
- à Blandy sur l'Ancœur, située plus à l'ouest en dehors du périmètre.

Le module à la station de l'Ancœur à Blandy est de 0,53 m³/s et de 1,53 m³/s à la station de l'Yverre à Courtomer (Figure 3-12).

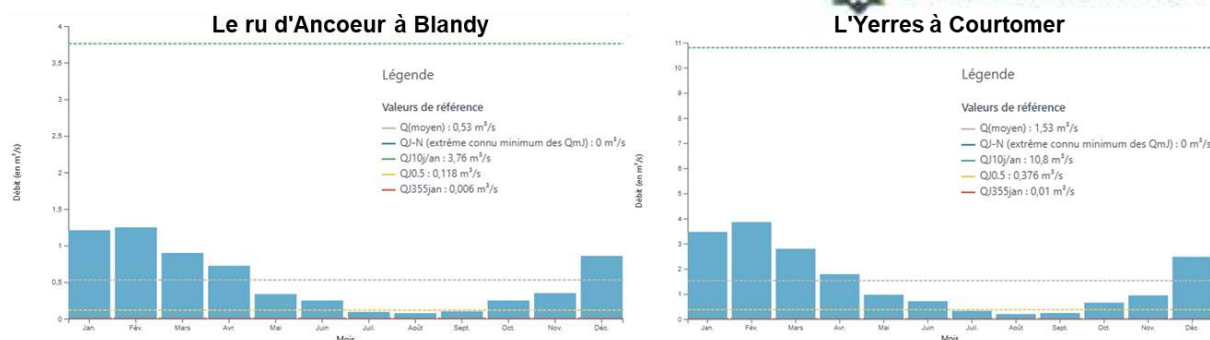


Figure 3-12 : Débits moyen mensuels des cours d'eau de l'Ancoeur à Blandy et de l'Yerres à Courtomer (Hydroportail, 2025)

3.3.2.4.2 Qualités des eaux superficielles

La qualité des masses d'eau superficielles principalement concernées par le projet est synthétisée ci-après en distinguant l'état écologique, l'état physico-chimique et l'état biologique de chacune des masses d'eau (Tableau 3-4, données 2022).

Tableau 3-4 : Etat biologique, écologique et physico - chimique des cours d'eau de la zone d'étude en 2022 (AESN, RNAOE 2022)

Code	Masse d'eau	Etat écologique	Etat physico chimique	Etat biologique	Etat polluants spécifiques	Etat chimique avec ubiquistes ESU	Etat chimique sans ubiquistes ESU
FRHR91	L'Almont-Ancoeur	Mauvais	Moyen	Mauvais	Moyen	Mauvais	Bon
FRHR100	L'Yerres de sa source au confluent de l'Yvron (inclus)	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Mauvais	Bon
FRHR101	L'Yerres du confluent de l'Yvron (exclu) au confluent du Ru du Cornillot (inclus)	Moyen	Médiocre	Bon	Moyen	Mauvais	Bon
FRHR101-F4800600	Ru d'avon	Mauvais	Médiocre	Mauvais	Moyen	Mauvais	Mauvais
FRHR100-F4730600	Ruisseau l'yvron	Médiocre	Médiocre	Médiocre	Moyen	Mauvais	Bon

FRHR91 -F44- 0400	Ru de courtenain	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Moyen	Mauvais	Bon
FRHR91 - F44550 00	Ru de la pree	Mauvais	Moyen	Mauvais	Moyen	Mauvais	Mauvais
FRHR10 0- F47370 00	Ru de vallieres	Médiocr e	Moyen	Médiocr e	Indétermi né	Indétermin é	Indétermin é
FRHR91 - F44490 00	Ru de villefermoy	Mauvais	Indétermi né	Mauvais	Indétermi né	Indétermin é	Indétermin é

Globalement, l'état écologique et physico-chimique des cours d'eau est mauvais à moyen, notamment l'Almont, le ru d'Ancœur et le ru d'Avon repartis sur la partie sud de la zone d'étude. Parmi les paramètres déclassants, on compte majoritairement le phosphore et les nitrates.

En ce qui concerne l'état biologique, celui-ci est également dégradé sur la majorité des cours d'eau, avec des indices biotiques révélant une forte altération des communautés aquatiques notamment dans l'Yvron, l'Almont et le ru d'Avon.

L'état chimique, quant à lui, varie : s'il est jugé « Bon » sans prise en compte des substances ubiquistes, il devient souvent « Mauvais » lorsque celles-ci sont intégrées à l'évaluation, en raison de la présence récurrente de polluants persistants comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les composés perfluorés (ex. sulfonate de perfluorooctane).

3.3.2.5 Zonages

- Classement en « zone sensibles »

La classification en zone sensible d'un périmètre hydrologique a pour objectif :

- De protéger les eaux de surfaces des phénomènes d'eutrophisation,
- De protéger la ressource en eau disponible pour la production d'eau potable prélevée directement en rivière,
- De protéger les eaux côtières destinées à la baignade ou à la production de coquillages.

La classification d'un périmètre comme zone sensible au regard des précédents critères entraîne l'application de normes de rejets au niveau des stations d'épuration en particulier sur les paramètres phosphorés ou azotés, voire bactériologiques.

L'identification des masses d'eau sensibles est réexaminée au moins tous les quatre ans par le préfet coordonnateur de bassin. S'il y a lieu de modifier cette identification, la révision se fait dans les conditions prévues à l'article R. 211-94 du code de l'environnement.

L'intégralité de la zone d'étude est classée zone sensible (bassin de la Seine).

Conséquences réglementaires du classement:

Ce classement induit pour les agglomérations de plus de 10 000 EH (équivalents habitants) une obligation de traitement de l'azote et du phosphore.

- Classement en « zone vulnérable »

La classification en zone vulnérable au regard de la Directive Européenne n° 91/676/CEE du 12 décembre 1991, dite directive Nitrates, a pour objectif de réduire la pollution provoquée ou induite par les nitrates d'origines agricoles. Elle vise donc la protection de la ressource en eau en vue de la production d'eau potable et la lutte contre l'eutrophisation des eaux douces et des eaux côtières. Son application se concrétise donc par la désignation de zones au sein desquelles des programmes d'actions fixent des prescriptions techniques. Chaque zone vulnérable correspond à un arrêté préfectoral (préfet coordonnateur de bassin). Les zones vulnérables sont réexaminées tous les 4 ans.

L'intégralité de la zone d'étude est classée zone vulnérable (bassin de la Seine).

- Zones de Répartition des Eaux (ZRE)

Une Zone de répartition des eaux (ZRE) est une zone comprenant des bassins, sous-bassins, systèmes aquifères ou fractions de ceux-ci caractérisés par une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins. Les ZRE sont définies par l'article R211-71 du Code de l'environnement et sont fixées par le préfet coordonnateur de bassin. L'arrêté pris par les Préfets des départements concernés traduit la ZRE en une liste de communes. Cet arrêté est le texte réglementaire fondateur de la ZRE. Dans une ZRE, les seuils d'autorisation et de déclaration des prélèvements dans les eaux superficielles comme dans les eaux souterraines sont abaissés. Ces dispositions sont destinées à permettre une meilleure maîtrise de la demande en eau, afin d'assurer au mieux la préservation des écosystèmes aquatiques et la conciliation des usages économiques de l'eau.

La zone d'étude est entièrement incluse au sein de deux ZRE :

- La ZRE de la nappe du « Champigny » ;
- La ZRE de la nappe de l'Albien.

3.3.2.6 Usages de l'eau

3.3.2.6.1 Usages des eaux souterraines

- Production d'eau potable

Les eaux souterraines constituent une ressource essentielle pour l'alimentation en eau potable dans la région de Grandpuits. Les nappes mobilisées sont les suivantes :

- La nappe du Lutétien, dont la perméabilité de fissures permet d'obtenir des débits relativement importants malgré l'hétérogénéité spatiale de la nappe. Cette nappe alimente plusieurs forages exploités pour des usages publics ou domestiques ;
- La nappe de Champigny, également utilisée pour la production d'eau potable, bien qu'elle soit plus vulnérable aux pollutions.
- Autres usages des eaux souterraines

Outre l'usage en eau potable (~80 %), l'eau souterraine est également mobilisée pour l'irrigation agricole (~16 %) et les besoins liés à l'industrie locale (~4 %).

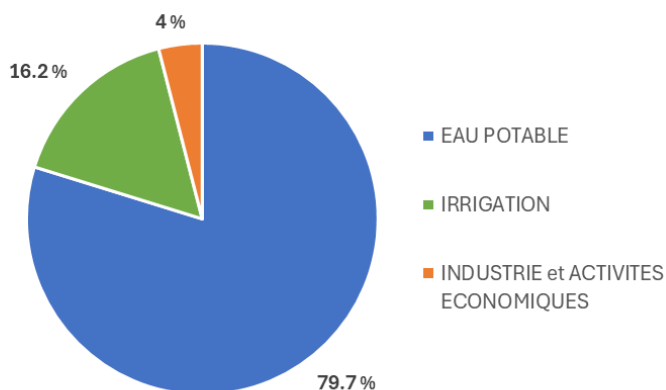


Figure 3-13 : Proportion des prélèvements en eau souterraine par usages en Seine-et-Marne en 2022 (BNPE, 2022)

Par ailleurs la nappe du Dogger est spécifiquement exploitée pour ses propriétés géothermiques. La formation des oolites blanches du Bathonien, très productive, est utilisée dans plusieurs installations pour le chauffage urbain ou industriel en région parisienne (Figure 3-33).

3.3.2.6.2 Usages des eaux de surface

Ces petits rus, souvent encaissés entre les parcelles cultivées, assurent principalement le drainage des terres agricoles. Leur tracé est rectiligne et résultat de l'aménagement humain. Les cours d'eau participent aussi à la recharge de la nappe de Champigny, au niveau des zones où la couverture marneuse est absente ou fissurée.

3.3.2.7 Périmètre de protection de captage d'eau potable

L'eau potable de la zone d'étude provient principalement de captages d'eau souterraine situés en Seine-et-Marne.

Seul le champ captant de Nangis, constitué des forages Nangis 3 (02592X0075/F3) et 4 (02592X0116/F4), est situé au sud-est de la zone d'étude. Il alimente les communes de Nangis, Rampillon, Meigneux, la Croix en Brie et Châteaubleau.

Les périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable destinée à la consommation humaine, et ceux des sources d'eau minérales naturelle, visent à assurer la protection de la qualité des eaux et de la santé humaine.

Les périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable destinée à la consommation humaine peuvent être instaurés par une déclaration d'utilité publique des travaux de prélèvement d'eau. On distingue 3 types de périmètres:

- le périmètre de protection immédiate, instauré autour du point de prélèvement pour les terrains à acquérir en pleine propriété;
- le périmètre de protection rapprochée, celui à l'intérieur duquel peuvent être interdits ou réglementés toutes sortes d'installations, travaux, activités, dépôts, ouvrages, aménagement ou occupation des sols de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux;
- le périmètre de protection éloignée, à l'intérieur duquel peuvent être réglementés le même type d'installations, travaux, activités...

La réglementation en termes de protection de captage sont régis par les articles L. 1321-2 à L. 1322-13, R. 1321-6 à R. 1321-14 et R. 1322-17 à R. 1322-22 du code de la santé publique.

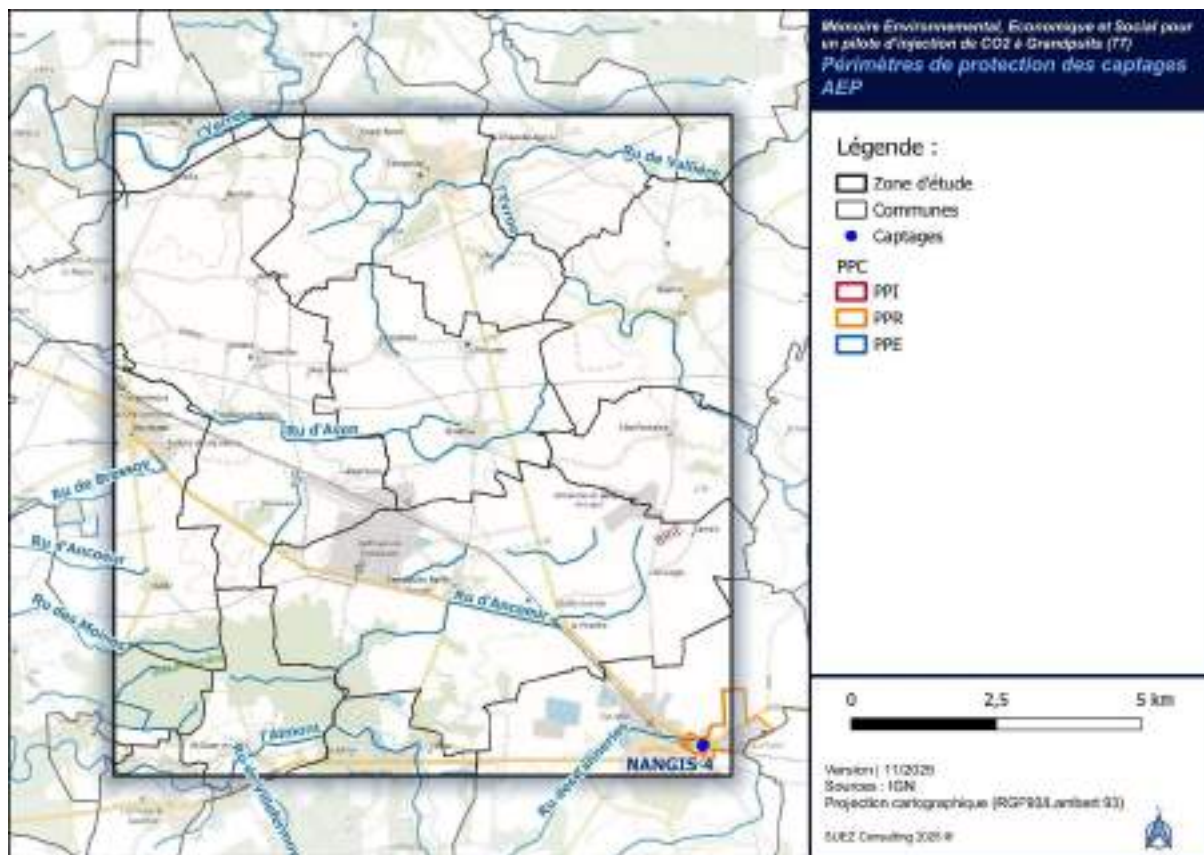


Figure 3-14 : Localisation des périmètres de protection des captages AEP situés dans la zone d'étude

Les périmètres de protection des sources d'eau minérale sont instaurés en cas de sources déclarées d'intérêt public. À l'intérieur de ces périmètres, peuvent être interdits ou réglementés toutes activités, dépôts ou installations de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux.

Ces périmètres font partie des servitudes d'utilité publique affectant l'utilisation des sols (SUP n° AS1). A ce titre, elles ont vocation à être annexées aux plans locaux d'urbanisme (PLU, PLUi) et aux cartes communales (si les territoires concernés sont couverts par ces documents d'urbanisme). Ils s'imposent par ce biais aux autorisations d'occupation du sol (permis de construire...).

Seuls les périmètres de protection immédiate et rapprochée du champ captant de Nangis sont situés au sein du périmètre de recherche (DUP par l'arrêté préfectoral 15 DCSE EC 02 du 23/06/2015), respectivement d'un diamètre d'environ 80 et 1 500 mètres.

Le périmètre de protection éloignée est situé sur la commune voisine de Rampillon.

Il y est notamment interdit tout nouveau forage au sein du périmètre de protection rapprochée, sauf s'il s'agit d'un ouvrage de remplacement d'un captage AEP.

3.3.2.8 Documents cadres du milieu aquatique (SDAGE, SAGE, Contrats de rivière et autre documents cadre)

3.3.2.8.1 SDAGE du Bassin Seine Normandie

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) est un document de planification qui décrit les priorités de la politique de l'eau pour le bassin hydrographique, pour une durée de 6 ans, en s'inscrivant dans une gestion durable de la ressource en eau. Ce document fixe les objectifs de qualité et quantité à atteindre pour chaque cours, eau souterraine et plan d'eau du territoire. La zone d'étude appartient au SDAGE du Bassin Seine Normandie.

Afin d'atteindre les objectifs environnementaux fixés par le SDAGE 2022-2027 adopté le 23 mars 2022, 5 orientations fondamentales ont été identifiées:

- Orientation Fondamentale 1: Pour un territoire vivant et résilient: des rivières fonctionnelles, des milieux humides préservés et une biodiversité en lien avec l'eau restaurée;
- Orientation Fondamentale 2: Réduire les pollutions diffuses en particulier sur les aires d'alimentation de captages d'eau potable;
- Orientation Fondamentale 3: Pour un territoire sain: réduire les pressions ponctuelles;
- Orientation Fondamentale 4: Pour un territoire préparé: assurer la résilience des territoires et une gestion équilibrée de la ressource en eau face au changement climatique;
- Orientation Fondamentale 5: Agir du bassin à la côte pour protéger et restaurer la mer et le littoral.

3.3.2.8.2 SAGE de l'Yerres

Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE) est un document élaboré en concertation entre les différents acteurs de l'eau d'un même bassin versant dans un objectif de juste équilibre entre la satisfaction des besoins des usagers et la préservation des milieux aquatiques.

La totalité de la zone d'étude est concernée par le SAGE de Yerres, excepté les communes Fontenailles, La Chapelle-Gauthier, Bréau et Bombon au sud de la zone d'étude. Ce SAGE a été approuvé initialement le 13 octobre 2011, révisé en 2018 puis consolidé en 2024.

Les enjeux décrits dans le SDAGE de l'Yerres sont les suivants:

- Améliorer la fonctionnalité écologique des cours d'eaux et des milieux associés
- Améliorer la qualité des eaux superficielles et souterraines
- Maîtriser le ruissellement et améliorer la gestion des inondations
- Améliorer la gestion quantitative de la ressource
- Restaurer le patrimoine et les usages liés au tourisme et aux loisirs

3.3.2.8.3 Plan départemental de l'eau (PDE)

Le Département de Seine-et-Marne et l'Etat, en lien avec l'agence de l'eau Seine-Normandie, se sont concertés pour construire un schéma départemental d'alimentation en eau potable. L'objectif est de proposer des solutions pérennes et mutualisées à l'ensemble des collectivités concernées et délivrer une eau satisfaisante en qualité et en quantité sur tout le territoire.

Le premier plan départemental de l'eau (2006-2012) est ainsi mis en place. Il rassemble le Département de Seine-et-Marne, la Région Ile-de-France, l'agence de l'eau, la chambre d'agriculture et l'union des maires de Seine-et-Marne. L'effort se poursuit à travers un 2^e plan (2012-2017), un 3^e (2017-2024), puis un 4^e (2025-2030).

Le 4^e plan départemental de l'eau (2025-2030), comprend 3 grands piliers :

1. Rendre la Seine-et-Marne résiliente aux phénomènes extrêmes
 - Réduire le risque inondation et ruissellement,
 - Limiter l'impact des sécheresses.
2. Aménager durablement la Seine-et-Marne
 - Intégrer la prise en compte des enjeux eau dans l'aménagement du territoire,
 - Préserver, protéger et restaurer les milieux aquatiques.
3. Garantir une qualité de l'eau pour satisfaire tous les usages
 - Lutter contre les pollutions diffuses,
 - Distribuer à tous les seine-et-marnais une eau conforme,
 - Lutter contre les pollutions ponctuelles.

3.3.2.8.4 Contrat de Territoire

La zone d'étude est concernée par le contrat de Territoire « Eau et Climat » signé par le Syndicat Mixte des 4 Vallées de la Brie (SM4VB), l'AESN et le Département de Seine-et-Marne le 27 septembre 2022.

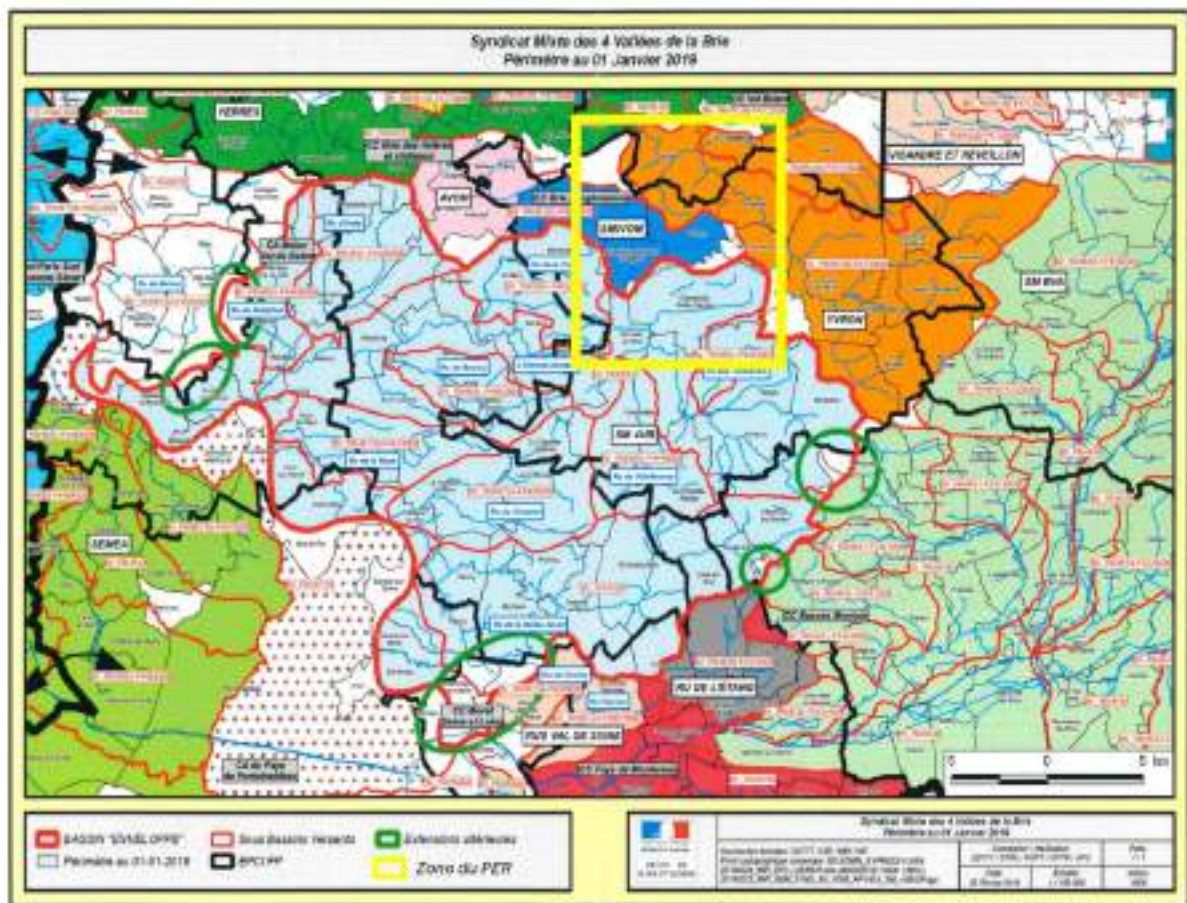


Figure 3-15 : Délimitation de la zone d'étude impactée par le contrat de Territoire "Eau et Climat" du SM4VB

Ce contrat, élaboré pour la période 2021 – 2025, comprend un programme d'action sur l'ensemble des bassins versants Almont-Ancœur ainsi que 3 autres affluents de la Seine. Ce contrat s'inscrit de 6 communautés de communes et agglomérations partiellement ou totalement concernées (CA Melun Val de Seine, CA Pays de Fontainebleau, CC Bassée-Montois, CC Brie des Rivières et Châteaux, CC Brie

Nangissienne et la CC du Pays de Montereau). Ainsi, il englobe la moitié sud de la zone d'étude. Le contrat porte sur les enjeux suivants :

- La protection et la restauration des milieux aquatiques et humides en lien avec la gestion des inondations (3,7 M€ de travaux) ;
- La prévention des inondations, notamment par le ruissellement (2,9 M€ de travaux) ;
- L'assainissement (19,9 M€ de travaux) ;
- La sensibilisation, l'animation et la valorisation des actions du contrat auprès des élus, du monde agricole et des riverains (0,7 M€ de travaux).

3.3.3 Milieu naturel

3.3.3.1 Zones réglementaires et d'inventaires

3.3.3.1.1 Zones de protection règlementaire

D'après la base de données de l'INPN (Inventaire national du patrimoine naturel) et l'atlas des patrimoines, le secteur d'étude est concerné par plusieurs sites règlementés :

- Natura 2000

Le réseau Natura 2000 est un ensemble de sites naturels définis à l'échelle de l'Union Européenne regroupant des écosystèmes terrestres et maritimes. Il a pour objectif d'assurer la survie et la pérennisation d'espèces et d'habitats à risques et qui présentent donc, selon le niveau, une menace particulière. L'objectif est alors de garantir la préservation du patrimoine naturel et de la diversité biologique tout en prenant en compte les exigences territoriales et régionales qu'elles soient économiques, sociales ou culturelles.

Ce réseau s'appuie sur la mise en application de deux Directives Européennes :

- La Directive « Oiseaux » 2009/147/CE du 30 novembre 2009 (recodification de la directive 79/409/CEE), qui vise la conservation des oiseaux sauvages et la protection des habitats nécessaires à la reproduction et à la survie d'espèces d'oiseaux considérées comme rares ou menacées à l'échelle de l'Europe. Cette directive s'applique aux oiseaux mais également à leurs œufs, leurs nids et leurs habitats. Elle prévoit pour cela la création de Zones de Protection Spéciale (ZPS).
- La Directive « Habitats Faune et Flore » 92/43/CEE, du 21 mai 1992, a pour objet la conservation d'habitats naturels de la faune et de la flore sauvages. Les espèces animales et végétales sauvages et les habitats susceptibles d'entrer dans le cadre de cette directive sont énumérés dans ses annexes. Elle prévoit pour cela la création de Zone Spéciale de Conservation (ZSC).

La zone d'étude **n'est pas concernée par la présence d'une aire Natura 2000** mais l'aire la plus proche borde la limite sud de la zone d'étude, décrite dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3-5 : Zones Natura 2000 recensées à proximité de la zone d'étude

Type	Code	Nom de la zone
ZPS	FR1112001	Massif de Villefermoy

- Zones humides d'importance internationale (site Ramsar)

Les zones humides d'importance internationale au titre de la Convention de Ramsar correspondent à des aires géographiques protégées déterminées par une convention ratifiée par les Etats. Ces zones ont un très fort intérêt pour la biodiversité en abritant notamment des espèces de poissons ou d'oiseaux d'eau vulnérables.

Aucune zone humide d'importance internationale (sites Ramsar) n'est située dans la zone de l'étude.

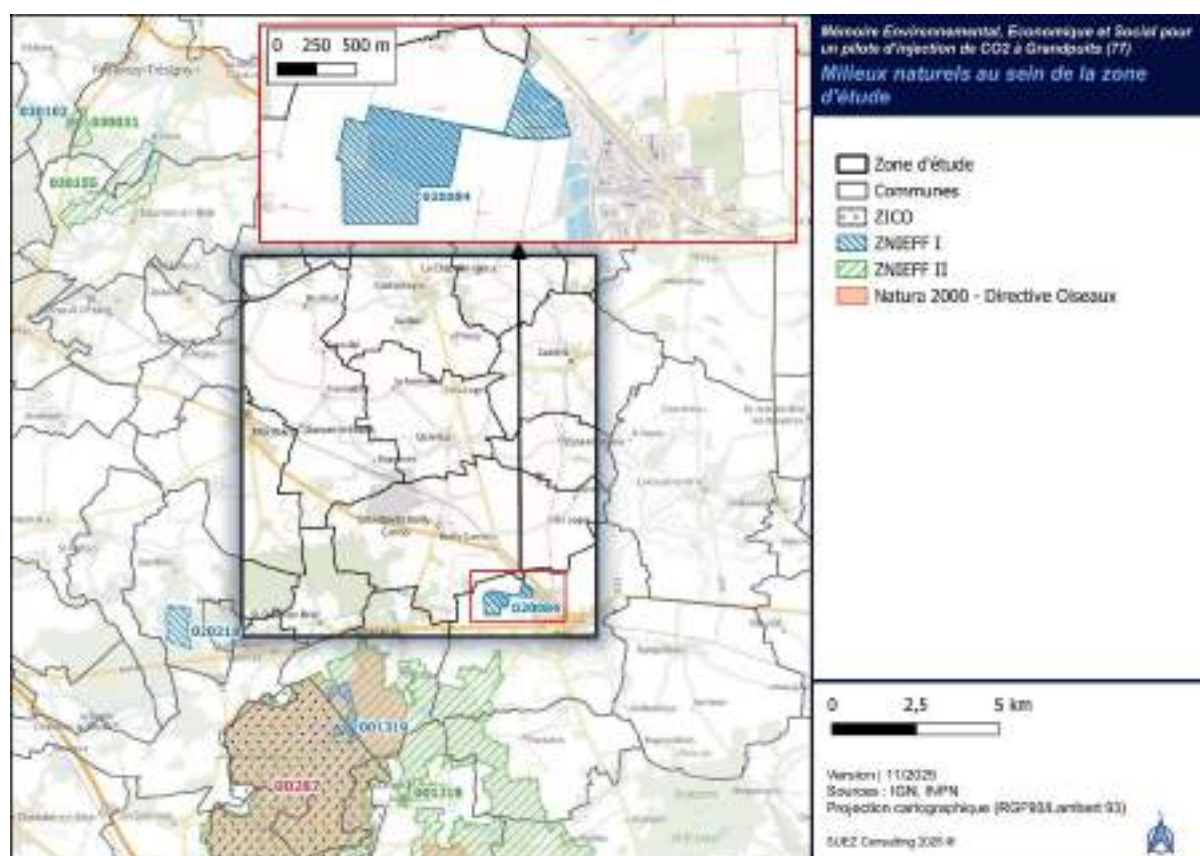


Figure 3-16 : Localisation des milieux naturels au sein de la zone d'étude et à proximité

- Parc Naturel National

Les Parcs Nationaux sont des territoires dans lesquels les milieux, la faune et la flore sont protégés des activités humaines. Ces espaces sont soumis à une réglementation spécifique (articles L331 et R331 du code de l'environnement) qui assure la sauvegarde de leur patrimoine naturel et culturel reconnus comme exceptionnels.

Aucun parc naturel national n'est situé dans la zone d'étude.

- Parc naturel régional

Les parcs naturels régionaux correspondent à des territoires ciblés comme disposant de patrimoines naturels et culturels riches mais potentiellement fragiles. Le développement de ce territoire est basé sur la mise en valeur et la protection de ce patrimoine. A la différence du Parc National, le parc régional ne dispose pas de pouvoir réglementaire.

Aucun parc naturel régional n'est situé dans la zone d'étude.

- Réserves naturelles nationales et régionales

Le statut de classement en réserve naturelle régionale est un statut réglementaire français défini par la loi de proximité du 27 février 2002. Il s'agit de zones non habitées du territoire d'une ou plusieurs communes dont la conservation de la faune, de la flore, du patrimoine géologique ou paléontologique ou en général, du milieu naturel présente une importance particulière de niveau régional.

Une réserve naturelle nationale est quant à elle un outil de protection à longs termes d'espaces, d'espèces et d'objets géologiques rares ou caractéristiques, ainsi que de milieux naturels fonctionnels et représentatifs de la diversité biologique en France.

Aucune réserve naturelle régionale et nationale n'est située dans la zone d'étude.

- Réserve de biosphère

Une réserve de biosphère constitue un territoire reconnu par l'UNESCO comme une zone de fort intérêt qui nécessite la conservation de sa biodiversité. L'objectif de ces zones est de définir, grâce à l'appui de la recherche, de la sensibilisation et de l'éducation les bases scientifiques, de l'utilisation rationnelle des ressources naturelles de la biosphère. Peuvent être labellisés "réserves de biosphères" tous les secteurs d'un intérêt international, bénéficiant d'une protection réglementaire pérenne. Une réserve de biosphère n'impose pas de réglementation particulière et s'appuie sur les législations existantes dans le pays où elle se situe.

Aucune réserve de biosphère n'est située dans la zone d'étude.

- Réserve nationale de chasse et de faune sauvage

Les Réserves de Chasse et de Faune Sauvage constituent des aires protégées qui visent à sécuriser certaines espèces afin de contribuer durablement au développement de la chasse en France. Elles ciblent de manière plus précise les espèces en diminution, les espèces étendues...

Les Réserves de Chasse et de Faune Sauvage ont quatre principaux objectifs:

- protéger les populations d'oiseaux migrateurs conformément aux engagements internationaux;
- assurer la protection des milieux naturels indispensables à la sauvegarde d'espèces menacées;
- favoriser la mise au point d'outils de gestion des espèces de faune sauvage et de leurs habitats;
- contribuer au développement durable de la chasse au sein des territoires ruraux.
- En France les réserves de chasse sont instituées par l'arrêté du 2 octobre 1951.

Aucune réserve nationale de chasse et de faune sauvage n'est située dans la zone d'étude.

- Conservatoire d'Espaces Naturels

Un Conservatoire d'Espace Naturel est un réseau privé de structures associatives de protection des milieux naturels ou semi-naturels en France. Leurs actions reposent sur la maîtrise foncière et/ou sur la maîtrise d'usages des périmètres établis.

Ces espaces peuvent être agréés (modalités précisées par décret) par l'Etat ou les régions d'après la loi Grenelle II de 2010.

Il n'y a pas de site géré par le Conservatoires d'Espaces Naturels dans la zone d'étude.

- Réserves biologiques et forestières intégrales ou dirigées:

Les réserves biologiques et forestières sont des aires protégées localisées en forêt qui ont pour objectifs la protection des habitats ou des espèces remarquables, rares ou vulnérables relevant du régime forestier et gérés à ce titre par l'ONF.

Aucune réserve biologique et forestières n'est située dans la zone d'étude.

- Arrêté Préfectoral de Protection Biotope (APPB) :

Les APPB correspondent à des arrêtés pris pour protéger un habitat naturel qui abrite des espèces animales ou végétales sauvages protégées. La protection s'étend aux milieux nécessaires à l'alimentation, à la reproduction, au repos ou à la survie des espèces. L'arrêté s'appuie sur des inventaires naturalistes.

Un biotope est une aire géographique bien délimitée, caractérisée par des conditions particulières (géologiques, hydrologiques, climatiques, sonores, etc.). Il peut arriver que le biotope soit constitué par un milieu artificiel (combles des églises, carrières), s'il est indispensable à la survie d'une espèce protégée. Cette réglementation vise donc des habitats d'espèces et non directement les espèces elles-mêmes.

Aucun arrêté de protection biotope n'est situé dans la zone d'étude.

- Forêt de protection

La forêt de protection désigne un statut défini dans le code forestier, aux articles L.411 et R.411 et suivants. Il s'agit de la protection foncière la plus stricte applicable aux forêts en France. Cette dénomination s'applique aux forêts classées pour se prémunir des catastrophes naturelles, afin de préserver la santé, la sécurité et la qualité de vie des habitants des zones urbanisées, ainsi que les ressources en eau et l'écosystème forestier en général.

Aucune forêt de protection n'est située dans la zone d'étude.

3.3.3.1.2 Zones d'inventaire

- Zones Naturelles d'intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF)

Les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique correspondent à des espaces naturels inventoriés grâce à leur potentielle richesse écologique et leur caractère particulièrement remarquable. Ces inventaires donnent une indication sur la richesse biologique d'un site. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une mesure de protection qui implique des contraintes légales, la nécessité de sa prise en compte lors de l'élaboration de tout projet est rappelée dans la circulaire 91-71 du 14 mai 1991 du Ministère de l'Environnement.

Une ZNIEFF est un territoire où les scientifiques ont identifié des éléments rares, remarquables, protégés ou menacés, du patrimoine naturel. Les ZNIEFF sont divisées en deux catégories:

- ZNIEFF I : de superficie assez réduite, ces zones sont des espaces homogènes d'un point de vue écologique et qui abritent au moins une espèce et/ou un habitat rare ou menacé, d'intérêt aussi bien local que régional, national ou communautaire ; ou ce sont des espaces d'un grand intérêt fonctionnel pour le fonctionnement écologique local.
- ZNIEFF II : se sont de grands ensembles naturels riches, ou peu modifiés, qui offrent des potentialités biologiques importantes. Elles peuvent inclure des zones de type I et possèdent un rôle fonctionnel ainsi qu'une cohérence écologique et paysagère.

La zone d'étude est concernée par une ZNIEFF de type I, intitulée « Bassin de la Haute-Voie à Nangis » (identifiant national : 110020084).

La zone représente une surface de 54,37 hectares et correspond aux bassins de décantation de la sucrerie de Nangis, qui servent de zone d'alimentation ou de refuge pour une partie des anatidés fréquentant l'étang de Villefermoy. Ces bassins sont colonisés par une végétation aquatique dense et diversifiée. Le lieu est particulièrement apprécié par de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau, rares en plaine de Brie.

On retrouve également trois ZNIEFF de type I et une ZNIEFF de type II à proximité de la zone d'étude.

- Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO)

Les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) sont des sites de grand intérêt qui abritent des effectifs d'oiseaux sauvages évalués comme ayant une forte importance Communautaire ou Européenne. Ces zones renvoient à un inventaire scientifique international (Birdlife International) et désignées dans le cadre de la Directive Oiseaux 79/409/CEE de 1979.

En matière de biodiversité, une ZICO abrite des milieux importants pour la vie de certains oiseaux (aires de reproduction, de mue, d'hivernage, zones de relais de migration). Ces zones ne confèrent aux sites concernés aucune protection réglementaire. En revanche, il est recommandé une attention particulière à ces zones lors de l'élaboration de projets d'aménagement ou de gestion.

Aucune zone importante pour la conservation des oiseaux (ZICO) n'est située dans la zone d'étude.

- Espaces Naturels Sensibles (ENS)

Les espaces naturels sensibles (ENS) sont des espaces « dont le caractère naturel est menacé et rendu vulnérable, actuellement ou potentiellement, soit en raison de la pression urbaine ou du développement des activités économiques ou de loisirs, soit en raison d'un intérêt particulier eu égard à la qualité du site ou aux caractéristiques des espèces végétales ou animales qui s'y trouvent ».

Il s'agit d'un outil de protection des espaces naturels par leur acquisition foncière ou par la signature de conventions avec les propriétaires privés ou publics mis en place dans le droit français. Ces espaces sont régis par le Code de l'urbanisme (Loi n° 95-101 du 2 février 1995), article L 142-1 « Afin de préserver la qualité des sites, des paysages et des milieux naturels et d'assurer la sauvegarde des habitats naturels selon les principes posés à l'article L 110, le Département est compétent pour élaborer et mettre en œuvre une politique de protection, de gestion et d'ouverture au public des espaces naturels sensibles, boisés ou non ».

Aucun espace naturel sensible n'est situé dans la zone d'étude.

3.3.3.2 Habitats naturels, la faune et la flore

Selon les publications de l'INPN à propos des listes d'espèces protégées, le Département de Seine-et-Marne dispose de plusieurs textes réglementaires fixant la liste des espèces protégées (faune et flore).

Ces textes sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 3-6 : Listes des textes réglementaires recensant les espèces protégées postérieurement à 1950

Protection départementale
Pas de protection spécifique sur le territoire départemental
Protection régionale
Arrêté interministériel du 11 mars 1991 relatif à la liste des espèces végétales protégées en région Île-de-France complétant la liste nationale
Arrêté interministériel du 22 juillet 1993 relatif à la liste des insectes protégés en région Île-de-France complétant la liste nationale
Protection nationale
Arrêté interministériel du 23 avril 2007 fixant la liste des mollusques protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection
Arrêté interministériel du 29 octobre 2009 fixant la liste des oiseaux protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection (JORF 5 décembre 2009, p. 21056)
Arrêté interministériel du 20 décembre 2004 relatif à la protection de l'espèce <i>Acipenser sturio</i> (esturgeon)
Arrêté interministériel du 20 janvier 1982 relatif à la liste des espèces végétales protégées sur l'ensemble du territoire, modifié par les arrêtés du 15 septembre 1982 (JORF du 14 décembre 1982, p. 11147), du 31 août 1995 (JORF du 17 octobre 1995, pp. 15099-15101), du 14 décembre 2006 (JORF du 24 février 2007, p. 62) et du 23 mai 2013 (JORF du 7 juin 2013, texte 24)
Arrêté interministériel du 29 octobre 2009 relatif à la protection et à la commercialisation de certaines espèces d'oiseaux sur le territoire national (JORF 24 novembre 2009, p. 20143)
Arrêté du 8 janvier 2021 fixant la liste des amphibiens et des reptiles représentés sur le territoire métropolitain protégés sur l'ensemble du territoire national et les modalités de leur protection [JORF n°0036 du 11 février 2021, Texte n° 3]
Arrêté interministériel du 8 décembre 1988 fixant la liste des espèces de poissons protégées sur l'ensemble du territoire national
Arrêté du 23 avril 2008 fixant la liste des espèces de poissons et de crustacés et la granulométrie caractéristique des frayères en application de l'article R. 432-1 du code de l'environnement (JORF n°0108 du 8 mai 2008)
Arrêté interministériel du 23 avril 2007 fixant la liste des insectes protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection
Arrêté interministériel du 23 avril 2007 fixant la liste des insectes protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection
Arrêté interministériel du 1er juillet 2011 fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection (modifié par l'arrêté du 6 septembre 2018 JORF n°0225 du 29 septembre 2018 texte n° 31, modifié par l'arrêté du 3 septembre 2020 JORF n°0240 du 2 octobre 2020 texte n°2)

Arrêté interministériel du 23 avril 2007 fixant la liste des mammifères terrestres protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection (modifié par l'article 2 de l'arrêté du 1er mars 2019, JORF n°0064 du 16 mars 2019 texte n° 7)

Arrêté interministériel du 21 juillet 1983, modifié par l'arrêté du 18 janvier 2000, relatif à la protection des écrevisses autochtones

3.3.3.3 Plans nationaux d'actions en faveur des espèces menacées

Les Plans nationaux d'actions (PNA) en faveur des espèces sont des documents d'actions qui ont pour objectifs de définir l'orientation pour la conservation et la restauration de populations d'espèces menacées. Il vise à assurer un bon état de conservation des espèces d'intérêt communautaire

Ces plans s'articulent en trois axes qui sont la connaissance, la conservation et la sensibilisation. Les documents permettent dès lors un suivi cohérent des populations des espèces concernées, à mettre en œuvre des actions coordonnées favorables à la restauration de ces espèces ou de leur habitat, et à informer les acteurs concernés et le public ainsi qu'à faciliter l'intégration de la protection des espèces dans les activités humaines et dans les politiques publiques.

La zone d'étude est concernée par les PNA suivants:

Tableau 3-7 : Plans Nationaux d'Action déclinés en Ile-de-France (DRIEAT)

Espèces	Durée	Enjeux et perspectives
Balbusard pêcheur	2020-2029	Assurer la conservation des populations nicheuses actuelles et futures, préserver leurs habitats et enrayer les causes directes de mortalité ou d'échec de la reproduction par le biais de mesures spécifiques.
Chauve-souris	2016-2025	Rétablir puis maintenir les populations des espèces les plus menacées de chauves-souris sur l'ensemble du territoire métropolitain. La mobilisation d'acteurs d'horizons divers (pouvoirs publics, catégories socio-professionnelles, entreprises, particuliers...) est requise, pour mener à bien ces actions et promouvoir une prise en compte de ces espèces à tout niveau.
Fluteau nageant	2012-2016	Regrouper tous les acteurs de la conservation, de la gestion du patrimoine naturel, de l'aménagement du territoire ainsi que les administrations compétentes autour de cinq objectifs (concerter, connaître, chercher, conserver, communiquer).
Messicoles	2012-2017 prolongé	Apporter des outils de connaissance, de gestion et de communication aux acteurs pour mettre en place un réseau de conservation et de restauration de la flore ségétale -Valoriser le rôle fonctionnel et les services rendus par les plantes messicoles - Mobiliser les acteurs pour que la conservation des plantes messicoles soit mieux prise en compte dans les politiques publiques, les projets de territoire et les formations.
Mulette épaisse et autres mollusques	2012-2017 + projet	Le maintien des populations actuelles de moule perlière et l'amélioration de l'état de conservation de celles-ci ; et le retour de l'espèce dans les cours d'eau d'où elle a disparu.

Odonates	2020-2030	Conservation ou le rétablissement dans un état de conservation favorable des espèces d'odonates menacées ou faisant l'objet d'un intérêt particulier.
Papillons diurnes patrimoniaux	2018-2028	Sauvegarder les papillons de jour à travers des mesures spécifiques visant à enrayer les causes directes de leur disparition en commençant par les problématiques touchant les espèces jugées comme les plus « patrimoniales ».
Sonneur à ventre jaune	2011-2017 en évaluation	Faire l'état de connaissance et proposer des actions à décliner ensuite au sein de la région.
Loutre	2019-2027	Favoriser la cohabitation de l'espèce avec l'aquaculture, notamment par la mise à disposition d'une assistance auprès des pisciculteurs. Ce plan doit aussi permettre d'améliorer encore la connaissance de l'espèce par un large public et de maintenir et développer les coopérations autour de sa conservation.
Pollinisateur sauvage	2016-2020	Mieux connaître les pollinisateurs sauvages et réalisant des inventaires de chaque espèce.
Butor étoilé	2025-2034	Mettre en place des mesures favorables à la conservation de la population française de Butor étoilé et, à terme, à son expansion.
Phragmite aquatique	2022-2031	Préservation des sites de migration en France avec le maintien voire l'augmentation des surfaces d'habitats d'alimentation. Pour ce faire plusieurs actions sont prévues : la mise en place d'outils de veille du réseau des sites de migration de l'espèce, la mise en œuvre d'une gestion favorable notamment sur les sites à plus forts enjeux, ainsi que les moyens de sa pérennisation.
Rôle des genêts	2024-2033	Améliorer les connaissances, mettre en œuvre des actions de conservation et de restauration de l'espèce et partager les décisions au sein du réseau.
Pies grièches	2025-2034	Rétablir des conditions favorables à l'accueil des pies grièches dans les milieux agricoles.

3.3.3.4 Schéma directeur de la Région Ile-de-France (SDRIF-E)

Le Schéma directeur de la Région Ile-de-France détermine l'aménagement du territoire d'ici à 2040. Il a été adopté par la Région le 11 septembre 2024 et approuvé par décret en Conseil d'Etat le 10 juin 2025.

L'objectif est de garantir un cadre de vie de qualité aux Franciliens à l'horizon 2040. Concrètement, le SDRIF-E a pour objectif:

- D'encadrer la croissance urbaine, l'utilisation de l'espace et la préservation des zones rurales et naturelles,
- De déterminer la localisation des grandes infrastructures de transports et des grands équipements,
- De favoriser le rayonnement international de la région.

Le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) est l'outil de mise en œuvre de la trame verte et bleue (TVB) régionale. Son objectif est double, à la fois dans l'aménagement du territoire et la protection de ressources naturelles (tels que la biodiversité, les habitats naturels...) tout en

garantissant les objectifs du bon état écologique des masses d'eau formulées par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Cette politique a pour ambition de concilier la préservation de la nature et le développement des activités humaines, en améliorant le fonctionnement écologique des territoires. De manière plus concrète, elle identifie les continuités écologiques à préserver ou remettre en bon état, qu'elles soient terrestres (trame verte) ou aquatiques et humides (trame bleue), pour :

- Favoriser le déplacement des espèces et réduire la fragmentation des habitats ;
- Préserver les services rendus par la biodiversité et préparer l'adaptation au changement climatique.

Le secteur d'étude comporte un réservoir de biodiversité au niveau du cours d'eau de l'Yerres (identifiant FR11RS288) au nord-ouest de la zone d'étude. Cette dernière est traversée par plusieurs corridors écologiques surfaciques présents au niveau des prairies humides englobant les cours d'eau. La zone d'étude comporte également un corridor linéaire à fonctionnalité réduite, traversant la zone d'étude du nord-ouest au sud.

La carte schématique de la trame verte et bleue est présentée sur la figure ci-dessous (Figure 3-17).

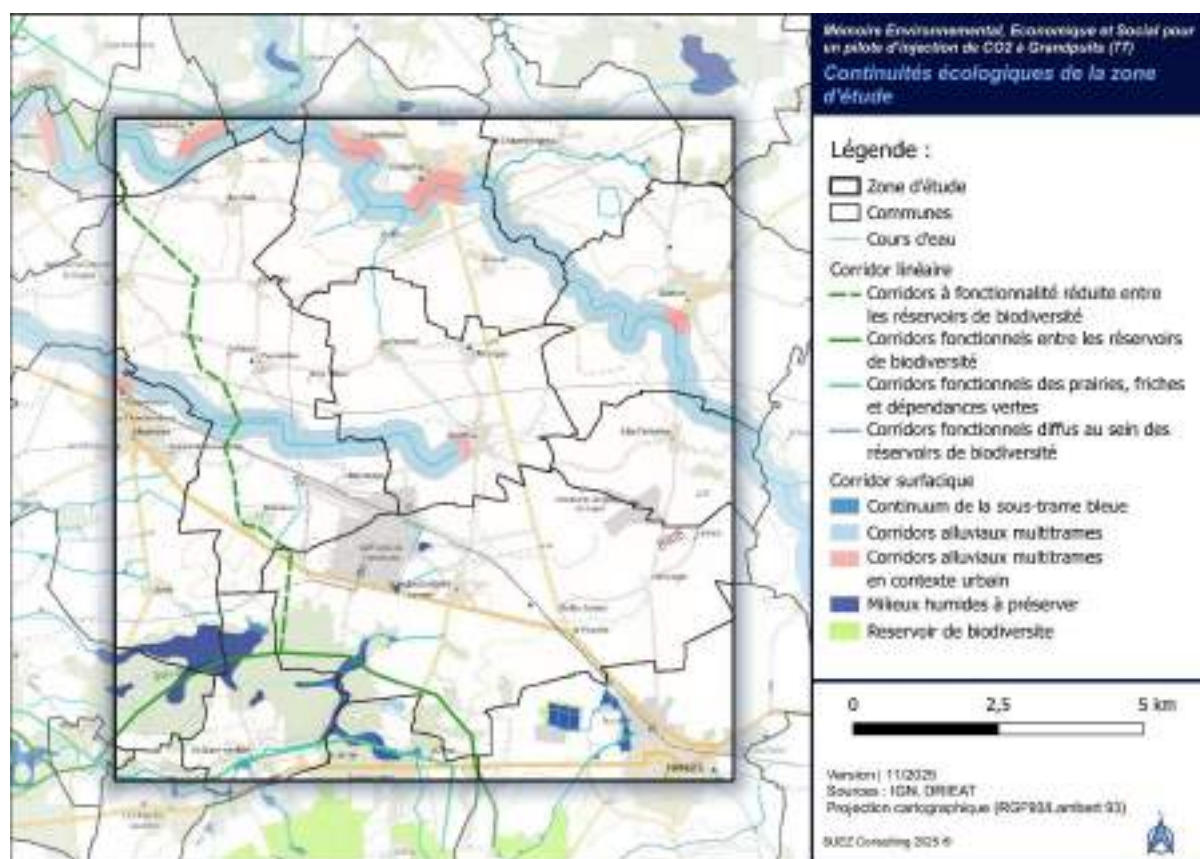


Figure 3-17 : Continuité écologique régionales (SRCE Trame verte et bleue INPN)

3.3.4 Patrimoine et paysage

3.3.4.1 Entités paysagères

Le secteur d'étude est composé de plusieurs types de paysages, identifiés dans l'Atlas des paysages de Seine-et-Marne :

- Le plateau briard cultivé : vaste étendue de terres limoneuses dédiées à une agriculture intensive, marquée par l'ouverture des paysages, de grandes parcelles et une faible couverture d'arbres ;
- Boisements épars : peu représentatifs à l'échelle du secteur d'étude, ces formations, souvent issues de plantations ou vestiges forestiers, restent localisées, à l'exception du Bois de Bombon, au sud-ouest de la zone d'étude ;
- Maillage bocager résiduel : quelques haies bordent les champs ou les chemins, formant un maillage paysager discontinu, témoin d'un bocage ancien disparu ;
- Vallons secs ou faiblement encaissés : bien que peu marqués, ces dépressions naturelles traversant le plateau introduisent une légère modulation du relief, et contribuent à structurer le paysage. Ils accueillent parfois une végétation plus dense ou des fossés, apportant une variation d'échelle et d'ambiance dans un environnement globalement ouvert.

3.3.4.2 Patrimoine culturel, architectural et historique (Monuments historiques, Sites classés et sites inscrits, Sites Patrimoniaux Remarquables, Archéologie)

3.3.4.2.1 Monuments historiques

Les monuments historiques (MH) inscrits ou classés sont répertoriés dans la base de données des monuments historiques inscrits et classés du ministère de la Culture (2021). Ils sont représentés sur la Figure 3-18.

Au sein de la zone d'étude, on dénombre 11 monuments historiques, dont 6 monuments classés et 5 monuments inscrits.

Tableau 3-8 : Liste des Monuments Historiques classés et inscrits sur la zone d'étude (Ministère Culture 2021)

N°	Ville	Monument	Protection
1	NANGIS	Église Saint Martin	Classé MH (1989/08/28)
2	GRANDPUITS	Ferme de la Salle	Inscrit MH
3	GRANDPUITS	Borne à fleur de lys N°28 & 29	Classé MH (1964/04/24)
4	GRANDPUITS	Borne à fleur de lys N°30	Classé MH (1964/04/24)
5	LADY	Église de Lady	Inscrit MH
6	AUBEPIERRE OZOUER	Borne à fleur de lys N°27	Classé MH (1964/04/24)
7	AUBEPIERRE OZOUER	Église Saint Aubin Ozouer le Repos	Inscrit MH
8	MORMANT	Borne à fleur de lys N°25 & 26	Classé MH (1964/04/24)
9	AUBEPIERRE	Église Saint Christophe d'Aubepierre	Inscrit MH
10	GASTIN	Moulin à vent (Moulin Choix)	Classé MH (1970/12/09)
11	COURPALAY	Silo à grains	Inscrit MH

La protection dite « au titre des abords » concerne les bâtiments situés à proximité d'un monument historique lorsqu'ils participent à la cohérence de son environnement, contribuent à sa préservation ou à sa mise en valeur. Ainsi, tout projet de travaux (construction, rénovation, aménagement) dans cette zone protégée doit faire l'objet d'une demande d'autorisation préalable auprès de l'Architecte

des Bâtiments de France (ABF). Cette réglementation, encadrée par la DRAC Île-de-France, s'applique dans un périmètre de 500 mètres autour des monuments concernés, illustré en Figure 3-18.

1.1.1.1.1 Sites classés et inscrits

Les sites classés ou inscrits sont des espaces naturels ou bâtis dont la qualité justifie leur préservation en France au titre de la loi du 2 mai 1930 (Article 12), aujourd'hui intégrée dans le Code de l'Environnement. Cette loi encadre les sites classés et inscrits selon 5 critères, le but étant de préserver des paysages remarquables pour leur intérêt : artistique, scientifique, historique, légendaire et pittoresque. Un site classé bénéficie d'une protection plus stricte qu'un site inscrit, impliquant notamment l'interdiction de modifications sans autorisation spéciale.

Ces protections sont décidées par l'État après enquête publique, et les projets d'aménagement doivent être compatibles avec la conservation du site. Le préfet joue un rôle dans la procédure d'inscription ou de classement, tandis que l'Architecte des Bâtiments de France donne son avis sur les travaux susceptibles d'impacter le site.

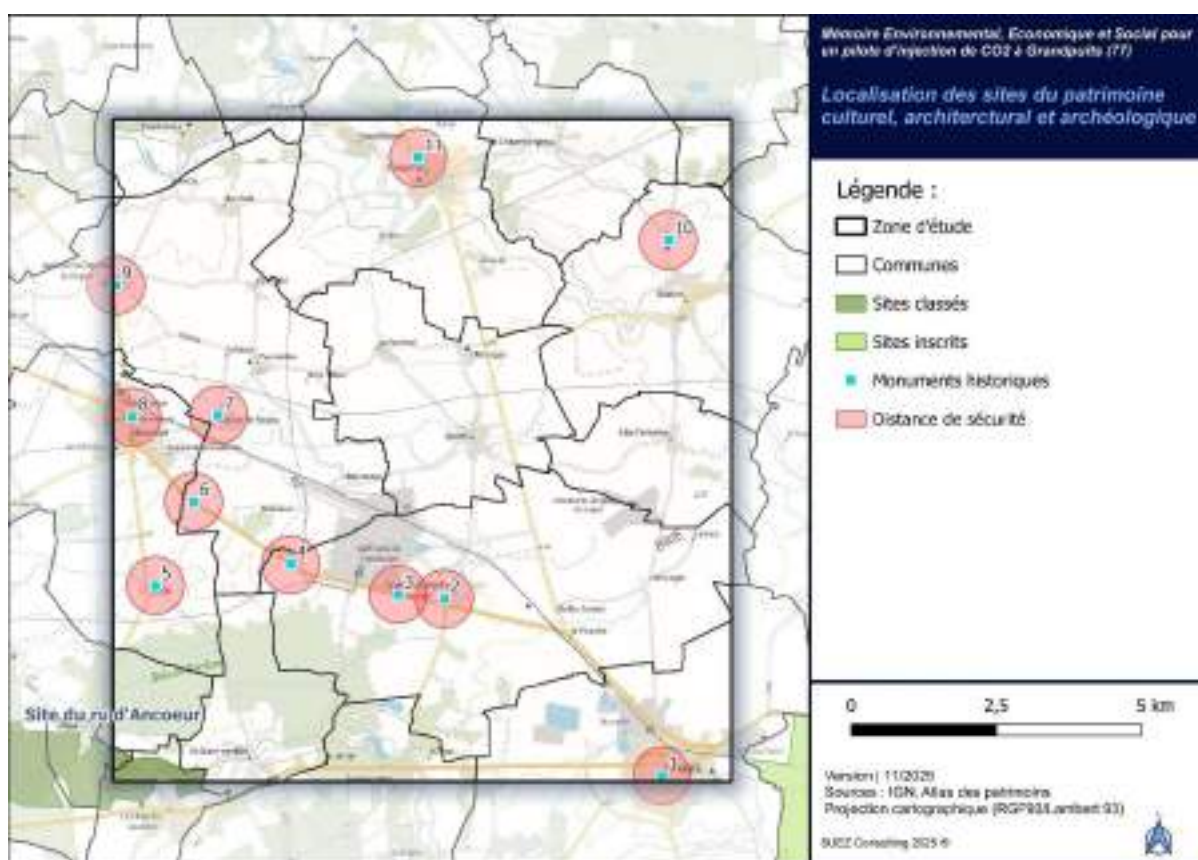


Figure 3-18 : Localisation des Monuments Historiques et des sites classés et inscrits de la zone d'étude (Atlas des patrimoines)

La zone d'étude compte uniquement le site classé du ru d'Ancœur, situé en bordure sud-ouest sur le territoire de la commune de la Chapelle-Gauthier.

Le site a été classé par les décrets du 14 octobre 1985 et du 20 août 1990.

L'occupation du sol est marquée par des paysages pittoresques et un héritage historique, que le classement a permis de protéger.

3.3.4.2.2 Sites Patrimoniaux Remarquables et sites archéologiques

Les Sites Patrimoniaux Remarquables (SPR) visent à protéger des villes, villages ou quartiers dont la conservation, la restauration, la réhabilitation ou la mise en valeur présente, d'un point de vue historique, architectural, archéologique, artistique ou paysager, un intérêt public.

Les sites patrimoniaux remarquables (SPR) se sont substitués aux anciens dispositifs de protection AVAP (Aires de MISE EN Valeur de l'Architecture et du Patrimoine), ZPPAUP (Zones de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager) et secteurs sauvegardés par la loi n°2016-925 du 7 juillet 2016 relative à la liberté de la création, à l'architecture et au patrimoine (LCAP).

Ce dispositif permet d'identifier et de retranscrire les enjeux patrimoniaux du territoire dans un plan de gestion.

Aucun site patrimonial remarquable ni aucune zone de présomption de prescription archéologique n'est comprise dans la zone d'étude.

3.3.5 Milieu humain

3.3.5.1 Occupation du sol

La cartographie de l'occupation du sol en 11 postes est issue du Mode d'Occupation du Sol (MOS) 2021 établie par l'Institut Paris Région.

L'occupation des sols au droit de la zone d'étude est majoritairement constituée d'espaces agricoles (73,5%) et d'espaces boisés (11%), suivi par des zones d'habitats individuels (3%), des espaces ouverts artificialisés (3%) et des zones d'activités (3%).

L'habitat est essentiellement individuel et dispersé, avec quelques ensembles de logements collectifs concentrés à Nangis.

Le territoire dispose également d'infrastructures spécifiques, comme l'aérodrome de Nangis Les Loges.

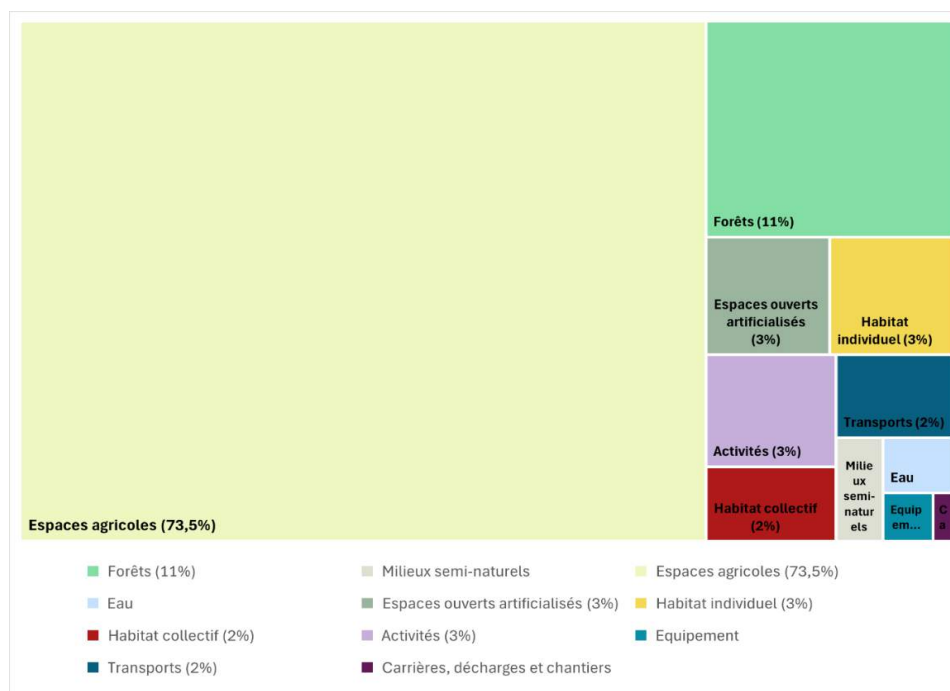


Figure 3-19 : Mode d'occupation du sol au sein de la zone d'étude (MOS 2021)

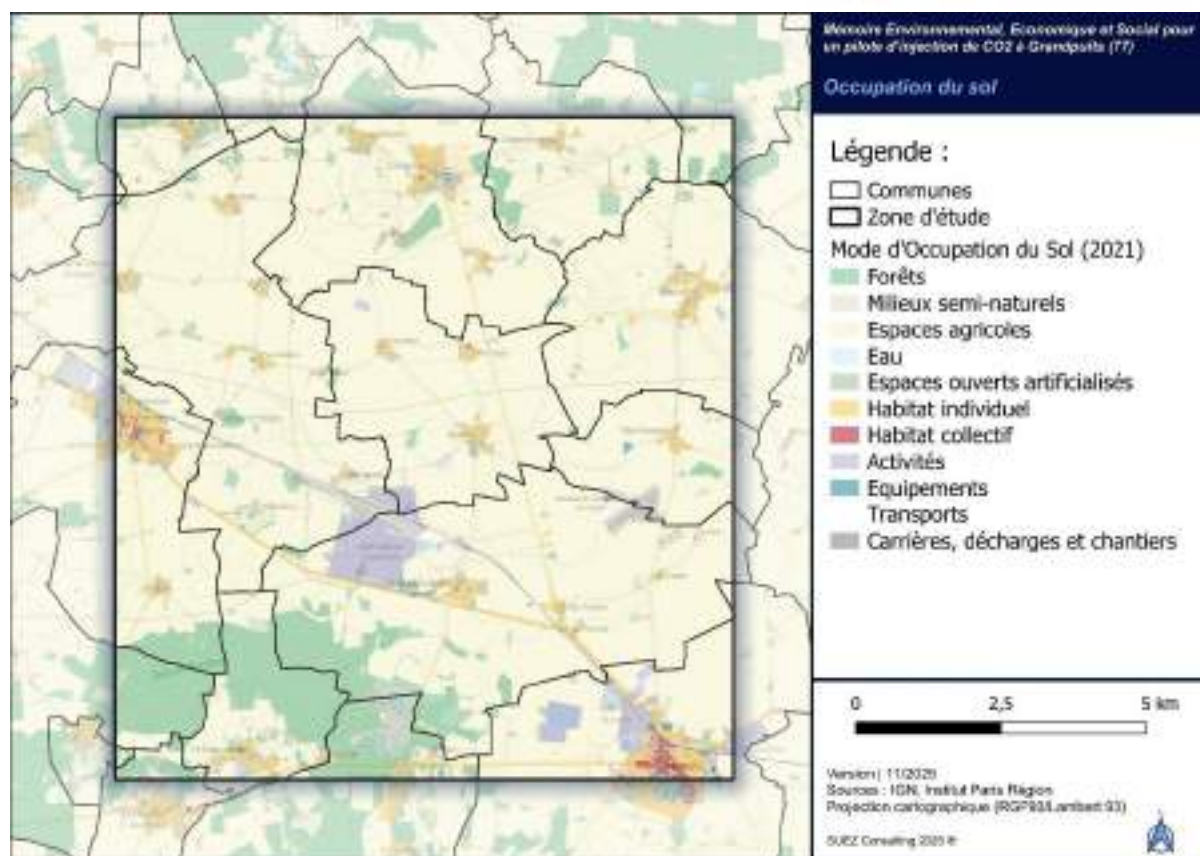


Figure 3-20 : Répartition de l'occupation du sol en 2021 au sein de la zone d'étude (MOS 2021)

3.3.5.2 Documents d'urbanismes

D'après la base de données géographique « Géoportail de l'urbanisme », les communes sont couvertes par les PLU suivants :

Tableau 3-9 : PLU des communes de la zone d'étude

Communes	PLU
Argentières	PLU communal du 21/06/2023
Aubepierre-Ozouer-le-Repos	Non mis en ligne
Beauvoir	Commune couverte par le Règlement National d'Urbanisme
Bernay-Vilbert	PLU communal du 24/02/2017
Bombon	PLU communal du 21/12/2020
Bréau	Commune couverte par le Règlement National d'Urbanisme
Clos-Fontaine	Commune couverte par le Règlement National d'Urbanisme
Courpalay	PLU communal du 12/07/2019
Courtomer	PLU communal du 15/02/2019

Fontenailles	PLU communal du 15/12/2017
Gastins	PLU communal du 24/06/2020
Grandpuits-Bailly-Carrois	PLU communal du 29/01/2025
La Chapelle-Gauthier	Non mis en ligne
La Chapelle-Iger	PLU communal du 02/10/2018
Mormant	PLU communal du 31/05/2023
Nangis	PLU communal du 05/03/2018
Pécy	PLU communal du 14/12/2017
Quiers	PLU communal du 26/11/2021
Saint-Ouen-en-Brie	Commune couverte par le Règlement National d'Urbanisme
Voinsles	PLU communal du 26/09/2019

Un extrait des plans de zonage figure ci-dessous (zones urbaines, zones à urbaniser, zones agricoles et zones naturelles).

La zone d'étude comprend des espaces boisés aux extrémités sud et nord. Le reste du territoire est recouvert de terres agricoles et de quelques zones urbanisées.

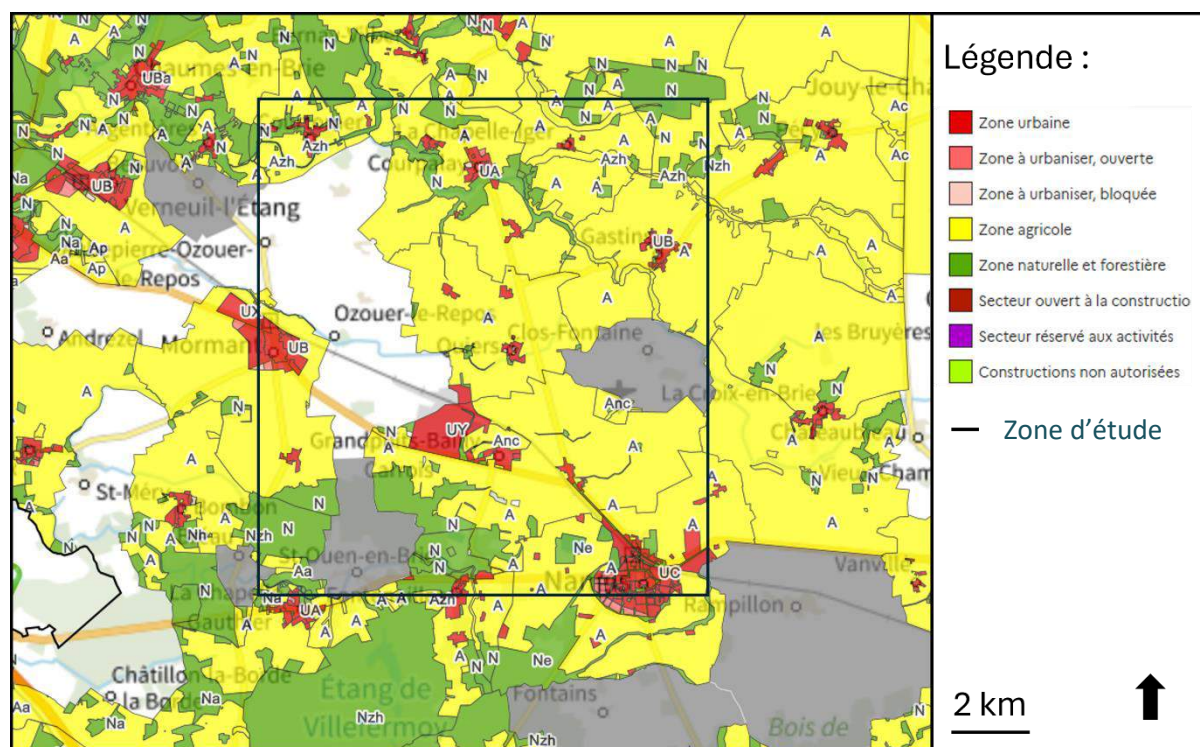


Figure 3-21 : Plans de zonage définis par les PLU des communes de la zone d'étude (Géoportail de l'Urbanisme)

3.3.5.3 Habitat et population

Le tableau ci-dessous présente la population totale des communes de la zone d'étude d'après les données de l'INSEE pour l'année 2022 (dernière année disponible) (

Tableau 3-10).

Tableau 3-10 : Population totale des communes de la zone d'étude

Commune	Population 2022	Densité de la population (nombre d'habitants au km ²) en 2022	Superficie en 2022, en km ²	Variation de la population : taux annuel moyen entre 2016 et 2022, en %
Argentières	352	137	2,57	-1,6
Aubepierre-Ozouer-le-Repos	965	36	26,83	0,9
Beauvoir	185	47	3,9	-1,8
Bernay-Vilbert	991	58,6	16,9	3,0
Bombon	936	62,4	15	-0,4
Bréau	371	274,8	1,4	2,6
Clos-Fontaine	235	39,4	6,0	-2,3
Courpalay	1 497	102,8	14,6	1,5
Courtomer	578	122,9	4,6	1,2
Fontenailles	1 090	39,7	27,4	0,3
Gastins	722	48,3	15,0	0,6
Grandpuits-Bailly-Carrois	1 014	41,4	24,5	-0,1
La Chapelle-Gauthier	1 398	80,5	17,4	-0,7
La Chappelle-Iger	191	21,9	8,7	2,7
Mormant	5 280	318,1	16,6	1,6
Nangis	8 883	367,7	24,2	0,4
Pécy	844	40,1	21,1	-0,4
Quiers	652	54,7	11,9	-0,4
Saint-Ouen-en-bris	833	146,4	5,7	-0,2
Voinsles	573	20,1	28,4	-0,9

Les communes qui présentent la population la plus importante sont les communes de Nangis (8 883 habitants) et de Mormant (5 280 habitants), situées en bordure de la zone d'étude. D'une manière générale, les communes de la zone d'étude sont vastes et présentent une densité de population faible.

3.3.5.4 Activités économiques (Industries, commerces et services, Activités agricoles, Tourisme et loisirs)

L'économie de la zone d'étude repose sur :

- L'agriculture avec de nombreuses exploitations de « grandes cultures », blé, oléagineux, betterave, orge et maïs.
- L'industrie avec la présence notamment de la zone industrielle de Grandpuits.

3.3.5.4.1 Industries, commerces et services

Le site Géorisques recense les sites classés ICPE en régime d'autorisation ou d'enregistrement. Parmi les 10 sites ICPE recensés sur le territoire, 8 possèdent un régime d'Autorisation, dont 1 classé Seveso Seuil Haut, et 2 possèdent un régime d'Enregistrement. Le tableau suivant énumère les différentes ICPE au sein de la zone d'étude :

Tableau 3-11 : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) de la zone d'étude

Nom	Régime en vigueur	Statut Seveso	Commune	Etat d'exploitation
LAT Nitrogen France SAS	Autorisation	Seuil Haut	Mormant	En exploitation
TotalEnergies Raffinage France	Autorisation	Seuil Haut	Grandpuits-Bailly-Carrois	En exploitation
ALICE (ex PRBG)	Autorisation	Non Seveso	Grandpuits-Bailly-Carrois	En exploitation
MESSER FRANCE	Autorisation	Non Seveso	Mormant	En exploitation
LESAFFRE Sucrierie	Autorisation	Non Seveso	Nangis	En exploitation
SOGEROS	Autorisation	Non Seveso	Mormant	En exploitation
SOUFFLET AGRICULTURE (Mormant silos)	Autorisation	Non Seveso	Mormant	En exploitation
VALFRANCE (ex-CAB à Nangis)	Autorisation	Non Seveso	Nangis	En exploitation
R&D BIO ENERGY	Enregistrement	Non Seveso	Quiers	En exploitation
SAS CORDOUX BIOGAZ	Enregistrement	Non Seveso	Courpalay	En exploitation

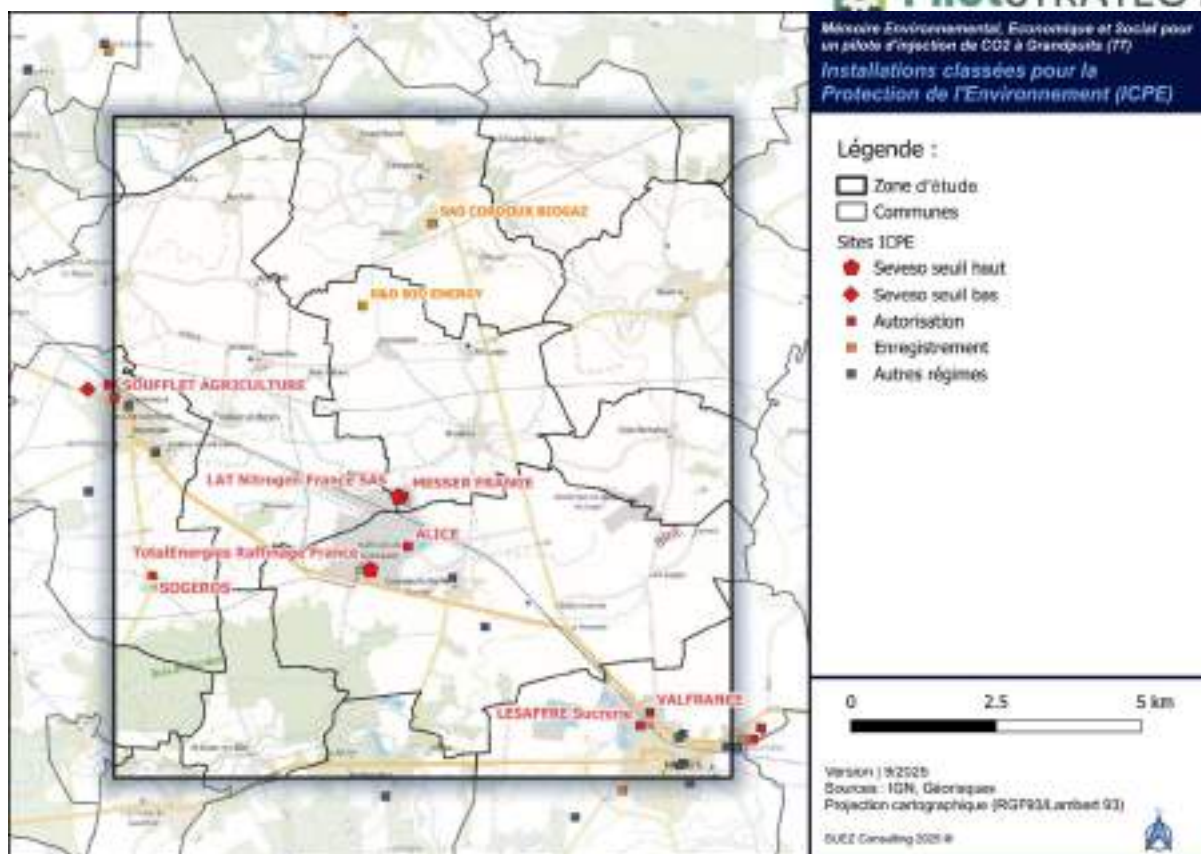


Figure 3-22 : Localisation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement de la zone d'étude (source Géorisques)

3.3.5.4.2 Activités agricoles

D'après le recensement agricole AGRESTE 2023 le département de Seine-et-Marne reste le plus agricole de la région, concentrant à lui seul une grande majorité des exploitations franciliennes.

Dans ce département, on comptabilise au total 2364 exploitations agricoles sur une superficie totale de 337 500 ha, équivalent à la superficie agricole utile en Seine-et-Marne, soit environ 60% de la superficie totale du département.

Au sein de la zone d'étude, les terres agricoles occupent une place significative et sont ponctuellement entrecoupées d'espaces urbanisés ou de boisement. L'agriculture locale est essentiellement céréalière, avec une prédominance de blé tendre, d'orge et de maïs.

L'élevage est très marginal sur ce territoire, mais quelques ateliers de volailles ou d'élevage bovin peuvent être rencontrés notamment à Grandpuits-Bailly-Carrois.

3.3.5.4.3 Tourisme et loisirs

La zone d'étude ne bénéficie pas d'une forte notoriété touristique, ce qui explique l'absence d'infrastructures dédiées telles que villages étapes, stations vertes, labels comme le Pavillon Bleu ou la Clef Verte.

Aucun musée ni parc zoologique n'est recensé sur le territoire concerné.

En revanche, l'offre en matière de pratiques sportives est plus développée. On recense deux complexes sportifs, l'un situé à Nangis (gymnase rue des Écoles) et l'autre à Mormant (gymnase Jacques Coutrot), ainsi qu'un stade à Nangis (Stade Greffulhe-Gramont, rue des Charmilles). Le

territoire comprend également deux centres équestres, implantés à Fontenailles et à Clos-Fontaine. Côté équipements aquatiques, trois piscines sont accessibles à Nangis via le centre aquatique intercommunal Aqualude, et deux autres piscines sont situées à Grandpuits-Bailly-Carrois et à Courpalay (Piscine des Sources de l'Yerres).

Enfin, quelques infrastructures d'hébergement de plein air sont recensées: deux campings à Grandpuits-Bailly-Carrois (Le Refuge et Les Prés Marteaux), ainsi que deux à Courpalay (Camping Hippo Camp et La Vallée des Tamaris).

3.3.5.5 Infrastructures de transport (Réseaux routier, ferroviaire, aérien, Réseaux de transport d'énergie

3.3.5.5.1 Réseau routier

Le territoire est essentiellement maillé par des voies départementales de différentes catégories (Figure 3-23) :

- Les liaisons principales qui desservent les pôles majeurs, tel que la D619 reliant Nangis à Mormant qui traverse la zone d'étude d'ouest en est et constitue l'axe majeur de desserte locale et régionale ; ainsi que la D408 traversant d'est en ouest la bordure sud de la zone d'étude.
- Les liaisons régionales qui assurent les liaisons interdépartementales d'intérêt régional. Il s'agit de la D201 qui traverse l'aire d'étude du nord au sud, reliant le secteur de Courtonne à celui de Nangis, ainsi que la D227 et la D67.
- Les liaisons locales qui desservent les pôles secondaires et assurent le maillage fin du territoire. On retrouve notamment les routes D215, D67, D67B, D56, et d'autres voies locales qui relient les communes aux axes structurants.

Aucune autoroute, ni route nationale ne traverse la zone d'étude.

3.3.5.5.2 Réseau ferroviaire

La zone d'étude est traversée par un axe ferroviaire reliant Paris à Mulhouse. Cette ligne, mise en service le 22 mai 2006 et toujours exploitée, dessert directement la bioraffinerie TotalEnergies ainsi que l'usine LAT Nitrogen grâce à des embranchements particuliers. Ceux-ci permettent l'expédition de produits liquides depuis les sites industriels. À proximité immédiate de la bioraffinerie, la voie ferrée est équipée d'un poste de chargement ainsi que d'un quai dédié, facilitant ainsi les opérations logistiques et le transport ferroviaire des marchandises.

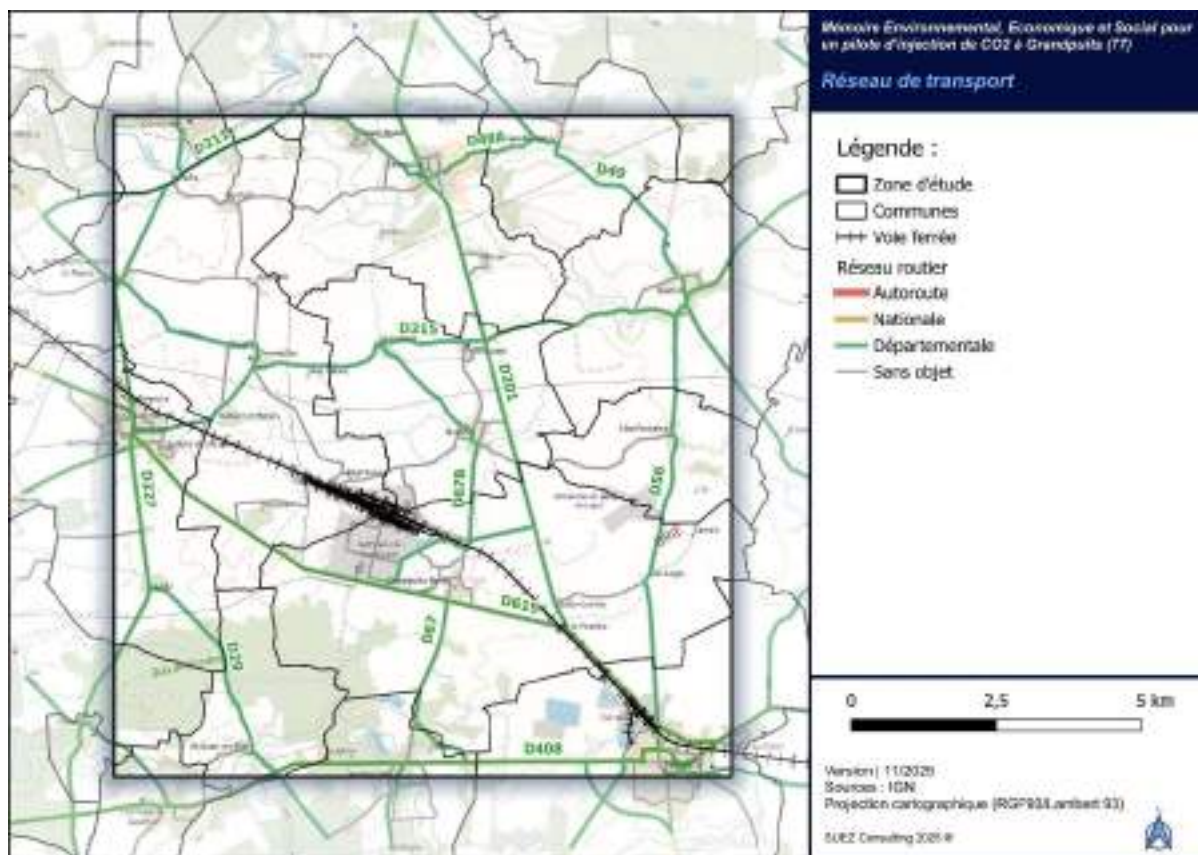


Figure 3-23 : Réseau de transport routier et ferroviaire au sein de la zone d'étude

3.3.5.5.3 Réseau aérien

Il n'y a pas d'aéroport dans la zone d'étude. Un aérodrome (Nangis-lès-Loges) est situé sur la commune de Grandpuits-Clos Fontaine.

3.3.5.5.4 Réseau de transport d'énergie et d'hydrocarbures

La zone d'étude est également traversée par des infrastructures de transport de matières dangereuses, distinctes des axes routiers et ferroviaires.

Il s'agit de canalisations enterrées (oléoducs pour les hydrocarbures et gazoducs pour le gaz naturel), qui assurent l'acheminement continu de produits énergétiques sur de longues distances.

Ces conduites relient notamment la bioraffinerie et ses installations logistiques aux grands réseaux nationaux et régionaux. Leur objectif est de garantir un transport sécurisé et régulier, indépendamment des conditions de circulation routière ou ferroviaire. Ce mode de transport permet également de limiter les flux de camions ou de wagons-citernes.

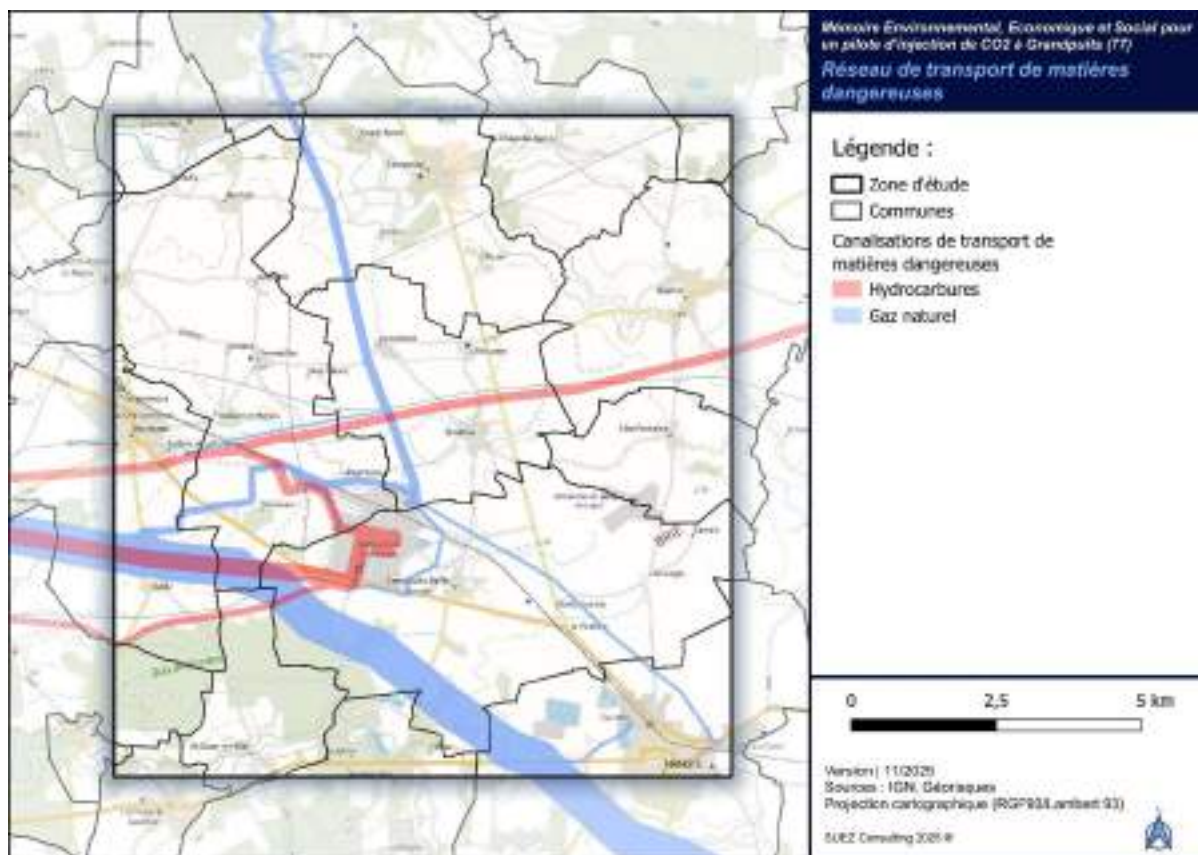


Figure 3-24 : Canalisations de transport de matières dangereuses au sein de la zone d'étude

3.3.5.5.5 Infrastructures militaires

Il n'y a pas de site militaire au sein de la zone d'étude.

3.3.5.5.6 Qualité de l'air

Les données de pollution atmosphériques d'Ile-de-France sont disponibles sur le site Airparif. Créé en 1979, Airparif est agréée par le ministère de l'Environnement pour la surveillance de la qualité de l'air sur l'ensemble de l'Ile-de-France.

En 2021, l'OMS a publié de nouvelles lignes directrices sur la qualité de l'air. Les recommandations pour les principaux polluants atmosphériques qui en découlent présentent des seuils qui évoluent à la baisse comme le montre le tableau suivant.

Tableau 3-12: Evolution des lignes directrices de l'OMS sur les principaux polluants atmosphériques

Polluant	Unité	Durée retenue pour le calcul des moyenne	Lignes directrices 2005	Lignes directrices 2021
PM _{2.5}	µg/m ³	année	10	5
		1 jour*	25	15
PM ₁₀	µg/m ³	année	20	15
		1 jour*	50	45
O ₃	µg/m ³	pic saisonnier	-	60
		8 heures	100	100*
NO ₂	µg/m ³	année	40	10
		1 jour*	-	25
		1 heure	200	200
SO ₂	µg/m ³	1 jour*	20	40
Pb	µg/m ³	année	0,5	0,5
CO	mg/m ³	1 jour*	-	4
		8 heures	10	10
		1 heure	35	35

* 3 jours de dépassement autorisés par an

La zone d'étude ne dispose pas de stations de mesures, la plus proche se situe à Melun à environ 20 km à l'est.

Conformément à l'arrêté du 19 avril 2017, Airparif réalise des cartographies annuelles pour l'ozone, le dioxyde d'azote, les PM_{2,5} et les PM₁₀.

Ozone

Polluant secondaire parce qu'il n'est pas émis dans l'air directement : il est le fruit de transformations chimiques de polluants (notamment NO_x et COV) dans l'atmosphère sous l'effet des rayonnements ultra-violet.

Les concentrations en ozone fluctuent selon les années. Le nombre de jours de dépassement du seuil de pollution (pendant 8 heures) varie entre 2 et 21 jours (2018).

Particules

Le chauffage résidentiel, les activités industrielles variées, le transport routier et l'agriculture sont les principaux émetteurs de particules.

Les particules évaluées (Particulate Matter) pour la qualité de l'air sont de deux types :

- Les PM₁₀, particules de diamètre inférieur à 10 µm
- Les PM_{2,5} dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm

Dans la zone d'étude, les concentrations moyennes annuelles de particules ont baissées de manière significative entre 2007 et 2024 : -48 % pour les PM₁₀, passant de 24 µg/m³ à 15 µg/m³ ; et -53% pour les PM_{2,5} passant de 17 µg/m³ à 8 µg/m³.

Dioxyde d'azote

Le dioxyde d'azote est un gaz à effet de serre. Il est produit par les activités humaines, notamment la combustion des combustibles fossiles.

Les concentrations en dioxyde d'azote ont diminuées de -79% de 2007 à 2024 sur la zone de l'étude. Ces observations sont logiques avec les tendances à l'échelle du département.

Globalement au sein de la zone d'étude le territoire subit une pollution atmosphérique moyenne à faible. Certains épisodes de forte pollution restent observés, du fait de son positionnement en région parisienne. Cependant, la zone d'étude s'inscrit dans une dynamique globalement favorable. Ces tendances s'expliquent par l'amélioration des performances des véhicules, la réduction du recours au fioul domestique pour le chauffage résidentiel, et la mise en œuvre de réglementations environnementales plus strictes en Île-de-France. La zone d'étude, située en grande périphérie parisienne, ne présente pas une forte densité industrielle.

3.3.5.6 Environnement sonore (Classement sonore des voies de transports terrestres, Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE), Cartes de bruit)

3.3.5.6.1 Classement sonore des voies de transports terrestres

D'après l'arrêté du 30 mai 1996, modifié par l'arrêté du ministère de l'Environnement du 23 juillet 2013 relatif aux modalités de classement des infrastructures de transports terrestres et à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit, les infrastructures de transports terrestres sont classées en 5 catégories selon le niveau de pollution sonore qu'elles génèrent, la catégorie 1 étant la plus bruyante.

Le classement des infrastructures routières et des lignes ferroviaires à grande vitesse ainsi que la largeur maximale des secteurs affectés par le bruit de part et d'autre de l'infrastructure sont définis en fonction des niveaux sonores de référence.

Tableau 3-13: Catégorie de classement sonore des infrastructures de transport terrestre

Catégorie de classement de l'infrastructure	Niveaux sonores de référence LAeq (6h22h) en dB(A)	Niveaux sonores de référence LAeq (22h-6h) en dB(A)	Largeur affectée par le bruit de part et d'autre de l'infrastructure
1	L>83	L>78	D=300m
2	79<L<83	74<L<78	D=250m
3	73<L<79	68<L<74	D=100m
4	68<L<73	63<L<68	D=30m
5	63<L<68	58<L<63	D=10m

Un seul axe routier dispose d'une classification dans la zone d'étude :

- La route D408, classifiée en infrastructure routière non concédée Lden A en catégorie 5 à 1,2 km à l'ouest de Nangis.

3.3.5.6.2 Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE)

La Directive Européenne 2002/49/CE du 25 juin 2002, transposée en droit français par les articles L.572-1 à 572-11 et R572-1 à R-572-11 du Code de l'Environnement, par le décret n°2006-361 du 24 mars 2006 et par les arrêtés du 3 avril 2006 et du 4 avril 2006, définit pour les grandes agglomérations

et les grandes infrastructures routières, ferroviaires et aéroportuaires, les modalités de réalisation des cartes de bruit stratégiques et les plans de prévention du bruit dans l'environnement.

Les Préfectures de départements sont chargées d'établir des cartes de bruit, définies selon les seuils fixés par directive européenne, et de veiller à l'édition des PPBE par les différents gestionnaires d'infrastructures. Ces cartes représentent, par codes couleur, l'exposition moyenne au bruit ambiant.

Dans ce cadre, le département de Seine-et-Marne a reconduit son PPBE pour la 4^{ème} échéance et pour la période de 2024 à 2029.

3.3.5.6.3 Cartes de bruit

Les cartes de bruit permettent de représenter des niveaux de bruit dans l'environnement et de géolocaliser les nuisances sonores. Les cartes de bruit sont élaborées par l'État pour l'ensemble des grandes infrastructures routières, autoroutières et ferroviaires.

Seul la route D408 à l'ouest de Nangis est mesurée au niveau de la zone d'étude. Le niveau sonore est supérieur à 55 db (jusqu'à 75 db) sur une largeur d'environ 350 m autour de la route (Figure 3-25)

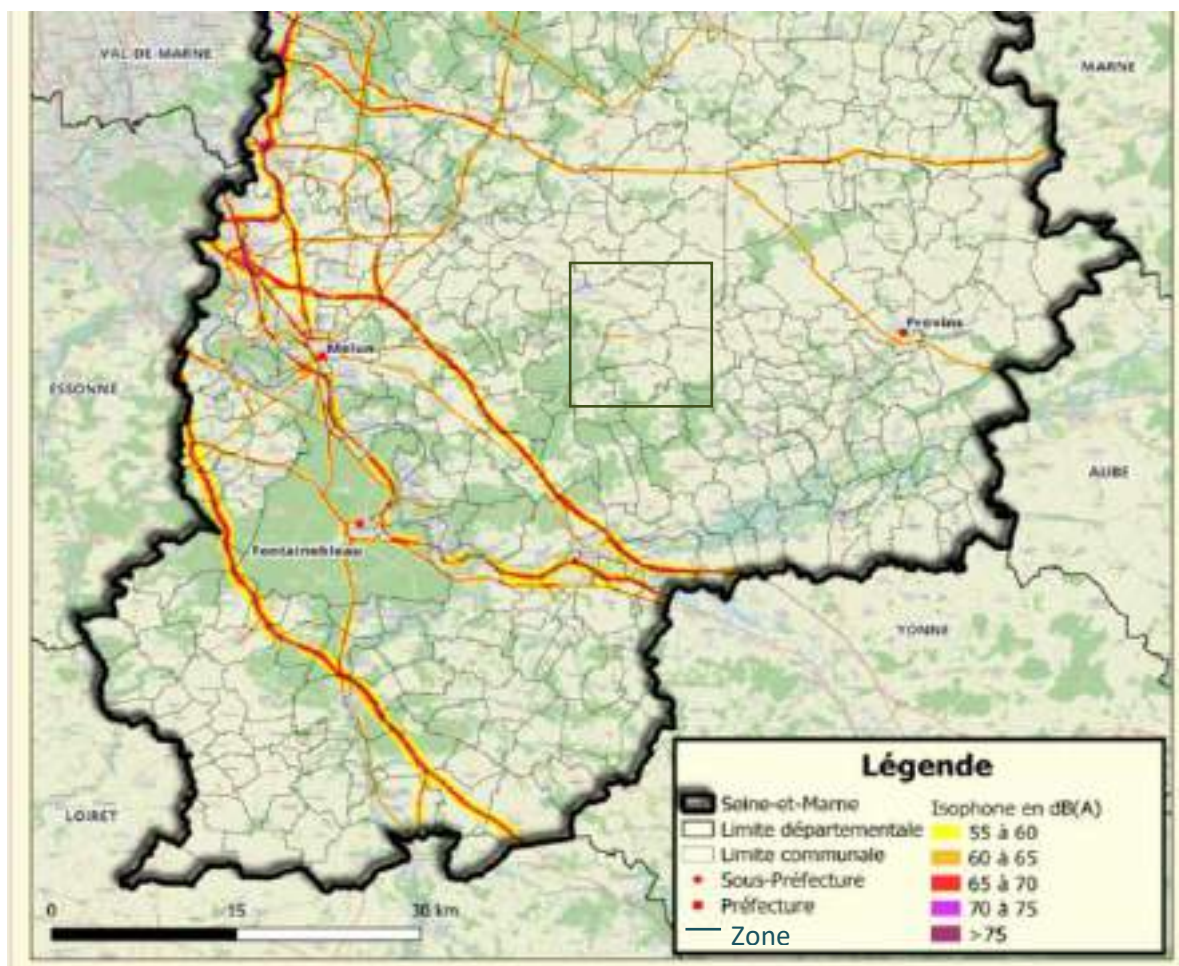


Figure 3-25 : Carte de bruit de 4^{ème} échéance pour les grandes infrastructures de transport routières et ferroviaires en Seine-et-Marne

3.3.5.7 Déchets

La gestion des déchets est assurée localement par les Communautés de Communes qui en détiennent les compétences. L'ensemble de la gestion des déchets s'articule autour de cinq points clés :

- Des collectes en porte-à-porte ;
- Des collectes en apports volontaires ;
- Un traitement des ordures ménagères résiduelles collectées en porte-à-porte ;
- La collecte des déchets industriels banals ;
- La gestion de la déchetterie intercommunale.

Les communautés de communes ont transféré la gestion des déchets à des syndicats sur la zone du PER :

- la CC Brie des Rivières et Chateau a transféré la gestion des déchets au SMETOM-GEEODE, syndicat mixte de l'Est seine-et-marnais créé en 1997;
- la CC Brie Nangissienne a transféré la gestion des déchets au SMETOM-GEEODE, syndicat mixte de l'Est seine-et-marnais créé en 1997;
- la CC Val Briard a transféré la gestion des déchets au SIETOM, syndicat mixte créée en 1960.

Il existe 2 déchetteries dans la zone d'étude situées à Nangis et Mormant.

Par ailleurs, les plans suivants sont en vigueur sur le territoire:

- Plan national:

Le premier plan national de prévention des déchets a été mis en place en 2004 et a posé les bases de l'action de prévention des déchets au niveau national. La France a adopté un nouveau Programme national de prévention des déchets pour la période 2014-2020 qui a pris le relais du Plan d'actions de 2004. Ce plan concerne tous les publics et vise autant les déchets ménagers que les déchets issus des activités économiques.

Constituant la 3e édition, le PNPD pour la période 2021-2027 actualise les mesures de planification de la prévention des déchets au regard des réformes engagées en matière d'économie circulaire depuis 2017.

- Plan régional:

A l'échelle de chaque région et depuis la loi NOTRe du 7 août 2015, un Plan Régional unique de Prévention et de Gestion des Déchets (PRPGD) est appelé à remplacer au plus vite les plans préexistants régionaux pour les déchets dangereux et départementaux pour les déchets non dangereux et du BTP.

À la place du SRADDET, l'Île-de-France dispose d'un document propre: le Schéma Directeur de la Région Île-de-France (SDRIF), révisé en 2024 sous la forme du SDRIF-E – Objectif 2040. Adopté le 11 septembre 2024 par le Conseil régional puis approuvé par décret en Conseil d'État le 10 juin 2025, il remplace l'ancien SDRIF 2013-2030. Ce schéma stratégique oriente l'aménagement, le logement, les mobilités, la transition écologique et le développement économique à l'échelle régionale.

3.3.6 Risques naturels et technologiques

3.3.6.1 Risques naturels

3.3.6.1.1 Risque sismique

La France dispose d'un zonage sismique divisant le territoire national en 5 zones de sismicité croissante en fonction de la probabilité d'occurrence des séismes.

L'article R.563-4 du code de l'Environnement définit les types de zones à risques et affecte chaque canton de chaque département dans une des cinq zones de sismicité croissante de zone 1 (très faible) à zone 5 (très forte).

- Zone 1 : aléa très faible.
- Zone 2 : aléa faible.
- Zone 3 : aléa modéré.
- Zone 4 : aléa moyen.
- Zone 5 : aléa fort (aux Antilles).

Le bassin de Paris est un bassin sédimentaire, constitué d'un empilement de couches géologiques quasi horizontales, connu pour son absence sismicité naturelle, ainsi que l'absence de failles majeures susceptibles de provoquer une sismicité induite par les opérations.

L'ensemble des communes concernées par la zone d'étude sont classées **en zone 1 de sismicité « aléa très faible »**. La zone de sismicité 1 n'exige aucune prescription particulière en termes de construction des bâtiments.

Des modèles géomécaniques sont développés pour vérifier les changements de contraintes liés à l'injection de CO₂.

Le retour d'expérience des opérations de géothermie dans la région dans le même type de roche n'a montré aucune sismicité induite.

3.3.6.1.2 Risque retrait-gonflement des argiles

Certaines catégories d'argiles réagissent fortement aux changements de leur taux d'humidité. Lorsqu'elles absorbent de l'eau, elles augmentent de volume, tandis qu'en période de sécheresse, elles se rétractent. Ces mouvements de sol peuvent engendrer des fissures sur des constructions légères, en particulier les maisons individuelles situées sur des fondations peu profondes.

La cartographie de l'aléa réalisée Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), indique que **l'exposition au sein de la zone d'étude est moyenne à forte**.



Figure 3-26 : Localisation des principaux épicentres en France depuis 1000 ans (BRGM, 2004)

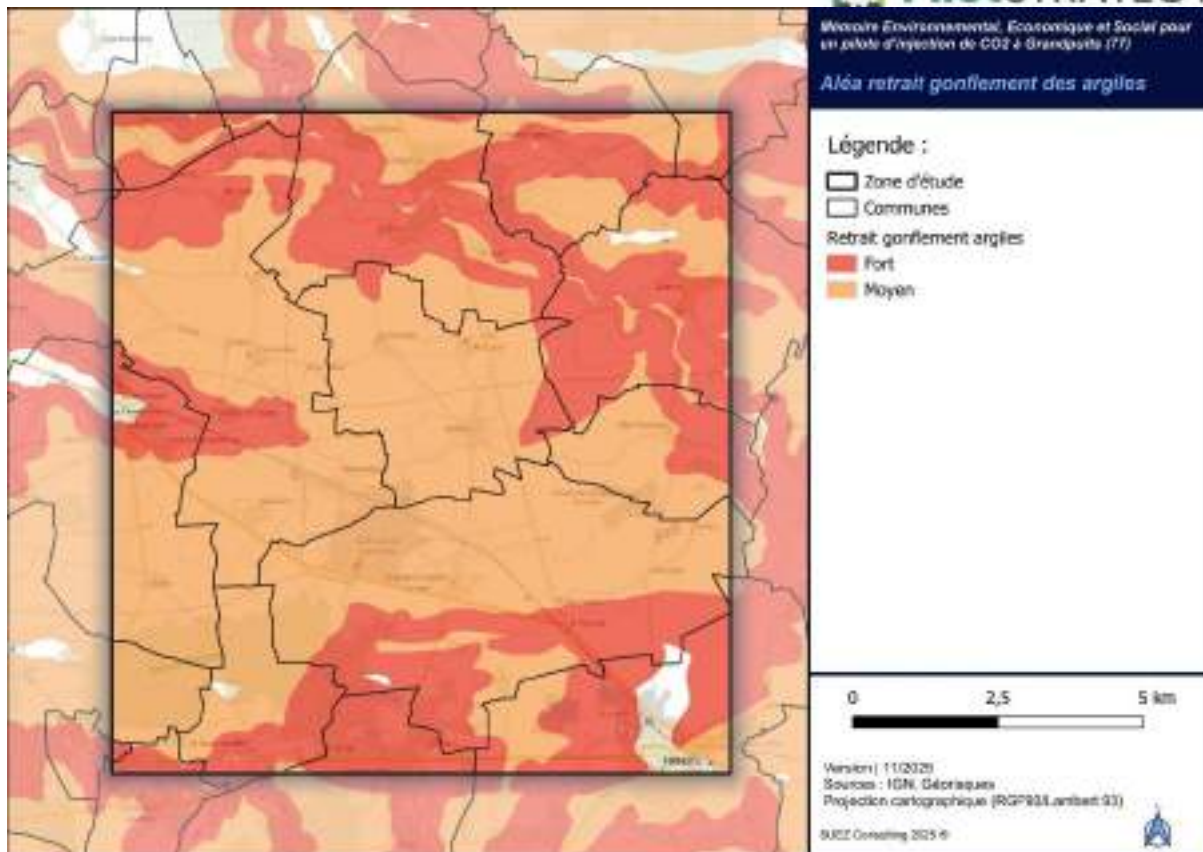


Figure 3-27 : Zones sensibles au retrait-gonflement des argiles

3.3.6.1.3 Risque d'inondation

Le Plan de Prévention des Risques Naturels d'Inondation (PPRI ou PPRNi) est un document de planification qui permet de:

- délimiter les zones exposées aux risques d'inondation et d'y prévoir des interdictions ou des prescriptions spécifiques (portant sur des constructions, ouvrages, aménagements, exploitations...) afin de ne pas aggraver le risque pour les vies humaines ;
- délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des mesures d'interdictions ou des prescriptions (pour les constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations) afin de ne pas aggraver les risques existants et de ne pas en provoquer de nouveaux ;
- fixer des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre ou à mettre en œuvre, dans ces deux types de zones, par divers acteurs (collectivités publiques, particuliers, propriétaires, exploitants, utilisateurs).

La zone d'étude est **concernée par un plan de prévention du risque inondation** et est sensible au phénomène de crue. Cette zone est aussi concernée par un Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) : **Le PAPI de la vallée de l'Yerres**.

Approuvé le 18 juin 2012 sur l'intégralité de la vallée de l'Yerres, le PPRI fut l'objet d'un certain nombre d'actions dans le cadre du PAPI d'intention comme la garantie de son intégration dans les documents d'urbanisme et l'accompagnement des collectivités dans la rédaction de leur Plan Communal de Sauvegarde (PCS).

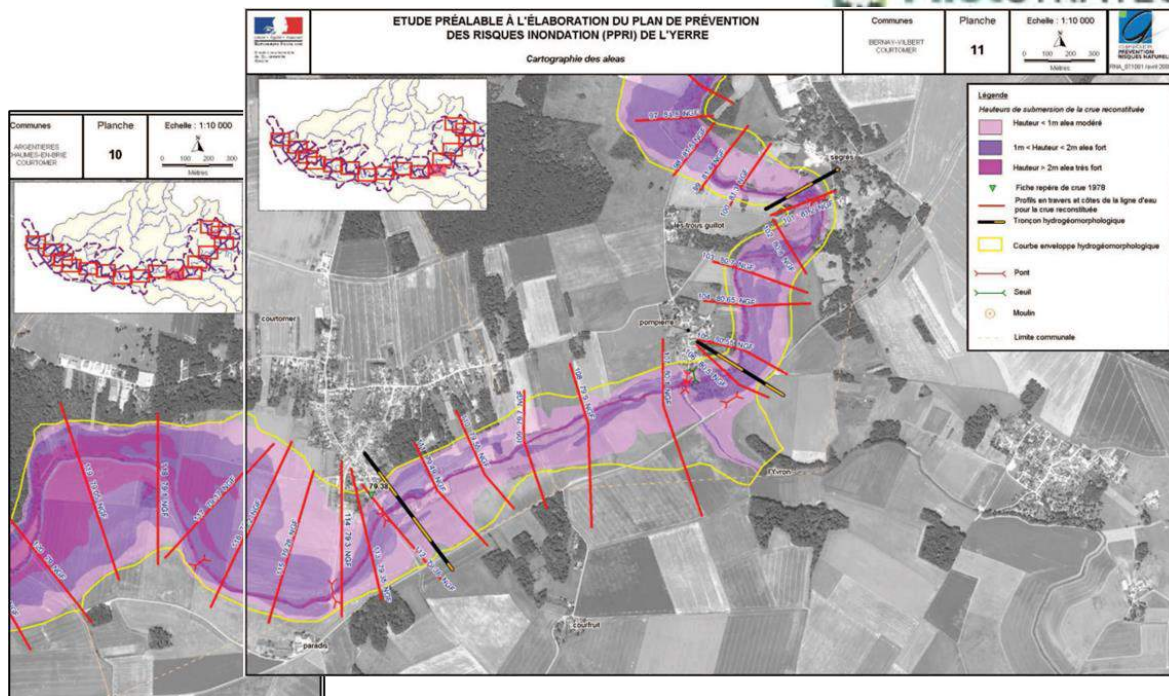


Figure 3-28 : Extrait de l'atlas des aléas du PPRI de l'Yerres au niveau de la zone d'étude

1.1.1.1.2 Remontée des nappes

On parle d'inondation par remontée de nappes lorsque l'inondation est provoquée par la montée du niveau de la nappe phréatique jusqu'à la surface du sol.

Trois paramètres sont particulièrement importants dans le déclenchement (et la durée) des inondations par remontée de nappes :

- une suite d'années à pluviométrie excédentaire, entraînant des niveaux d'étiages de plus en plus élevés ;
- une amplitude importante de battement annuel de la nappe, dépendant étroitement du pourcentage d'interstices de l'aquifère ;
- un volume global important d'eau contenue dans la nappe.

Le territoire est sensible à la remontée des nappes phréatiques. Plus la sensibilité à la remontée de nappes est forte, plus le risque d'inondation est important. Le risque de remontée de nappes peut provoquer des désagréments pour les citoyens :

- Inondations de sous-sols, de garages semi-enterrés et caves ;
- Fissurations d'immeubles ;
- Remontées de cuves enterrées ou semi-enterrées et de piscines ;
- Dommages aux réseaux routiers et de chemins de fer ;
- Remontées de canalisations enterrées ;
- Pollutions.

La carte ci-après illustre le risque de remontée de nappe sur la zone d'étude (Figure 3-29). On retrouve certaines zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe et aux inondations de cave.

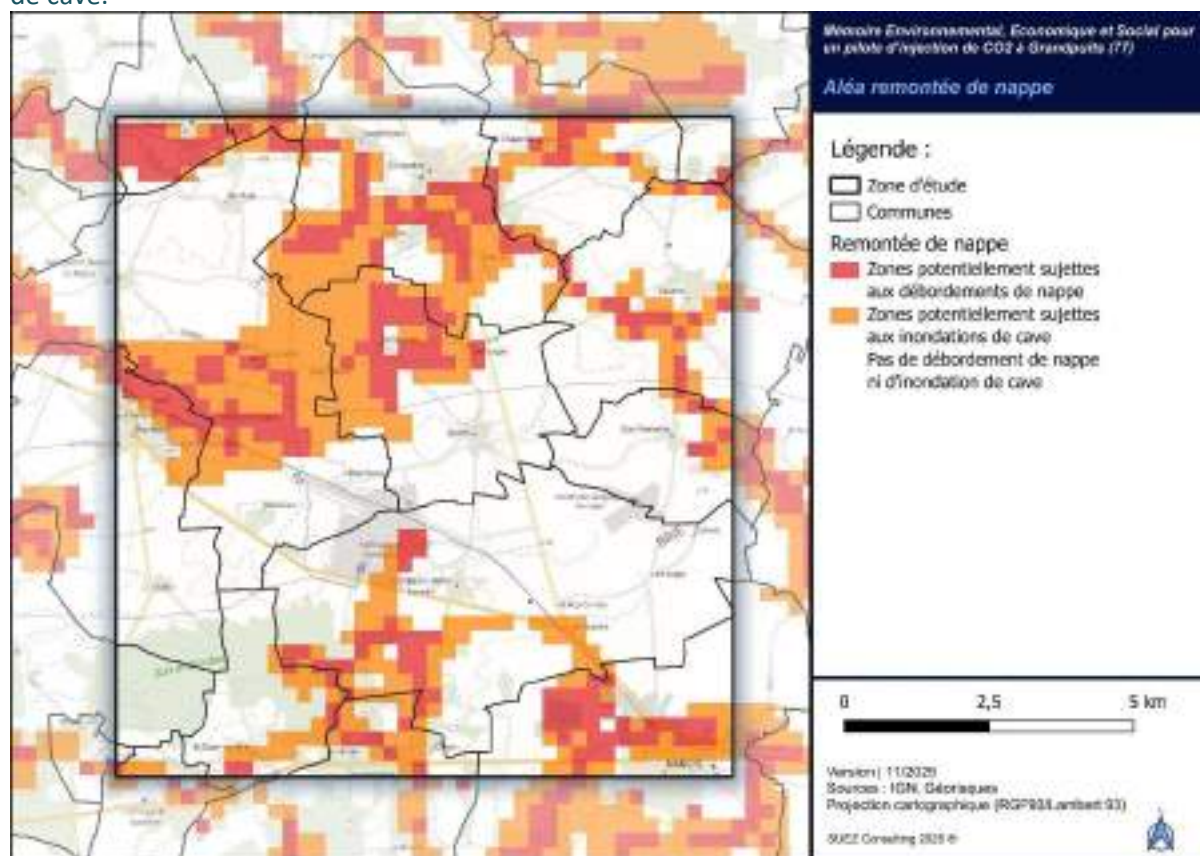


Figure 3-29 : Zones sensibles aux remontées de nappe

3.3.6.1.4 Risque de feux de forêts

L'Atlas du Risque Feu de Forêt en Île-de-France cartographie et catégorise les massifs forestiers d'Île-de-France par niveaux de risque.

Le principal espace boisé (Bois de Bombon) est classé en niveau de risque faible. L'ensemble des espaces boisés de la zone d'étude sont classés à un niveau faible à modéré.

3.3.6.2 Risques technologiques

3.3.6.2.1 Risque industriel

Le risque industriel dans le secteur d'étude relève de la présence d'industries chimiques et pétrochimiques, de dépôts d'hydrocarbures liquides et liquéfiés ainsi que certaines installations classées qui fabriquent ou stockent des produits dangereux.

La zone d'étude accueille deux sites industriels ICPE classés à Autorisation Seveso Seuil-Haut : LAT Nitrogen France SAS et TotalEnergies Raffinage France. Ceux-ci sont implantés sur la commune de Mormant et de Grandpuits-Bailly-Carrois. Il existe un Plan Particulier d'Intervention (PPI) commun pour les deux sites Seveso ainsi qu'un Plan de Prévention des Risques Technologique (PPRT).

Le plan de zonage issu du PPRT de la bioraffinerie TotalEnergies est présenté sur la figure ci-dessous (Figure 3-30).

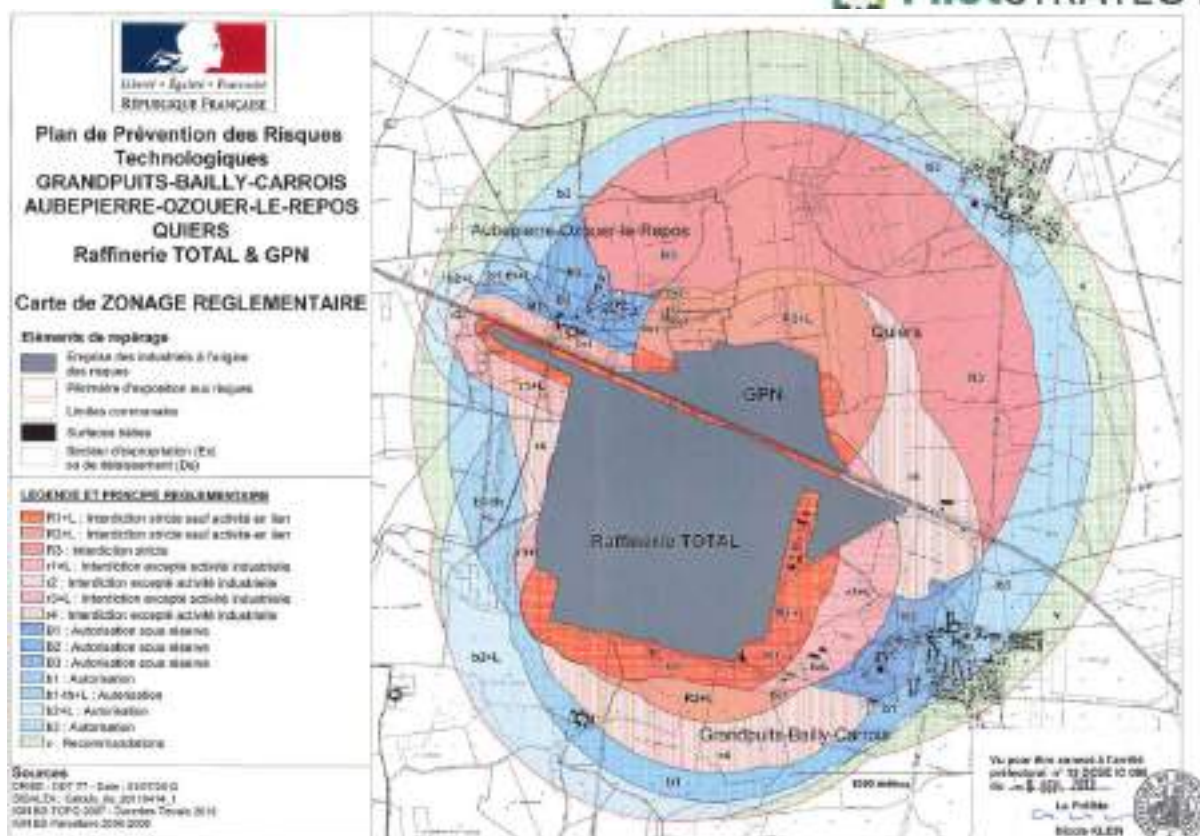


Figure 3-30 : Plan de zonage du PPRT de la bioraffinerie TotalEnergies à Grandpuits-Bailly-Carrois

Ce plan délimite un périmètre d'exposition aux risques, contenant des zones de maîtrise de l'urbanisation future et des zones de prescription concernant l'urbanisation existante.

3.3.6.2.2 Risque minier

Le plan de prévention des risques miniers (PPRm) est un document de planification qui permet de:

- délimiter les zones exposées aux risques miniers et d'y prévoir des interdictions ou des prescriptions spécifiques (portant sur des constructions, ouvrages, aménagements, exploitations...) afin de ne pas aggraver le risque ;
- délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des mesures d'interdictions ou des prescriptions (pour les constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations) sont utiles afin de ne pas aggraver les risques existants et de ne pas en provoquer de nouveaux ;
- fixer des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre ou à mettre en œuvre, dans ces deux types de zones, par divers acteurs (collectivités territoriales, utilisateurs...)

La zone d'étude n'est pas concernée par le risque minier.

3.3.6.2.3 Risque lié au transport de matières dangereuses

Une partie de la zone d'étude est **soumise au risque lié au transport de matières dangereuses**. Ce risque se manifeste principalement le long des axes de circulation empruntés par les poids lourds, mais concerne également les infrastructures ferroviaires et les canalisations enterrées d'hydrocarbures et de gaz.

Sur le plan routier, le territoire est structuré par un réseau départemental dense. Les voies les plus exposées sont la D619, reliant Nangis à Mormant et traversant l'aire d'étude d'ouest en est, et la D408, qui borde la zone au sud. La D201, reliant Courtonne à Nangis, ainsi que les axes secondaires tels que la D227, la D67 et la D215, constituent également des itinéraires susceptibles d'accueillir du trafic de camions transportant des matières dangereuses. Bien qu'aucune autoroute ne traverse directement la zone, la densité de ce maillage départemental favorise le passage de véhicules spécialisés, augmentant ainsi les risques d'accidents technologiques.

Le réseau ferroviaire accroît également l'exposition aux risques, puisqu'une ligne reliant Paris à Mulhouse traverse la zone d'étude. Cette voie dessert directement la bioraffinerie TotalEnergies de Grandpuits et l'usine LAT Nitrogen, grâce à des embranchements particuliers équipés de quais de chargement dédiés. Ces dispositifs facilitent le transport ferroviaire de produits liquides et constitue un point sensible du territoire en matière de sécurité.

Enfin, la zone d'étude est traversée par des canalisations enterrées de gaz et d'hydrocarbures, qui relient la bioraffinerie aux grands réseaux nationaux et régionaux. Ces infrastructures, bien que conçues pour limiter le recours au transport routier ou ferroviaire, représentent-elles aussi un facteur de risque, compte tenu des volumes transportés et de la proximité de certaines zones habitées. Une zone de sécurité réglementaire est d'ailleurs imposée de part et d'autre de leur tracé.

3.3.6.2.4 Sites et sols pollués

Il s'agit ici de recenser les différents sites qui accueillent ou ont accueilli dans le passé des activités polluantes ou potentiellement polluantes. Il s'agit des informations de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (ex-BASOL), les Secteurs d'Information sur les sols (SIS), les Servitudes d'Utilité Publique (SUP) et les anciens sites industriels et activités de service (CASIAS).

- Secteurs d'information sur les sols (SIS)

L'article L.125-6 du Code de l'environnement prévoit que l'État élabore, au regard des informations dont il dispose, des Secteurs d'Information sur les Sols (SIS). Ceux-ci comprennent les terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et la mise en place de mesures de gestion de la pollution pour préserver la sécurité, la santé ou la salubrité publique et l'environnement.

La zone d'étude est concernée par les secteurs d'information sur les sols suivants:

Tableau 3-14 : Secteurs d'information sur les sols (SIS) au sein de la zone d'étude

Numéro d'identifiant SIS	Nom usuel	Commune
SSP000572201	Terres polluées excavées du site du PLESSIS PATE	Grandpuits-Bailly-Carrois
SSP000593501	Station-service Relais Grandpuits 1	Grandpuits-Bailly-Carrois

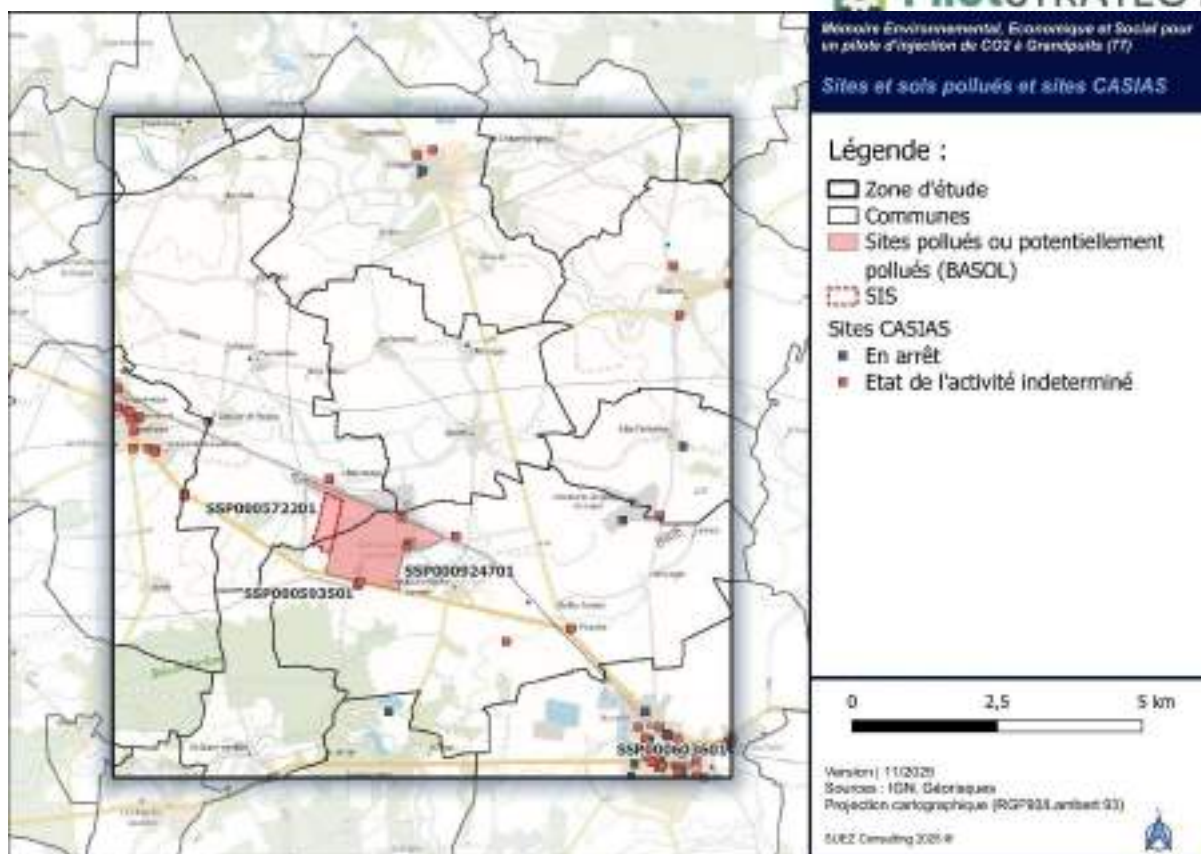


Figure 3-31 : Localisation des sites et sols pollués (BASOL et SIS) et sites CASIAS dans la zone d'étude

- Information de l'administration concernant une pollution suspectée ou avérée (ancienne dénomination: BASOL)

Différentes situations peuvent être à l'origine de la suspicion de pollution d'un site et de la diffusion de cette information par l'administration dans Géorisques (anciens sites BASOL). Il peut s'agir d'une découverte fortuite, à l'occasion de travaux sur un terrain ayant accueilli anciennement des activités industrielles. Un site peut également être mis en évidence à la suite d'une action de l'administration dans le cadre de ses missions de contrôle et de suivi des sites industriels. Les pollutions accidentelles peuvent également donner lieu à la création d'un site dans BASOL.

Plusieurs communes sont concernées par des sites de pollution suspectée ou avérée au sein de la zone d'étude. Elles sont détaillées dans le tableau ci-dessous et illustrées sur le tableau suivant.

Tableau 3-15 : Sites pollués ou potentiellement pollués (BASOL) au sein de la zone d'étude

Numéro d'identifiant	Nom usuel	Commune
SSP0005722	Terres polluées excavées du site du PLESSIS PATE	Grandpuits-Bailly-Carrois
SSP0009247	RAFFINERIE TOTAL Grandpuits (ex ELF ANTAR FRANCE)	Grandpuits-Bailly-Carrois
SSP0005935	Station-service Relais Grandpuits 1	Grandpuits-Bailly-Carrois
SSP0006036	Usine NANGIS MAGNETICS (ex Rhône-Poulenc Systèmes)	Nangis

- BASIAS / CASIAS

La carte des anciens sites industriels et activités de services (CASIAS) recense les anciennes activités susceptibles d'être à l'origine d'une pollution des sols. Il peut s'agir d'anciennes activités industrielles (qu'il s'agisse d'industries lourdes, manufacturières, etc.) ou encore d'anciennes activités de services potentiellement polluantes (par exemple les blanchisseries, les stations-services et garages, etc.). Elle témoigne notamment de l'histoire industrielle d'un territoire depuis la fin du 19^{ème} siècle.

On recense 6 324 sites dans le département de Seine-et-Marne, dont 77 au sein de la zone d'étude.

3.3.7 Permis de recherche, permis d'exploiter et concessions

3.3.7.1 Carrières

Aucune carrière n'est recensée dans la zone d'étude. Quelques anciennes carrières sont recensées sur les communes de Nangis, Saint-Ouen-en-Brie, la Chapelle-Gauthier et Gastins mais ne sont plus en activité.

3.3.7.2 Contraintes minières et après-mines

Aucune mine n'est recensée dans la zone d'étude.

3.3.7.3 Titres miniers, permis d'exploration et d'exploitation d'hydrocarbures

Le cadastre minier qui recense les titres miniers est disponible sur la plateforme Camino.

Ce cadastre compte un seul titre minier au sein de la zone d'étude, réparti entre les communes de Mormant, Aubepierre-Ozouer-le-Repos, Courtomer et Bernay-Vilbert. Celui-ci est valide et a débuté le 22/05/1987 avec une date de fin prévue au 04/01/2035.

Il concerne l'exploitation d'hydrocarbures par Vermillion REP, titulaire de la concession dite « concession de Chaunoy ».

La zone d'étude est également limitrophe au sud avec le titre minier de la concession de « Charmottes » (exploitation d'hydrocarbures par Vermillion REP jusqu'au 24/10/2038).

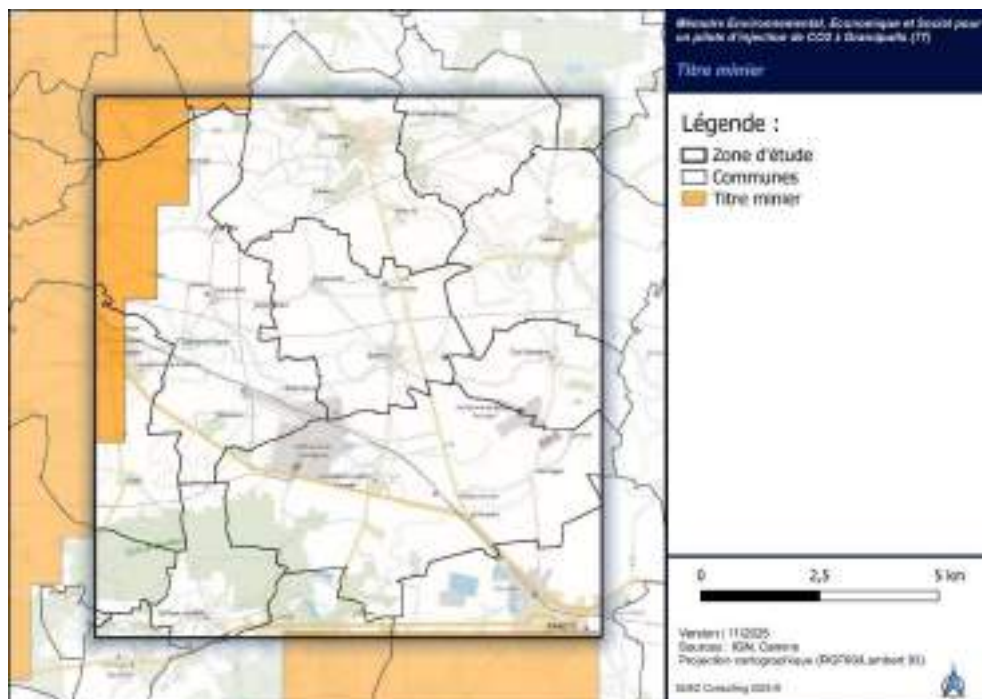


Figure 3-32 : Localisation des titres miniers présents sur la zone d'étude (API Camino, janvier 2025)

3.3.7.4 Géothermie

3.3.7.4.1 Inventaire des ouvrages géothermiques dans le Dogger à proximité de la zone d'étude

L'inventaire des installations de géothermie profonde dans le Dogger montre l'absence d'installations au sein de la zone d'étude.

Les doublets géothermiques en fonctionnement les plus proches sont situés dans un rayon de 20 à 30 km autour de la zone d'étude. Ces ouvrages sont localisés sur les communes de Coulommiers, Melun l'Almont, Le Mée-sur-Seine et Dammarie-les-Lys.

Ces doublets géothermiques exploitent l'aquifère du Dogger à des profondeurs comprises entre environ 1 650 et 1 980 m. Ils sont tous en fonctionnement et assurent une production et une réinjection d'eau géothermale selon le schéma classique des doublets.

Tableau 3-16 : Installations de géothermie profonde (Dogger) à proximité de la zone d'étude

Nom du site	Type d'exploitation	Distance /Grandpuits	Etat de l'installation	Indice BSS	Type d'ouvrage	Aquifère capté	Profondeur toit réservoir (m/sol)
Coulommiers 2	Doublet géothermique	28.4 km	En fonctionnement	BSS003EQNU	Puits d'injection	Dogger	1980.0
				BSS003EQNQ	Puits de production	Dogger	1979.0
Melun l'Almont 2	Doublet géothermique	21.7 km	En fonctionnement	BSS003EQNU	Puits d'injection	Dogger	1711.3
				BSS003EQMS	Puits de production	Dogger	1698.5
Le Mée-sur-Seine 2	Doublet géothermique	25 km	En fonctionnement	BSS003EQMC	Puits d'injection	Dogger	1682.3
				BSS003EQMG	Puits de production	Dogger	1677.4
Dammarie-les-Lys	Doublet géothermique	25.3 km	En fonctionnement	BSS003EQOS	Puits d'injection	Dogger	1656.0
				BSS003EQOO	Puits de production	Dogger	1654.0

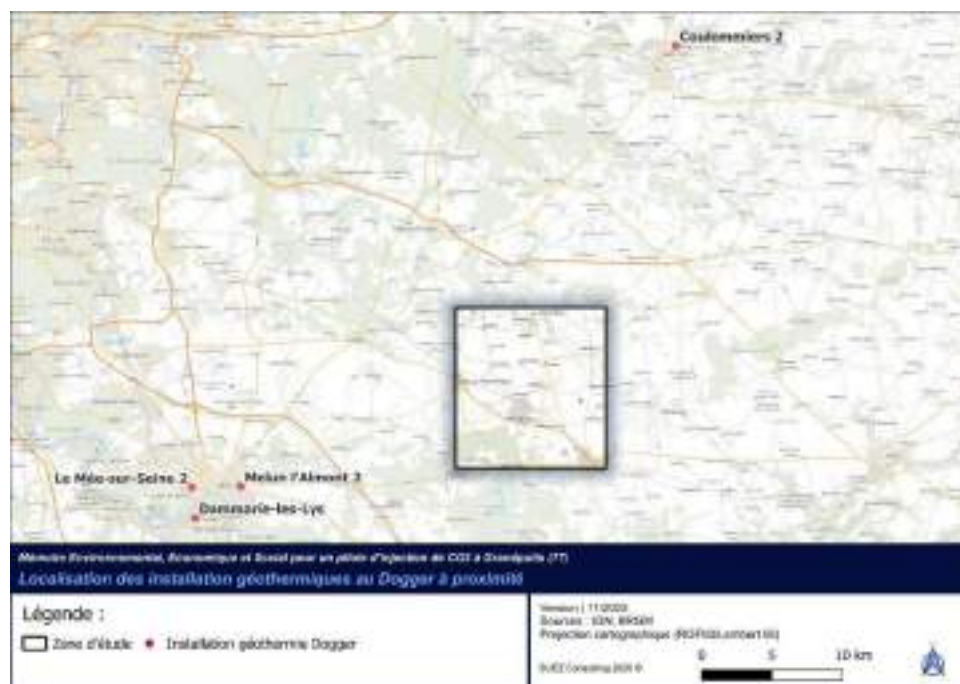


Figure 3-33 : Localisation des installations géothermiques profondes du Dogger à proximité de la zone d'étude

3.3.8 Synthèse des enjeux environnementaux

L'état initial a permis d'identifier les composantes environnementales de la zone d'étude susceptibles d'être affectées par le projet pilote.

Le tableau ci-après présente une synthèse des enjeux environnementaux, définis comme des éléments du milieu à protéger et à prendre en compte dans la conception et la mise en œuvre du projet.

Enjeux
Nul
Faible
Moyen
Fort

Quatre niveaux d'enjeux sont distingués en fonction de la sensibilité des milieux vis-à-vis des effets potentiels du projet.

Thématique	Description	Enjeux
Climat	Le climat océanique dégradé de la zone d'étude implique des précipitations homogènes et régulières au cours de l'année ainsi qu'une température moyenne annuelle de 11,3°C. Des épisodes exceptionnels de température et de précipitations sont à prévoir de façon plus fréquente dans les prochaines années dans la zone d'étude en raison du dérèglement climatique.	Nul
Topographie et relief	La zone d'étude correspond à un vaste plateau incliné du Bassin parisien. La zone d'étude se situe dans une zone globalement plane avec des altitudes allant de 80 à 130 mNGF.	Faible
Géologie	Le secteur d'étude est dominé par la présence des limons des plateaux recouvrant le calcaire de Brie. En profondeur, les coupes géologiques et les diagraphies permettent d'appréhender la superposition des couches du Bassin parisien. La couche réservoir du Dogger, ciblée pour l'injection de CO ₂ , est située entre 1,8 et 2 km de profondeur, il s'agit de l'aquifère salin des oolites blanches. La couche de couverture imperméable de l'Oxfordien est localisée entre 1,5 et 1,8 km de profondeur. Les données sismiques révèlent qu'aucune faille n'est présente dans le secteur d'étude.	Faible

Thématique	Description	Enjeux
Hydrogéologie	Dans le sous-sol de la zone d'étude, 3 masses d'eau souterraines sont recensées. Certaines masses d'eau sont plus vulnérables que d'autres face aux pollutions anthropiques, comme la masse d'eau Tertiaire - Champigny - en Brie et Soissonnais, car proches de la surface (masses d'eau de niveau 1), et sont ainsi directement impactées par les activités humaines. D'autres, plus profondes, comme la masse d'eau de l'Albien-néocomien captif, sont mieux protégées mais peuvent être sujettes aux pressions quantitatives. Enfin, la zone d'étude est classée en zone de Répartition des Eaux (ZRE), défini par l'article R211-71 du Code de l'environnement. Le périmètre de la zone d'étude est inclus dans les ZRE de la nappe de « Champigny » et de la nappe de l'Albien. La nappe ciblée pour l'injection de CO₂ est la nappe du Dogger correspondant aux formations carbonatées du Jurassique.	Moyen
Hydrologie	Le réseau hydrographique local est relativement dense et possède une structure dendritique. Les rus et ruisseaux parcourant la zone d'étude sont des affluents de la Yerres et du Ru d'Ancœur. Globalement, l'état écologique et physico – chimique des cours d'eau est mauvais à moyen, notamment l'Almont, le ru d'Ancœur et le ru d'Avon repartis sur la partie sud de la zone d'étude. Parmi les paramètres déclassants, on compte majoritairement le phosphore et les nitrates. La zone d'étude est classée en zone sensible afin de protéger les eaux de surface de phénomènes d'eutrophisation et de protéger la ressource en eau potable, au titre de la Directive 91/271/CEE dites « Eaux Résiduaire Urbaines ». La Directive Européenne n° 91/676/CEE du 12 décembre 1991, dite directive Nitrates, classe la zone d'étude en zone vulnérable afin d'éviter la pollution provoquée par les nitrates.	Moyen
Usages de l'eau	La répartition des prélèvements d'eau souterraine se fait à hauteur de 80 % pour l'alimentation en eau potable, 16 % pour l'irrigation et 4 % pour l'industrie. On relève la présence uniquement du champ captant AEP de Nangis constitué de deux forages au sud-ouest de la zone d'étude, dont le périmètre de protection immédiate et rapprochée est situé en partie au sein de la zone d'étude.	Moyen
Milieu naturel	La zone d'étude est seulement concernée par une ZNIEFF de type I, intitulé « Bassin de la Haute-Voie à Nangis » (identifiant national : 110020084). La zone représente une surface de 54,37 hectares et correspond aux bassins de décantation de la sucrerie de Nangis, qui servent de zone d'alimentation ou de refuge pour une partie des anatidés fréquentant l'étang de Villefermoy. Aucune zone NATURA 2000 n'est située au sein de la zone d'étude.	Moyen

Thématique	Description	Enjeux
Patrimoine et paysage	Au sein de la zone d'étude, on dénombre 11 monuments historiques. Le site compte uniquement le site classé du ru d'Ancœur, situé en bordure sud-ouest sur le territoire de la commune de la Chapelle-Gauthier. Les principaux paysages retrouvés dans l'aire d'étude sont le plateau briard cultivé, les boisements épars, le maillage bocager résiduel ainsi que les vallons secs ou faiblement encaissés.	Faible
Population – économie – occupation du sol	Les communes présentant la population la plus importante sont Nangis (8 883 habitants) et Mormant (5 280 habitants). Les communes les moins peuplées sont Beauvoir, Clos-Fontaine et La Chapelle-Iger avec moins de 400 habitants. Globalement les communes comprises au sein de la zone d'étude sont vastes et présentent une densité de population relativement faible. L'économie de la zone d'étude repose principalement sur l'agriculture avec de nombreuses exploitations de « grandes cultures », blé, oléagineux, betterave, orge et maïs et l'industrie avec la présence notamment de la zone industrielle de Grandpuits.	Moyen
Réseaux	Le territoire est essentiellement maillé par des voies départementales. Aucune autoroute ni route nationale ne traverse la zone d'étude. Un axe ferroviaire traverse la zone d'étude du nord-ouest au sud-est en passant par la bioraffinerie TotalEnergies de Grandpuits. La zone d'étude est traversée par des canalisations de transport de gaz et d'hydrocarbures et est de ce fait concerné par la servitude de type I3 relatives à l'établissement des canalisations de transport de gaz, d'hydrocarbures et de produits chimiques.	Moyen
Qualité de l'air	Globalement, le périmètre de l'étude subit une pollution atmosphérique faible à moyenne et s'inscrit dans une dynamique favorable. Certains épisodes de pollution restent observés du fait de la proximité de la zone d'étude avec l'agglomération parisienne.	Faible
Acoustique	Dans la zone d'étude, les nuisances sonores sont principalement liées à la présence d'infrastructures de transport terrestres. Il existe un Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE) sur le département de Seine-et-Marne pour la période 2024-2029. Seul un passage de la route départementale D408 à 1,2 km à l'ouest de Nangis est concerné par ce plan (Lden A en catégorie 5).	Faible
Risques naturels	<u>Inondation</u> : La zone d'étude est concernée par un plan de prévention du risque inondation approuvé le 18 juin 2012 sur l'intégralité de la vallée de l'Yerres. La vallée est donc sensible au phénomène de crue.	Moyen

Thématique	Description	Enjeux
	<u>Remontée de nappe</u> : L'aléa est inégalement réparti au sein de la zone d'étude. On retrouve certaines zones potentiellement sujettes aux débordements de nappe et aux inondations de cave. <u>Retrait-gonflement des argiles</u> : Sur la zone étudiée, la quasi-totalité du territoire est exposée à un risque moyen à élevé de retrait-gonflement des argiles. <u>Séismes</u> : L'ensemble des communes concernées par la zone d'étude sont classées en zone 1 de sismicité avec un « aléa très faible ». <u>Feu de forêts</u> : le principal espace boisé de la zone d'étude est le bois de Bombon au sud-ouest. Il est classé au niveau de risque faible. L'ensemble des espaces boisées de la zone d'étude sont classés à un niveau de risque faible à modéré.	
Risques technologiques	<u>Industriel</u> : La zone d'étude accueille deux sites industriels ICPE classé à Autorisation Seveso Seuil-Haut : LAT Nitrogen France SAS et TotalEnergies Raffinage France. Ceux-ci sont implantés sur la commune de Mormant et de Grandpuits-Bailly-Carrois. Il existe un Plan Particulier d'Intervention (PPI) commun pour les deux sites Seveso ainsi qu'un Plan de Prévention des Risques Technologique (PPRT). <u>Minier</u> : La zone d'étude n'est pas concernée par le risque minier. <u>Transport de matières dangereuses</u> : Une partie de la zone d'étude est soumise au risque de transport de matière dangereuse. <u>Sites et sols pollués</u> : Plusieurs communes, telles que Grandpuits-Bailly-Carrois et Nangis, sont concernées par des sites de pollution suspectée ou avérée au sein de la zone d'étude (site BASOL) et on recense 77 sites CASIAS (anciens sites industriels).	Moyen
Permis de recherche	Absence de carrière en activité et mine dans la zone d'étude. Un seul titre minier au sein de la zone d'étude, réparti entre les communes de Mormant, Aubepierre-Ozouer-le-Repos, Courtomer et Bernay-Vilbert. Celui-ci est valide avec une date de fin prévue au 04/01/2035 et concerne l'exploitation d'hydrocarbures par Vermillion REP. La zone d'étude n'est pas concernée par des installations géothermiques.	Faible

3.4 Effets potentiels des choix de projet sur l'environnement et mesures associées

3.4.1 Effets des études et mesures incluses dans la demande théorique de permis

3.4.1.1 Description du programme de travaux envisagés

Les travaux envisagés dans le cadre de cette étude s'inscrivent en vue d'un projet pilote d'injection de CO₂ à grandeur réelle.

L'essai consisterait à construire un puits d'injection et à le tester avec une injection de CO₂ dans le sous-sol limitée à un volume de 100 000 tonnes sur la durée courte (3 mois). Deux scénarios sont envisagés concernant le puits d'injection.

Le scénario principal correspondrait à une injection hors-site du CO₂ à l'aide d'un caroduc de 3 km de long entre la source de CO₂ et la tête de puits. Ce scénario inclurait la création d'un puits légèrement dévié. Ce scénario permettrait d'éviter les interférences avec les sites Seveso seuil haut et les puits profonds existants.

Le scénario principal pour les études de dimensionnement détaillées comprendrait les équipements suivants :

- Compression ;
- Conduite entre le site de l'émetteur et la tête de puits ;
- Puits d'injection.

Le scénario alternatif correspondrait à une injection dans d'un puits fortement dévié dont la tête de puits serait située dans l'enceinte de l'usine émettrice.

Ce scénario comprendrait les équipements suivants :

- Compression ;
- Puits d'injection.

La figure suivante (Figure 3-34) présente la possible localisation de la tête de puits selon les deux scénarios envisagés. La tête de puits du scénario principal se situerait en dehors du périmètre du PPRT applicable à l'usine LAT Nitrogen. La tête de puits du scénario principal serait reliée à l'usine émettrice de CO₂ par un caroduc, suivant le cheminement d'un gazoduc déjà existant.

La tête de puits du scénario alternatif se situerait au sein de l'enceinte de l'usine et à proximité ouvrage profond existant.

La zone cible d'injection de CO₂ correspondant à la base du puits resterait la même pour les deux scénarios. Cette zone se situerait en dehors de l'enveloppe de risque Seveso de l'usine LAT Nitrogen France SAS.

Une modélisation a été réalisée afin d'évaluer l'étendue du panache souterrain de CO₂ après injection, et l'incidence sur la pression de la nappe du Dogger.

L'enveloppe du CO₂ injecté dans le sous-sol serait peu étendue (rayon d'environ 300 à 420 m autour de la base du puits). L'enveloppe de pression, représentée selon les différents scénarios probabilistes (P10, P50, P90), correspond à la zone où l'augmentation de pression de CO₂ dans la formation atteint au moins 1 bar. Cette enveloppe atteindrait un rayon d'environ 2,6 à 3,1 km autour de la base du puits

selon les scénarios. Dans le scénario défavorable (P10), l'enveloppe de pression n'atteindrait que très partiellement l'ouvrage existant de l'usine LAT Nitrogen.

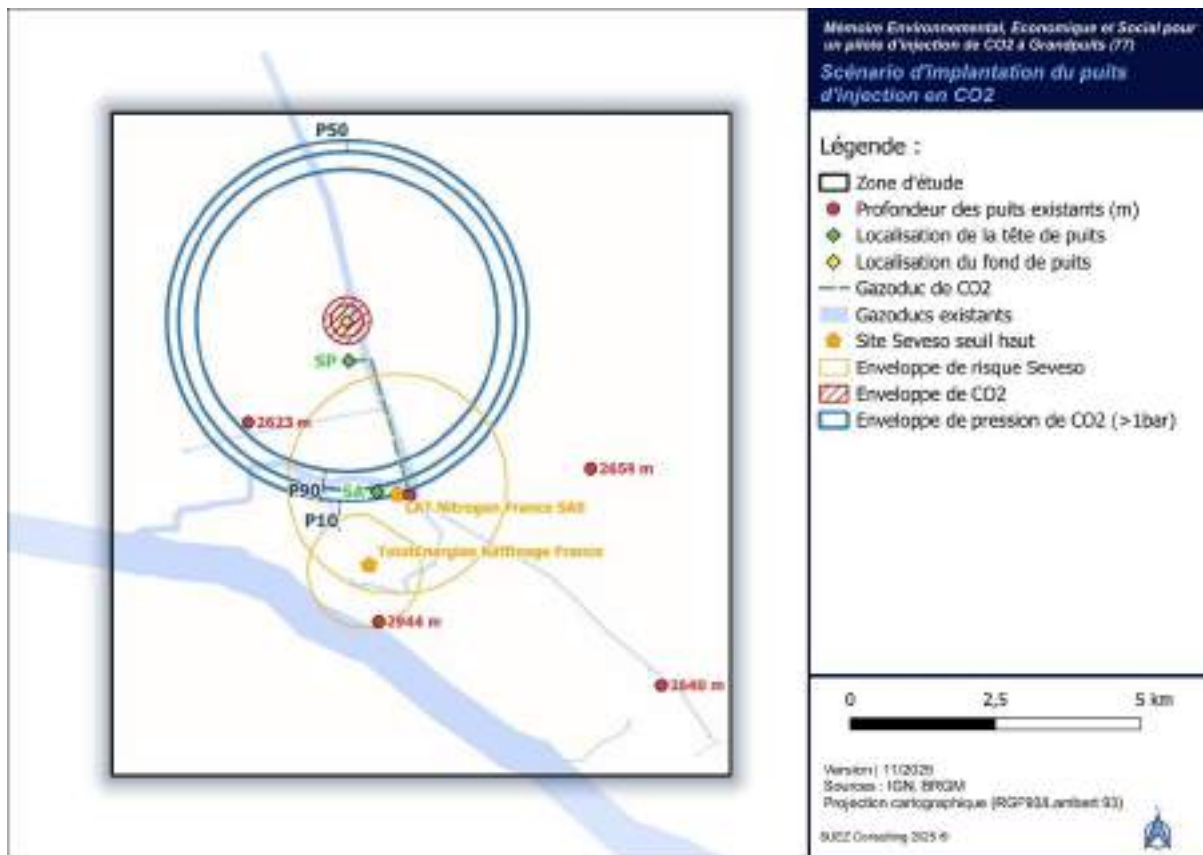


Figure 3-34 : Localisation du puits d'injection de CO₂ en fonction des différents scénarios au sein de la zone d'étude

Dans les deux scénarios, le CO₂ devrait être comprimé avant injection. Le CO₂ passerait d'abord à travers des séparateurs-filtre pour retenir les particules et liquides susceptibles d'endommager les compresseurs. Puis la compression serait pratiquée pour atteindre la pression d'injection requise. La compression exigerait un compresseur en 5 étages, équipé de refroidisseurs intermédiaires, avec des conditions de sortie différentes selon le scénario. La pression et la température seraient plus élevées pour le scénario alternatif, en raison de la longueur et de la déviation du puits.

Le programme de travaux de la phase de transport dépendra du scénario retenu et de la source de CO₂ utilisée. Le transport de CO₂ s'effectuerait par carבודuc dans le cas où le scénario principal était retenu et si l'usine LAT Nitrogen constituait la source de CO₂.

Le carבודuc entre les installations et la tête de puits aurait un diamètre estimé de 6 pouces. Ce diamètre a été choisi en appliquant des critères de conception de vitesse sur le tracé détaillé du pipeline.

La **sécurité** du dispositif serait assurée par l'installation de soupapes et de vannes d'isolement destinées à limiter les risques de fuite accidentelle, complétée par un système d'arrêt d'urgence (ESD – Emergency Shut Down) obligatoire. Une installation de suivi par fibre optique serait envisageable afin d'alerter sur tout éventuel incident le long de la canalisation.

Le trajet du carבודuc serait évalué afin d'impacter le moins possible les habitants en suivant le tracé des gazoducs existants.

La phase de travaux du puits comprendrait l'incidence de la réalisation du forage et des voies d'accès mobilisées. Il s'agirait d'un ouvrage foré à environ 1,8 km de profondeur. La durée des travaux d'aménagement du puits serait évaluée entre 3 et 6 mois (comprenant la durée de préparation du chantier).

Le puits d'injection serait conçu de manière à garantir une parfaite étanchéité entre les différentes formations aquifères traversées. Pour cela, plusieurs colonnes de cuvelage en acier seraient mises en place successivement et scellées par des ciments spécifiques injectés sur toute leur hauteur. Seul le tubage d'injection en contact avec le CO₂ serait en acier inoxydable (Chromium 13, 22 or 25). Ce dispositif permettrait d'isoler chaque niveau aquifère (Tertiaire, Craie, Albien, Dogger ...) intercepté par le forage, y compris la nappe cible destinée à l'injection de CO₂.

Des formulations de ciments spécifiques, résistantes à la corrosion par le CO₂ (par exemple à base de silicates renforcés ou de ciments de type CorrosaCem et EverCRETE), seraient utilisées au niveau du réservoir d'injection et dans les sections profondes. Ces matériaux présentent une faible porosité et empêche toute réaction de dégradation au contact du CO₂ injecté.

Des mesures de surveillance seraient réalisées dans le cadre du suivi environnemental du projet. Conformément aux premières modélisations, le suivi devrait se poursuivre pendant 3 ans minimum (3 à 5 ans) après la fin de l'injection, afin d'observer la dissipation de la surpression attendue environ 8 mois après l'arrêt de l'injection, puis la stabilisation du CO₂ dans le réservoir (en attente de confirmation par les résultats du pilote). Le programme de monitoring présenté ci-dessous permettrait de vérifier que l'injection et le stockage sont conformes aux modèles réalisés. La déviation du puits serait d'environ 26° dans le scénario principal, et d'environ 65° dans le scénario alternatif. Par conséquent, l'acquisition de données serait limitée dans le scénario alternatif, en raison de cette forte déviation.



Figure 3-35 : Programme de monitoring envisagé sur 3 ans du projet pilote

3.4.1.2 Effets prévisionnels des travaux de forage

Les principaux effets identifiés dans la bibliographie sur des projets de forage sont les suivants (liste non exhaustive) :

- Effets sur le milieu physique

La réalisation du forage et de la plateforme autour de ce dernier aurait un impact sur le sol. Néanmoins ces travaux seraient limités à l'emprise de la plateforme.

De plus, il sera tenu compte de l'environnement et zones sensibles pour le choix de la mise en place des installations de tête de puits et de l'aménagement des voies d'accès, afin de limiter autant que possible la dégradation des sols et d'optimiser la régénération naturelle ultérieure.

Par ailleurs, si les déchets des opérations de forage ne pouvaient être recyclés, ceux-ci seraient évacués par des filières de traitement adaptées.

- Effets sur le milieu naturel

La localisation du forage a été choisie afin de minimiser au maximum les effets sur la faune, la flore et les habitats naturels (évitement des zones humides, des zones Natura 2000, etc.).

Un inventaire et un suivi écologique sera réalisé préalablement aux travaux pour s'assurer de l'absence d'espèces protégés.

Les impacts potentiels se limiteraient aux abords immédiats de la plateforme de forage.

Les impacts majeurs résideraient dans le changement d'occupation des sols lié à la mise en place de la plateforme de forage, et dans le défrichage de la végétation existante à cet endroit (si nécessaire).

Une perturbation de la faune locale serait possible. Cependant, cette perturbation serait limitée dans le temps, à la durée des travaux de création de la plateforme et de la réalisation du forage.

Suite à l'inventaire et au suivi écologique réalisé, des mesures seront définies (adaptation du calendrier des travaux, réduction du bruit ...) dans l'optique d'éviter et réduire cette perturbation.

- Effets sur les sites et paysages
 - Patrimoine

La localisation des zones sensibles (sites archéologiques, sites classés et inscrits, monuments historiques...) est prise en compte afin de s'en éloigner au maximum.

Néanmoins en cas d'éventuelles découvertes fortuites de vestiges archéologiques, la DRAC et le maire de la commune concernée seraient directement informés.

- Paysage

Le mât de forage pourrait constituer une gêne visuelle. Néanmoins il s'agit d'un impact temporaire dont la durée serait préalablement déterminée.

A la fin des travaux, si le forage est conservé en vue d'une éventuelle mise en exploitation, l'impact visuel serait limité à la tête de puits sur la plateforme qui pourrait faire l'objet d'une intégration paysagère spécifique.

- Effets sur le milieu humain et la santé
 - Circulation routière

La réalisation du forage pourrait avoir un impact négligeable sur la circulation (occupation temporaire de courte durée) et ce principalement lors de la phase de construction de la plateforme de forage, et du montage et démontage de la machine de forage (période en début et fin de chantier, limitée à 7 jours par phase).

- Qualité de l'air

Les terrassements nécessaires à la réalisation de la plateforme de forage pourraient, en fonction de l'époque, être générateurs de poussières au même titre que tout chantier de construction.

Par ailleurs, cette phase, impliquant l'utilisation d'engins de chantier, serait aussi génératrice de gaz à effet de serre.

En outre, la phase de test de puits pourrait impliquer le dégagement de gaz incondensables comme du CO₂. Ces éventuelles venues de gaz seraient limitées et contrôlées par les équipes de forage. Des systèmes de vannes de sécurité seront installés.

L'impact sur l'air est néanmoins à relativiser puisqu'il serait très localisé et de courte durée.

- Environnement sonore

Les travaux de forage pourraient être générateurs de bruit, notamment du fait de travaux organisés en 24/24h comme pour tous les forages profonds.

L'impact sur l'environnement sonore est néanmoins à relativiser puisqu'il serait généré à distance des habitations et de courte durée.

3.4.1.3 Mesures prévues dans la demande de permis

3.4.1.3.1 Mesures d'évitement

Le choix d'emplacement du puits d'injection prend en compte les puits existants afin de s'en éloigner le plus possible pour éviter un risque de fuite de CO₂. Les puits existants sont ainsi situés à plus de 2 km du panache modélisé.

L'enveloppe de pression liée à l'injection du CO₂ dans les 3 scénarios probabilistes (P10, P50, P90) montre également qu'il y a 90 % de la chance que l'enveloppe de pression n'impacte qu'un puits profond sur les cinq présents sur la zone d'étude avec une incidence faible d'environ 1 bar.

Dans le cas où la source de CO₂ provient de l'usine LAT Nitrogen, le flux de CO₂ est quasiment pur (environ 99 % de CO₂ et 1 % d'H₂) ce qui éviterait la mise en place d'unités de capture et de conditionnement.

L'emplacement potentiel du puits d'injection a par ailleurs été défini afin d'éviter les zones de sensibilité écologique particulière, en particulier les cours d'eau et les espaces protégés observés sur le territoire (ZNIEFF) et abritant des espèces protégées.

3.4.1.3.2 Mesures de réduction

Dans le cadre du projet pilote, un travail de concertation et d'information serait réalisé et poursuivi avec les parties prenantes locales.

Les seuils de vibrations applicables seraient respectés (assimilables aux seuils pour les chantiers).

Afin de minimiser les nuisances sonores, les mesures suivantes pourraient être mises en place:

- L'ensemble du matériel utilisé répondrait aux normes françaises ou européennes en matière d'émissions de bruit afin de réduire les impacts de la campagne;
- Si besoin, des dispositifs d'insonorisation pourraient être mis en place afin de réduire les émissions sonores dues aux forages;
- Si besoin, des mesures de bruit pourraient être réalisées pendant le chantier;
- Enfin, l'ensemble du personnel serait convenablement équipé en protection auditive en accord avec la réglementation.

En complément, des mesures spécifiques permettrait de garantir l'intégrité du puits et de prévenir tout risque de communication entre les formations géologiques:

- Le puits d'injection serait conçu pour assurer une parfaite étanchéité entre les différentes formations aquifères traversées, notamment au moyen de cuvelages en acier scellés par des ciments adaptés;
- La qualité de la cimentation et l'intégrité des tubages seront contrôlées par des diagraphies spécifiques;
- La sécurité de l'installation sera assurée par l'installation de soupapes, de vannes d'isolement, et d'un système d'arrêt d'urgence (ESD – Emergency Shut Down);
- Un plan de gestion du forage sera établi et un suivi régulier de l'intégrité du puits sera réalisé;
- À l'issue du permis, le puits sera comblé conformément aux règles de l'art et à la réglementation applicable.

3.4.1.3.3 Mesure de compensation

En cas d'impact avéré causé par le passage des véhicules, notamment sur les cultures, des indemnisations seront réalisées conformément aux barèmes de la Chambre Départementale d'Agriculture de la région Ile-de-France.

3.4.2 Evaluation préliminaire des incidences Natura 2000

La présente partie de ce document est établie conformément à l'article R.414-23 du code de l'environnement et la circulaire du 15 avril 2010 relative à l'évaluation des incidences Natura 2000.

Elle fait office d'évaluation des incidences Natura 2000 lorsqu'elle permet de conclure à l'absence d'incidence.

La zone d'étude ne comporte pas de sites Natura 2000. Le site le plus proche est situé en bordure sud de la zone d'étude.

Compte tenu de l'éloignement de ce site, le projet ne présenterait pas d'impact sur l'environnement des sites Natura 2000.

L'évaluation préliminaire montre que la zone d'étude n'est pas susceptible d'affecter les sites Natura 2000.

Il n'y a donc pas lieu de poursuivre l'évaluation des incidences Natura 2000.

3.4.3 Effets des travaux potentiels optionnels et mesures associées

En complément des scénarios principaux étudiés dans la demande de permis, certains travaux optionnels pourraient être envisagés afin d'optimiser le suivi du projet et de renforcer la sécurité des opérations. Ces travaux incluraient notamment des opérations supplémentaires de monitoring (acquisition de données sismiques, installation de capteurs fibre optique dans le puits ou le long de la caroduc, suivi micro-sismique), ainsi que des aménagements techniques liés à la compression et au transport du CO₂.

L'intégration d'équipements de surveillance en continu permettra de contrôler la pression, la température et la composition du flux de CO₂ tout au long de la phase d'injection. L'ajout de dispositifs de détection des fuites, associés à des soupapes et des vannes d'isolement, limitera fortement les risques accidentels. Un système d'arrêt d'urgence (ESD – Emergency Shut Down) restera par ailleurs obligatoire afin de sécuriser l'ensemble de l'installation.

Les effets potentiels de ces travaux supplémentaires resteraient limités car ils s'inscrivent dans le prolongement direct des aménagements déjà prévus dans la demande de permis. Les principales incidences pourraient concerner des nuisances temporaires liées à l'installation des dispositifs (bruit, circulation locale accrue, mobilisation ponctuelle d'engins). Ces impacts seraient toutefois réduits grâce à la mise en place de mesures d'évitement et de réduction analogues à celles décrites en section 3.4.1.

3.4.4 Synthèse des impacts et mesures

L'évaluation des impacts a permis de définir les incidences du projet sur l'environnement. Le tableau présenté ci-après établit une synthèse des impacts bruts et impacts résiduels du projet après la mise en place de mesures. Quatre niveaux d'enjeux sont définis.

Tableau 3-17 : Niveaux d'impact

Impacts
Nul
Faible
Moyen
Fort

Type	Impacts	Impacts	Mesures	Impact résiduel
Milieu physique	Le projet prévoit la réalisation d'un forage profond d'environ 1,8 km, accompagné de la création d'accès et de l'installation d'un caroduc de 3 km dans le scénario principal, ou bien d'un puits fortement dévié dans le scénario alternatif. Ce forage profond traversera différentes formations géologiques aquifères utilisées notamment pour l'alimentation en eau potable. Aucun captage d'eau potable, ni	Moyen	Evitement Choix du tracé du caroduc pour limiter l'impact sur les zones sensibles, suivant en grande partie le tracé d'un gazoduc existant. Choix de l'emplacement de l'injection de CO₂ à une distance importante des puits existants afin d'éviter un risque éventuel de fuite sur ces ouvrages anciens.	Faible

Type	Impacts	Impacts	Mesures	Impact résiduel
	périmètre de protection n'est cependant situé à proximité des emplacements envisagés du puits. Ces travaux présentent des risques en cas de rejet accidentel de CO₂, pouvant entraîner notamment un appauvrissement de l'air en oxygène.		Réduction Le puits d'injection sera conçu de manière à garantir une parfaite étanchéité entre les différentes formations aquifères traversées (cuvelages en acier inoxydable scellés par des ciments spécifiques). Un contrôle de la bonne cimentation et de l'état des tubages sera réalisé à l'aide de diagraphies spécifiques. A l'issue du permis d'exploration, le forage sera comblé dans les règles de l'Art. La sécurité du dispositif sera assurée par l'installation de soupapes et de vannes d'isolement, complétée par un système d'arrêt d'urgence (ESD – Emergency Shut Down). Un plan de gestion du forage sera établi et un suivi régulier de l'intégrité du puits sera réalisé.	

Type	Impacts	Impacts	Mesures		Impact résiduel
Milieu naturel	Le puits d'injection de CO₂ et les voies de transport mobilisées seront situés en dehors des sites Natura 2000. L'évaluation préliminaire montre que le PER n'est pas susceptible d'affecter les sites Natura 2000 situés à proximité de l'aire d'étude. Les travaux de forage, les passages de camions et les opérations d'aménagement du puits et de la canalisation de transport sont susceptibles de provoquer une perturbation ponctuelle de la faune présente sur le site et nécessiter le défrichage de la végétation existante à cet endroit (si nécessaire). Cependant, cette perturbation sera limitée dans le temps, à la durée des travaux de création de la plateforme et de la réalisation du forage.	Faible	Evitement	L'emplacement du puits est prévu hors zones Natura 2000, ZNIEFF et zones protégées. Les tracés des camions seront étudiés pour éviter les milieux sensibles et la circulation s'effectuera uniquement sur les voies existantes. Suite à l'inventaire et au suivi écologique, des mesures spécifiques pourront être définies (adaptation du calendrier des travaux ...).	Faible
			Réduction	Un suivi régulier des vibrations et du bruit sera également mis en place afin de réduire les nuisances pour l'environnement et les riverains. Le site sera remis en état à l'issue des travaux. Suite à l'inventaire et au suivi écologique, des mesures spécifiques pourront être définies (adaptation du calendrier des travaux ...).	

Type	Impacts	Impacts	Mesures		Impact résiduel
Patrimoine et paysage	Le puits d'injection de CO₂ et la canalisation de transport de CO₂ seront situées en dehors des zones sensibles (sites archéologiques, sites classés et inscrits, monuments historiques...) Le mât de forage pourra constituer une gêne visuelle. Néanmoins il s'agit d'un impact temporaire pendant la durée des travaux. A la fin des travaux, si le forage est conservé en vue d'une éventuelle mise en exploitation, l'impact visuel sera limité à la tête de puits et au compresseur ce qui entraîne un impact paysager limité.	Faible	Compensation	La localisation des zones sensibles (sites archéologiques, sites classés et inscrits, monuments historiques...) est prise en compte afin de s'en éloigner au maximum. Un démantèlement des installations et une remise en état est prévue à l'issue du permis d'exploration.	Faible
			Réduction	Le tête de puits pourra faire l'objet d'une intégration paysagère.	
Milieu humain	La réalisation du forage pourra avoir un impact négligeable sur la circulation (occupation temporaire de courte durée) et ce principalement lors de la phase de construction de la plateforme de forage, et du montage et démontage de la machine de forage (période en début et fin de chantier, limitée à 7 jours par phase).	Faible	Evitement	Le caroduc et le puits d'injections seront éloignés de plusieurs centaines de mètres des premières habitations. L'implantation du puits d'injection est prévue proche de la source pour limiter le transport de CO₂.	Faible
			Réduction	Des concertations avec les riverains sont prévues, en plus du respect des seuils réglementaires de vibrations ainsi que le contrôle du trafic routier lié aux travaux.	

Type	Impacts	Impacts	Mesures	Impact résiduel
	Les travaux peuvent générer des nuisances sonores et vibratoires liées au forage et au passage des camions. Des risques de sécurité subsistent en cas d'accident de transport ou de fuite.		Compensation En cas d'impact avéré causés par le passage des véhicules, notamment sur les cultures, des indemnités seront réalisées conformément aux barèmes de la Chambre Départementale d'Agriculture de la région Ile-de-France.	

A noter que chaque technique d'intervention sur site fera l'objet préalablement d'une déclaration au titre du code minier. Les impacts et mesures pourront être de nouveau vérifiés lors de cette demande.

3.5 Volet économique et social

3.5.1 Définition du périmètre de l'analyse socio-économique

D'une surface de 97 km², soit environ 80 % du périmètre d'étude, la Communauté de Communes de la Brie Nangissienne constitue la base de l'analyse socio-économique.

Les communes de Bernay-Vilbert, Courtomer, Courpalay, La Chapelle-Iger, Voinsles et de Pécy, appartenant à la Communauté de Communes du Val Briard, ainsi que les communes d'Argentières, Beauvoir et de Bombon, appartenant à la Communauté de Communes Brie des Rivières et Châteaux, sont également intégrées à cette analyse socio-économique. Elles couvrent respectivement environ 24 km², soit environ 20 % du périmètre d'étude.

Une comparaison synthétique entre la Communauté de Communes de la Brie Nangissienne, la Communauté de Communes du Val Briard et la Communauté de Communes Brie des Rivières et Châteaux est néanmoins proposée, afin de mettre en évidence les singularités de ces trois intercommunalités.

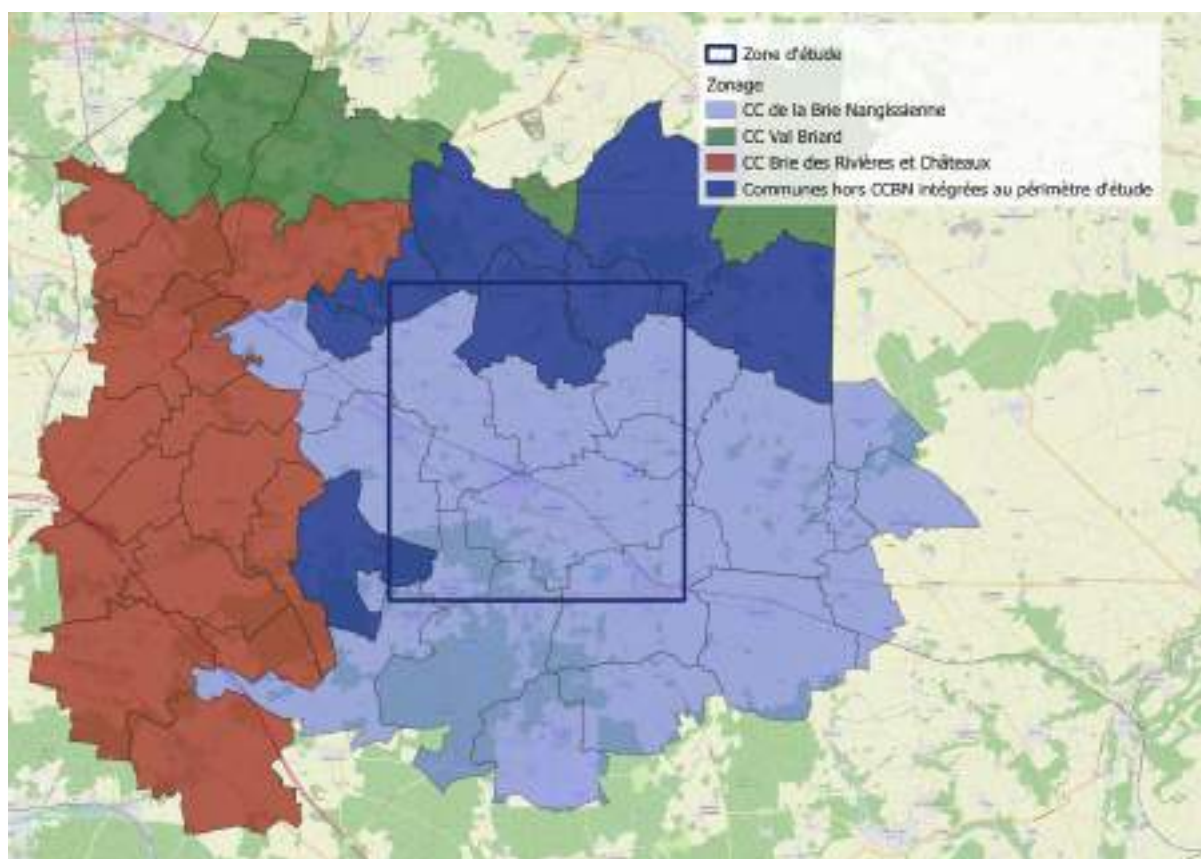


Figure 3-36 : Définition du périmètre de l'analyse socio-économique

3.5.2 Contexte géographique du périmètre

La communauté de communes de la Brie Nangissienne se situe dans la région Île-de-France, dans le département de Seine-et-Marne à environ 30 kilomètres de Melun et à environ 75 kilomètres de Paris.

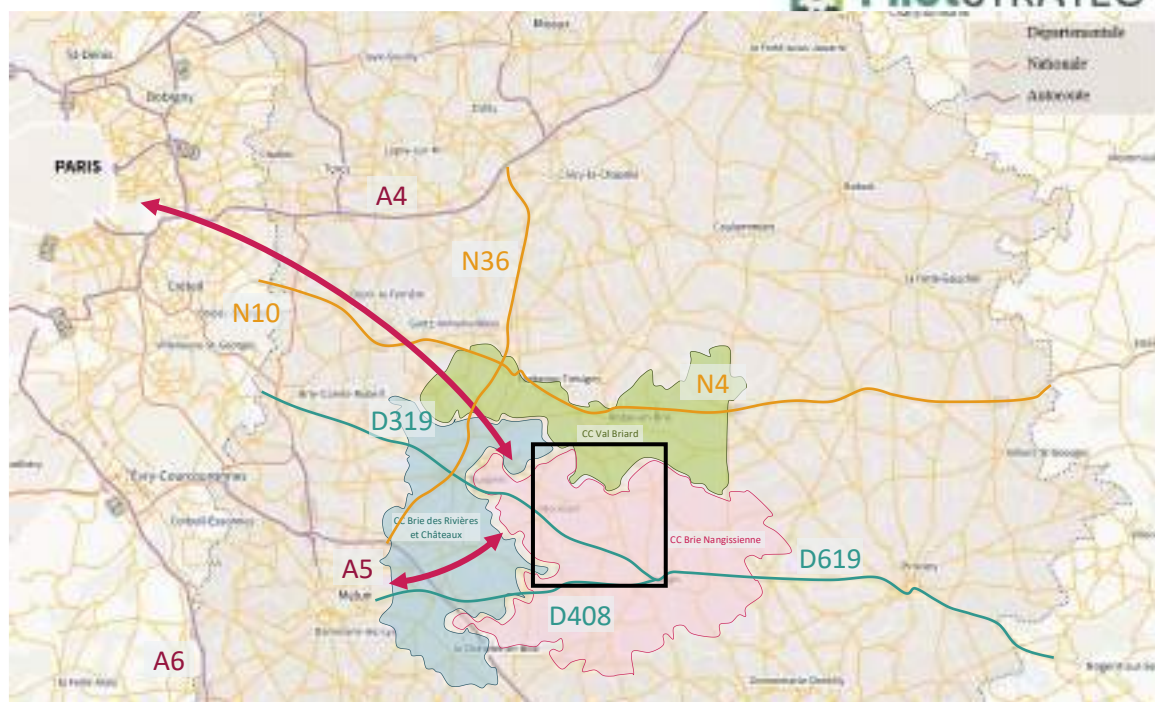


Figure 3-37 : Contexte géographique du périmètre

Le territoire bénéficie au sud de la proximité de l'autoroute A5, qui relie Troyes à Paris en passant par Melun. En limite nord et nord-ouest, il est également desservi par la route nationale 4 et la route nationale 36. La desserte interne de la Communauté de Communes (CC) de la Brie Nangissienne repose sur un maillage de routes départementales, dont la départementale 619, axe structurant est-ouest, et la départementale 408 qui assure la liaison vers Melun.

3.5.3 Etat des lieux de la situation économique et sociale à l'échelle du périmètre

3.5.3.1 Contexte démographique

Avant 2000, la CC de la Brie Nangissienne connaissait une croissance démographique soutenue. Depuis le début des années 2000, cette dynamique s'est nettement ralentie. Le taux de croissance annuel moyen entre 2016 et 2022 était de 0,4 % contre 1,4% entre 1990 et 1999 et même de 2,2% entre 1982 et 1990.

La population de la CC de la Brie Nangissienne était de 21 650 habitants en 1990, de 25 400 habitants en 2006 et de 28 330 en 2022. Les communes les plus peuplées sont Nangis (8 885 habitants), Mormant (5 280 habitants) et Verneuil-l'Étang (3 210 habitants). La commune de Grandpuits-Bailly-Carrois compte quant à elle 1 015 habitants.

La population des communes de la Communauté de Communes du Val Briard intégrées au périmètre d'étude est d'environ 4 670 habitants dont 1 500 pour la commune de Courpalay, 990 pour la commune de Bernay et 850 pour la commune de Pécy.

La population des communes de la Communauté de Communes Brie des Rivières et Châteaux intégrées au périmètre d'étude est d'environ 1 480 habitants dont 940 habitants pour la commune de Bombon.

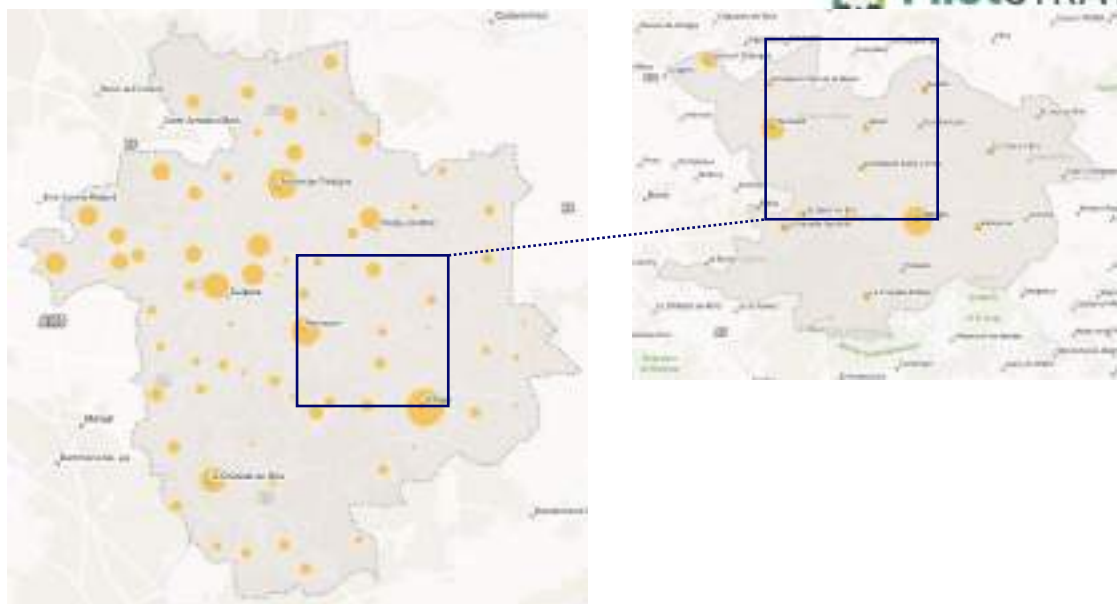


Figure 3-38 : Population par commune (INSEE, 2022)

A noter que les secteurs des communes de Bernay-Vilbert, Voinsles et Pécly (Communauté de Communes du Val Briard), ainsi que de Bombon, Argentières et Beauvoir (Communauté de Communes Brie des Rivières et Châteaux), incluses dans le périmètre d'étude, sont principalement constituées d'espaces agricoles et forestiers.

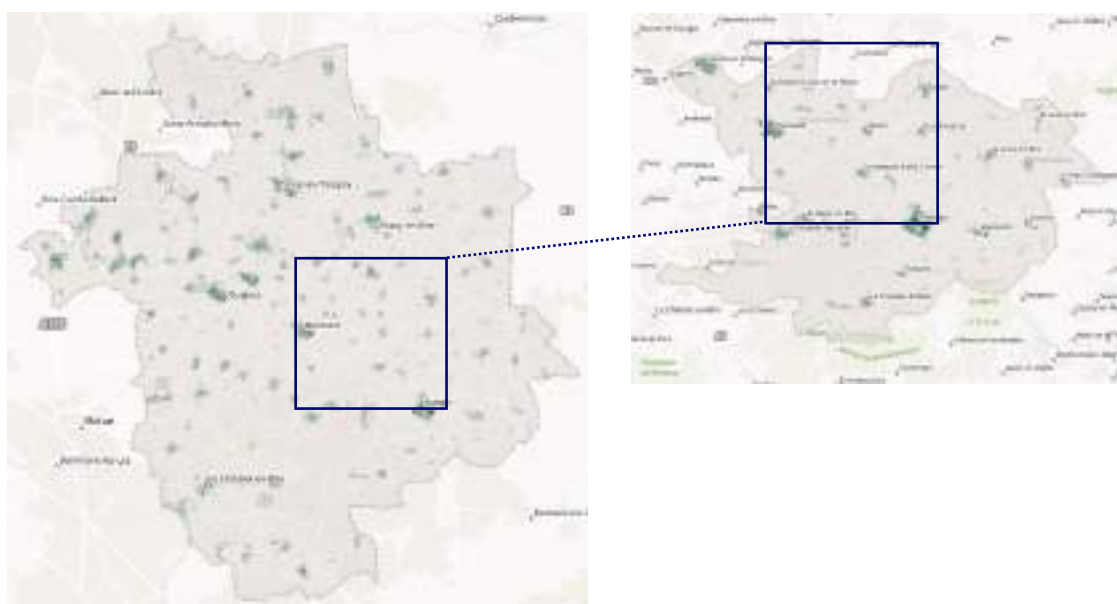


Figure 3-39 : Population par commune - données carroyées (INSEE, 2022)

La structure par âge de la population de la Brie Nangissienne et des trois communes comprises dans le périmètre d'étude met en évidence un vieillissement de la population. La part des jeunes de 0-14 ans et celle des 15-29 ans diminue légèrement entre 2011 et 2022. Dans le même temps, les tranches d'âge plus âgées progressent: les 60-74 ans passent d'environ 12 % en 2011 à plus de 14 % en 2022, et les 75 ans et plus de 5,5 % en 2011 à près de 7 % en 2022. La part des 30-44 ans reculent également entre 2011 et 2022.

Ces évolutions traduisent un vieillissement de la population, marqué par une baisse relative des jeunes et une augmentation continue des seniors.

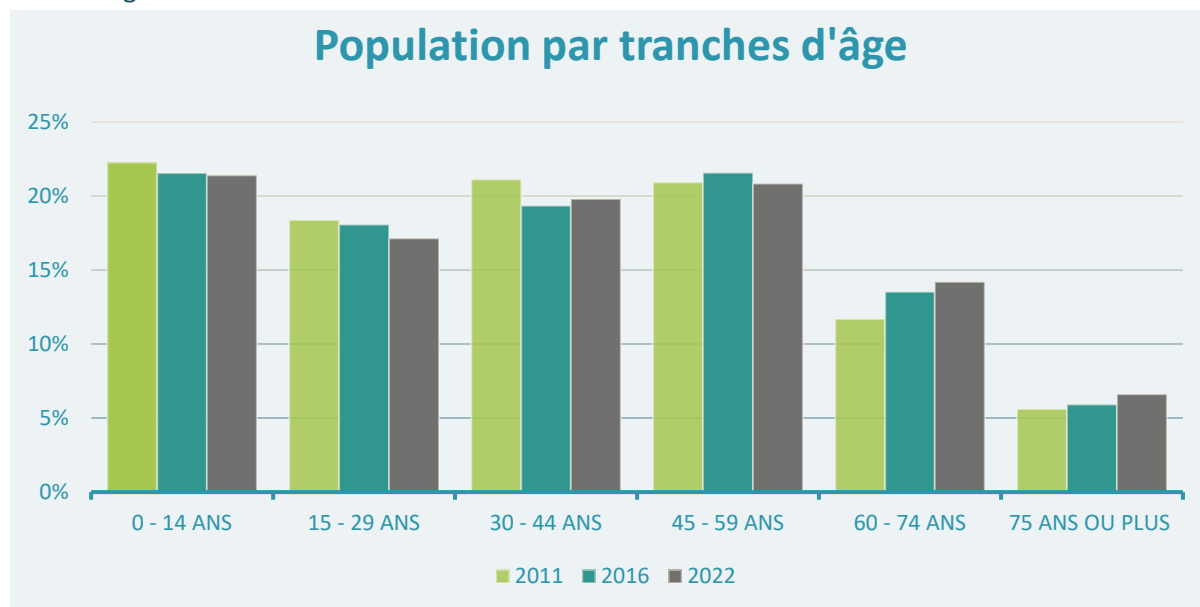


Figure 3-40 : Population par tranches d'âge (INSEE, 2022)

3.5.3.2 Contexte économique et de l'emploi

3.5.3.2.1 Types d'activités

La population au sein du périmètre d'étude se caractérise par une forte proportion d'actifs ayant un emploi, environ 70 %. Ce taux est légèrement supérieur à la moyenne départementale et nationale. La part de chômeurs est à l'inverse légèrement inférieure à celle observée en Seine-et-Marne et en France. Les parts d'élèves/étudiants, de retraités et d'autres inactifs sont quant à elles globalement proches de celles observées en Seine-et-Marne et en France.

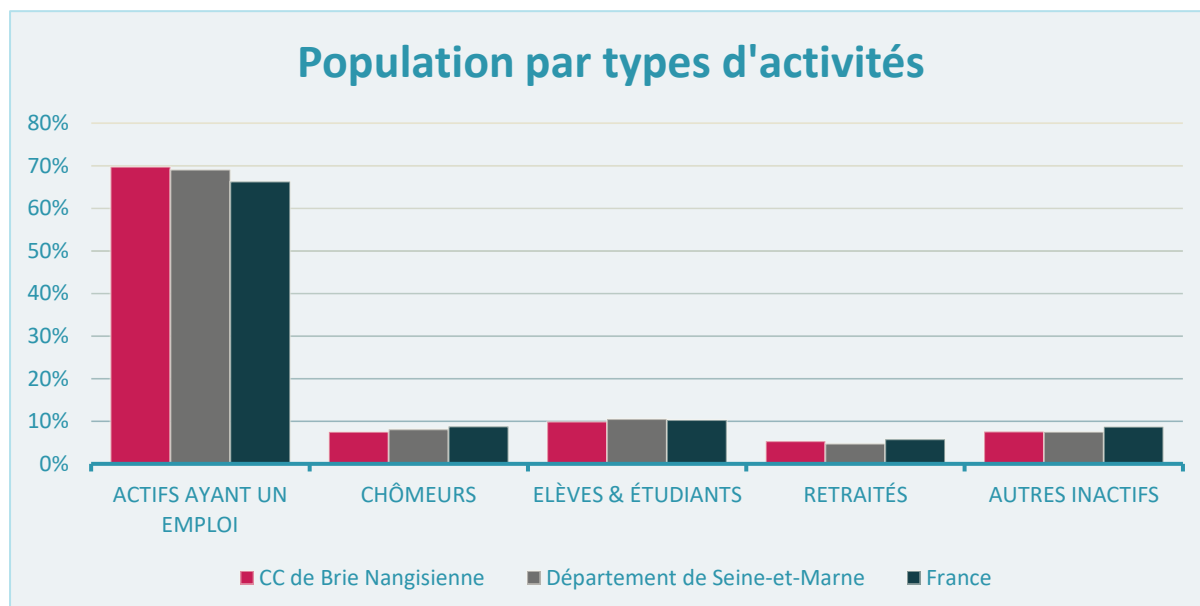


Figure 3-41 : Population par types d'activités – comparaison Seine-et-Marne et France (INSEE, 2022)

En 2022, la CC de la Brie Nangissienne présente une structure socio-économique sensiblement différente de la CC du Val Briard et de la CC Brie des Rivières et Châteaux.

La part de la population active ayant un emploi y est significativement plus faible que dans les deux autres territoires, traduisant une dynamique de l'emploi moins favorable (respectivement 69% et 75%). Cette tendance est renforcée par une part de chômeurs et d'inactifs légèrement plus élevée au sein de la CC de la Brie Nangissienne.

Cette dernière se distingue par une part plus élevée d'élèves et étudiants et à l'inverse, par une part de retraités moins élevée que la CC du Val Briard. Ces parts sont sensiblement identiques pour la CC Brie des Rivières et Châteaux.

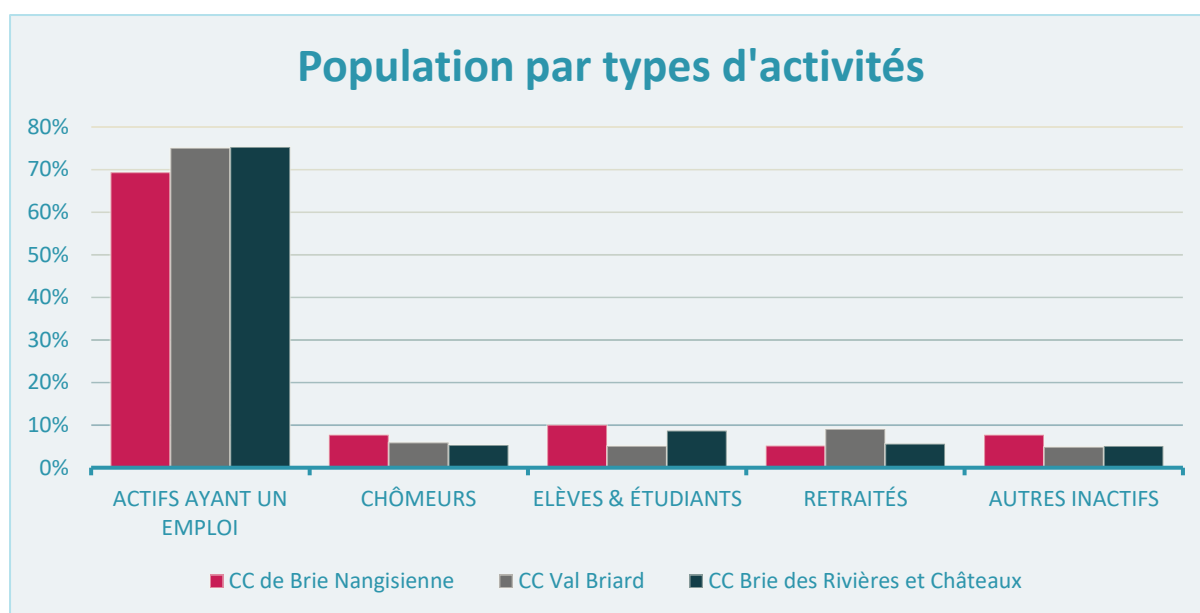


Figure 3-42 : Population par types d'activités – comparaison intercommunalités (INSEE, 2022)

3.5.3.2.2 Groupes socioprofessionnels

Ce graphique met en évidence une transformation progressive de la structure socioprofessionnelle de la population de la Communauté de Communes de la Brie Nangissienne, marquée par un vieillissement de la population (hausse des retraités) et une régression des catégories populaires (ouvriers et employés). Le territoire est également marqué par une légère augmentation artisans et des commerçants ainsi que des cadres et des professions intellectuelles supérieures. Ces évolutions traduisent à la fois un vieillissement démographique et une mutation socio-économique progressive.

La CC de la Brie Nangissienne se caractérise par une part d'ouvriers nettement supérieure à celle observée dans les deux autres intercommunalités. Cette tendance témoigne d'une orientation industrielle du territoire. La part d'employés y est également plus importante.

La proportion de cadres et professions intellectuelles supérieures, de professions intermédiaires et de commerçants y est à l'inverse la plus faible qu'au sein des autres intercommunalités.

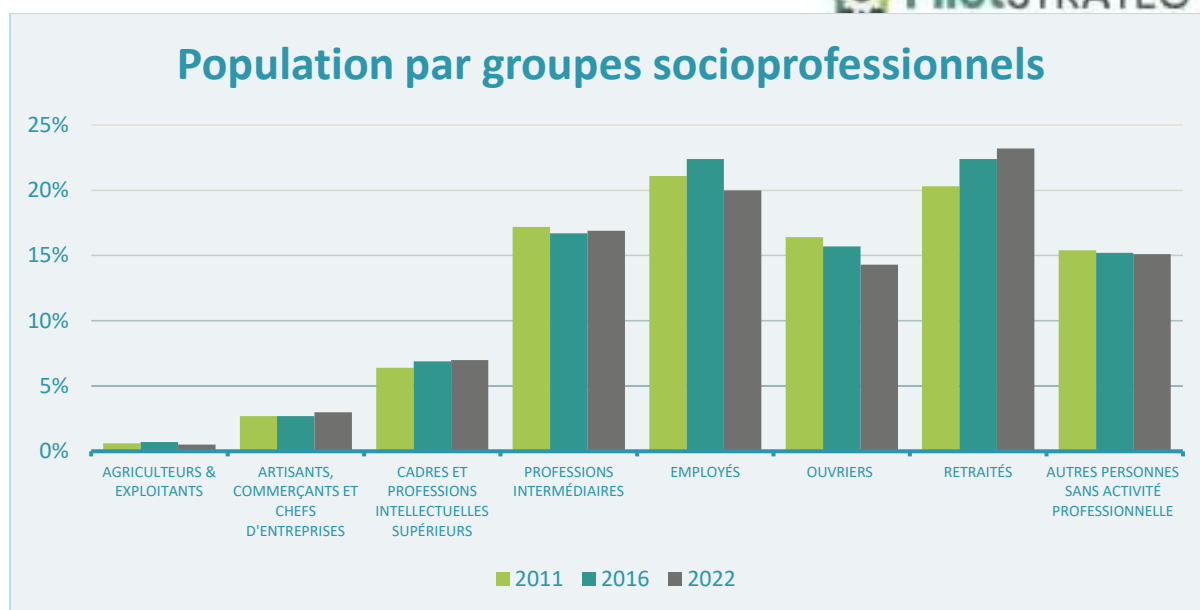


Figure 3-43 : Population par groupes socioprofessionnels – évolution (INSEE, 2022)

En ce qui concerne les retraités, la CC Brie Nangissienne affiche la proportion la plus importante des trois intercommunalités, confirmant une présence significative de populations âgées sur le territoire. La part des personnes sans activité professionnelle y est également plus élevée.

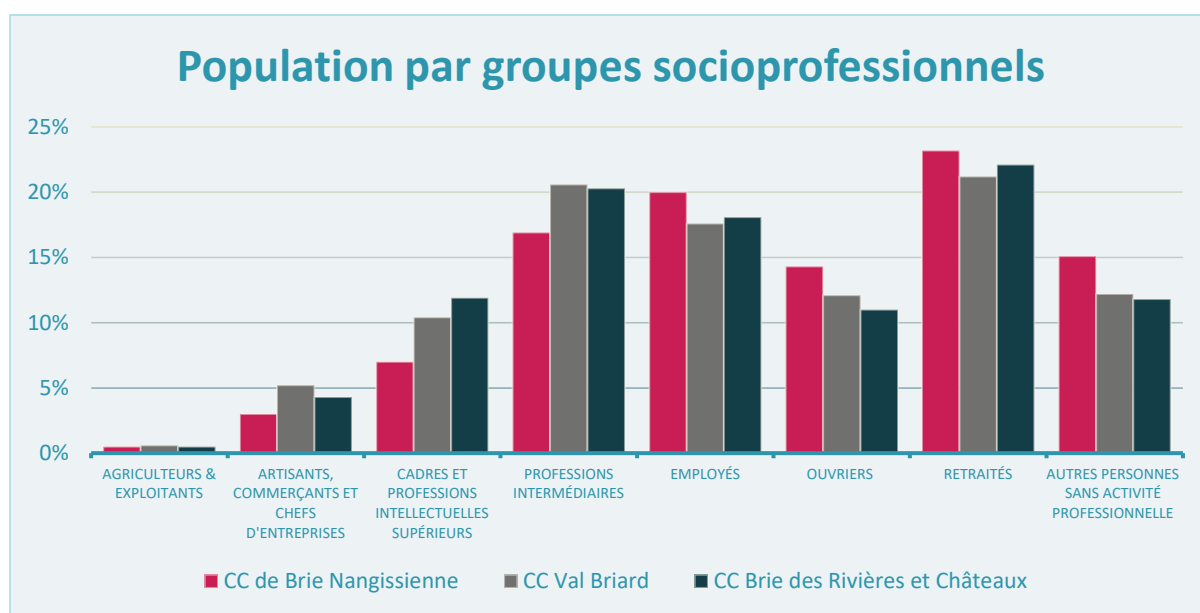


Figure 3-44 : Population par groupes socioprofessionnels - comparaison intercommunalités (INSEE, 2022)

3.5.3.2.3 Secteurs d'activités

Les secteurs du commerce, transports et services divers représentent la part la plus importante des emplois, avec une progression de près de 3 % entre 2011 et 2016, puis une stabilisation en 2022. Ce secteur confirme ainsi son rôle moteur dans l'économie locale, reflet d'une tertiarisation accrue de l'emploi. Le secteur de l'administration publique, de l'enseignement, de la santé et de l'action sociale reste aussi fortement représenté, avec une part proche de 30 % depuis 2011. On observe une légère

baisse entre 2011 et 2016, suivie d'un redressement en 2022. Le secteur de l'industrie maintient une stabilité autour de 20 % des emplois entre 2011 et 2022.

À noter qu'entre 2011 et 2016, le nombre d'emplois est resté relativement stable avec environ 7 000 emplois recensés sur le territoire en 2011 contre 6 750 en 2022. Cette baisse du nombre d'emplois témoigne d'une légère diminution de l'activité économique locale ces dernières années.

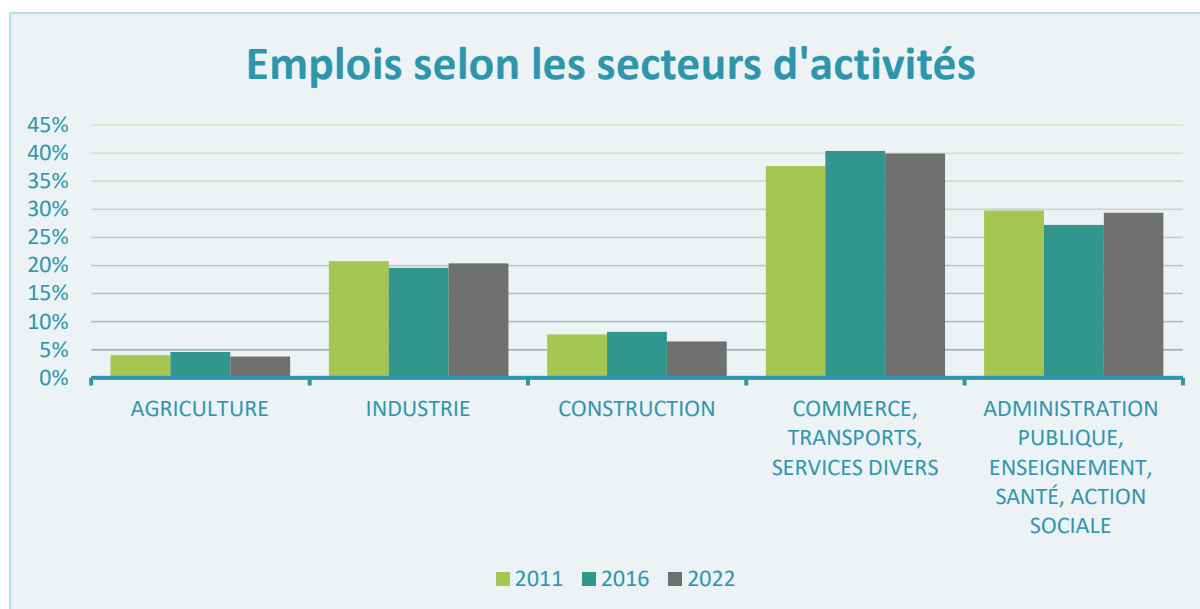


Figure 3-45 : Emplois selon les secteurs d'activités - évolution (INSEE, 2022)

Comme mentionné précédemment, avec environ 40 % des emplois, le secteur du commerce, des transports et des services divers constitue le principal secteur d'emploi de la CC de la Brie Nangissienne. Cette part est comparable à celle de la CC Brie des Rivières et Châteaux mais inférieure à celle du Val Briard, où ce secteur représente plus 50 % des emplois.

La CC de la Brie Nangissienne se distingue par une part des emplois industriels nettement supérieure à celui observé dans les deux autres intercommunalités, notamment pour la Communauté de Communes Val Briard où la part n'est que de 9 %.

La fonction publique et les secteurs médico-sociaux et éducatifs (administration, santé, enseignement, action sociale) représentent environ 30 % des emplois au sein de la CC de la Brie Nangissienne, un niveau équivalent à celui des autres intercommunalités. C'est également le cas pour l'agriculture, qui représente environ 3 % des emplois pour une occupation de 80 % des sols.

Représentant environ 7 % des emplois, le secteur de la construction est moins important au sein de la CC de la Brie Nangissienne que dans les deux autres intercommunalités où la part s'élève à près de 9 % pour la CC Val Briard et à près de 13 % pour la CC Brie des Rivières et Châteaux.

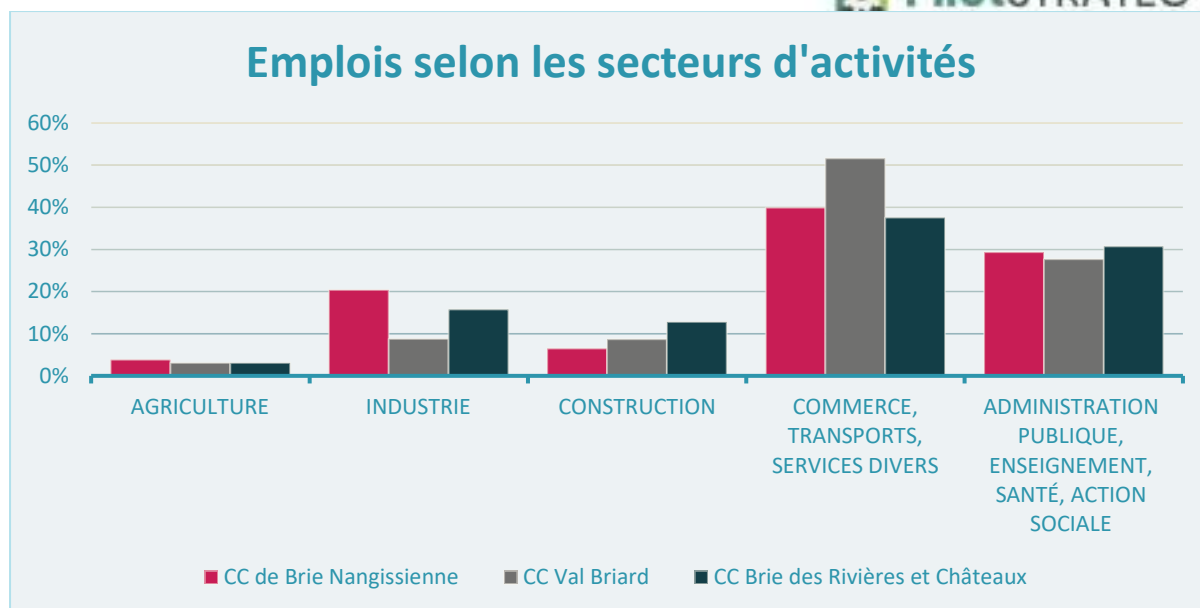
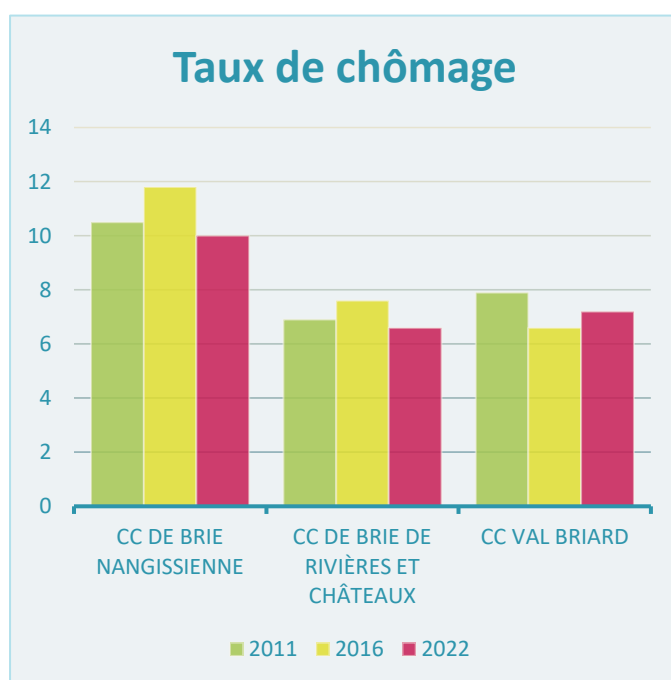


Figure 3-46 : Emplois selon les secteurs d'activités - comparaison intercommunalités (INSEE, 2022)

3.5.3.2.4 Taux de chômage

Le taux de chômage au sein de la CC de la Brie Nangissienne est beaucoup plus élevé qu'au sein des deux autres communautés de communes. Au sein de la CC de la Brie Nangissienne, le taux de chômage a connu une augmentation entre 2011 et 2016, passant de 10,5 % à près de 12 %. En 2022, le taux de chômage a diminué pour atteindre un niveau légèrement inférieur à celui de 2011.



Au sein des deux autres communautés de communes, le taux de chômage a également légèrement diminué entre 2011 et 2022. Il est de 6,6 % pour la CC Brie des Rivières et Châteaux et de 7,2 % pour la CC Val Briard.

Figure 3-47 : Taux de chômage

3.5.3.2.5 Synthèse

Les trois intercommunalités présentent un nombre d'emplois globalement comparable, mais elles se distinguent sur plusieurs indicateurs relatifs à l'emploi et à la mobilité des actifs. La CC Brie des Rivières et Châteaux se caractérise par un nombre d'actifs ayant un emploi résidant dans la zone, plus élevé que dans les deux autres intercommunalités, ce qui s'explique principalement par une population plus importante. Rapporté à la population totale, cela représente environ 50 % pour la CC Brie des Rivières et Châteaux, un taux équivalent à celui de la CC du Val Briard, contre 44 % pour la CC de la Brie Nangissienne.

Tableau 3-18 : Tableau de synthèse du contexte économique et de l'emploi (INSEE – 2022)

	CC Brie Nangissienne	CC Val Briard	CC Brie des Rivières et Châteaux
Population	28 330	29 261	40 561
Superficie (km²)	294	333	366
Densité (habitants/km²)	96	88	111
Nombre d'emplois dans la zone	6 732	7 755	7 773
Actifs ayant un emploi résidant dans la zone	12 648	14 505	20 041
Indicateur de concentration d'emploi*	53,2%	53,5%	38,8
Part des actifs travaillant dans la commune de résidence	15,6%	13,3%	11,4%
Taux de chômage	10%	7,2%	6,6%
Taux de motorisation	88,6%	94,5%	95,4%

*L'indice de concentration de l'emploi mesure le rapport entre le nombre d'emplois total proposés sur un territoire et le nombre d'actifs occupés (actifs en emploi) qui y résident.

L'indice de concentration d'emplois révèle un déséquilibre entre l'offre d'emplois locaux et la population active occupée. Il atteint environ 53 % pour les CC de la Brie Nangissienne et du Val Briard, contre 39 % pour la CC Brie des Rivières et Châteaux. Ces valeurs, nettement inférieures à 100 %, indiquent que le territoire d'étude est marqué par une fonction résidentielle importante.

Sur le plan socio-économique, la CC de la Brie Nangissienne présente un taux de chômage plus élevé, tandis que les taux de motorisation sont supérieurs dans les CC du Val Briard et Brie des Rivières et Châteaux, traduisant un recours plus important à la voiture individuelle, sans doute en lien avec une moindre accessibilité aux pôles d'emploi.

3.5.3.3 Activités économiques

Malgré son caractère rural, le territoire accueille un tissu économique structuré, en particulier autour du secteur industriel. Celui-ci s'appuie sur la présence de nombreuses zones d'activités économiques dont la zone d'activités de la future bioraffinerie TotalEnergies localisée sur la commune de Grandpuits-Bailly-Carrois qui s'étend sur environ 220 hectares. La conversion de cette raffinerie en bioraffinerie est précisée dans la suite du rapport (paragraphe 8.4.1.2).

D'autres ZAC sont également présentes sur le territoire. Il s'agit de la ZAC Nangisactipôle à vocation industrielle, commerciale et artisanale et la zone industrielle de Mormant, orientée vers l'industrie, la logistique et l'artisanat.

Plusieurs grands employeurs industriels sont présents sur le territoire, jouant un rôle majeur dans l'emploi local: la bioraffinerie de Grandpuits, qui emploie 410 personnes, l'usine LAT Nitrogen à Grandpuits, spécialisée dans la fabrication d'engrais, avec 206 employés et la sucrerie Lesaffre à Nangis, qui compte 160 salariés.

3.5.3.4 Mobilité pour les déplacements domicile-travail

Le mode de déplacement dominant est la voiture, utilisée par 71 % des habitants. Cette part extrêmement élevée reflète une forte dépendance à l'automobile, caractéristique des territoires périurbains ou ruraux où l'offre de transports alternatifs est souvent limitée. Les transports en commun représentent 20 % des déplacements, ce qui constitue le second mode de déplacement, mais reste très inférieur à la voiture. Cela peut traduire une offre existante mais insuffisante, ou un usage contraint. A l'échelle du département de Seine et Marne, la part modale de la voiture est de 63 % et celle des transports en commun est de 27 %. Cette comparaison traduit une dépendance plus marquée à la voiture dans la CC de la Brie Nangissienne, ainsi qu'un moindre recours aux transports collectifs, probablement en lien avec une desserte moins dense et une accessibilité plus limitée aux réseaux de transport en commun. La part modale des mobilités actives est relativement faible (6 %). Ces chiffres indiquent que les conditions de déplacement à pied ou à vélo sont probablement peu favorables, que ce soit en raison des distances ou du manque d'infrastructures sécurisées.

Parts modales pour se rendre au travail

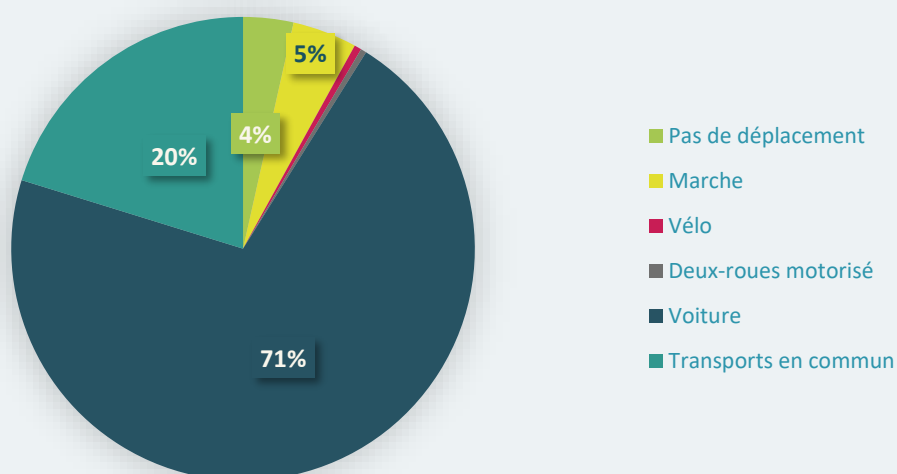


Figure 3-48 : Parts modales - mobilité professionnelle (INSEE, 2022)

3.5.3.5 Définition de la « situation de référence » prospective

Les CC de la Brie Nangissienne, du Val Briard et des Rivières et Châteaux ne sont couvertes ni par un Plan Local d'Urbanisme intercommunal, ni par un Schéma de Cohérence Territorial.

La définition de l'évolution du territoire d'étude repose sur le Schéma Directeur de la Région Île-de-France. Ce dernier, adopté en 2024, est le document de référence pour la planification stratégique afin d'encadrer la croissance urbaine, l'utilisation de l'espace et de favoriser le rayonnement international de la région. Il a pour objectif d'encadrer la croissance urbaine et la préservation des zones rurales et naturelles, de déterminer la localisation des grandes infrastructures de transports et des grands équipements ainsi que de favoriser le rayonnement international de la région.

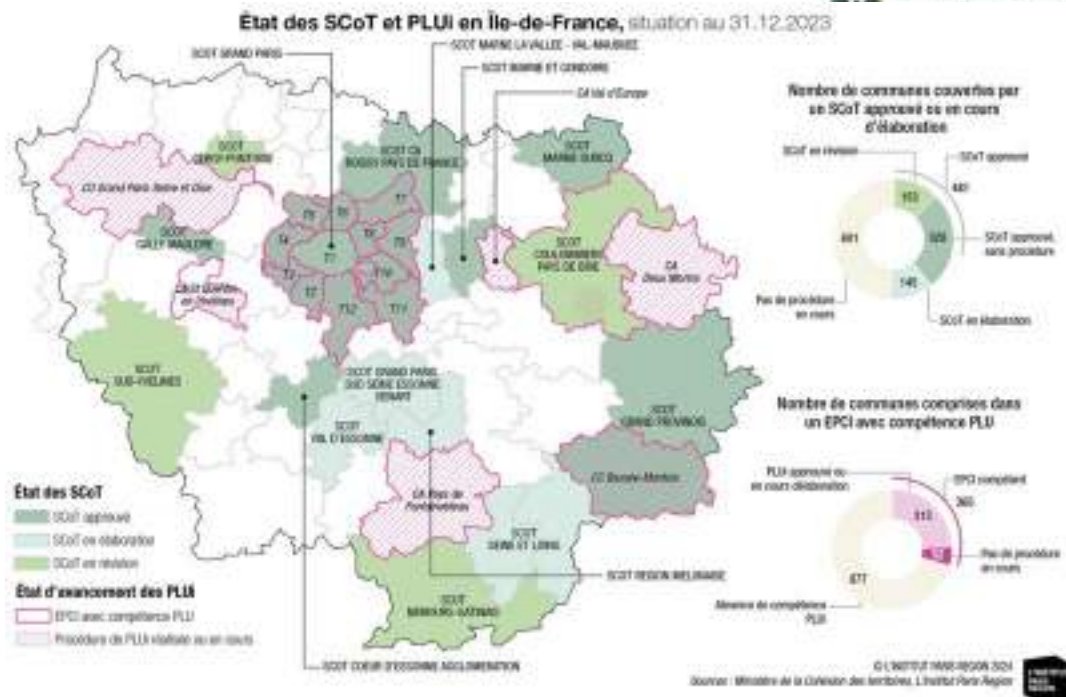


Figure 3-49 : Etat des SCoT et PLUi en Île-de-France (Institut Paris Région, 2024)

3.5.3.6 Evolution économique

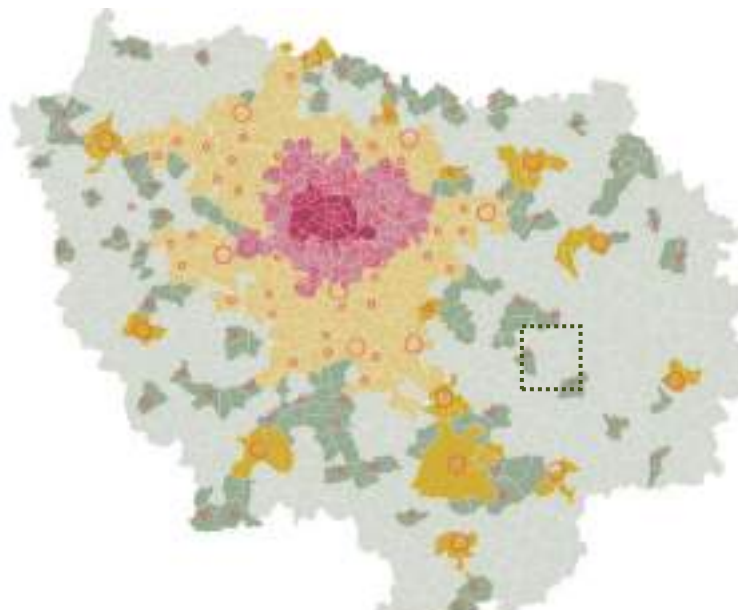


Figure 3-50 : Périmètre couvert par le SDRIF-E

Dans le cadre de sa stratégie d'aménagement durable, le SDRIF-E vise à stopper l'étalement urbain afin de préserver les espaces agricoles, naturels et forestiers. Il encourage également le développement de l'économie de proximité, vecteur de dynamisme local et de cohésion sociale. L'organisation du rabattement sur les gares constitue un autre levier essentiel pour renforcer l'attractivité de ces territoires tout en favorisant l'usage des transports en commun.

Le territoire d'étude est composé de communes rurales et de deux petites villes : Nangis et Mormant.

Pour les petites villes, la stratégie d'attractivité se traduit par un objectif de densification raisonnée, favorisant le développement de logements, d'activités économiques et d'équipements publics dans une logique de revalorisation du cadre de vie.

Pour les communes rurales, l'enjeu est double: préserver le cadre de vie rural tout en améliorant l'accès aux fonctions essentielles de la vie quotidienne. Cela passe par la mise en œuvre de solutions

innovantes en matière de mobilité, d'accès à l'emploi, aux commerces et aux services. Le SDRIF-E encourage ainsi le développement de nouvelles offres de transport adaptées aux spécificités de ces territoires peu denses, afin de renforcer leur inclusion et leur résilience.



Figure 3-51 : Développer l'indépendance productive régionale (SDRIF-E)

Ces orientations traduisent une volonté forte de garantir un aménagement équilibré du territoire francilien, en conciliant attractivité, durabilité et qualité de vie.

Le SDRIF-E identifie des secteurs d'urbanisation préférentielle devant répondre à des objectifs de densité, qualité urbaine et durabilité. Ces secteurs doivent être prioritairement desservis par les transports en commun, avec une ouverture à l'urbanisation possible sur des périmètres d'environ 10 hectares, en fonction des besoins à court et moyen terme. Les projets doivent viser une densité minimale de 45 logements par hectare, ou une densité au moins égale à celle des secteurs résidentiels existants lorsque celle-ci est supérieure.

La valorisation des zones bien desservies par les transports collectifs est un enjeu majeur: seuls les secteurs situés dans un rayon de 2 kilomètres autour d'une gare existante ou prévue peuvent être considérés comme éligibles. Cette logique vise à optimiser l'accessibilité et limiter l'étalement urbain.

À l’horizon 2040, une extension de 2 % de la superficie de l’espace urbanisé communal de référence est envisageable pour chaque polarité. Cette orientation vise à renforcer les polarités existantes et à structurer un développement urbain équilibré.

Par ailleurs, le SDRIF-E insiste sur le renforcement de l'attractivité des sites d'activités d'intérêt régional, en accueillant des activités industrielles, des fonctions supports, des grands services urbains et des installations d'économie circulaire. Le maintien de l'activité économique passe également par un environnement adapté à leur fonctionnement, incluant notamment le maintien de leur accessibilité.

Enfin, les orientations du Projet Vélo Île-de-France et la nécessité de préserver les sites multimodaux existants témoignent d'une volonté de favoriser une mobilité durable, intégrée à la stratégie d'aménagement du territoire.

Deux projets routiers sont localisés à proximité du territoire d'étude. Il s'agit du réaménagement de la RD1036 pour améliorer la connectivité entre l'A4 et l'A5 et soutenir le développement économique et de la modernisation de la RD1004 pour sécuriser les déplacements et renforcer l'accessibilité locale.



Figure 3-52 : Projets d'infrastructures (SDRIF-E)

3.5.3.6.1 Orientations du SDRIF-E

Bien que les projets économiques et industriels soient relativement limités au sein du territoire d'étude, les principales orientations du SDRIF-E sont:

- De sanctuariser la bioraffinerie, reconnue comme un site d'activités d'intérêt régional, afin de garantir la pérennité de ses fonctions économiques stratégiques;
- Favoriser l'urbanisation au sein des secteurs identifiés à Nangis pour favoriser le développement résidentiel;
- Maintenir les sites multimodaux à Nangis et à proximité de la bioraffinerie pour renforcer l'intermodalité et soutenir la logistique durable;
- Moderniser et requalifier les zones d'activités existantes à Nangis et à Mormant;
- Favoriser les projets de développement autour des gares de Nangis et de Mormant pour favoriser le développement de centralités et améliorer l'accessibilité en transports en commun.

3.5.3.6.2 Conversion de la raffinerie en bioraffinerie

La conversion de la raffinerie de Grandpuits vise à transformer le site en une plateforme industrielle « zéro pétrole », tournée vers les énergies renouvelables et le recyclage, notamment à travers la production de carburants d'aviation durables (SAF) et le recyclage chimique des plastiques.

Si ces deux volets structurants sont maintenus et entrent dans une phase de réalisation concrète, les ambitions initiales ont été revues à la baisse. Plusieurs projets complémentaires, comme le recyclage mécanique du plastique, la production de biométhane, et l'extension de la capacité de production de SAF, sont aujourd'hui gelés, entraînant des incertitudes sur une partie des emplois prévus.

Ce recentrage reflète une adaptation du projet au contexte économique et international, tout en maintenant l'objectif principal de décarbonation du site.

3.5.3.6.3 Activité de l'usine LAT Nitrogen

Des incertitudes persistent concernant les activités futures de l'usine LAT Nitrogen.

L'usine a en effet récemment annoncé en janvier 2025, l'arrêt de la production d'ammoniac sur le site de l'usine de Grandpuits, invoquant un manque de viabilité économique. Cette activité concerne 80 salariés [7].

3.5.3.7 Evolution démographique

L'évolution démographique au sein du secteur d'étude repose sur les données de l'INSEE présentées précédemment et sur l'atlas réalisé par le conseil département de la Seine-et-Marne (« La Seine-et-Marne à la loupe », 10/2020).

D'après ce rapport, l'estimation de l'évolution démographique au sein du département de Seine-et-Marne se base à la fois sur le modèle de projections démographiques OMPHALE et sur l'étude « évolution conjointe du parc de logements et de la population en Île-de-France – deux scénarios à l'horizon 2035 ».

Le scénario issu du modèle OMPHALE prend en compte les naissances, les décès et les migrations. Ce « scénario bas », prévoit la construction de 6 300 nouveaux logements par an en Seine-et-Marne pour répondre aux tendances actuelles de natalité, migrations et desserrement des ménages. D'après ce scénario, le nombre d'habitants de la Seine-et-Marne serait de 1 556 000 habitants en 2035.

Le « scénario haut », basé sur les objectifs fixés par la loi du « Grand Paris », prévoit quant à lui la construction de 8 400 nouveaux logements par an en Seine-et-Marne. La construction de ces logements doit permettre de favoriser la rotation des logements en augmentant la vacance afin de freiner le départ des jeunes ménages et des familles et de faciliter l'accès au logement pour les jeunes et les étudiants arrivant dans la région. D'après ce scénario, le nombre d'habitants de la Seine-et-Marne serait de 1 615 000 habitants en 2035.

En considérant une croissance de population linéaire jusqu'en 2035, le taux de croissance annuel moyen selon les deux scénarios est de 0,57 % pour le « scénario bas » et de 0,79 % pour le « scénario haut ». En se basant sur la population de la communauté de communes de Brie Nangissienne et des 3 communes intégrées au périmètre d'étude et sur les taux de croissance annuel moyen, la population au sein de la communauté de communes en 2035 sera d'environ 33 250 habitants pour le « scénario bas » et d'environ 34 210 habitants pour le « scénario haut ».

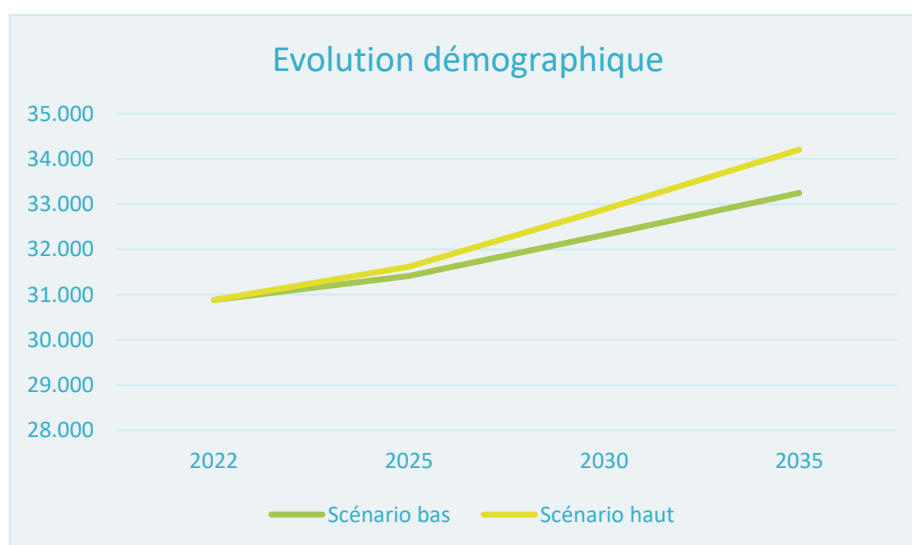


Figure 3-53 : Estimation de l'évolution de la population

3.5.3.8 Synthèse

Tableau 3-19 : Synthèse de la situation économique et démographique

Situation économique	Situation actuelle : • Plusieurs zones industrielles et d'activités • Activités industrielles majeures dont la bioraffinerie, l'usine LAT Nitrogen et la sucrerie Lesaffre Situation prospective : • Conversation en cours de la raffinerie en bioraffinerie • Incertitude sur l'avenir des activités de l'usine LAT Nitrogen • Incertitudes sur l'implantation de nouvelles activités industrielles et économiques
Situation démographique	Situation actuelle : • Vieillessement de la population • Importance du secteur industriel • Dominance de la fonction résidentielle Situation prospective : • Evolution démographique limitée en cohérence avec les orientations du SDRIF-E • Volonté de freiner le départ des jeunes ménages et des familles et de faciliter l'accès au logement pour les jeunes et les étudiants • Environ 3 000 habitants supplémentaires d'ici 2035

3.5.4 Evaluation de l'impact du projet envisagé sur le territoire

3.5.4.1 Intérêt scientifique pour la connaissance du sous-sol

Le projet vise à améliorer la compréhension scientifique de l'impact d'un projet pilote à l'échelle industrielle d'injection de CO₂ dans le Dogger du Bassin parisien. L'intérêt scientifique du projet repose sur l'acquisition prévue de données spécialisées avant l'injection de CO₂ et sur le programme de surveillance pendant et après l'injection de CO₂.

La succession et la nature des couches géologiques du Bassin parisien étant déjà bien caractérisées, seules des opérations de diagraphie conventionnelles, telles que des diagraphies du diamètre au caliper, gamma-ray, soniques et CBL-VDL, sont prévues dans la partie supérieure des puits, au-dessus de la roche couverture, afin de garantir l'intégrité des aquifères sensibles.

Des acquisitions de diagraphies spécialisées telles que des mesures de densité, des mesures acoustiques multipolaires, des mesures spectrales gamma, des mesures USIT, des échantillonnages de fluides et des carottages sont prévues dans la roche couverture et la formation de stockage afin d'améliorer les connaissances sur leurs caractéristiques pétrophysiques avant l'injection de CO₂. Des essais d'injection de saumure sont également prévus avant l'injection de CO₂ afin de vérifier la capacité d'injection. Ces mesures impliqueront des expériences supplémentaires en laboratoire et des analyses de données afin de renforcer les connaissances sur la formation de stockage et sa roche couverture.

Le programme de surveillance prévu à ce stade comprend:

- des mesures continues de la pression et de la température au fond du puits;
- l'acquisition continue de données sur la température et les contraintes à l'aide de fibres optiques le long du puits;
- des mesures continues du débit, de la pression et de la température au niveau de la tête de puits ainsi qu'à la barrière d'entrée de l'usine afin de surveiller les conduites de surface
- des profils sismiques verticaux réguliers afin d'évaluer l'extension du panache de CO₂ dans la couche réservoir.
- des mesures de la sismicité induite par l'injection et de la déformation en surface (satellite, locale) afin de confirmer l'absence d'impact.

3.5.4.2 *Intérêt scientifique pour les connaissances humaines et sociales*

3.5.4.2.1 *Acceptation sociale du projet*

L'analyse de l'acceptabilité sociale du projet s'appuie sur deux sources principales:

- Une enquête réalisée pour le compte du projet PilotSTRATEGY par un organisme de sondage d'opinion de juillet à septembre 2022;
- Une revue de presse par les auteurs de l'étude (voir section 3.6.3.3) portant sur les mois de février à juin 2025;

3.5.4.2.1.1 *Enquête d'opinion*

L'enquête d'opinion a été conduite du 28 juillet au 1^{er} septembre 2022 sur les communes suivantes : Argentières, Aubepierre-Ozouer-le-Repos, Bernay-Vilbert Bombon Bréau, Clos-Fontaine, Courpalay, Courtomer, Fontenailles, Gastins, Grandpuits-Bailly-Carrois, La Chapelle-Gauthier, La Chapelle-Iger, Mormant, Nangis et Saint-Ouen-en-Brie. L'enquête est également conduite en Espagne, au Portugal, en Pologne et en Grèce sur les autres sites du projet PilotSTRATEGY.

Les objectifs de l'enquête d'opinion sont de recueillir la perception et les attentes des habitants vis-à-vis du projet pilote de stockage souterrain de CO₂. Elle permet de mesurer son niveau d'acceptation et a permis d'identifier les critères déterminants pour que celui-ci soit jugé acceptable. L'enquête avait également pour but de mieux caractériser la connaissance du public sur le procédé de captage et stockage du CO₂, d'évaluer les craintes et bénéfices perçus, ainsi que de repérer les conditions et mesures susceptibles de favoriser l'adhésion locale.

Les principaux résultats de l'enquête publique de l'été 2022 sont présentés ci-dessous :

- **Attachement au cadre de vie ainsi qu'au patrimoine naturel et culturel** : plus de la moitié des répondants résident dans la zone depuis plus de 10 ans. Environ 80% déclarent être fortement attachés à leur lieu de vie ainsi qu'au patrimoine naturel et culturel ;
- **Forte préoccupation du changement climatique mais importance économique des industries à forte intensité énergétique** : 77 % jugent le changement climatique comme grave ou très grave tandis que 75 % reconnaissent l'importance économique des industries à forte intensité énergétique ;
- **Connaissances sur le dispositif de captage et du stockage du carbone relativement limitées** : 25 % ne savent pas à quoi cela correspond, 50 % en ont déjà entendu parler mais savent pas très bien à quoi cela correspond tandis que seulement 25 % connaissent le dispositif ;
- **Un dispositif jugé utile** : 70 % estiment que c'est une bonne ou très bonne option pour atténuer le changement climatique et 62 % considèrent justifiée ou très justifiée la décision d'implanter un stockage souterrain de CO₂ dans leur secteur ;

- **Un projet jugé acceptable et bénéfique localement** : 73 % jugent le projet de captage et de stockage du carbone acceptable. Une majorité anticipe des impacts positifs sur l'économie, l'environnement et la société. Une majorité considère également que le stockage de carbone aurait un impact positif sur la santé. De plus, la reconnaissance sociale pour contribuer à l'atténuation du changement climatique constitue un levier important pour favoriser l'adhésion et la réussite du projet ;
- **L'acceptabilité du projet fortement liée à la localisation du site de stockage** : plus le site de stockage est proche de l'usine, plus il est perçu favorablement. A l'inverse, plus le site de stockage est éloigné de l'usine plus le désaccord s'accroît.
La proximité avec les habitations est également un critère fondamental : 40 % jugent inacceptable de vivre à proximité immédiate d'un site. Les distances jugées acceptable ne sont pas mentionnées ;
- **Des conditions essentielles pour renforcer l'acceptabilité du projet** : des compensations économiques aux communes, la création de comités consultatifs municipaux et la participation active des citoyens aux décisions sont jugées importantes pour l'acceptabilité du projet.

3.5.4.2.1.2 Revue de presse

Les articles de presse permettent d'identifier les principales inquiétudes, interrogations ou oppositions exprimées par les riverains. Ils permettent d'apporter des compléments qualitatifs aux données issues de l'enquête.

La revue de presse repose sur trois articles publiés en février et mars 2025 par les médias Le Parisien, France Info, et Actu.fr ([8, 9 ,10]).

D'après ces articles de presse, pour certains habitants et les membres de l'association pour la protection de l'environnement du Val du Ru d'Ancœur (APEVRA), le projet d'un stockage géologique de CO₂ commercial soulève plusieurs inquiétudes majeures. Parmi elles figurent le risque de pollution des sols et des nappes phréatiques, les risques sécuritaires, notamment en cas d'attentat ou de conflit, ainsi que le manque de recul sur le procédé. Le coût élevé du projet de pilote d'injection est également régulièrement dénoncé par ses opposants. Ces derniers s'interrogent plus largement sur l'utilité réelle de la démarche. D'une part, ils considèrent que cette solution pourrait encourager la poursuite des émissions de CO₂ plutôt que leur réduction effective. D'autre part, le fait d'acheminer du CO₂ depuis d'autres régions de France, voire d'Europe, jusqu'au site de stockage constitue un frein supplémentaire à l'acceptation du projet : « ... si on transporte le CO₂ qui n'est plus produit sur place pour l'enfouir, cela n'a plus de sens » réagit Pascal Machu, coprésident de FNE77. D'après Alain Damien, membre de l'association APEVRA, les doutes de la rentabilité économique et l'utilité environnementale de l'installation sont renforcés par la conversion de la raffinerie en bioraffinerie et par l'arrêt partiel de la production de LAT Nitrogen sur le site de Grandpuits. En effet, le PDG de LAT Nitrogen, Leo Alders, a annoncé en janvier 2025 mettre fin à la production d'ammoniac sur le site [7].

3.5.4.2.1.3 Synthèse

D'après l'enquête d'opinion, le projet pilote de captage et d'enfouissement du CO₂ est globalement perçu comme utile pour réduire l'impact sur le changement climatique. Il est jugé acceptable et bénéfique localement, mais sous certaines conditions. L'une des principales attentes concerne la localisation du site de stockage par rapport au site de production du CO₂ : plus le site de stockage est proche de l'usine, plus le projet est perçu favorablement. À l'inverse, plus la distance augmente, plus

les réticences sont importantes. La proximité avec les zones d'habitation constitue également un critère de vigilance majeur pour les personnes interrogées.

Les articles de presse analysés soulignent également l'importance de la distance entre le site de production et le site de stockage, tout en faisant émerger d'autres préoccupations : le risque de pollution des sols et des nappes phréatiques, le coût global du projet, ainsi que la crainte que cette technologie ne serve à justifier la poursuite des émissions de CO₂, plutôt qu'à favoriser leur réduction à la source.

3.5.4.3 Volet économique

3.5.4.3.1 Les retombées économiques de la mise en œuvre du projet

La principale retombée économique du projet pilote réside dans la confortation d'emplois à l'échelle locale et national qu'il pourrait apporter. La méthodologie retenue permet de quantifier les retombées potentielles sur :

- **Les emplois directs** : Ce sont, par exemple pour la phase travaux, les emplois créés ou confortés par les entreprises impliquées dans le chantier.
- **Les emplois indirects** : Ce sont les emplois créés ou confortés destinés à réaliser les commandes liées à l'activité créée (ex : fourniture de béton pour les ouvrages).

Estimation préliminaire des coûts du pilote d'injection de CO₂

A ce stade des études, il est retenu l'hypothèse d'un investissement global de l'ordre de 56 millions d'euros (CAPEX+OPEX) pour le scénario principal du pilote d'injection de CO₂.

Maintien des emplois

Le nombre total d'emplois confortés par les travaux correspond à la somme des emplois directs et indirects. Afin de déterminer le nombre d'emplois directs liés aux projet pilote, nous retenons une méthodologie basée sur les statistiques nationales de l'INSEE. Il est utilisé ici les chiffres de l'investissement total par secteur d'activité du BTP (2023), de l'industrie (2023) et de l'ingénierie (2020) ainsi que le nombre de salariés en équivalent temps plein (EQTP) de ces secteurs.

Ces valeurs sont des estimations moyennes par secteur d'activité pour les emplois directs :

- **Génie civil** : 3,62 emplois.an / M€2024 HT d'investissement ;
- **Construction de réseaux et de lignes** : 4,31 emplois.an / M€2024 HT d'investissement ;
- **Services d'ingénierie** : 4,42 emplois.an / M€2024 HT d'investissement ;
- **Fabrication d'équipements** : 2,59 emplois.an / M€2024 HT d'investissement ;

L'euro n'ayant pas la même valeur en 2020 et 2023 qu'en 2025 du fait de l'inflation et étant donné que les coûts des travaux ont été établis en 2025, une conversion des données de chiffre d'affaires en euro 2025 doit être réalisée pour pouvoir appliquer correctement les ratios. A date de l'étude, les données INSEE disponibles correspondent à l'année 2024, nous retenons donc cet horizon pour la conversion des données INSEE.

Tableau 3-20 : Ratios des effets d'un investissement sur l'emploi (d'après INSEE)

Secteur d'activité INSEE	Chiffre d'affaires HT (en millions d'euros)	Année de référence	Chiffre d'affaires HT (en millions d'euros 2024)	Effectifs équivalent temps plein (EQTP)	Ratios des effets d'un investissement sur l'emploi
Ingénierie	48 833	2020	55 670	246 062	4,42 emplois.an / M€ HT
Génie civil	67 271	2023	68 616	248 143	3,62 emplois.an / M€ HT
Construction de réseaux	13 088	2023	13 350	57 566	4,31 emplois.an / M€ HT
Fabrication d'équipements	69 786	2023	71 182	184 014	2,59 emplois.an / M€ HT

Nous retenons une durée d'investissement de 2 ans, avec la répartition temporelle suivante :

Tableau 3-21 : Répartition des investissements dans le temps

	Année -2	Année -1	Début d'injection	Total
Répartition des investissements	23%	77%		
Investissement en M€ 2025	13 M€	43 M€		56 M€ 2025
Génie civil	2,5 M€			2,5 M€
Construction de réseaux	5 M€	2,5 M€		7,5 M€
Services d'ingénierie	2 M€	2,5 M€		4,5 M€
Equipements	3,5 M€	38 M€		41,5 M€

Le nombre d'emplois annuels directs confortés par les travaux est ainsi la multiplication des ratios présentés précédemment par l'investissement annuel envisagé. Les nombres sont arrondis à l'unité supérieure.

Tableau 3-22 : Nombre d'emplois annuels directs potentiellement confortés par le projet

	Année -2	Année -1
Génie civil	9	0
Construction de réseaux	22	11
Services d'ingénierie	9	11
Fabrication d'équipements	9	98
TOTAL	49	120

Sur la base des ratios calculé précédemment, il est estimé que les investissements liés au projet de pilote d'injection de CO₂ pourraient contribuer au maintien de 49 emplois directs pour la première année de travaux et 120 emplois directs pour la seconde année.

Le calcul des emplois indirects confortés par les investissements du projet repose sur une étude de la littérature disponible (FFB, La Fabrique de l'Industrie ...), par prudence nous retenons les ratios minimums :

- Pour l'industrie, 0,5 emploi indirect par emploi direct ;
- Pour le BTP, 0,4 emploi indirect par emploi direct ;
- Pour l'ingénierie, faute d'études spécifiques nous retenons l'hypothèse d'un ratio similaire au BTP de 0,4 emploi indirect par emploi direct ;

Tableau 3-23 : Nombre d'emplois annuels indirects potentiellement confortés par le projet

	Année -2	Année -1
Génie civil	4	0
Construction de réseaux	11	6
Services d'ingénierie	4	4
Fabrication d'équipements	5	49
TOTAL	24	59

Il est donc estimé que les investissements liés au projet de pilote d'injection de CO₂ pourraient contribuer au maintien de 24 emplois indirects pour la première année de travaux et 59 emplois indirects pour la seconde année.

Intégration et valorisation du tissu industriel local

D'un point de vue qualitatif, le pilote d'injection de CO₂ serait vecteur d'innovation pour le territoire, pourrait offrir de nouvelle perspective à la plateforme pétrochimique de Grandpuits et s'inscrirait ainsi en cohérence avec les orientations du SDRIF-E. Il pourrait en effet contribuer au développement de la bioraffinerie, en renforçant son attractivité en tant que site d'activités d'intérêt régional, et en garantissant la pérennité de sa fonction économique stratégique à l'échelle du territoire.

Le pilote d'injection de CO₂ pourrait participer également à l'effort de décarbonation de l'industrie, en ligne avec l'un des objectifs majeurs du SDRIF-E : parvenir à une production d'énergie 100 % décarbonée d'ici 2050. Le schéma prévoit pour cela la mobilisation de plus de 1 000 hectares de foncier pour accompagner les projets liés à la transition énergétique et environnementale.

Le pilote d'injection de CO₂ pourrait également offrir également un effet vitrine pour le territoire, le positionnant en tant que projet pilote à l'échelle nationale et européenne. Selon l'enquête d'opinion, le fait de contribuer à l'atténuation du changement climatique serait objet de fierté pour le territoire, digne de reconnaissance sociale.

3.5.4.3.2 Les retombés à long terme

En cas de passage en phase commerciale, le projet pourrait présenter plusieurs retombées positives à l'échelle nationale et territoriale:

Il contribuerait à la stratégie nationale de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, en s'inscrivant comme une solution complémentaire aux efforts de transition énergétique et de décarbonation de l'industrie. Il pourrait permettre une amélioration de l'attractivité économique du territoire, en particulier en renforçant son intérêt pour les industriels engagés dans la réduction de leur impact environnemental. Ce positionnement pourrait attirer de nouveaux investissements et encourager la relocalisation d'activités industrielles durables.

Enfin, le projet pourrait favoriser le développement d'une filière industrielle locale spécialisée, autour des technologies de captage, de transport et de stockage du CO₂. Cela inclurait notamment la production d'équipements, la logistique, ainsi que les activités de maintenance, créant ainsi de nouvelles opportunités économiques et d'emploi sur le territoire.

3.5.4.4 Synthèse

Tableau 3-24 : Synthèse des impacts du projet sur le territoire

Intérêt technique	scientifique	Amélioration de la compréhension scientifique de l'impact d'un projet à l'échelle industrielle d'injection de CO₂ dans le Dogger du Bassin parisien.
Intérêt social et humain		Acceptation sociale du projet pilote: • Perçu comme utile pour réduire l'impact industriel sur le changement climatique ; • Jugé acceptable et bénéfique localement, mais sous certaines conditions ; • Plus le site de stockage est proche du point d'émission, plus le projet est perçu favorablement. Impact sur l'activité humaine : • Peu d'impact direct
Volet économique		Estimation des coûts du projet : • 56 millions d'euros Estimation du maintien des emplois grâce au projet pilote : • 169 emplois directs annuels, cumulés sur 2 ans • 83 emplois indirects annuels, cumulés sur 2 ans Une valorisation du tissu industriel local à moyen et long terme.

3.6 Analyse des méthodes utilisées

3.6.1 Généralités

Ce chapitre a pour objet d'analyser les méthodes utilisées pour évaluer et établir l'état initial de l'environnement et les effets du projet sur l'environnement, mais également de faire état des difficultés méthodologiques rencontrées.

La méthodologie utilisée pour identifier les effets potentiels des choix du projet a consisté dans un premier temps à dresser l'état initial de la zone d'étude afin d'identifier les secteurs et les domaines sensibles. À la suite de cet inventaire, pour chaque thématique, les effets sur l'environnement et socio-économiques des travaux ont ensuite été évalués dans le périmètre concerné, en prenant explicitement en compte les stratégies d'évitement, de réduction ou de compensation intégrées au programme de travail du pilote hypothétique.

3.6.2 Recueil des données environnementales

La méthodologie a consisté essentiellement en une recherche bibliographique. L'état initial est ainsi élaboré à partir d'éléments bibliographiques et de banques de données disponibles sur Internet.

Cette étape d'analyse de l'état initial est une étape fondamentale afin de mettre en évidence les caractéristiques du périmètre et d'estimer la sensibilité générale de son environnement. C'est elle qui permettra de positionner le forage de manière la plus optimale afin de minimiser les effets sur l'environnement.

Les ouvrages et sites internet consultés sont présentés en Annexe 2.

3.6.3 Description des difficultés éventuelles

3.6.3.1 Lors de l'analyse de l'état initial

La difficulté majeure dans cette phase a été la collecte et la synthèse des informations sur un périmètre d'environ 121,5 km² et comprenant 20 communes, soit un nombre important de données à collecter et synthétiser.

3.6.3.2 Lors de l'analyse des effets

La principale difficulté rencontrée au cours de cette étape a résidé dans la prise en compte de l'ensemble des effets potentiels liés aux différentes phases du projet – compression du CO₂, transport par conduite et réalisation du puits d'injection – et ce, pour chacun des scénarios envisagés.

L'évaluation a nécessité de distinguer les impacts temporaires liés aux phases de chantier (bruit, vibrations, circulation d'engins, occupation du sol) des effets permanents associés au fonctionnement des installations (risques de fuites, intégrité des puits).

La comparaison entre le scénario principal et le scénario alternatif a complexifié l'analyse, dans la mesure où les incidences diffèrent selon la localisation de la tête de puits, la longueur du carבודuc, le degré de déviation du forage et le niveau de monitoring accessible.

Enfin il a été nécessaire de considérer non seulement les effets directs sur l'environnement (air, eau, sol, biodiversité), mais également les effets indirects ou cumulatifs.

3.6.3.3 Auteurs de l'étude

Sur le plan opérationnel, la présente étude a été réalisée par le bureau d'étude Suez Consulting dont les principaux intervenants sont les suivants:

Tableau 3-25 : Auteurs de l'étude

Auteurs	Qualités	Rôle
Evie LE POTTIER	Ingénieure de projet	Evaluation environnementale
Clément ROUSSEZ	Ingénieur de projet	Volet économique et social
Simon PEREZ	Chef de projet	Volet économique et social
Olivier FRYSCHER	Chef de projet	Contrôle et validation du document

3.7 Annexes

3.7.1 Glossaire

AEP	Alimentation en Eau Potable	INPN	Inventaire National du Patrimoine Naturel
BASOL	Base de données sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués)	MOS	Mode d'Occupation du Sol
BASIAS	Base de données des Anciens Sites Industriels et Activités de Service	NGF	Nivellement Général de la France
CSC	Captage et Stockage géologique de CO ₂	NOx	Oxydes d'azote
DRAC	Direction Régionale des Affaires Culturelles	ONF	Office Nationale des Forêts
BNPE	Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau	PER	Permis exclusif de recherches
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières	PLU	Plan Local d'Urbanisme
CC	Communauté de Commune	PPBE	Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement
CCS	Carbon Capture and Storage (captage et stockage du dioxyde de carbone)	PPR	Plan de Préventions des Risques
CO ₂	Dioxyde de Carbone	PPRI	Plan de Prévention du Risque Inondation
ENS	Espaces Naturels Sensibles	PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	PTGE	Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement	RBI	Réserve Biologique Intégrale
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques	RD	Route Départementale
		RN	Route Nationale
		SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
		SIS	Système d'information sur les Sols

SCOT Schéma de Cohérence Territoriale

SDRIF-E Schéma directeur de la Région Ile-de-France

SDAGE Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SRCE Schéma Régional de Cohérence Ecologique

SOx Oxydes de Soufre

SRADDET Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires

SUP Servitudes d'Utilité Publique

TVB Trame Verte et Bleue

ZAR Zone d'Action Renforcée

ZICO Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux

ZNIEFF Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique

ZPPAUP Zone de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager

ZPS Zone de Protection Spéciale

ZRE Zone de Répartition des Eaux

ZSC Zone Spéciale de Conservation

ZVR Zone Vulnérable Renforcée

3.7.2 Bibliographie

- [1] Global Carbon Atlas. <https://globalcarbonatlas.org/> (accessed 11/04/25).
- [2] Haut Conseil pour le Climat. (28/06/2023). *Rapport annuel 2023 – « Acter l’urgence, engager les moyens »*. Site. <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-annuel-2023-acter-lurgence-engager-les-moyens/>
- [3] Ministères Aménagement du territoire Transition écologique (20/03/2023). *Publication du 6^{ème} rapport de synthèse du GIEC*. Site. <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>. (accessed 11/04/25).
- [4] Net Zero Industry Act. (2023) Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on establishing a framework of measures for strengthening Europe’s net-zero technology products manufacturing ecosystem.
- [5] Ministère de l’Economie, des Finances et de la Souveraineté Industrielle et Numérique. (2024) *Etat des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France*.
- [6] Global CCS Institute, *198 new facilities*. Site. <https://status23.globalccsinstitute.com/new-facilities/> (accessed 11/04/25).
- [7] Usine nouvelle. (20/01/2015). *LAT Nitrogen arrête la production d’ammoniac à Grandpuits », L’Usine Nouvelle*. Site. <https://www.usinenouvelle.com/article/lat-nitrogen-arrete-la-production-d-ammoniac-a-grandpuits>. N2225978).
- [8] Actu.fr. (26/02/2025). *Seine-et-Marne « Les risques sont démesurés » : un projet de stockage de CO₂ dans le sol inquiète les habitants*. Site. (https://actu.fr/ile-de-france/grandpuits-bailly-carrois-77211/seine-et-marne-les-risques-sont-demesures-un-projet-de-stockage-de-co2-dans-le-sol-inquiete-les-habitants_62298686.html)
- [9] France Info. (02/03/2025). *« Un projet de stockage de CO₂ en sous-sol en Seine-et-Marne : « Notre département ne doit pas être une grande poubelle »*. Site. <https://france3-regions.franceinfo.fr/paris-ile-de-france/seine-et-marne/un-projet-de-stockage-de-co2-en-sous-sol-en-seine-et-marne-notre-departement-ne-doit-pas-etre-une-grande-poubelle-3115456.html>
- [10] Le Parisien. (07/02/2025). *« Des apprentis sorciers » : en Seine-et-Marne, le projet de stockage souterrain de CO₂ ne convainc toujours pas*. Site. <https://www.leparisien.fr/seine-et-marne-77/des-apprentis-sorciers-en-seine-et-marne-le-projet-de-stockage-souterrain-de-co2-ne-convainc-toujours-pas-07-02-2025-QLKK2GNKJJGWBADHN2GDBAMLHA.php>.

Nom	Site Internet
Infoclimat	https://www.infoclimat.fr
Infoterre	https://infoterre.brgm.fr
Sandre	https://www.sandre.eaufrance.fr
HydroPortail	https://hydro.eaufrance.fr
Gesteau	https://www.gesteau.fr
Agence de l’Eau Seine Normandie	https://www.eau-seine-normandie.fr
Muséum national d’Histoire naturelle	https://inpn.mnhn.fr

DRIEAT Ile-de-France	https://www.drieat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr
Région Ile-de-France	https://www.iledefrance.fr
CAUE 77	https://www.caue77.fr
Atlas des patrimoines	http://atlas.patrimoines.culture.fr
L'Institut Paris Région	https://www.institutparisregion.fr
Géoportail de l'Urbanisme	https://www.geoportail-urbanisme.gouv.fr
INSEE	https://www.insee.fr
Géorisques	https://www.georisques.gouv.fr
Airparif	https://www.airparif.fr
Services de l'Etat en Seine-et-Marne	https://www.seine-et-marne.gouv.fr
Smetom-Geeode	https://www.smetom-geeode.fr
Sietom 77	https://sietom77.com
BRGM	https://www.brgm.fr
Géothermies	https://www.geothermies.fr

4 Lusitanian Basin (Portugal)

Plano Ambiental Prévio

Projeto Piloto na Bacia Lusitaniana - Portugal

Authors: Rui Veloso, Pedro Madureira, Carlos Ribeiro, Júlio Carneiro; Ana Delicado, Maria Helena Caeiro, João Casacão; Soraia Vieira, João Paulo Medeiros, Helena Adão, José Lino Costa

4.1 Sumário executivo

Este documento constitui o Plano Ambiental Prévio (PAP) que apoia o processo de avaliação ambiental do projeto-piloto de armazenamento de CO₂ ao largo de Figueira da Foz, desenvolvido pelo projeto PilotSTRATEGY em Portugal. O documento tem como objetivo identificar potenciais riscos ambientais e definir medidas preventivas, de mitigação e de monitorização associadas exclusivamente à fase de prospeção, que compreende a aquisição sísmica 3D e a perfuração exploratória do poço de injeção. As atividades relacionadas com o transporte, injeção e operação de CO₂ não estão aqui incluídas e serão objeto de um procedimento específico de avaliação ambiental antes da implementação do projeto-piloto.

A área do projeto situa-se na plataforma continental portuguesa, dentro da Bacia Lusitaniana, e caracteriza-se por uma heterogeneidade ambiental significativa. Com base na informação de referência disponível, foram identificados cinco tipos de comunidades bentónicas (A2, A3, B1, C1 e C2). As comunidades associadas a sedimentos finos e lodosos (C1 e C2) apresentam maior sensibilidade e menor resiliência à perturbação física, enquanto as comunidades de sedimentos grosseiros (A2 e A3) revelam maior potencial de recuperação e podem servir como condições de referência.

A avaliação prévia indica que a aquisição sísmica é suscetível de gerar perturbação acústica temporária, enquanto a perfuração exploratória constitui a fase com maior potencial de significância ambiental devido à interação direta com o fundo marinho, à redeposição de sedimentos e ao ruído contínuo. Desde que sejam implementadas as medidas de mitigação propostas, as restrições sazonais para proteção de algumas comunidades biológicas e um programa de monitorização baseado na abordagem BACI (*Before-After-Control-Impact*), considera-se que a fase de prospeção tem, nesta primeira fase de avaliação ambiental, um impacto aceitável.

O presente PAP não substitui nem antecipa a necessidade de uma futura Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), caso tal procedimento venha a ser exigido pela legislação aplicável. Os resultados apresentados foram produzidos no âmbito de um projeto de Investigação e Desenvolvimento (PilotSTRATEGY), podendo, contudo, constituir um apoio à definição do âmbito e à tomada de decisão preliminar pelas autoridades competentes relativamente à fase de prospeção.

4.2 Introdução

Portugal tem vindo a consolidar a sua posição de liderança enquanto Estado-Membro da União Europeia (UE) empenhado na transição para uma economia baseada em energias renováveis, nomeadamente através da adoção de uma estratégia nacional de descarbonização. O Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC 2050) constitui um documento estratégico alinhado com as orientações internacionais para o combate às alterações climáticas, servindo de base à definição de roteiros para a descarbonização dos setores industriais nacionais. O trabalho desenvolvido no âmbito do RNC 2050 encontra-se articulado com o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030) que constitui o principal instrumento de política energética e climática para o período de 2021 a 2030. O Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030) foi inicialmente apresentado em 2019, estabelecendo o enquadramento estratégico para alcançar a neutralidade carbónica até 2050. O plano foi revisto em 2024, tendo sido definidos objetivos mais ambiciosos para a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

Atualmente, prevê-se uma redução de 55% das emissões de GEE até 2030, em comparação com os níveis de 2005 (cerca de 75 Mt), e a antecipação da meta de neutralidade carbónica para 2045, em vez de 2050. Além disso, na versão revista do PNEC 2030, a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) é identificada como uma tecnologia essencial para apoiar Portugal no cumprimento das suas metas de descarbonização, particularmente em setores de difícil mitigação, nos quais a redução de emissões é mais desafiante (como o setor do cimento) e onde outras formas de descarbonização podem ser mais difíceis ou menos eficazes. O plano sublinha igualmente a necessidade de inovação e investimento em CCUS, destacando a importância da investigação e desenvolvimento para melhorar a eficiência e a relação custo-eficácia destas tecnologias, bem como para planear as infraestruturas necessárias. Adicionalmente, a utilização de CO₂ poderá promover a produção de hidrogénio de baixo carbono e de outros combustíveis sustentáveis.

A estratégia nacional encontra-se igualmente alinhada com o *Net-Zero Industry Act*, que entrou em vigor em junho de 2024, tendo como objetivo o reforço da capacidade industrial europeia para o desenvolvimento de tecnologias de emissões líquidas nulas e respetivos componentes-chave, com o intuito de expandir novos setores de produção na UE. Prevê-se que este ato contribua para o aumento da competitividade do setor das tecnologias *net-zero*, para a atração de investimento e para a melhoria do acesso ao mercado das tecnologias limpas na Europa. Este enquadramento apoia a transição energética e reforça a resiliência energética da UE. O *Net-Zero Industry Act* estabelece ainda a meta de assegurar, até 2030, uma capacidade de produção que cubra pelo menos 40% das necessidades anuais de implantação da UE, proporcionando previsibilidade, segurança e compromissos de longo prazo para fabricantes e investidores.

4.2.1 O projeto PilotSTRATEGY

O PilotSTRATEGY é um projeto europeu financiado pelo programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664. O projeto centra-se em cinco regiões (Figura 4.1) onde projetos anteriores e, em particular, o projeto europeu STRATEGY CCUS, identificaram possibilidades para o desenvolvimento de esquemas locais de CCUS em áreas altamente industrializadas.



Figura 4.1 - Mapa da Europa com destaque para os países abrangidos pelo projeto PilotSTRATEGY e as respetivas localizações dos locais para armazenamento de CO₂.

Dentro destas cinco regiões, a área *offshore* portuguesa localizada nas proximidades da Figueira da Foz foi selecionada para uma caracterização detalhada, com vista à implementação de um local piloto para a injeção e o armazenamento geológico de CO₂ num aquífero salino profundo. A área *offshore* insere-se na parte Norte da Bacia Lusitaniana, que foi previamente caracterizada com base em conjuntos de dados sísmicos 2D e 3D existentes, bem como em 13 poços antigos de prospeção de petróleo e em amostras de rocha recolhidas em afloramentos de formações análogas em terra. Dados aeromagnéticos disponíveis e um levantamento sísmico passivo foram igualmente integrados na caracterização geológica do local piloto (vide relatório D2.7 do PilotSTRATEGY).

Um dos objetivos principais do projeto PilotSTRATEGY consiste na caracterização do reservatório geológico e da formação selante na área de estudo e na determinação do local para a implementação de um piloto de injeção e armazenamento de CO₂. Para além de testar o reservatório geológico, o piloto permitirá, igualmente, desenvolver protocolos de medição, monitorização e verificação *in situ* (MMV), capazes de reduzir a incerteza e de contribuir para o reforço da confiança em projetos de CCS.

O cenário piloto foi desenvolvido tendo em consideração emissores interessados na instalação de unidades piloto de captura, nomeadamente a cimenteira de Souselas. Foram consideradas opções de transporte flexíveis, incluindo a injeção direta a partir de navio, para o armazenamento *offshore*, de modo a evitar a instalação de infraestruturas “permanentes”, como gasodutos ou plataformas *offshore*. O desenho do piloto teve como objetivo assegurar o fornecimento de CO₂ necessário à sua implementação, permitindo validar os modelos de reservatório e de injeção desenvolvidos no âmbito do projeto PilotSTRATEGY para a Bacia Lusitaniana. Conforme referido anteriormente, foi considerado o ciclo completo, desde a captura até à injeção, com enfoque na minimização da instalação de infraestruturas permanentes ou de difícil realocação. Neste contexto, o transporte de CO₂ por via ferroviária foi considerado entre as instalações de captura e o porto da Figueira da Foz, e por navio entre o porto e o local *offshore* de injeção (Figura 4.2). O volume de CO₂ e as condições de transporte serão compatibilizados entre o transporte ferroviário, o operador portuário e o navio, de modo

a permitir o seu transporte sem necessidade de armazenamento intermédio e/ou de recondição intensivo. Durante a fase piloto, o CO₂ será injetado diretamente a partir do navio, prevendo-se o armazenamento de menos de 100 kt no reservatório geológico entre 2031 e 2033.

(sem escala)

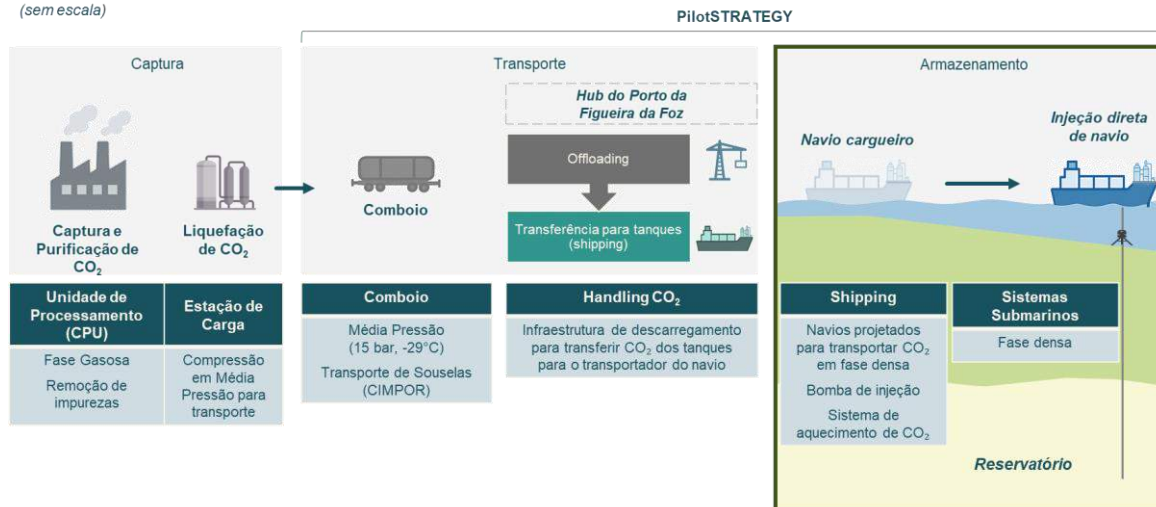


Figura 4. 2 - Fluxograma conceptual da captura, transporte e injeção de CO₂ para a fase piloto (as condições de pressão e temperatura de transporte são indicativas).

Se o piloto confirmar a adequação do enquadramento geológico para o armazenamento seguro de CO₂, os cenários de longo prazo preveem a possibilidade de escalar a tecnologia para uma fase comercial, com a captura de CO₂ (com aumentos entre 2034 e 2050 entre 0,5 e 4,7 Mt/ano) e o transporte a partir de outros emissores relevantes localizados mais a sul. Para a fase comercial, o CO₂ será transportado exclusivamente por gasoduto (Figura 4.3).

(sem escala)

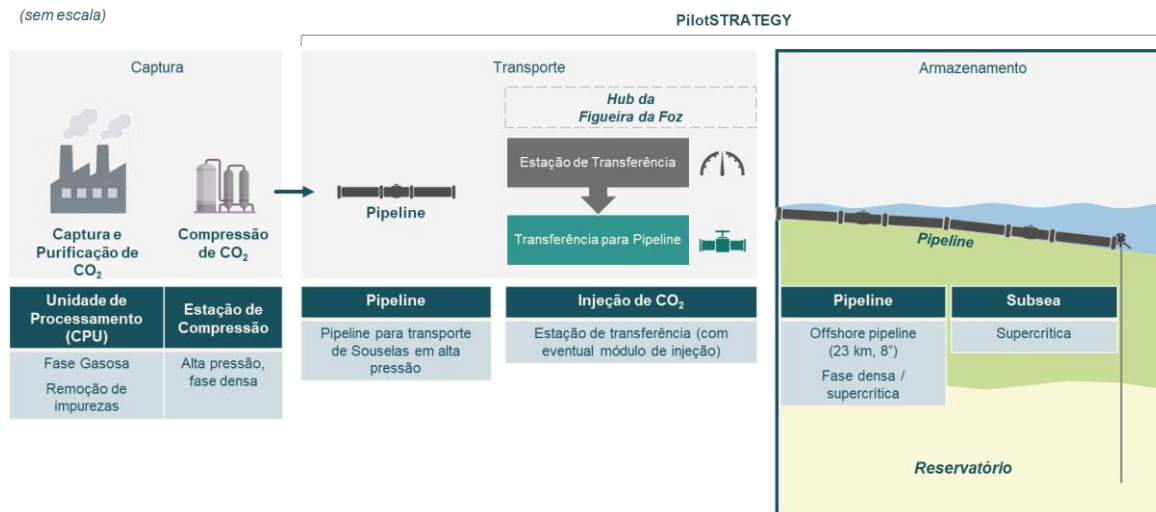


Figura 4.3 - Fluxograma conceptual alternativo da captura, transporte e injeção de CO₂ para a fase comercial, com ligação por oleoduto entre as fontes emissoras e o hub em terra no porto da Figueira da Foz (as condições de pressão e temperatura de transporte são indicativas).

4.2.2 Âmbito do documento

O objetivo deste documento é desenvolver um Plano Ambiental Prévio (PAP) para identificar os potenciais riscos ambientais e definir estratégias de mitigação para a fase exploratória que antecede a

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

implementação da fase piloto. Abrange exclusivamente as atividades inerentes à realização de levantamentos sísmicos 3D para aquisição da situação de referência (*baseline*) e melhor caracterização da estrutura geológica, à perfuração do furo a utilizar como poço de injeção durante o piloto e à aquisição da linha de base ambiental. Assim, e embora, de acordo com o Decreto-Lei No. 60/2012, a fase piloto esteja isenta da obrigatoriedade de requerer uma licença de exploração, uma vez que prevê a injeção de menos de 100 kt, o presente PEP abrange os estudos ambientais que, habitualmente, se enquadram no âmbito de uma licença deste tipo. Acresce que as atividades de CO₂ e de transporte não são abordadas no PEP, por corresponderem já ao próprio Projeto Piloto. O PAP corresponde, de forma aproximada, à fase da definição do âmbito do processo de avaliação ambiental, durante a qual são identificadas as questões ambientais chave e os requisitos do estudo. O PAP destina-se a:

- a) Identificar as questões e atividades que provavelmente serão relevantes para a fase de exploração;
- b) Fornecer uma descrição dos dados ambientais disponíveis e identificar lacunas existentes;
- c) Abordar as incertezas inerentes através da aplicação do **princípio da precaução**;
- d) Incluir uma avaliação de risco ambiental (ARA) para assegurar que todas as atividades relevantes e os impactos associados sejam identificados.

4.3 Enquadramento Regulamentar, Ambiental e Técnico do Local de Armazenamento de CO₂

No âmbito do projeto PilotSTRATEGY, o caso da Bacia Lusitaniana abrange a área em redor da cidade da Figueira da Foz, o local de armazenamento *offshore*, designado como estrutura Q4-TV1, situada a cerca de 22 km do porto da Figueira da Foz, bem como os emissores potenciais previamente identificados. O projeto considerou a cimenteira CIMPOR instalada em Souselas como o principal emissor, cuja principal fonte de emissões de CO₂ resulta do combustível queimado nos fornos, e a unidade de pasta e papel NAVIGATOR na Figueira da Foz como fonte potencial de *backup*. De acordo com o roteiro para o cumprimento das metas de descarbonização, a instalação de Souselas ainda emitirá 0,5 Mt de CO₂ em 2050. O projeto compreende duas fases de injeção:

- Fase 1 – Corresponde à fase piloto, com injeção até 100 kton de CO₂ ao longo de 3 anos;
- Fase 2 – Expansão para a escala comercial no mesmo local e com o mesmo poço de injeção, com uma taxa de injeção mínima de CO₂ de 0,5 Mt/ano durante um período de 30 anos, com potencial de expansão até 4,7 Mt/ano, para abranger outros emissores adicionais e recorrendo a poços de injeção adicionais e a estruturas de armazenamento já identificadas no setor norte da Bacia Lusitaniana.

A fase piloto utilizará a infraestrutura existente no porto da Figueira da Foz, incluindo instalações de carga/descarga e sistemas de injeção a bordo. A fase comercial substituirá estas instalações, incluindo um gasoduto em terra desde Souselas até ao *hub* da Figueira da Foz, que terá uma estação de compressão para que o CO₂ possa ser transferido por gasoduto até ao local de injeção *offshore*. Estas instalações serão projetadas para lidar com volumes maiores de CO₂ e garantir eficiência e segurança a longo prazo.

O projeto visa a injeção de CO₂ na secção inferior do Grupo Torres Vedras (Cretácico Inferior, Aptiano-Albiano), composto por alternância de arenitos e argilas xistosas. As simulações de injeção demonstram que a pluma de CO₂ não atinge o poço antigo próximo

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

(Dourada-1C) e evita as principais falhas identificadas (Figura 4.4). O poço de injeção está a ser planeado com revestimentos cimentados de modo a evitar qualquer fuga potencial, particularmente ao longo do poço. As coordenadas da área de estudo, do poço Dourada-1C e do poço de injeção são apresentadas na Tabela 4.1.

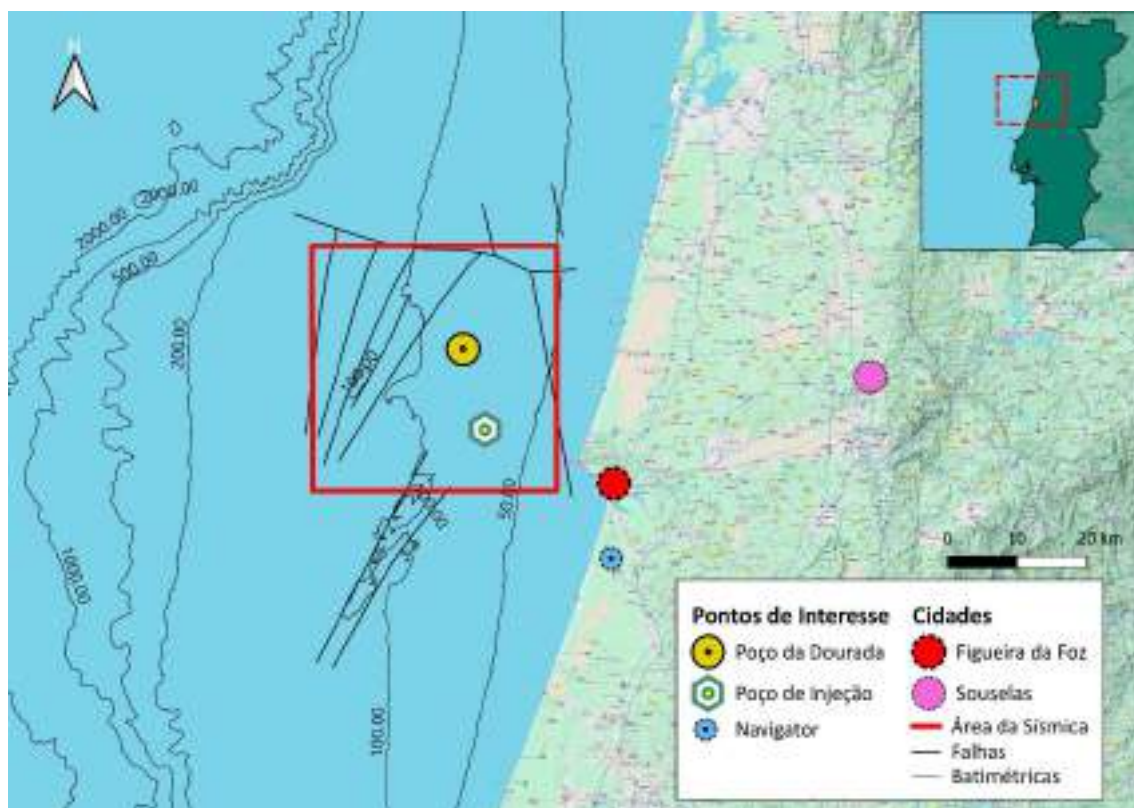


Figura 4.4 - Área de estudo com a localização da Figueira da Foz, do poço para a futura injeção de CO₂, do antigo poço de prospecção de petróleo Dourada-1C. Pormenor: Localização da figura em relação a Portugal continental.

Tabela 4.1 - Coordenadas da área de estudo, do future poço para a injeção de CO₂ e do antigo poço de prospecção de petróleo Dourada-1C (WGS 84 EPSG: 4326).

Limites do Polígono	Latitude (N)	Longitude (W)
Superior direito	40°27'43"	8°56'54"
Superior esquerdo	40°27'43"	9°21'40"
Inferior esquerdo	40°08'45"	9°21'40"
Inferior direito	40°08'47"	8°56'54"
Dourada-1C	40°19'44"	9°06'23"
Poço de injeção de CO ₂	40°13'32"	9°04'09"

4.3.1 Enquadramento legal e institucional para atividades CCS

A apresentação do Pacto Ecológico Europeu [COM (2019) 640 final] em dezembro de 2019 estabeleceu o enquadramento para a adoção de uma estratégia de crescimento renovada, baseada numa transição verde alinhada com os objetivos de descarbonização de longo prazo da União Europeia (UE). A subsequente adoção da Lei Europeia do Clima [Regulamento (UE) 2021/1119 de 30 de junho de 2021] concretizou os objetivos definidos no Pacto Ecológico,

estabelecendo uma meta vinculativa de redução líquida de emissões de GEE de pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990, e visando alcançar a neutralidade climática até 2050.

O Plano REPowerEU [COM (2022) 230 final] foi apresentado em maio de 2022 como estratégia a adotar pela UE para acelerar a transição energética e acabar com a dependência dos combustíveis fósseis. Para atingir a meta de neutralidade climática definida na Lei Europeia do Clima, a Comissão Europeia apresentou, em fevereiro de 2024, a sua avaliação da meta climática para 2040 ([COM (2024) 63 final]), recomendando uma redução de 90% nas emissões de GEE até 2040, em comparação com os níveis de 1990. Assim, considerou-se que, para além da plena implementação do enquadramento climático e energético de 2030, será necessário reforçar a contribuição das tecnologias de CCUS. Estas últimas são também reconhecidas no *Net Zero Industry Act* [Regulamento 2024/1735 de 13 de junho], que identifica tecnologias de emissão zero e estabelece a meta de armazenamento geológico de 50 Mt por ano na UE.

A UE estabeleceu um enquadramento jurídico robusto para garantir que os projetos de CCUS sejam cuidadosamente avaliados antes da sua implementação. O procedimento inclui a obrigatoriedade de Avaliações de Impacte Ambiental (AIA) para projetos qualificados ao abrigo da Diretiva 2011/92/UE, transposta para a legislação nacional pelos Estados-Membros, incluindo Portugal. Esta secção descreve as licenças relevantes para as diferentes fases ou subprojetos a desenvolver como parte do programa de armazenamento subterrâneo de CO₂, de acordo com o âmbito deste Plano de Licenciamento. Abaixo apresenta-se uma lista geral das licenças analisadas, sendo que descrições detalhadas são fornecidas mais adiante no documento.

4.3.1.1 Fase piloto

O *Net Zero Industry Act* motivou a revisão do Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030), de forma a garantir o alinhamento das políticas, objetivos e metas previamente estabelecidos com o novo contexto internacional e da UE. No plano revisto, submetido em 2024, é reconhecida a necessidade de aumentar o nível de remoção de carbono para compensar as emissões de GEE de difícil mitigação em setores industriais onde as soluções tecnológicas existentes ainda não eliminam totalmente as emissões (por exemplo, emissões de processo na descarbonização de materiais utilizados, incineração de resíduos). Consequentemente, está a ser avaliado o potencial geológico para o armazenamento geológico de carbono, com o objetivo de contribuir para atingir a meta nacional de neutralidade climática em 2045.

A Lei Nacional No. 98/2021 define as bases da política do clima em Portugal, na qual se prevê que o Estado monitorize e apoie o desenvolvimento das tecnologias de CCUS (Artigo 59). Além disso, o parágrafo 2 do Artigo 59 afirma que o Estado, bem como as suas administrações autónomas e locais, devem promover projetos piloto para a implementação destas tecnologias em áreas com elevadas emissões de CO₂. O Decreto-Lei No. 60/2012 estabelece o enquadramento legal para o armazenamento de CO₂, em conformidade com a Diretiva 2009/31/CE do Parlamento e do Conselho Europeu. Contudo, no seu Artigo 2, parágrafo 3, é referido que o documento não se aplica ao armazenamento de CO₂ em reservatórios geológicos quando a massa total injetada for inferior a 100 kt e o armazenamento tiver como finalidade o desenvolvimento de investigação científica ou de novos produtos e processos. Este é o caso da fase piloto prevista para ser desenvolvida *offshore* da Figueira da Foz, conforme proposto pelo projeto PilotSTRATEGY.

As atividades de CCUS *offshore* devem também ter em consideração o enquadramento regulamentar das atividades no espaço marítimo, nomeadamente o PSOEM (Plano de Situação para o Ordenamento do Espaço Marítimo). De acordo com o Decreto-Lei No. 38/2015 e com a

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

Resolução do Conselho de Ministros No. 203-A/2019, que desenvolve a política de planeamento e gestão do espaço marítimo nacional em conformidade com a Diretiva Europeia 2014/89/UE, a fase piloto requer a aquisição de um “Título de Utilização Privada do Espaço Marítimo” (TUPEM), que deve ser atribuído pela Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM, Artigo 51). O Decreto-Lei No. 38/2015 estabelece que as atribuições de um TUPEM para novas atividades depende da aprovação prévia de um plano de afetação (Artigo 50(1)). De acordo com o Artigo 23(1), o plano de afetação é considerado como um projeto e está sujeito a Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), nos termos do Decreto-Lei No. 151-B/2013. Conforme indicado na Parte B da Resolução do Conselho de Ministros No. 203-A/2019, o plano de afetação deve ter em consideração os outros usos incluídos na mesma área e/ou volume do espaço marítimo nacional, apresentando a fundamentação jurídica, científica e técnica e uma análise custo-benefício para apoiar o processo de tomada de decisão (Figura 5<4.). Não obstante, para o desenvolvimento de uma atividade de investigação científica, o TUPEM pode ser isento da aprovação prévia de um plano de afetação por decisão dos membros do Governo responsáveis pelos assuntos do mar e pelo ambiente (Artigo 50(2)).

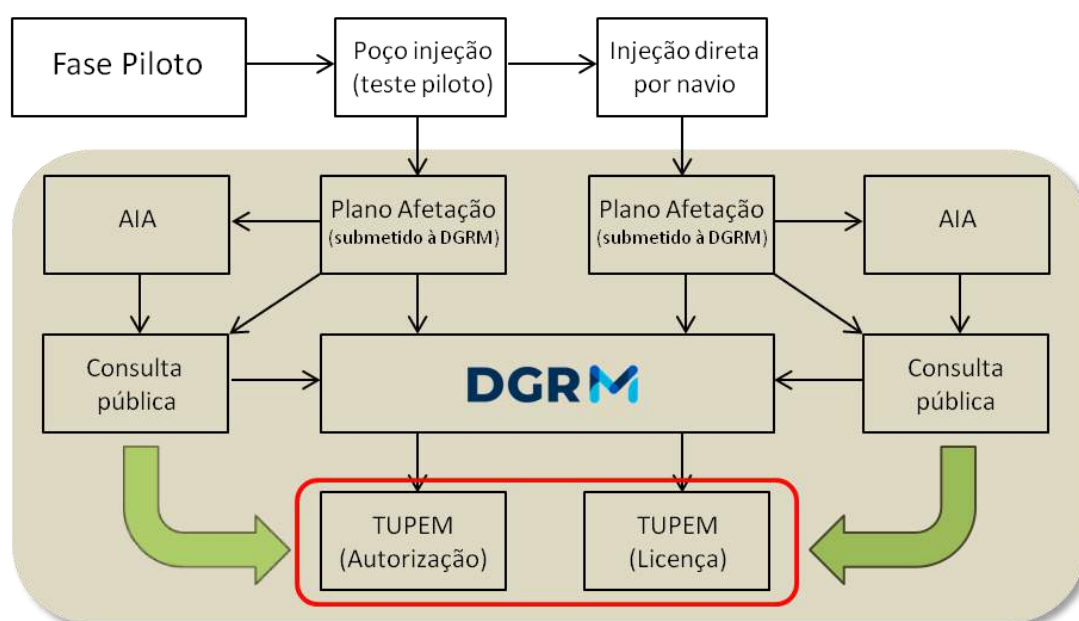


Figura 4.5 - Diagrama de fluxo do procedimento de licenciamento para a Fase Piloto. Para atividades de investigação científica, o TUPEM pode ser dispensado da aprovação prévia de um plano de afetação, simplificando o procedimento.

Prevê-se que, para a fase piloto, um TUPEM possa ser emitido como “licença” (Artigos 54 a 56) ou como “autorização” (Artigo 57). A “licença” refere-se à utilização temporária (menos de 12 meses) ou intermitente durante um ou mais períodos descontínuos ao longo do ano. Tem uma duração máxima de 25 anos, e deve ser aplicada uma taxa relativa à utilização do espaço marítimo.

A “autorização” refere-se a um TUPEM no âmbito de projetos de investigação científica ou pilotos não comerciais. Tem uma duração máxima de 10 anos e está isenta de taxas. De acordo com o Artigo 66, poderá ser exigido o pagamento de uma caução para assegurar a manutenção das características biológicas e físico-químicas do ambiente marinho. A caução pode ser dispensada se for previsto que a atividade não causará impactes no ambiente marinho e não requererá a construção ou colocação de estruturas móveis. Uma dispensa também poderá resultar da aplicação de normas ambientais que possam ser impostas a uma atividade específica, garantindo igualmente a proteção e conservação do ambiente marinho.

4.3.1.2 Fase comercial

Para a fase comercial e para o armazenamento de CO₂ em quantidades superiores a 100 kton, aplica-se o Decreto-Lei No. 60/2012. Neste caso, as formações geológicas com potencial para armazenamento de CO₂ são consideradas depósitos minerais do domínio público (Artigo 5(1)). Deve notar-se que o Decreto-Lei No. 30/2021, no seu Artigo 3, parágrafo 2, refere que os depósitos minerais localizados no espaço marítimo nacional estão sujeitos a legislação especial. Contudo, não revoga o Decreto-Lei No. 60/2012, que atribui ao Ministério responsável pelos recursos minerais e à Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) a competência para atuar no enquadramento legal estabelecido relativo ao armazenamento de CO₂. De acordo com o Decreto-Lei No. 60/2012, é feita uma distinção entre a concessão para armazenamento de CO₂ e a autorização para operar as instalações de injeção à superfície, que resulta na permissão para realizar o armazenamento, regulada também pelo Regime de Exploração de Atividades Industriais (REAI). Nos termos do Artigo 6(1), os contratos de concessão para armazenamento de CO₂ devem ser outorgados pelo Ministério responsável pelos recursos geológicos. O parágrafo 2 define que a DGEG é responsável por conceder licenças de exploração para avaliação direta do potencial de um determinado reservatório subterrâneo para armazenamento de CO₂ através de perfurações ou ensaios de injeção.

Não é evidente se uma licença similar será necessária para a implementação da fase piloto e, caso seja, qual a legislação ou regulamentação aplicável. A duração de uma licença de exploração não deve exceder cinco anos, podendo ser prorrogada por mais três anos se o plano de exploração aprovado tiver sido devidamente executado, mas for insuficiente para cumprir os critérios de caracterização do potencial do complexo de armazenamento (Artigo 13). O Artigo 17(3), estabelece que o titular de uma licença de exploração terá preferência na atribuição de um contrato de concessão para armazenamento de CO₂, desde que os trabalhos de exploração tenham sido concluídos de acordo com o plano aprovado e a candidatura à concessão seja apresentada no prazo de 45 dias úteis após a conclusão dos trabalhos de exploração. O parágrafo 4 define que a duração da concessão deve ser ajustada à capacidade total de armazenamento de CO₂ do reservatório geológico estudado, sendo fixada no contrato. O Artigo 18 descreve os diferentes dados e informações que devem ser incluídos na candidatura a um contrato de concessão, bem como na licença que permita o estabelecimento das instalações à superfície necessárias para a injeção de CO₂. Entre os elementos exigidos, destacam-se:

- (i) A caracterização do reservatório e do complexo de armazenamento (incluindo modelação dinâmica), bem como a avaliação de riscos;
- (ii) Quantidade total de CO₂ a injetar e armazenar, incluindo a previsão das suas fontes e transporte, a composição do fluxo de CO₂, a pressão de injeção e a localização das instalações de injeção;
- (iii) Plano de execução, incluindo medidas para prevenir ou mitigar a ocorrência de anomalias;
- (iv) Plano de monitorização, que deve incluir (nos termos do Anexo II do Decreto-Lei No. 60/2012) a monitorização das emissões que possam resultar de fugas de CO₂, o fluxo volumétrico de CO₂ na cabeça do poço de injeção, a pressão e temperatura do reservatório, de modo a determinar a fase do CO₂ e o seu comportamento. O plano de monitorização deve também abranger a fase pós-fecho.

Como referido no ponto (i) acima, a candidatura ao contrato de concessão deve incluir, igualmente, uma avaliação de riscos relacionada com o armazenamento de CO₂, conforme descrito no Anexo I do Decreto-Lei No. 60/2012. Esta avaliação deve englobar a caracterização do perigo e dos riscos, bem como a avaliação da exposição e dos efeitos. A caracterização do perigo foca-se no potencial de fuga de CO₂ a partir do complexo de armazenamento. São

considerados diferentes parâmetros, como a identificação de potenciais condutas de fuga, a magnitude potencial da fuga inferida a partir das taxas de fluxo, os parâmetros críticos que afetam potenciais fugas (por exemplo, pressão máxima no reservatório, taxa máxima de injeção, temperatura), os efeitos secundários do armazenamento de CO₂, incluindo o deslocamento de fluidos no reservatório e a criação de novas substâncias, e outros fatores que possam representar uma ameaça para a saúde humana ou para o ambiente. A avaliação da exposição baseia-se nas características do ambiente natural, na distribuição da população humana e nas suas atividades, bem como no destino potencial de fugas de CO₂ através de condutas identificadas no ponto anterior. A avaliação dos efeitos centra-se na sensibilidade de certas espécies, comunidades ou habitats face a potenciais fugas de CO₂. Está, assim relacionada com os efeitos da exposição a elevadas concentrações de CO₂ na biosfera, incluindo solos, sedimentos marinhos e águas bentónicas, bem como aos efeitos da redução de pH nesses ambientes. A avaliação deve também considerar os efeitos causados por outras substâncias que possam estar presentes no fluxo de CO₂ decorrente de fugas. A caracterização de riscos deve basear-se na avaliação de perigo, exposição e efeitos, considerando as fontes de incerteza e as possibilidades previstas para a sua redução. Deve resultar na avaliação da segurança e integridade do reservatório de armazenamento a curto e longo prazo, incluindo uma avaliação dos riscos de fuga de CO₂ relativamente às operações previstas e para a saúde humana no pior cenário. No caso de transferência de responsabilidade, o Artigo 22 exige a criação de um fundo de reserva, a ser constituído pelo contratante e alocado à DGEG. O montante do fundo de reserva deve ser determinado considerando as obrigações contratuais que permanecem ativas após a transferência e o custo estimado para monitorização durante um período mínimo de 30 anos.

No conceito PilotSTRATEGY, prevê-se que, durante a fase comercial, o CO₂ seja acondicionado num *hub* em terra e transportado por gasoduto até ao local de armazenamento *offshore*. De acordo com a legislação mencionada acima (Decreto-Lei No. 38/2015 e Resolução do Conselho de Ministros No. 203-A/2019), a instalação de um gasoduto *offshore* exigirá a aprovação de um plano de afetação e a aquisição de um TUPEM concedido pela DGRM. Neste caso, prevê-se que o TUPEM seja emitido como tipo “concessão”, uma vez que permite a utilização da área ocupada pelo gasoduto por um longo período, que não poderá exceder 50 anos.

4.3.1.3 Avaliação de Impacte Ambiental

No que se refere à proteção e conservação do ambiente marinho, a Avaliação de Impacte Ambiental e as atividades de monitorização relacionadas com projetos de CCUS no espaço nacional são reguladas pelo enquadramento apresentado abaixo (Tabela 4.2), o qual alinha a política portuguesa com as estratégias e diretrizes da UE.

A Diretiva 2011/92/UE do Parlamento e do Conselho Europeu, de 13 de dezembro de 2011, estabelece o enquadramento para a avaliação dos impactes ambientais de determinados projetos públicos e privados, garantindo que os efeitos potenciais sobre o ambiente sejam considerados antes da concessão de autorização de desenvolvimento. De acordo com o Artigo 4 desta Diretiva, “os Estados-Membros adotam todas as medidas necessárias para assegurar que, antes de ser concedida a autorização, os projetos suscetíveis de ter efeitos significativos no ambiente, em virtude, nomeadamente, da sua natureza, dimensão ou localização, sejam sujeitos a um requisito de autorização de desenvolvimento e a uma avaliação quanto aos seus efeitos”. Conforme indicado no Anexo I da mesma diretiva, os projetos referidos no Artigo 4(1), incluem:

- 1) “Locais de armazenamento nos termos da Diretiva 2009/31/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril de 2009, relativa ao armazenamento geológico de dióxido de carbono.”
- 2) “Instalações para a captura de correntes de CO₂ com vista ao armazenamento geológico, nos termos da Diretiva 2009/31/CE, provenientes de instalações abrangidas por este Anexo, ou quando a captura anual total de CO₂ seja igual ou superior a 1,5 megatoneladas.”

Projetos piloto, como o proposto no âmbito do PilotSTRATEGY, enquadram-se na categoria 1 acima, uma vez que não consideram a componente de captura, mas apenas o transporte e o armazenamento da cadeia CCUS.

Tabela 4.2 - Enquadramento regulatório do Estudo de Impacte Ambiental (EIA) associado a projetos CCS.

Instrumento / Legislação	Tipo	Âmbito	Autoridade Competente	Notas Principais	Endereço internet
Diretiva 2011/92/UE + 2014/52/UE	Diretiva da UE	Avaliação de Impacte Ambiental (AIA)	Comissão Europeia / APA	Estabelece os requisitos da AIA para projetos industriais, incluindo CCS.	https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/92/oj/eng
Diretiva 2009/31/CE	Diretiva da UE	Armazenamento geológico de CO ₂	Comissão Europeia / APA, DGEG, DGRM	Define critérios para seleção, monitorização e encerramento de locais de armazenamento de CO ₂ .	https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/31/oj/eng
Diretiva 2014/89/UE	Diretiva da UE	Ordenamento do espaço marítimo	Comissão Europeia / DGRM	Estabelece um quadro para o ordenamento do espaço marítimo, compatível com projetos CCS, visando a utilização sustentável do mar.	https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/89/oj/eng
Convenção OSPAR	Convenção Internacional	Proteção do ambiente marinho	Comissão OSPAR / Estado Português	Principal enquadramento internacional para a proteção do ambiente marinho no Atlântico Nordeste; inclui o armazenamento de carbono.	https://www.ospar.org/work-areas/oic/carbon-capture-and-storage
Decreto-Lei n.º 151-B/2013	Decreto-Lei	Regime jurídico da AIA	APA	Estabelece o regime jurídico de avaliação de impacte ambiental de projetos públicos e privados suscetíveis de afetar significativamente o ambiente, incluindo captura, transporte e armazenamento de CO ₂ .	https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/151-b-2013-513863
Decreto-Lei n.º 60/2012	Decreto-Lei	Armazenamento geológico de CO ₂	APA, DGEG, DGRM	Transpõe a Diretiva CCS. Regula licenciamento, monitorização, encerramento e responsabilidades.	https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/60-2012-553447
Decreto-Lei n.º 17/2014	Decreto-Lei	Recursos geológicos marinhos	DGEG, DGRM	Regula as atividades de prospeção, pesquisa e utilização do subsolo marinho.	https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/17-2014-25343987
Decreto-Lei n.º 38/2015 (alterado pelo DL n.º 39/2015)	Decreto-Lei	Ordenamento do espaço marítimo nacional	DGRM	Estabelece o quadro legal do ordenamento do espaço marítimo. Implementa os instrumentos de planeamento marítimo (PSOEM).	https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/38-2015-66727183
Lei n.º 19/2014	Lei	Lei de Bases do Ambiente	Assembleia da República / APA	Define os princípios fundamentais da política ambiental.	https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/19-2014-25344037
Lei n.º 17/2014	Lei	Atividades no espaço marítimo	DGRM	Define as bases da política de ordenamento e gestão do espaço marítimo nacional e estabelece o regime de Títulos de Utilização Privativa do Espaço Marítimo (TUPEM).	https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/17-2014-25343987

O processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) em Portugal é regulado pelo Decreto-Lei No. 151-B/2013, de 31 de outubro, que transpõe a Diretiva 2011/92/UE (alterada pela Diretiva 2014/52/UE) para a legislação nacional. Este decreto estabelece o regime jurídico de avaliação do impacte ambiental de projetos públicos e privados suscetíveis de ter efeitos significativos sobre o ambiente. Nos termos deste Decreto-Lei, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é a entidade competente para a AIA. Projetos piloto, como os promovidos pelo PilotSTRATEGY, estão referenciados no Anexo I e enquadram-se nas categorias mencionadas no ponto (a) do Artigo 1(3). Isto está também em conformidade com o Artigo 4(1), da Diretiva 2011/92/UE, conforme referido acima.

Projetos piloto de armazenamento de CO₂, como aqueles designados pelo projeto PilotSTRATEGY, podem estar sujeitos a AIA com base numa análise caso a caso (critérios subjetivos), de acordo com os fatores de sensibilidade ambiental listados no Anexo III, mencionados nos subpontos ii) e iii) dos pontos b) e c) do Artigo 1(3).

4.3.1.4 Requisitos AIA e Enquadramento regulatório para projetos CCS

De acordo com o Artigo 3 da Diretiva 2011/92/UE (cujo enquadramento foi descrito anteriormente), a Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) deve identificar, descrever e avaliar, de forma adequada, os efeitos de um projeto sobre os seguintes fatores:

- Seres humanos, fauna e flora;
- Solo, água, ar, clima e paisagem;
- Bens materiais e património cultural;
- A interação entre estes fatores.

O Decreto-Lei No. 151-B/2013, de 31 de outubro, que transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva 2011/92/UE (alterada pela Diretiva 2014/52/UE), estabelece no Anexo V, referido no Artigo 13(1), e no Artigo 14(2), o conteúdo mínimo obrigatório de uma AIA, que inclui, de forma não exaustiva:

- a) Caracterização do projeto:
 - Localização e características do local de armazenamento;
 - Tecnologias de captura e transporte de CO₂;
 - Processo de injeção e armazenamento;
- b) Avaliação de alternativas razoáveis;
- c) Materiais, recursos e energia;
- d) Descrição ambiental de referência;
- e) Emissões, efluentes e resíduos esperados;
- f) Identificação e avaliação dos impactes ambientais:
 - Impactes na geologia e nos recursos hídricos;
 - Impactes na atmosfera e no clima;
 - Impactes na biodiversidade;
 - Impactes na população e na saúde humana;
- g) Metodologia de previsão de impactes;
- h) Medidas de mitigação e prevenção e programas de monitorização:
 - Sistemas de deteção de fugas, incluindo sensores de CO₂ e monitorização sísmica passiva;
 - Plano de resposta a emergências, incluindo medidas de evacuação e mitigação;
 - Plano de reabilitação ambiental do local após o encerramento;
- i) Limitações e incertezas;
- j) Consulta pública:
 - O projeto será sujeito a um processo de consulta pública, permitindo que cidadãos, organizações ambientais e entidades locais apresentem contributos. A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) analisará os contributos recebidos e poderá exigir ajustamentos ao projeto.
- k) Resumo Não Técnico

No que se refere a orientações regulamentares específicas para projetos de CCS, a Diretiva 2009/31/CE estabelece o enquadramento jurídico para o armazenamento geológico de CO₂ e determina claramente que os locais de armazenamento devem ser explorados ao abrigo de uma licença de armazenamento. Esta licença constitui um instrumento fundamental para assegurar o cumprimento dos requisitos substantivos da Diretiva e garantir que o armazenamento geológico é realizado de forma ambientalmente segura. O Decreto-Lei No. 60/2012, de 14 de março, que transpõe esta Diretiva para a ordem jurídica portuguesa, reforça este princípio no seu Artigo 9(1), ao estabelecer que “uma formação geológica só pode ser selecionada como local de armazenamento se, nas condições de utilização propostas, não existir

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

um risco significativo de fuga nem um risco significativo para o ambiente ou para a saúde humana”.

Atendendo a que os projetos de armazenamento geológico de CO₂ estão, por defeito, sujeitos a Avaliação de Impacte Ambiental, conforme referido anteriormente (Anexo I do Decreto-Lei No. 151-B/2013, de 31 de outubro), este processo assegura o cumprimento das normas ambientais e dos requisitos legais antes da sua implementação. Adicionalmente, nos termos do Artigo 18 do Decreto-Lei No. 60/2012, de 14 de março, o operador deve definir e submeter à Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) um conjunto de dados, incluindo:

- Plano de monitorização elaborado de acordo com os requisitos estabelecidos no Anexo II do referido decreto;
- Descrição das medidas de prevenção de anomalias;
- Plano de medidas corretivas, nos termos do Artigo 35(3);
- Proposta de um plano provisório de pós-encerramento, nos termos do Artigo 37(2).

A correta seleção de um local adequado para o sequestro geológico de CO₂ deve igualmente considerar o Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território, a Rede Natura 2000 e outras Áreas Classificadas de elevada relevância para a biodiversidade.

A Convenção OSPAR constitui o principal enquadramento internacional para a proteção do ambiente marinho no Atlântico Nordeste, à qual Portugal é Parte Contratante. Esta Convenção estabelece obrigações relativas à prevenção da poluição marinha, à proteção dos ecossistemas e à gestão sustentável das atividades marítimas. Determina que “as Partes Contratantes devem, em conformidade com as disposições da Convenção, adotar todas as medidas possíveis para prevenir e eliminar a poluição e tomar as medidas necessárias para proteger a área marítima contra os efeitos adversos das atividades humanas, de modo a salvaguardar a saúde humana e a conservar os ecossistemas marinhos e, sempre que possível, restaurar as áreas marinhas que tenham sido negativamente afetadas”.

Em 2007, a Comissão OSPAR alterou os Anexos II e III da Convenção, permitindo o armazenamento de CO₂ em formações geológicas sob o fundo marinho. Neste contexto, a OSPAR adotou, igualmente, duas decisões fundamentais: a Decisão OSPAR 2007/1, que proíbe o armazenamento de CO₂ na coluna de água ou diretamente no fundo do mar, e a Decisão OSPAR 2007/2, que estabelece as condições em que o CO₂ pode ser armazenado em formações geológicas, assegurando que tais atividades não comprometem o ambiente marinho.

A Diretiva 2014/89/UE, de 23 de julho, estabelece um enquadramento para o ordenamento do espaço marítimo na União Europeia, compatível com projetos de CCS. De acordo com o Artigo 5.º, os Estados-Membros devem ter em consideração fatores económicos, sociais e ambientais de modo a apoiar o desenvolvimento sustentável do setor marítimo. Além disso, os Estados-Membros devem procurar contribuir para o desenvolvimento sustentável dos setores da energia *offshore*, do transporte marítimo, das pescas e da aquicultura, bem como para a proteção e melhoria do ambiente, incluindo o reforço da resiliência aos impactos das alterações climáticas.

Conforme já referido na secção 4.1.1, o Decreto-Lei No. 38/2015, de 12 de março (complementado pelo Decreto-Lei No. 39/2015, de 30 de julho), transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva 2014/89/UE do Parlamento e do Conselho Europeu, de 23 de julho de 2014, que estabelece um quadro para o ordenamento do espaço marítimo. Este decreto-lei desenvolve a Lei No. 17/2014, de 10 de abril, que estabelece as Bases da Política de

Ordenamento e de Gestão do Espaço Marítimo Nacional. Embora não seja explicitamente referido, é recomendável que os projetos piloto de armazenamento de CO₂ estejam alinhados com estas orientações. O promotor do projeto é responsável por assegurar a adoção de todas as medidas necessárias para alcançar e manter o bom estado ambiental do meio marinho. Além disso, após a cessação do título de utilização privativa, o respetivo titular fica obrigado a repor as condições físico-químicas que tenham sido alteradas, salvo se tais alterações resultarem num benefício ambiental comprovado.

Nos termos do Artigo 23, e em articulação com o Decreto-Lei No. 151-B/2013, de 31 de outubro, o Plano de Afetação, enquanto instrumento que designa áreas específicas do espaço marítimo para determinados usos e atividades, está sujeito a Avaliação de Impacte Ambiental sempre que tal seja exigido ao abrigo daquele diploma. A AIA do Plano de Afetação deve ter em consideração o relatório ambiental aprovado (Artigo 13). Tal como discutido na secção 4.1.1, as atividades de investigação científica podem ser dispensadas da apresentação de um Plano de Afetação por decisão ministerial.

A Lei No. 19/2014, de 14 de abril inclui os instrumentos necessários para uma gestão ambiental eficaz. De acordo com o Artigo 18, os instrumentos de avaliação ambiental visam assegurar que projetos, públicos ou privados, suscetíveis de causar impactos no ambiente, no ordenamento do território ou na qualidade de vida dos cidadãos sejam sujeitos a uma AIA prévia à sua aprovação. Esta avaliação deve considerar, entre outros aspetos, o estado atual do ambiente, a avaliação de alternativas, os cenários de referência, os impactos cumulativos de outros desenvolvimentos planeados ou existentes, bem como os contributos recolhidos no âmbito da consulta pública. No caso de projetos suscetíveis de provocar efeitos ambientais adversos significativos, a avaliação deve ainda incluir uma análise do ciclo de vida.

4.3.1.4.1 Processo de Avaliação de Impacte Ambiental

Na sequência da apresentação do enquadramento jurídico e regulamentar da AIA, a presente secção descreve as principais etapas, as responsabilidades institucionais e os prazos indicativos associados ao processo de AIA para projetos cujo foco não seja a investigação e que considerem a injeção de mais de 100 kton de CO₂, enquadrando-se no âmbito da aplicação do Decreto-Lei No. 60/2012.

As diferentes etapas do processo de AIA, incluindo aquelas aplicáveis a projetos CCS, encontram-se representadas na Figura 4.6.

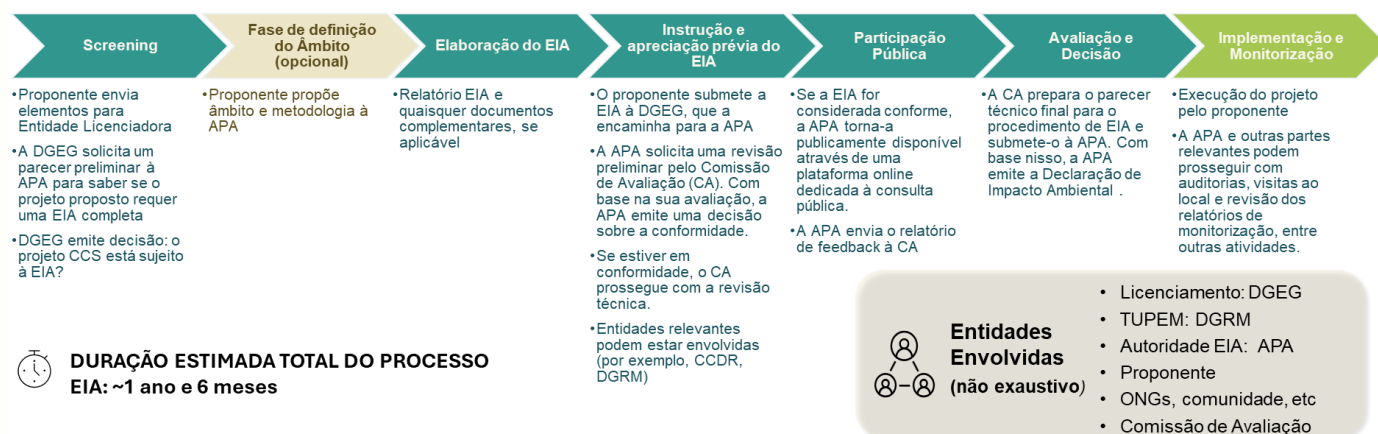


Figura 4.6 - Principais etapas do processo de AIA (1 – Conforme solicitado no Anexo IV do Decreto-Lei n.º 151-B/2013; 2 – De acordo com o Anexo III do Decreto-Lei n.º 151-B/2013; 3 – De acordo com o Anexo I do Decreto-Lei n.º 151-

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

B/2013; 4 – Dias úteis; 5 – Conteúdo mínimo listado no Anexo V do Decreto-Lei n.º 151-B/2013; 6 – Equipa multidisciplinar, nos termos do Artigo 9.º do Decreto-Lei n.º 151-B/2013; 7 – Os prazos podem variar).

As autoridades e entidades relevantes que estão, ou podem estar, envolvidas no processo de AIA associado a projetos de captura e armazenamento de carbono, como o PilotSTRATEGY, encontram-se listadas na Tabela 4.3 seguinte.

Tabela 4.3 - Autoridade competente e principais entidades associadas ao processo de AIA para projetos de CCS. Autoridades que emitem pareceres sobre projetos e atividades enquadrados na Subcategoria A1 do Grupo 11 “Transporte de energia, combustíveis e substâncias químicas”.

Competência da Entidade	Entidade	Descrição
CCS	Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG)	Emite licenças para a exploração e armazenamento geológico de CO ₂
AIA	Agência Portuguesa do Ambiente (APA)	Coordena e controla o processo de avaliação de impacto ambiental
Atividades marinhas	Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM)	Emite licenças (e.g., TUPEM) para o uso privado do espaço marinho e assegura o cumprimento dos regulamentos nesse domínio
Conservação da natureza	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF)	Emite opinião sobre os impactos em áreas e/ou espécies protegidas, incluindo a biodiversidade marinha

Note-se que a lista inclui as principais entidades envolvidas, podendo, no entanto, participar outras entidades adicionais em função da fase do processo de AIA e da natureza específica do projeto e da matéria em análise, tais como a Direção Geral para o Património Cultural. Contudo, caso a fase piloto envolva a injeção de menos de 100 kton e exista alinhamento com as autoridades competentes, o projeto enquadra-se como investigação científica, ficando dispensado do cumprimento integral dos requisitos previstos nesse diploma.

4.3.1.5 Aquisição sísmica e operações de perfuração de poços – Enquadramento legal

Esta secção compreende a lista de verificação de conformidade aplicável às operações de aquisição sísmica e perfuração de poços de prospeção em Portugal. As competências relativas às atividades de prospeção e exploração de depósitos minerais e ao armazenamento geológico de CO₂ encontram-se distribuídas pelas seguintes entidades:

DGEG – Direção-Geral de Energia e Geologia: principal entidade licenciadora para projetos de prospeção e armazenamento geológico, incluindo projetos de CCS;

APA – Agência Portuguesa do Ambiente: responsável pela Avaliação de Impacte Ambiental e pelo licenciamento ambiental;

DGRM – Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos: emite pareceres técnicos sobre segurança marítima e navegação, coordena os pareceres interministeriais relativos à utilização do espaço marítimo e à emissão do TUPEM (Título de Utilização Privativa do Espaço Marítimo), nos termos do Artigo 50.º do Decreto-Lei n.º 38/2015.

4.3.1.5.1 Aquisição sísmica 3D

A aquisição sísmica continua sujeita a: 1) licenciamento ambiental prévio (ou isenção devidamente justificada) pela APA; 2) obtenção de TUPEM; e 3) comunicação à DGEG com o plano técnico e o cronograma de execução. Uma lista de verificação de conformidade pode ser resumida da seguinte forma:

- Submissão do plano técnico à DGEG;

- Pedido de isenção ou submissão de EIA à APA;
- Pedido de TUPEM à DGRM;
- Emissão de parecer técnico pela DGRM;
- Comunicação do início da atividade.

4.3.1.5.2 Perfuração do poço

O enquadramento legal atualizado para as atividades de perfuração de poços exige:

- Licença de prospeção emitida pela DGEG;
- Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) obrigatória, salvo dispensa expressa pela APA;
- TUPEM para ocupação do espaço marítimo, emitido pela DGRM;
- Plano de segurança e de emergência aprovado pela DGRM;
- Comunicação do início das atividades.

O processo de AIA evidencia a necessidade de alinhar o procedimento português com as práticas europeias, incluindo uma separação clara entre o licenciamento e a AIA para atividades de aquisição sísmica, perfuração e armazenamento. Adicionalmente, em determinados casos, sobretudo aqueles que envolvam potenciais impactes cumulativos, ambientes sensíveis ou projetos isentos de AIA, poderá ser exigido um estudo de referência autónomo e aprofundado.

4.3.2 Atividades durante a fase de prospeção

O presente PEP abrange as atividades exigidas durante a fase de prospeção para a implementação do local de armazenamento de CO₂, nomeadamente a aquisição de dados de sísmica e a perfuração do poço de injeção. A injeção piloto propriamente dita e o respetivo acompanhamento terão de ser objeto de um PEP específico, uma vez que o volume a injetar, a profundidade de injeção e a taxa de injeção serão revistos com base nos dados obtidos durante a fase de prospeção.

4.3.2.1 Operações de aquisição de sísmica 3D

Durante a fase piloto está prevista a realização de uma campanha de aquisição sísmica de reflexão 3D na área *offshore* da Bacia Lusitaniana, localizada a cerca de 20 km da costa da Figueira da Foz (Figura 4.7).

A campanha abrangerá uma área total de 1225 km² (35 x 35 km) que integra o local de injeção de CO₂, correspondendo a uma área com profundidades de coluna de água entre 60 e 180 m. As coordenadas da área considerada para aquisição sísmica são apresentadas na Tabela 4.4.

A área estende-se para além da localização do prospecto, incluindo regiões circundantes que não estão cobertas por sísmica 3D, garantindo continuidade e complementaridade da informação geofísica necessária para a caracterização do complexo de armazenamento, particularmente do reservatório e da formação selante. A extensão da área para oeste e norte é relevante para uma melhor caracterização da continuidade, conectividade e transmissibilidade das falhas geológicas identificadas, aspetos cruciais para avaliar potenciais riscos de sismicidade induzida futura.

A área alargada apoia, igualmente, o plano de monitorização a longo prazo da dispersão da pluma de CO₂ em profundidade. Permitirá analisar a propagação da pressão e a frente de pressão ao longo do período de injeção de 30 anos, o que é crítico para a obtenção de volumes de pressão e saturação de gás ao longo do tempo com base no sinal 4D obtido a partir de múltiplas campanhas sísmicas 3D. Ao considerar uma área mais ampla, é ainda possível

melhorar a estratégia de desenvolvimento e monitorização, assim como determinar a melhor localização de futuros poços adicionais de injeção de CO₂.

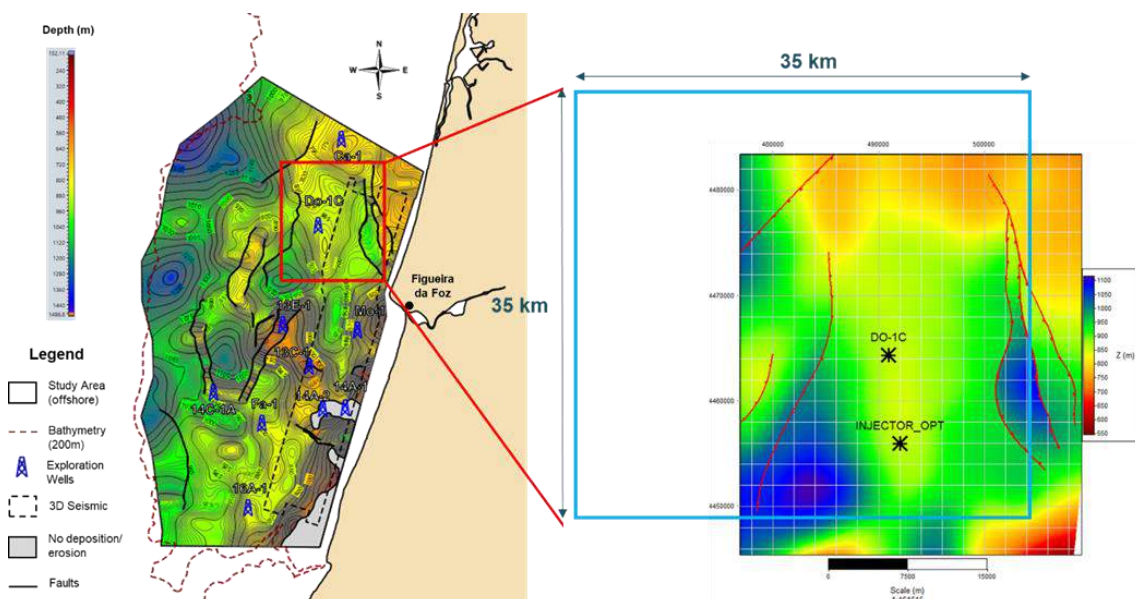


Figura 4.7 - Localização da área a ser coberta pela campanha sísmica 3D no offshore da Bacia Lusitaniana. A área de cobertura total está indicada pelo polígono a azul.

Tabela 4.4 - Coordenadas da área a ser coberta por sísmica 3D (WGS84 EPSG: 4326).

Vértices do polígono	X(m)	Y(m)
Superior direito	40°27'43"	8°56'54"
Superior esquerdo	40°27'43"	9°21'40"
Inferior esquerdo	40°08'45"	9°21'40"
Inferior direito	40°08'47"	8°56'54"

O alvo dos trabalhos da caracterização sísmica localiza-se a uma profundidade total entre 800 e 1400 m TVDSS (*Truth Vertical Depth Subsea*), incluindo as formações geológicas do reservatório e do selo. Estes dados serão fundamentais para:

- Contribuir com informação para o planeamento do poço de injeção de CO₂, uma vez que fornecem informação crucial para a confirmação da sua localização, previsão da profundidade de injeção e identificação de riscos associados à perfuração;
- Caracterizar a estrutura, a estratigrafia e as propriedades dos fluidos do complexo de armazenamento (reservatório e selo), permitindo a obtenção de dados de elevada qualidade para interpretação sísmica estrutural e estratigráfica avançada, bem como para a interpretação quantitativa das propriedades das rochas e dos fluidos (inversão sísmica);
- Caracterizar o complexo de armazenamento numa região mais alargada em torno do local previsto para a injeção de CO₂, incluindo uma área de sobreposição com o levantamento sísmico 3D de Cabo Mondego, na parte oriental. Mais de metade da área do prospecto foi apenas mapeada/interpretada com base em antigas linhas sísmicas 2D;
- Avaliar os potenciais riscos de sismicidade induzida (caracterização da continuidade, conectividade e transmissibilidade das falhas geológicas), nomeadamente na parte

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

ocidental do local de injeção, correspondendo a uma área onde ocorrem falhas complexas identificadas nas linhas sísmicas 2D existentes;

- Criar uma linha de base para estudos de sismicidade induzida ao longo do tempo;
- Estabelecer uma linha de base (pré-injeção) para a monitorização a longo prazo da dispersão da pluma de CO₂, correspondendo ao levantamento inicial/tempo zero de uma análise sísmica 4D time-lapse (propagação da pressão e frente de pressão);
- Melhorar as estratégias de injeção e de monitorização, incluindo o apoio à decisão sobre a localização de poços adicionais de injeção para o desenvolvimento à escala comercial;
- Realizar registo sísmico multicomponente.

4.1.1.1 Enquadramento geológico

Na área de aquisição, o maior potencial de armazenamento é identificado nas rochas do Cretácico Inferior, constituindo o denominado Grupo de Torres Vedras (localmente designada por Formação da Figueira da Foz¹). Esta formação é composta maioritariamente por arenitos, depositados em ambiente fluvial, com intercalações de argilas selantes, que foram observadas e descritas em alguns dos poços de prospeção existentes na área de estudo. A rocha selante é constituída por uma espessa camada impermeável localizada no topo do reservatório, no Cretácico Superior, que combina, na sua parte superior, calcários predominantes depositados num ambiente de plataforma carbonatada marinha e, na base, margas e argilas, que constituem um refletor sísmico forte e facilmente identificável. Nesta área, é ainda interpretada a presença de diapiros salinos, limitados por falhas e identificados nas linhas sísmicas 2D antigas (Figura 4.8).

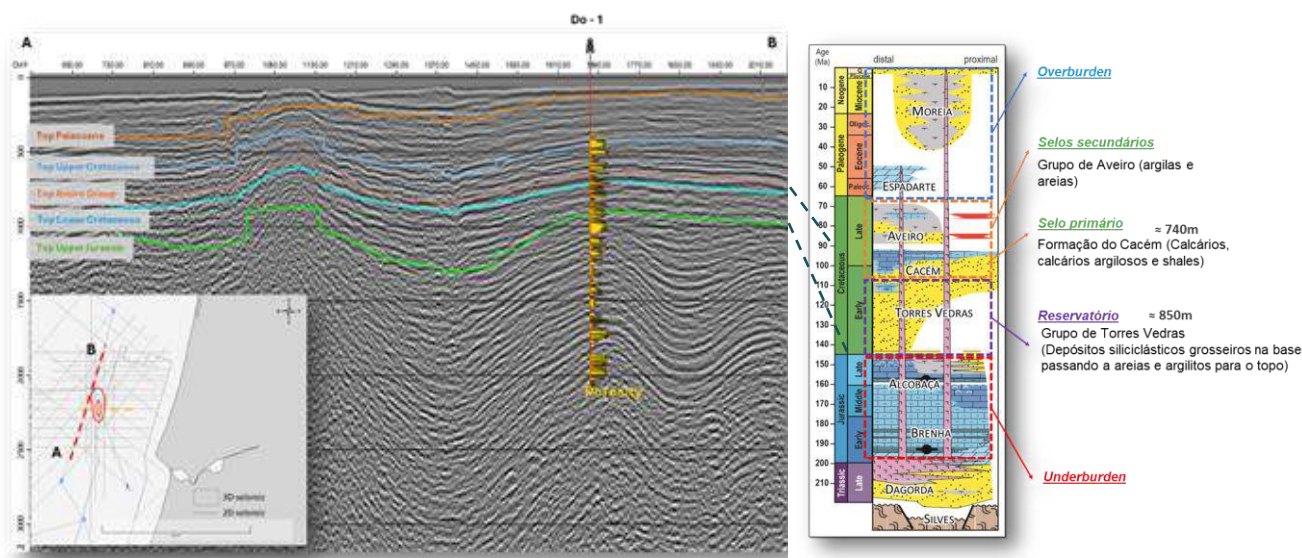


Figura 4.8 - Linhas sísmicas 2D antigas e correlação estratigráfica.

¹ O complexo registo tectónico da Bacia Lusitaniana conduziu à diferenciação de múltiplas sub-bacias, nas quais as formações do Cretácico que, embora mantenham as características sedimentológicas gerais, apresentam diferenças que conduziram à atribuição de designações locais específicas para formações lateralmente equivalentes. No presente relatório, tal como em todos os demais do PilotSTRATEGY, foram seguidas as designações constantes dos Sistemas Petrolíferos em Portugal, conforme adotadas pela DGEG (ver o sítio da DGEG para os Sistemas Petrolíferos), uma vez que a maior parte dos dados utilizados no projeto resulta dos esforços de exploração de hidrocarbonetos realizados na bacia Lusitaniana.

4.3.2.1.1 Recomendações para a aquisição de dados de sísmica

Recomenda-se a realização de uma campanha sísmica *offshore* de Alta Resolução Estendida (XHR), com mini-streamers, com início das operações previsto para 2027, tendo em consideração aspectos geofísicos e logísticos, bem como a necessidade de uma imagem detalhada do subsolo para a caracterização geológica e posterior monitorização do armazenamento de CO₂. Uma ilustração esquemática de um levantamento sísmico com mini-streamers é apresentada na Figura 4.9.

Os navios de aquisição sísmica são utilizados para rebocar os mini-streamers abaixo da superfície do mar, que transportam hidrofones. As ondas sonoras são transmitidas junto ao navio através de canhões de ar comprimido, propagando-se através da coluna de água e do fundo marinho, onde são refletidas pelas diferentes camadas rochosas. Estas ondas sonoras refletidas são captadas pelos hidrofones distribuídos ao longo dos *streamers* e, após processamento, permitem obter uma imagem tridimensional do subsolo.

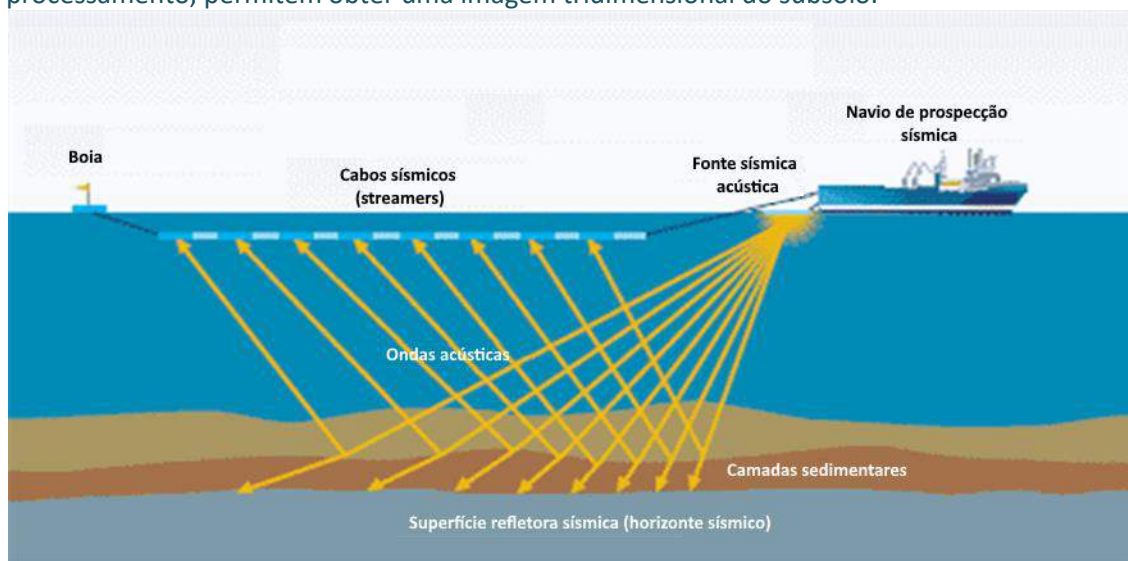


Figura 4.9 - Imagem que ilustra um levantamento sísmico com streamers (adaptado de www.fishsafe.org/en/offshore-structures/seismic-surveys).

Os navios rebocam, normalmente, vários *streamers* (de 1 a 12), com comprimentos variáveis que podem atingir até 5000 metros. No decurso da aquisição de dados, estes navios exibem sinais e luzes que indicam uma embarcação com capacidade de manobra restrita. Os *streamers* são afastados através de *diverters*, os quais são semelhantes a portas de arrasto de meia-água, podendo o conjunto atingir larguras superiores a 500 metros. A extremidade de cada *streamer* é assinalada por uma bóia de cauda equipada com refletor de radar e luzes intermitentes. A velocidades dos navios pode atingir entre 4 e 5 nós, necessitando de manter uma trajetória retilínea durante a aquisição de dados, sendo normalmente acompanhados por uma “embarcação de apoio” (*chase boat*), que auxilia na notificação de outras embarcações sobre as operações em curso.

As áreas de levantamento variam significativamente em dimensão e podem abranger grandes extensões da superfície do mar. A Figura 4.10 apresenta uma representação gráfica dos principais componentes e equipamentos deste sistema.

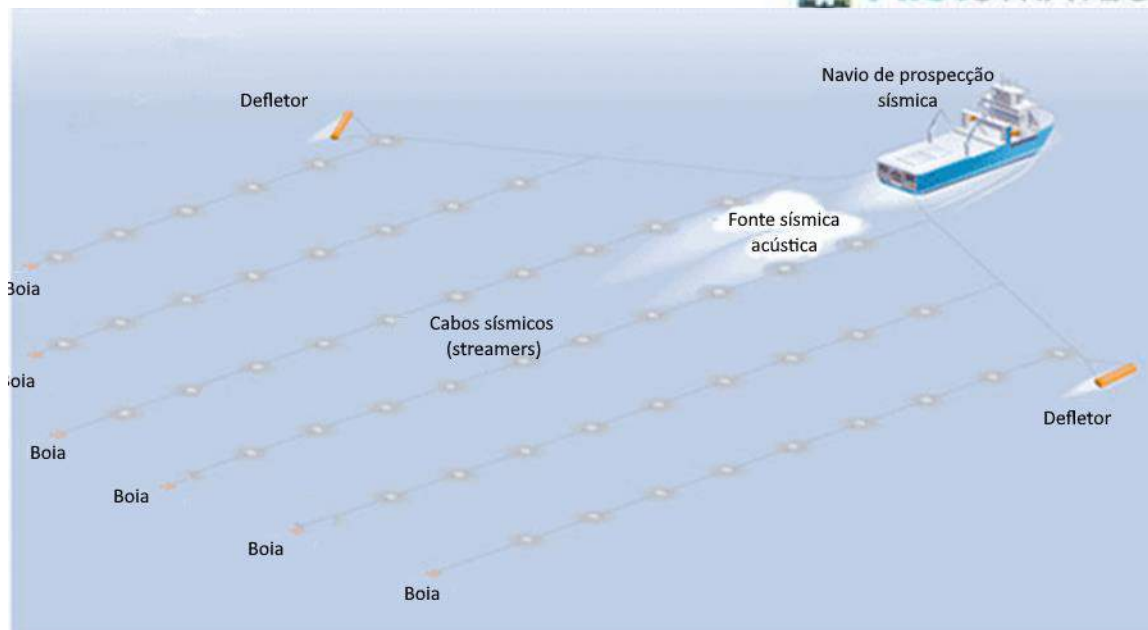


Figura 4.10 - Imagem que ilustra um navio de prospecção sísmica em operação com o diverso tipo de equipamento associado (Fonte: www.fishsafe.org/en/offshore-structures/seismic-surveys).

Mini-streamers são conjuntos de hidrofones de alta resolução rebocados por navios e utilizados em levantamentos sísmicos em ambiente marinho. Esta tecnologia tem sido utilizada com sucesso em vários projetos de CCS, notadamente no campo de *Sleipner*, no Mar do Norte. As principais vantagens da aquisição sísmica com mini-streamers para armazenamento de CO₂ são:

- Alta resolução, proporcionando uma boa imagem das camadas superficiais e da pluma de CO₂, uma vez que utiliza streamers muito mais curtos (de dezenas a centenas de metros) do que as campanhas de sísmica convencionais com *streamer*;
- Custo-benefício, devido aos menores custos associados a navios menores e tempos de mobilização mais curtos;
- Permitir um levantamento da situação de referência (*baseline*) com resolução mais elevada do que a obtida por streamers convencionais, de modo a fornecer uma melhor repetibilidade para estudos *time-lapse* (4D) na monitorização da pluma, em comparação com streamers convencionais.;
- Redução da pegada ambiental, já que não é necessário instalar equipamento no fundo marinho, como na aquisição com Ocean Bottom Nodes. Por outro lado, utiliza fontes acústicas menores (impacto acústico reduzido) e streamers mais curtos (mais fáceis de manusear em águas rasas).

No entanto, este tipo de aquisição enfrenta desafios na estimativa de velocidades em zonas mais profundas e na atenuação de reflexões múltiplas, exigindo processamento inovador ou abordagens combinadas para obtenção de imagens com boa resolução em profundidade.

Os parâmetros gerais para o “desenho” da campanha de aquisição sísmica estão resumidos na Tabela 5. A principal recomendação consiste em utilizar, tanto quanto possível, parâmetros de aquisição densos para garantir uma imagem de alta resolução, cobertura multi-azimutal (para melhorar a repetibilidade), e alto *fold* (para assegurar uma elevada relação sinal/ruído, ou seja, menos ruído do que em levantamentos baseados em streamers convencionais).

Tabela 4.5 - Parâmetros sísmicos 3D e caracterização do alvo.

Área de estudo	1 225km ²
Coluna de água	80-85m
Profundidade do alvo (em profundidade)	800-1500 m
Profundidade do alvo (em tempo)	0.8-1.3 segundos
Tipo de Reservatório/Selo	Estrutural e estratigráfico
Litologia do Reservatório/Selo	Reservatório: formação siliciclástica (Cretácico Inferior); Selo: rochas carbonatadas (Cretácico Superior)
Tempo de aquisição	Campanha de sísmica de reflexão com mini-streamers XHR

A recomendação para a configuração dos *mini-streamers* é apresentada na Tabela 4.6, e a configuração da fonte na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 - Configuração típica de mini-streamers no levantamento XHR.

Número de <i>streamers</i>	6–12 mini-streamers
Comprimento do <i>Streamer</i>	600–1000 m
Separação entre <i>Streamers</i>	25–50 m
Profundidade do <i>Streamer</i>	2–4 m
Intervalo de grupo	3.125–6.25 m

Tabela 4.7 - Configuração da fonte.

Tipo de fonte	Disparo em ar comprimido
Volume total	300–1,000 in ³
Frequência predominante	80–200 Hz
Profundidade a que é rebocado	1.5–3 m
Intervalo entre disparos	6.25–12.5 minutos

4.3.2.1.2 Desafios operacionais expectáveis

Alguns desafios operacionais para a realização da campanha de aquisição sísmica são esperados devido à proximidade da costa portuguesa, nomeadamente pela existência de

atividades antropogénicas relevantes como o tráfego marítimo e a pesca, bem como por condições ambientais adversas (correntes e ventos fortes e ondulação).

A área de levantamento apresenta uma atividade de pesca significativa, com uma parte signativa da área de prospeção coberta por artes de pesca. Para minimizar perturbações tanto na aquisição sísmica quanto nas atividades de pesca locais, recomenda-se manter contacto com as autoridades locais e com as associações de pescadores.

Dada a proximidade da área de levantamento 3D sísmico ao porto da Figueira da Foz, espera-se um tráfego marítimo significativo. Recomenda-se contactar as autoridades portuárias e atualizar regularmente a localização das embarcações durante toda a campanha de aquisição para evitar conflitos.

4.3.2.2 Perfuração do poço de injeção

O local do poço de injeção de CO₂ está planeado para ser perfurado na área *offshore* da Bacia Lusitaniana, encontrando-se a cerca de 22 km da Figueira da Foz, conforme ilustrado na Figura 4.11. Este poço está previsto para ser utilizado na injeção de menos de 100 kton de CO₂ durante um período entre 12 e 15 meses, na fase piloto, bem como para a recolha de perfis geofísicos (*logging*) e realização de testes. A recolha destes dados será fundamental para assegurar a possibilidade de utilização deste mesmo poço numa eventual fase comercial.

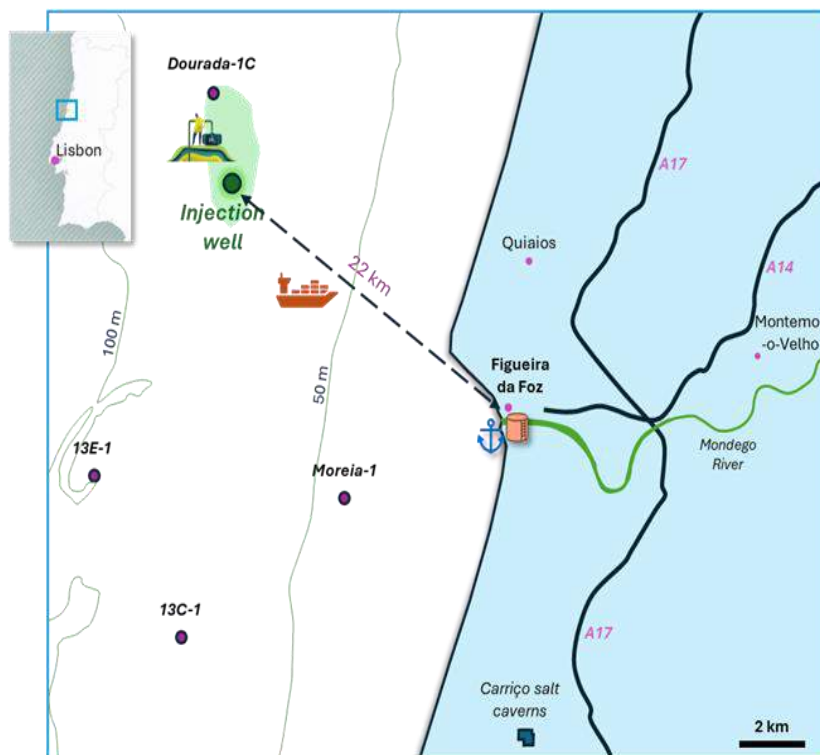


Figura 4.11 - Localização do poço de injeção de CO₂ ao largo da Figueira da Foz.

4.3.2.2.1 Prognóstico do poço

A profundidade do poço de injeção é estimada a partir dos dados existentes sobre o poço antigo “Dourada-1C”, situado a 11,7 km a Norte do local seleccionado para a injeção, de acordo com a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Estimativa da profundidade do poço de injeção de CO₂.

	Profundidade (m)	Formação	Litologia
Overburden		Fm. Espadarte	Depósitos siliciclásticos e dolomitos do Cenozóico
Topo selo secundário	415	Grupo Aveiro	Depósitos silicilásticos do Cretáceo Superior
Topo selo primário	770	Fm. Cacém	Calcários/dolomitos, calcários argilosos e argilas do Cretáceo Superior
Topo reservatório	880	Grupo Torres Vedras	Depósitos siliciclásticos do Cretáceo Inferior, com sedimentos grosseiros na base, evoluindo para arenitos e argilitos intercalados em direção ao topo

4.3.2.2.2 Perigos associados à perfuração

Não são esperados perigos associados à perfuração.

4.3.2.2.3 Planeamento da perfuração do poço

O desenho do poço de injeção de CO₂ é apresentado na Figura 4.12. O poço é constituído por quatro secções: o tubo condutor de 20", revestimento de superfície de 13 3/8", revestimento de 9 5/8" e uma secção em furo aberto. A parte inferior do poço será deixada em furo aberto, de modo a reduzir os danos na formação. Ao nível do condutor de 20" será instalada uma válvula de segurança de fundo (DHSV – Downhole Safety Valve), que consiste numa válvula de corte de emergência destinada a prevenir a libertação descontrolada de fluidos do reservatório em caso de emergência à superfície. A profundidade total (TD) do poço é de 1400 m, de forma a acomodar com segurança dois intervalos de injeção localizados a 1025-1065 m e 1155-1205 m de profundidade.

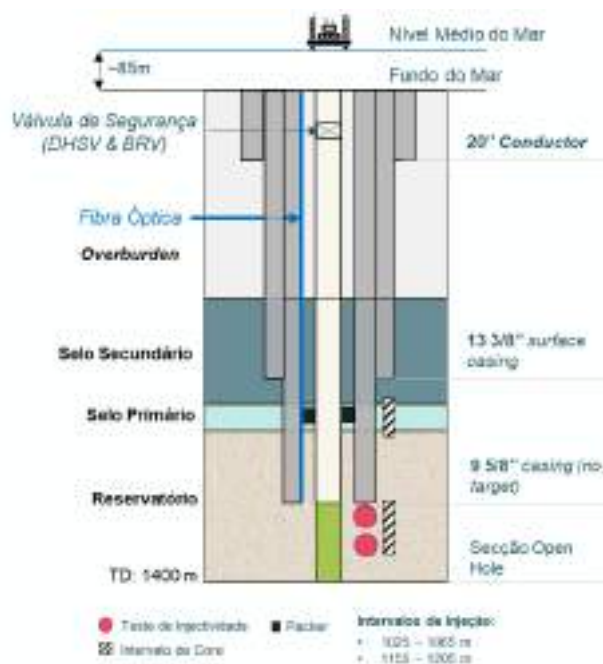


Figura 4.12 - Desenho do poço de injeção de CO₂.

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

É considerado a aplicação de revestimento até à parte superior, uma vez que este constitui uma barreira de segurança adicional. A sapata do revestimento de superfície é de 20", ou seja, cerca de 0,5 m. Durante todas as atividades de perfuração será instalado uma cabeça de poço (*wellhead*) e, sobre este, um sistema de prevenção de escape descontrolado de fluidos (BOP – *Blow Out Preventer*), conforme ilustrado nas Figuras 4.13 a 4.15.

A cabeça de poço é o conjunto crítico instalado à superfície que sela o topo do furo, fornecendo suporte estrutural aos revestimentos e às colunas de produção e funcionando como o ponto de controlo para a gestão do escoamento de fluidos sob alta pressão do reservatório para as instalações de superfície e de CO₂ no sentido inverso. Atua como elemento de ligação entre os tubos no subsolo subsuperfície e os equipamentos de superfície.

O BOP é um sistema de segurança de alta pressão instalado na cabeça de poço, destinado a selar o furo e a controlar fluxos perigosos de óleo ou gás (*blowouts*) durante as operações de perfuração, constituindo a última linha de defesa da sonda para a prevenção de acidentes ambientais e para a proteção do pessoal e dos equipamentos. As principais funções do BOP incluem o controlo do poço, permitindo o encerramento do furo para conter os fluidos da formação caso a pressão exceda o peso do fluido de perfuração, bem como a selagem e a proteção ambiental, prevenindo a libertação descontrolada de fluidos.



Figura 4.13 - Esquema da cabeça de poço e da instalação de um BOP (Blow Out Preventer).



Figura 4.14 - Exemplo de uma cabeça de furo offshore (Fonte: www.offshore-energy.biz/universal-subsea-installs-defender-on-talos-subsea-well/).



Figura 15 - Exemplo da instalação de um BOP (Blow Out Preventer, <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/rigs-and-equipment/pressure-control-equipment/>).

A perfuração das secções do poço correspondentes ao condutor de 20" e ao revestimento de superfície de 13 3/8" será realizada sem *riser* e sem BOP, utilizando lama de perfuração à base de água, que será descarregada no mar. Este tipo de lama de perfuração é composto por água doce ou salgada com aditivos como bentonite, barite ou polímeros. Apresenta custos mais reduzidos e um menor impacte ambiental. A secção de perfuração mais profunda (revestimento de 9 5/8" e furo aberto) está planeada para ser executada com o apoio de um *riser* no tubo de perfuração e com o BOP instalado. Neste caso, poderão ser utilizadas lamas à base de óleo, uma vez que permitem um melhor controlo do poço; estas lamas não são libertadas para a coluna de água, sendo recolhidas na unidade de perfuração.

Durante a fase de conclusão do poço de injeção, o furo é preenchido com um fluido de completação ou uma salmoura, considerada "limpa", isto é, isenta de partículas, de forma a evitar o bloqueio da perfuração. Este fluido é igualmente especificado de modo a não danificar a formação Reservatório e a garantir uma pressão hidrostática adequada no interior do poço. Tipicamente, trata-se de uma salmoura de elevada densidade, a qual é selecionada para assegurar uma pressão em sobrecarga relativamente à pressão dos poros da formação, contribuindo assim para a estabilidade do poço e para o controlo do fluxo de fluidos durante a operação.

A utilização de plataformas autoelevatórias (*jack-up rigs*) (Figura 4.16) é comum na perfuração de poços de injeção de CO₂ em águas pouco profundas a intermédias (até cerca de 150m), sendo o projeto *Greensand*, na Dinamarca, um exemplo relevante. Este tipo de unidades móveis proporciona uma plataforma estável para operações de perfuração e injeção com elevada precisão, sendo frequentemente mais económicas quando comparadas com a utilização de plataformas fixas em projetos de armazenamento de CO₂ localizados em águas pouco profundas. Estas unidades são constituídas por um casco flutuante equipado com várias pernas móveis, capazes de elevar o casco acima da superfície do mar. As dimensões das plataformas *jack-up* variam consideravelmente, mas geralmente incluem um casco (por exemplo, com 55–70 m de comprimento, 53–72 m de largura e 7–9 m de espessura) e pernas longas (por exemplo, 30–122 m ou mais), que suportam decks de grandes dimensões (por exemplo, entre 65 × 62 m² e 89 × 102 m²).



Figura 4.16 - Exemplo de um Jack-up rig (adaptado de www.aquaterraenergy.com/the-only-way-is-jack-up-rigs-cost-effective-solutions/).

O ruído gerado por uma plataforma *jack-up* durante as operações de perfuração é significativo, sendo caracterizado por elevados níveis de pressão sonora (Sound Pressure Levels – SPL) que podem atingir até cerca de 120 dB, variando consoante a intensidade da operação (por exemplo, perfuração ativa versus períodos de espera). O ruído é dominado por frequências baixas (aproximadamente entre 2 e 1400 Hz), embora inclua também componentes de frequências mais elevadas, podendo afetar a fauna marinha, com potencial para provocar alterações comportamentais, e representar desafios adicionais para a proteção auditiva dos trabalhadores, exigindo medidas de controlo associadas à carga dos motores e às vibrações. As emissões acústicas resultam essencialmente do funcionamento da maquinaria (bombas, motores) e da interação da broca com as formações geológicas, gerando assinaturas de frequência distintas das produzidas por embarcações de apoio, com uma atenuação mais rápida das componentes de alta frequência.

4.3.3 Caracterização da área de estudo

A caracterização da área de estudo inclui a descrição da batimetria e das características geológicas, ambientais, ecológicas e socioeconómicas, que constituem a linha de base preliminar desenvolvida com base nos dados e informações disponíveis.

4.3.3.1 Batimetria

Os dados batimétricos foram recolhidos a partir do portal EMODnet (www.emodnet.ec.europa.eu/), que compila dados disponíveis de levantamentos multifeixe e monofeixe ao longo da margem Oeste Ibérica. A área de estudo localiza-se ao largo, a Noroeste da cidade da Figueira da Foz, e insere-se no domínio geomorfológico da plataforma continental e do talude superior do território continental português (Figura 4.17). Nesta região, a plataforma continental apresenta uma largura média de 40–45 km, estendendo-se desde a linha de costa até profundidades que variam entre 50 e 100 m. É, de um modo geral, caracterizada por uma superfície relativamente plana, com declives do fundo marinho compreendidos entre 0,23% e 0,35%.

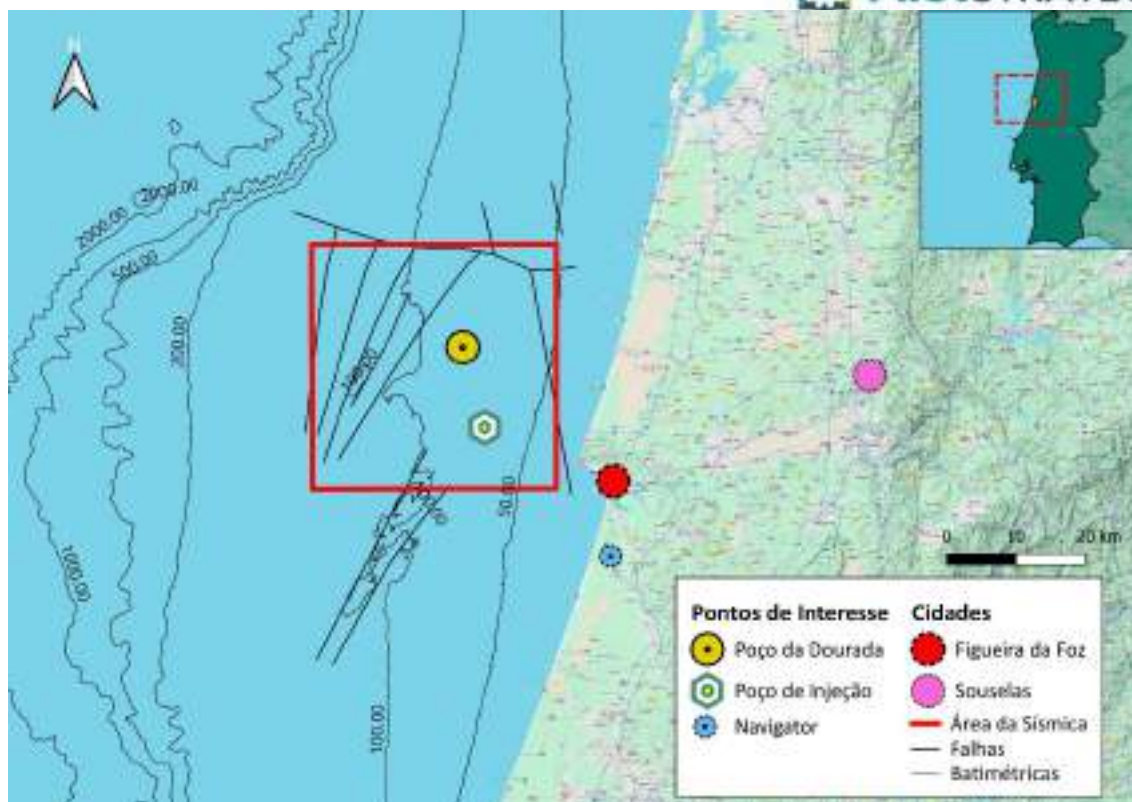


Figura 17 - Enquadramento geomorfológico da área de estudo (para as coordenadas do polígono a vermelho, ver Tabela 3). Pormenor: Localização da Figura à escala de Portugal continental.

À escala regional, a margem Oeste Ibérica apresenta uma plataforma continental irregular, mas geralmente estreita, com a rutura da plataforma frequentemente situada a profundidades próximas de ~160 m. Esta margem é profundamente dissecada por canhões submarinos com orientação geral Este–Oeste, em particular nas áreas a Sul da latitude da Figueira da Foz (por exemplo, os canhões da Nazaré, de Cascais e de Setúbal–Lisboa), que se estendem desde a plataforma continental, a profundidades inferiores a 50 m, até à planície abissal ibérica, onde as profundidades atingem cerca de 5000 m. A localização destes canhões submarinos é fortemente condicionada por estruturas tectónicas herdadas, sendo a sua génese associada a processos erosivos e à instabilidade sedimentar (e.g. Lastras *et al.*, 2009).

4.3.3.2 Geologia

Os dados relativos à composição dos sedimentos superficiais (baseados sobretudo na granulometria) foram obtidos a partir do EMODnet e encontram-se representados na Figura 18. O tipo de sedimento varia significativamente ao longo da plataforma continental, sendo este um aspeto relevante para a interpretação dos diferentes tipos de habitat. Em toda a plataforma continental, os tipos de sedimentos apresentam uma variação expressiva, influenciando diretamente a natureza e distribuição dos habitats bentónicos (Mamede *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2013).

Tal como se observa no mapa, a zona costeira e a plataforma interna na região de estudo são predominantemente cobertas por sedimentos grosseiros e areias. Em particular, identificam-se extensas áreas de Areia (representadas a laranja) e de Areia Cascalhenta (representadas a amarelo-claro/bege). Estes sedimentos grosseiros são típicos de ambientes costeiros dinâmicos, sustentando comunidades específicas de infauna e epifauna adaptadas a substratos móveis e instáveis (Mamede *et al.*, 2022).

Mais ao largo, na região da plataforma média, o mapa indica a presença de rocha (representada a verde-escuro). Estes substratos rochosos constituem importantes habitats de fundo duro, fundamentais para a ocorrência de organismos sésseis e para a disponibilização de refúgio a uma elevada diversidade de fauna marinha, o que está de acordo com a caracterização geral da plataforma média, frequentemente marcada pela ocorrência de afloramentos rochosos. As zonas de transição a partir destas áreas rochosas, estendendo-se em direção à rutura da plataforma (ainda que esta não esteja explicitamente delimitada por um tipo de sedimento específico no mapa), são caracterizadas pela presença de sedimentos mais finos. Observam-se áreas de lodo/silte (representadas a cinzento) e de cascalho (representadas a azul-claro), que correspondem aos “sedimentos arenosos lodosos” referidos na descrição regional mais ampla. Estes sedimentos albergam, tipicamente, comunidades adaptadas a ambientes de menor energia hidrodinâmica, frequentemente com maior teor de matéria orgânica (Martins *et al.*, 2013). Estudos realizados na plataforma continental portuguesa indicam que sedimentos cascalhentos e áreas pouco profundas e mais abrigadas tendem a apresentar valores de diversidade mais elevados quando comparados com sedimentos lodosos e zonas mais profundas (Martins *et al.*, 2013).

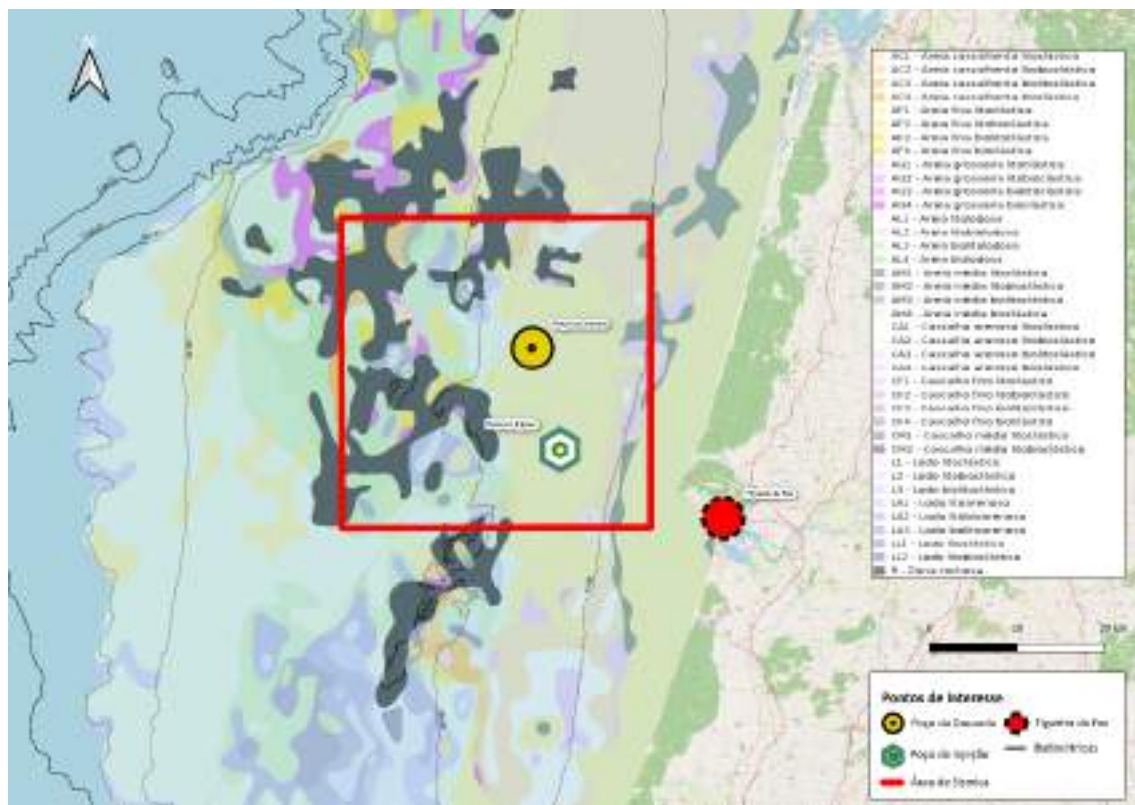


Figura 4.18 - Distribuição dos diferentes tipos de sedimentos na plataforma continental e na área de estudo.

4.3.3.3 Ambiente e ecologia

4.3.3.3.1 Fitoplâncton

Atendendo à disponibilidade limitada de estudos específicos e sistemáticos sobre as comunidades de fitoplâncton na área ao largo da Figueira da Foz, a presente caracterização baseia-se na literatura científica regional e geral disponível para a costa ocidental Ibérica (Western Iberian Coast – WIC) e, sempre que possível, em estudos mais especificamente focados na costa Noroeste e ocidental de Portugal. Embora esta abordagem seja necessariamente generalista, fornece um enquadramento robusto para descrever a estrutura, a dinâmica e a variabilidade das comunidades de fitoplâncton expectáveis na área de estudo, a qual se insere num dos sistemas costeiros mais produtivos do Atlântico Nordeste (Moita, 2001; Ferreira *et al.*, 2021; Favareto *et al.*, 2023).

O fitoplâncton constitui a base da cadeia trófica marinha e desempenha um papel central na produção primária oceânica, no ciclo de nutrientes e no sequestro biológico de carbono. Estes organismos microscópicos fotossintéticos são responsáveis por uma fração substancial da fixação global de carbono e sustentam, direta ou indiretamente, todos os níveis tróficos superiores dos ecossistemas marinhos (Brotas *et al.*, 2019; Moita, 2001). A sua distribuição e abundância são condicionadas por fatores físicos, químicos e biológicos, em particular pela disponibilidade de nutrientes, pela intensidade da mistura vertical, pela estratificação da coluna de água, pela radiação solar e pelos padrões de circulação oceânica.

De um modo geral, as comunidades de fitoplâncton marinhas são dominadas por três grandes grupos taxonómicos: diatomáceas, dinoflagelados e cocolitóforos. As diatomáceas estão tipicamente associadas a ambientes ricos em nutrientes e fortemente misturados, apresentando elevadas taxas de crescimento e desempenhando um papel fundamental na exportação de carbono orgânico para águas mais profundas. Entre os géneros mais comuns incluem-se *Chaetoceros*, *Pseudo-nitzschia*, *Leptocylindrus*, *Thalassiosira*, *Skeletonema* e *Rhizosolenia* (Moita, 2001; Favareto *et al.*, 2023). Os dinoflagelados, como *Ceratium*, *Dinophysis*, *Gymnodinium* e *Prorocentrum*, tendem a dominar em condições mais estáveis e estratificadas, sendo frequentemente característicos de fases tardias das florações ou de períodos de relaxamento do afloramento costeiro. Os cocolitóforos, em particular *Emiliania huxleyi* (Lohmann) W.W. Hay & H. Mohler 1967, *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner 1943 e *Coccolithus pelagicus* (Wallich) J. Schiller 1930, são comuns em águas mais oceânicas e relativamente pobres em nutrientes, estando associados a períodos prolongados de estratificação e a elevada transparência da água.

A costa ocidental e Noroeste de Portugal integra o Sistema de Afloramento da Margem Ibérica, um dos mais produtivos do Atlântico Nordeste. Este sistema é caracterizado pela predominância de ventos de Norte durante a primavera e o verão, os quais induzem transporte de Ekman e promovem o afloramento de águas frias e ricas em nutrientes à superfície. Estes processos desencadeiam aumentos significativos da biomassa fitoplanctónica, refletidos em elevadas concentrações de clorofila *a* e em florações intensas dominadas por diatomáceas (Moita, 2001; Favareto *et al.*, 2023).

A resposta do fitoplâncton ao afloramento costeiro foi descrita em detalhe por Favareto *et al.* (2023), que demonstraram que tanto a intensidade como a duração dos eventos de afloramento exercem um forte controlo na estrutura das comunidades. Durante períodos de afloramento ativo, dominam diatomáceas de rápido crescimento, como *Chaetoceros* e *Pseudo-nitzschia*, enquanto os períodos de relaxamento favorecem o aumento relativo de dinoflagelados e cocolitóforos (Figura 19). Este padrão reflete uma sucessão ecológica clássica, impulsionada pela disponibilidade de nutrientes e pelo grau de estabilidade da coluna de água. Observações *in situ* realizadas por Moita (2001) já haviam demonstrado que as águas ao largo da costa portuguesa apresentam uma sucessão sazonal bem definida das comunidades de fitoplâncton: domínio de diatomáceas durante a primavera e o verão em associação com o afloramento, aumento da importância relativa dos dinoflagelados durante períodos de estratificação da coluna de água e de relaxamento do afloramento, e maior abundância de cocolitóforos em ambientes mais oceânicos ou em fases tardias das florações. Estes padrões são consistentes com distribuições de clorofila *a* derivadas de satélite, que evidenciam fortes gradientes da costa para o largo e elevada variabilidade interanual (Ferreira *et al.*, 2021; Favareto *et al.*, 2023).

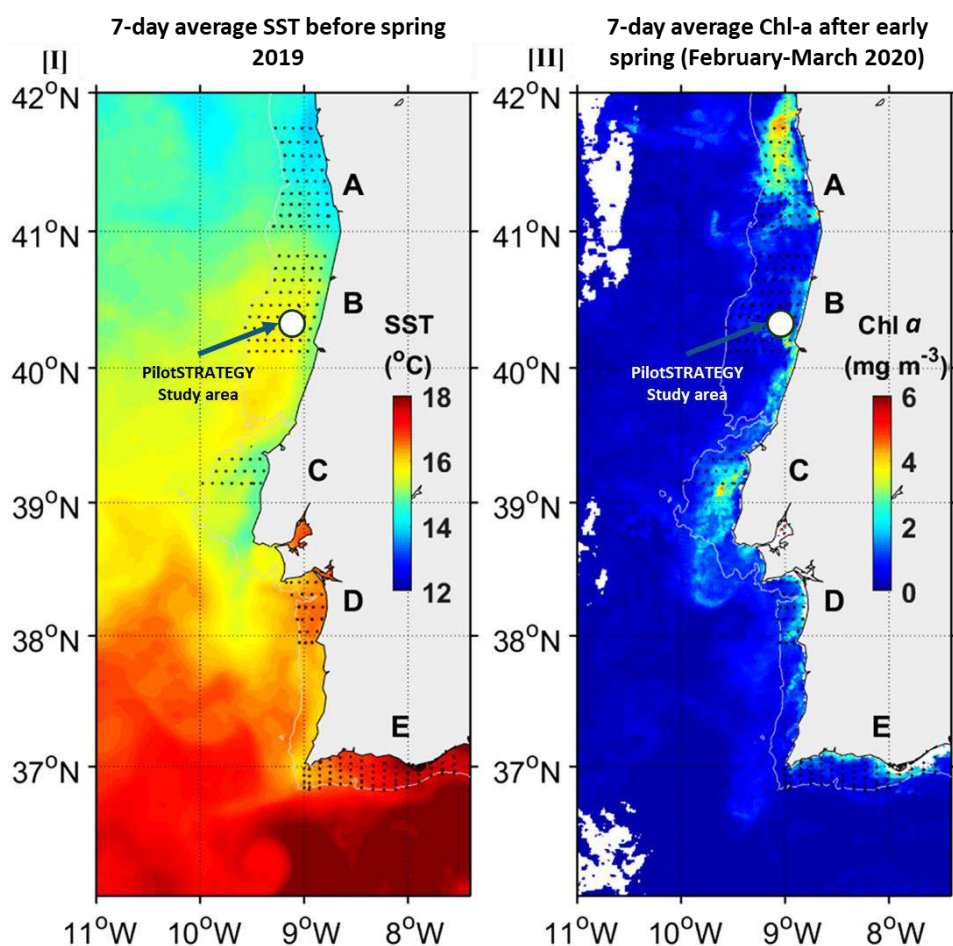


Figura 4.19 - As imagens de satélite ilustram as condições da água através de uma média de sete dias de [I] temperatura da superfície do mar (SST; °C, NASA/JPL, 2015) antes da primavera de 2019 e de [II] concentração de clorofila *a* (mg m⁻³, EU-CMEMS, 2022) após o início da primavera na Área A. Estas figuras exemplificam a resposta da estrutura da comunidade de fitoplâncton às fases de afloramento costeiro e de relaxamento, evidenciando o domínio das diatomáceas durante períodos de afloramento ativo e o aumento da contribuição de dinoflagelados e cocolitóforos em condições mais estratificadas. Fonte: Favareto *et al.* (2023).

Os resultados obtidos por Moita (2001), Mendes (1997; 1999) e Cruz *et al.* (2022) são consistentes com os fenómenos de afloramento costeiro que predominam entre junho e setembro ao longo da costa portuguesa. Estes processos são particularmente intensos ao longo das costas Noroeste e Norte da Península Ibérica, onde as águas superficiais são mais frias e ricas em nutrientes. Ao longo da zona costeira, o aumento da mistura vertical da coluna de água está geralmente associado a eventos de tempestade e/ou a condições de afloramento intenso, sendo caracterizado pela presença de comunidades dominadas por espécies maioritariamente de origem bentónica, como *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve 1873, *Thalassiothrix* spp., *Thalassiosira eccentrica* (Ehrenberg) Cleve 1904, *Navicula* spp., *Odontella mobiliensis* (Bailey) Grunow 1884, *Pleurosigma* spp., *Diploneis* spp. e *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschowsky 1902. Associados a estas comunidades, podem também ocorrer cocolitóforos como *E. huxleyi* e *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner 1943, embora estas taxa ocorram geralmente em condições de menor turbulência e a maiores distâncias da costa. Durante o verão, e como indicadores de estratificação da coluna de água, são frequentemente observados dinoflagelados como *Ceratium* spp., *Dinophysis* spp., *Prorocentrum* spp., *Gymnodinium* spp. e *Gyrodinium* spp., em conjunto com a diatomácea *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström 1986. A intensificação da circulação das águas superficiais com o início do período outonal parece ser responsável pelo transporte de espécies como *Hemiaulus chinensis* Greville 1865, *Helicosphaera carteri* (Wallich) Kamptner 1954 e *Syracosphaera pulchra* Lohmann 1902, que apresentam maior afinidade durante o verão. Associados a estas espécies, os dinoflagelados *Gymnodinium catenatum* H.W. Graham 1943 e *Alexandrium affine* (H. Inoue & Y. Fukuyo) Balech 1995 caracterizam florações de dinoflagelados formadores de cadeias que ocorrem tipicamente no outono, com concentrações mais elevadas em zonas de convergência ao longo da plataforma continental do noroeste português.

A análise da fenologia das florações fitoplanctónicas realizada por Ferreira *et al.* (2021), com base numa série temporal diária de 22 anos de dados de clorofila a derivados de satélite, identificou cinco principais fenorregiões ao longo da Costa Ocidental Ibérica (Figura 20). De particular relevância para a presente área de estudo são as fenorregiões Margem Continental (CoMa) e Afloramento Costeiro (CoUp). A região CoMa representa uma zona de transição entre os domínios oceânico e costeiro, com florações que ocorrem tipicamente na primavera, iniciando-se em fevereiro, atingindo o pico em março e terminando em maio. A biomassa fitoplanctónica é moderada, refletindo a influência combinada da circulação costeira, da profundidade da camada de mistura e de uma disponibilidade intermédia de nutrientes. Em contraste, a fenorregião CoUp é caracterizada por uma produtividade muito elevada e por uma forte variabilidade temporal. As florações são de curta duração, intensas e frequentemente associadas a eventos episódicos de afloramento. Em média, a principal floração ocorre no final do verão e início do outono (agosto a outubro), embora múltiplas florações possam desenvolver-se ao longo do ano em resposta à natureza pulsada do afloramento costeiro (Ferreira *et al.*, 2021).

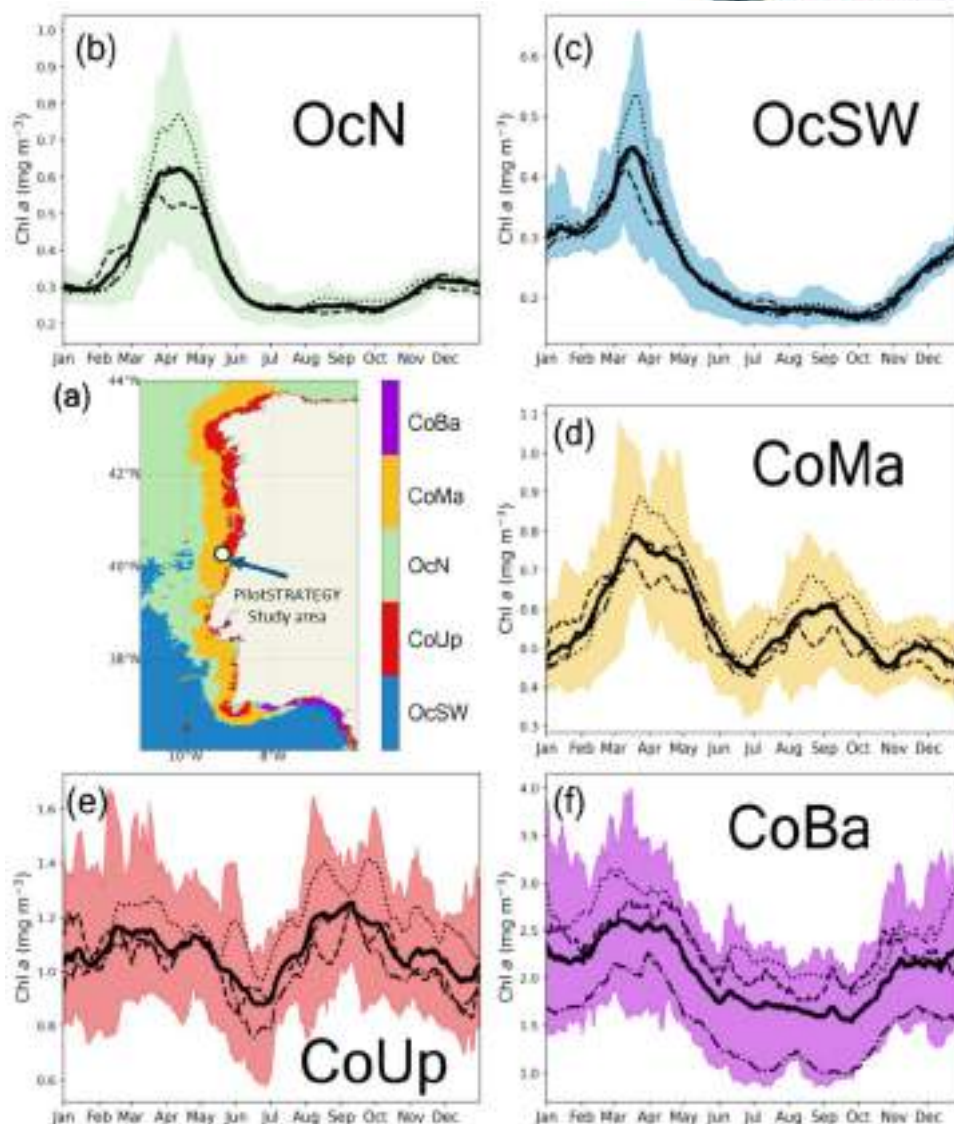


Figura 4.20 - Fenoregiões da costa Ocidental Ibérica identificadas por Ferreira et al. (2021) em base numa série temporal de 22 anos de dados de clorofila *a* derivados de satélite, destacando as regiões da Margem Continental (CoMa) e do Afloramento Costeiro (CoUp) relevantes para a área de estudo. Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2021).

Na área *offshore* da Figueira da Foz, espera-se, assim, que as comunidades de fitoplâncton reflitam uma combinação destes dois regimes principais: a influência direta do afloramento costeiro típico da fenoregião CoUp e as características de transição da fenoregião da Margem Continental (CoMa). Adicionalmente, a descarga fluvial local do rio Mondego poderá contribuir para o enriquecimento em nutrientes e para a formação de frentes costeiras, potenciando a produtividade primária local e alterando temporariamente a composição das comunidades.

Consequentemente, as comunidades de fitoplâncton mais prováveis na área de estudo deverão ser dominadas por diatomáceas como *Chaetoceros*, *Pseudo-nitzschia*, *Thalassiosira*, *Leptocylindrus* e *Skeletonema* durante períodos de afloramento ativo; por dinoflagelados como *Ceratium*, *Dinophysis*, *Gymnodinium* e *Prorocentrum* em condições de estratificação da coluna de água; e por coccolitóforos, especialmente *E. huxleyi*, em águas mais oceânicas, afastadas da linha de costa, e durante as fases tardias das florações.

Apesar da importância ecológica fundamental do fitoplâncton enquanto base da produtividade marinha, regulador dos ciclos biogeoquímicos e principal suporte do zooplâncton e dos níveis tróficos superiores, estas comunidades não são consideradas entre os compartimentos biológicos mais sensíveis às atividades do projeto PilotSTRATEGY. As atividades do projeto tendem a afetar principalmente os habitats bentónicos profundos. A dinâmica do fitoplâncton, por sua vez, é controlada sobretudo por processos de superfície, como o afloramento costeiro, a estratificação da coluna de água, a radiação solar e a disponibilidade de nutrientes na zona eufótica. Assim, quaisquer impactos diretos sobre as comunidades fitoplanctónicas são considerados pouco prováveis, espacial e temporalmente limitados, e amplamente mascarados pela elevada variabilidade natural que caracteriza este grupo biológico ao longo da costa Ocidental portuguesa.

4.3.3.3.2 Zooplâncton

Devido à ausência de estudos dirigidos sobre as comunidades de zooplâncton especificamente na área de estudo, a caracterização apresentada neste relatório baseia-se na literatura disponível para a costa portuguesa e para a costa ocidental ibérica em geral, assumindo-se que esta fornece um enquadramento representativo do funcionamento ecológico da área em análise. Esta abordagem é comumente adotada em estudos de linha de base quando não existem séries temporais locais ou campanhas de amostragem específicas, permitindo uma caracterização fiável das comunidades e dos principais processos que controlam a sua dinâmica (Pardal & Azeiteiro, 2001; Cunha, 1993a, b; MAMAOT, 2012).

O zooplâncton compreende um vasto conjunto de organismos pertencentes a quase todos os grandes filos de animais e desempenha um papel central na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas marinhos. Estas comunidades constituem o principal elo de ligação entre a produção primária pelo fitoplâncton e os níveis tróficos superiores, assegurando a transferência de energia e matéria para peixes, aves marinhas e mamíferos marinhos. Distinguem-se geralmente dois grandes componentes funcionais: o holoplâncton, constituído por organismos que passam todo o seu ciclo de vida na coluna de água, e o meroplâncton, que inclui os estádios larvares de espécies bentónicas e nectónicas que habitam temporariamente o meio pelágico durante a fase reprodutiva (Cunha, 1993a; Pardal & Azeiteiro, 2001).

Do ponto de vista taxonómico, o zooplâncton apresenta uma elevada diversidade estrutural e funcional (Figura 21). Os cnidários estão principalmente representados por hidromedusas e cifomedusas, bem como por organismos coloniais como os sifonóforos, que podem assumir localmente grande importância em termos de biomassa e de predação sobre outros componentes planctónicos (Figura 21A-B). Os moluscos contribuem sobretudo através da produção de ovos e formas larvares, como as larvas trocófora e velígera (Figura 21C-D), que constituem fases-chave para a dispersão e recrutamento das populações bentónicas. Os anelídeos poliquetas são predominantemente organismos bentónicos, mas surgem no zooplâncton quer sob a forma de larvas meroplanctónicas, quer, em alguns géneros, como formas holoplanctónicas carnívoras (Figura 21E). Os crustáceos constituem o grupo dominante do zooplâncton marinho, ocupando o segundo nível trófico da cadeia alimentar marinha. Dentro deste grupo, os copépodes são geralmente os organismos mais abundantes e ecologicamente mais relevantes, sendo frequentemente acompanhados por cladóceros, ostrácodeos, anfípodes, eufausiáceos, misidáceos e formas larvares de decápodes, como zoea e mysis da classe Malacostraca e zoea e megalopa da infraordem Brachyura (Figura 21F-K) (Cunha, 1993a; Pardal & Azeiteiro, 2001). As larvas de briozoários fazem igualmente parte do zooplâncton, caracterizando-se pela presença de uma banda ciliada que permite a natação ativa e a posterior fixação ao substrato, onde ocorre a metamorfose (Figura 21L). Os quetognatos, com o seu corpo

fusiforme e aspeto transparente, são predadores eficientes de copépodes e representam um componente importante do zooplâncton carnívoro (Figura 21M). Para além disso, as larvas de equinodermes, como os estádios equinopluteus e ophiopluteus, são comuns em áreas costeiras produtivas (Figura 21N). O filo Chordata está representado no zooplâncton por três grandes grupos: salpas, apendiculárias e ovos e larvas de peixes (ictioplâncton). Os ovos de peixes pelágicos são geralmente pequenos (cerca de 1 mm), transparentes e maioritariamente esféricos, embora existam várias variações morfológicas, como formas elipsoides no género *Engraulis* ou ovóides em famílias como Gobiidae e Ophidiidae (Morgado *et al.*, 2014). Estes estádios iniciais de vida são fundamentais para a dinâmica populacional dos recursos haliêuticos e constituem uma fração importante do meroplâncton (Figura 21O-P).



Figura 4.21 - Exemplos de organismos que constituem o zooplâncton da zona costeira portuguesa: Cnidária – A, *Podocorine carnea*; B, *Diphyes dispar*; Mollusca – C, *Gastropoda*; D, *Bivalvia*; Annelida – E, *Autolytus* sp. (Polychaeta); Crustacea – F, *Evadne nordmanni* (Cladocera); G, larva zoea de *Pachygrapsus marmoratus* (Decapoda); H, *Mysidacea*; I, *Acartia tonsa* (Copepoda); J, *Cirripedia*; K, estágio praniza de *Paragnathia formica* (Isopoda); Bryozoa – L, larva de briozoário; Chaetognatha – M, *Chaetognatha*; Echinodermata – N, larva ofioplúteo de *Ophiotrix fragilis*; Chordata – O, ovos de peixe; P, larvas de peixe.

Ao longo da costa portuguesa, o ciclo anual de produção de zooplâncton é fortemente sazonal. A produção é geralmente elevada da primavera ao outono e diminui durante o inverno,

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

com o holoplâncton a dominar ao longo da maior parte do ano (Cunha, 1993a, b; Pardal & Azeiteiro, 2001). A biomassa do zooplâncton atinge tipicamente os valores máximos no verão, refletindo o aumento da disponibilidade alimentar associado ao aumento da produção primária, enquanto a riqueza taxonómica tende a ser mais elevada no inverno, particularmente entre novembro e janeiro, período em que a comunidade se torna mais diversa, embora menos abundante (MAMAOT, 2012). Esta dissociação entre biomassa e diversidade é característica de sistemas costeiros temperados e reflete a alternância entre períodos dominados por poucos grupos altamente abundantes e fases de maior heterogeneidade taxonómica.

Os componentes meroplanctónicos são particularmente importantes nas zonas costeiras, onde as larvas de decápodes (por exemplo, caranguejos braquiúros e camarões) podem representar uma fração significativa da abundância total, sobretudo na primavera e no verão, coincidindo com os períodos reprodutivos das espécies bentónicas (Monteiro *et al.*, 2024). Estudos recentes indicam ainda que a estrutura e a abundância do zooplâncton ao longo da costa portuguesa respondem de forma sensível à variabilidade climática, em particular às variações da temperatura da superfície do mar e a índices atmosféricos como a Oscilação do Atlântico Norte (NAO), que influenciam a fenologia, a composição taxonómica e a produtividade global destas comunidades (Monteiro *et al.*, 2024).

Para a costa Ocidental e Noroeste de Portugal, vários estudos indicam que as comunidades de zooplâncton são fortemente influenciadas pela hidrodinâmica costeira, pela variabilidade térmica e pelos processos de produtividade associados ao afloramento costeiro e à circulação sazonal. O zooplâncton é geralmente dominado por copépodes, com géneros comuns como *Calanus*, *Acartia*, *Paracalanus* e *Temora*, frequentemente acompanhados por cladóceros como *Evadne* e *Podon*, apendiculários do género *Oikopleura* e quetognatos do género *Sagitta* (Cunha, 1993a; Pardal & Azeiteiro, 2001).

De um modo geral, a composição típica do zooplâncton da costa Oeste e Noroeste portuguesa inclui uma forte dominância de copépodes no holoplâncton, presença regular de cladóceros, quetognatos e apendiculários, importância sazonal de larvas de crustáceos decápodes e de peixes no meroplâncton, e ocorrência episódica de organismos gelatinosos, como medusas e sifonóforos, que podem exercer localmente impactes significativos na dinâmica trófica.

Apesar da elevada importância ecológica do zooplâncton como elo central nas cadeias alimentares marinhas e como regulador da transferência de energia entre produtores primários e níveis tróficos superiores, estas comunidades não são consideradas particularmente vulneráveis às atividades previstas no âmbito do projeto PilotSTRATEGY. As operações associadas ao projeto ocorrerão principalmente região betónica mesofótica, não sendo expectável que interfiram diretamente com a coluna de água superficial onde se concentra a maior parte da produção e da atividade alimentar do zooplâncton. Importa, no entanto, reconhecer que uma grande proporção do zooplâncton realiza migrações verticais diárias, deslocando-se de profundidades intermédias durante o dia para águas superficiais durante a noite para se alimentar. Esta conectividade vertical entre massas de água superficiais e mais profundas constitui uma característica ecológica intrínseca da dinâmica do zooplâncton. Contudo, estas migrações estão geralmente confinadas à parte superior da coluna de água e são controladas por gradientes ambientais naturais, como a luz, a pressão de predação e a disponibilidade alimentar. Não implicam uma permanência prolongada em ambientes bentónicos profundos onde terão lugar as atividades do projeto. Assim, os impactes potenciais seriam indiretos, altamente localizados e de baixa magnitude, sendo improvável que produzam

alterações mensuráveis na estrutura, abundância ou funcionamento das comunidades de zooplâncton à escala regional considerada neste estudo.

4.3.3.3.3 Ecossistemas bentónicos da plataforma continental – Comunidades bentónicas na avaliação ambiental

Os ecossistemas bentónicos da plataforma continental desempenham um papel importante na manutenção da biodiversidade marinha e no funcionamento dos sistemas costeiros. Constituídos por sedimentos e em certas áreas, por substratos rochosos, oferecem uma grande diversidade de habitats que suportam numerosas espécies marinhas e cadeias tróficas complexas (Schratzberger & Ingels, 2018; Min *et al.*, 2023). Para além disso, as plataformas continentais possuem elevado valor económico, funcionando como áreas de extração de recursos naturais e zonas estratégicas para infra-estruturas submarinas, incluindo cabos e oleodutos (Gasparatos *et al.*, 2017). A intensificação destas atividades, juntamente com a pesca, as dragagens e o desenvolvimento costeiro, tem exercido uma pressão cumulativa sobre os ambientes de plataforma, ameaçando a sua biodiversidade, integridade e sustentabilidade a longo prazo (Li *et al.*, 2023). Este contexto reforça a necessidade urgente de ferramentas mais eficazes e sensíveis, capazes de detectar perturbações ambientais de forma precoce. As abordagens tradicionais de monitorização apresentam limitações em termos de resolução da resposta espacial e temporal, dificultando a identificação e mitigação dos impactos antes da degradação efetiva dos ecossistemas. As comunidades bentónicas, devido à sua forte ligação à biogeoquímica dos sedimentos e à sua rápida resposta a alterações ambientais, fornecem um conhecimento ecologicamente robusto para ser considerado na monitorização ambiental (Vieira *et al.*, 2023, 2025a, 2025b). A análise da estrutura e função destas comunidades permite estabelecer condições de referência para avaliar o impacto de atividades humanas, como levantamentos sísmicos 3D, perfurações e pesca de arrasto. A integração destas análises em estudos de impacto ambiental e em programas de monitorização de longo prazo é, por isso, essencial para a gestão sustentável dos ecossistemas da plataforma continental.

As comunidades bentónicas incluem uma ampla diversidade de organismos que vivem na superfície ou no interior dos sedimentos do fundo marinho (fauna intersticial). Incluem microrganismos, meiofauna e macrofauna, que estabelecem interações ecológicas complexas responsáveis pela regulação dos processos biogeoquímicos, ciclo de nutrientes, transferência de energia e estabilidade dos sedimentos (Bonaglia *et al.*, 2020; Schratzberger & Ingels, 2018).

Os microrganismos (bactérias e *archaea*) são responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e regeneração de nutrientes, influenciando diretamente a química dos sedimentos e a disponibilidade de oxigénio (Wang *et al.*, 2020). As suas atividades metabólicas são altamente sensíveis às alterações ambientais, o que os torna indicadores valiosos das pressões locais e globais (Jokanovic *et al.*, 2021; Jones *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2025a).

A meiofauna é composta por organismos metazoários bentónicos de pequena dimensão (<63µm ou 38 µm) que habitam os interstícios dos sedimentos. É abundante numa grande variedade de habitats marinhos, desde estuários, plataformas continentais até ao mar profundo, apresentando elevada especificidade de habitat (Panieri *et al.*, 2023; Vanreusel *et al.*, 2010; Zeppilli *et al.*, 2018). Devido ao seu reduzido tamanho, elevada abundância, ciclo de vida curtos e ausência de fases larvares pelágicas, a meiofauna responde rapidamente a perturbações ambientais, constituindo bioindicadores fiáveis e economicamente eficientes (Kennedy & Jacoby, 1999; Ridall & Ingels, 2021). Entre os organismos da meiofauna, os nemátodes são o grupo mais diverso e abundante nos sedimentos marinhos, sendo igualmente dominantes em ambientes de plataforma continental ou em habitats perturbados (Sroczyńska *et al.*, 2021; Min

et al., 2023). A sua resiliência e ubiquidade fazem deles excelentes indicadores do estado ecológico dos sedimentos (Ridall & Ingels, 2021). A composição e distribuição espacial das comunidades de nemátodes estão diretamente ligadas às características físico-químicas dos sedimentos. Mesmo pequenas variações no teor de matéria orgânica, concentração de oxigénio, granulometria ou profundidade podem originar alterações substanciais na estrutura das comunidades (Gallucci *et al.*, 2008; Adão, 2022; Min *et al.*, 2023). Além disso, os nemátodes exibem grande variabilidade nos seus traços biológicos, como comprimento corporal, biomassa e estratégias de história de vida, refletindo as condições ambientais locais (Patrício *et al.*, 2012; Sroczynska *et al.*, 2021).

A macrofauna ($\geq 500 \mu\text{m}$) desempenha um papel essencial na remobilização dos sedimentos e nos ciclos biogeoquímicos através da bioturbação e bio-irrigação. Estes processos aumentam a penetração de oxigénio, alteram a permeabilidade dos sedimentos e estimulam a atividade microbiana, contribuindo para a manutenção da estabilidade no sedimento (Kristensen *et al.*, 2012; Bonaglia & Nascimento, 2023). Os padrões de distribuição das comunidades bentónicas são explicados pelo efeito das variáveis ambientais como o tipo de sedimento, a profundidade da água e indicadores de recursos alimentares (por exemplo, matéria orgânica, clorofila *a* e feopigmentos), frequentemente utilizados como preditores (Gallucci *et al.*, 2023; Charrier *et al.*, 2023; Min *et al.*, 2023). A diversidade funcional das comunidades bentónicas é igualmente importante para compreender a transferência de energia entre níveis tróficos e a eficiência dos processos biogeoquímicos (Hiscock *et al.*, 2004; Bonaglia & Nascimento, 2023). Os nemátodes estabelecem uma ligação entre os componentes microbianas e macrobentónicas ao alimentarem-se de bactérias, protozoários e detritos, servindo simultaneamente de presa para organismos macrobentónicos (Vafeiadou *et al.*, 2013). As interações entre nemátodes e bactérias são particularmente relevantes para o metabolismo dos sedimentos (Vieira *et al.*, 2025b). O consumo de microorganismos por parte dos nemátodes estimula o crescimento dos primeiros, aumentando a disponibilidade da matéria orgânica e intensificando os processos de mineralização e desnitrificação promovidos pelas bactérias. Por outro lado, a abundância e diversidade, das comunidades bacterianas afetam diretamente a dinâmica das comunidades de nemátodes (Zimmermann *et al.*, 2016). Estas relações recíprocas sublinham a importância dos nemátodes e das bactérias como preditores ecológicos dos fundos de plataforma (McMahon *et al.*, 2021).

A análise integrada de todas as comunidades bentónicas proporciona uma compreensão abrangente das condições ecológicas dos sedimentos. Cada grupo responde às alterações ambientais em diferentes escalas espaciais e temporais, oferecendo informação complementar sobre os impactos dos fatores de stress. A incorporação das comunidades bentónicas em programas de monitorização ambiental e avaliação de impactos pode melhorar significativamente a capacidade de deteção e interpretação de alterações induzidas pela atividade humana. Estes indicadores ecológicos constituem uma base robusta, precisa e economicamente eficiente para a avaliação de perturbações sedimentares, apoiando o desenvolvimento de estratégias de gestão mais responsivas para os ecossistemas da plataforma continental.

As infraestruturas marinhas promovem impactos significativos sobre os ecossistemas bentónicos afetando diversos mecanismos ecossistémicos (Gasparatos *et al.*, 2017). Durante a construção de estruturas como parques eólicos *offshore* e plataformas petrolíferas, o substrato é alterado e vários habitats podem ser destruídos (Currie *et al.*, 2005). A alteração do habitat decorrente da modificação dos processos hidrodinâmicos e de sedimentação constitui outro fator crítico de perturbação, afetando os padrões de distribuição das comunidades. As

infraestruturas marinhas podem ainda perturbar as interações entre espécies, alterando a composição trófica relativa das comunidades e o fluxo de energia nas cadeias alimentares locais (Coolen *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2024). Em conjunto, estes impactes evidenciam a necessidade de integrar estes fatores nas avaliações de impacto ambiental de projetos relacionados com a implementação de infraestruturas marinhas.

4.3.3.3.1 Principais estruturas bentónicas esperadas na plataforma continental ao largo da Figueira da Foz

A caracterização ecológica das comunidades bentónicas na área de estudo do projeto PilotSTRATEGY baseia-se na integração de um conjunto de dados existentes na bibliografia. Os mapas de probabilidade de ocorrência, de habitats EUNIS e modelos de distribuição de comunidades (MDC) disponíveis em Mamede (2018) serão utilizados como referência, permitindo a comparação direta com as previsões locais produzidas para a área de estudo. Este procedimento permitirá a atribuição preliminar dos principais tipos de comunidades bentónicas dominantes, espécies características e exclusivas de macrofauna, bem como a identificação de potenciais “hotspots” de biodiversidade e áreas de sensibilidade ecológica.

4.3.3.3.2 Enquadramento oceanográfico e físico da área de estudo

O projeto piloto previsto no PilotSTRATEGY decorrerá na plataforma continental portuguesa ao largo da Figueira da Foz, localizada na Margem Oeste Ibérica, numa zona de confluência influenciada pelas águas frias do Atlântico Norte e pelas águas mais quentes provenientes do Norte de África e do Mar Mediterrâneo (Mamede, 2018). A área encontra-se também na proximidade do canhão submarino da Nazaré, uma das mais importantes estruturas geomorfológicas da margem continental portuguesa (Dias & Nittrouer, 1984). O rio Mondego constitui a principal fonte alóctone de sedimentos no sistema costeiro e na plataforma local. Vários estudos indicam que a ocorrência de comunidades bentónicas está tipicamente associada aos sedimentos vasosos da plataforma continental adjacente à foz do estuário do Mondego e resulta de uma clara influência da dinâmica sedimentar estuarina e da descarga de água doce na estrutura do habitat bentónico local (Mamede, 2018; Martins *et al.*, 2012, 2013, 2014).

4.3.3.3.3 Padrões de distribuição espacial das comunidades bentónicas na área de estudo

Os estudos disponíveis identificaram a existência de comunidades distintas com base na profundidade, disponibilidade de matéria orgânica e condições hidrodinâmicas (Vanaverbeke *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2013). As comunidades bentónicas são influenciadas por elevados fluxos de matéria orgânica e por perturbações físicas, como a ressuspensão de sedimentos, criando um ambiente complexo com estruturas de comunidades variadas. Estas estruturas podem suportar elevada biomassa bentónica devido à mobilização de nutrientes, contudo, em áreas com fortes correntes e perturbações mecânicas, as comunidades podem ser expostas a maior stress, resultando em menor diversidade e resiliência (Ramalho *et al.*, 2014; Min *et al.*, 2023; Chen, 2023). Os sedimentos superficiais da plataforma são controlados por uma ampla variedade de fatores tais como: tipo de litologia erodida a partir do continente, aportes fluviais, hidrodinamismo, fisiografia da plataforma (inclinação, barreiras morfológicas), atividade biológica, alterações paleoclimáticas e contaminação antropogénica.

De acordo com Mamede (2018), a abundância e diversidade das comunidades de macrofauna diminuem com o aumento da distância à costa e com a profundidade. Os valores mais elevados ocorrem nas áreas mais rasas, até cerca de 50 m de profundidade, diminuindo em fundos mais profundos. Esta tendência na zona dos 50–60 m coincide também com a presença de sedimentos mais grosseiros (Vanaverbeke *et al.*, 2011; Martins *et al.*, 2013). Os padrões relacionados com a profundidade em ambientes de plataforma continental ao longo da bacia profunda são semelhantes aos observados nas comunidades meiobentónicas (Min *et al.*,

2024), reforçando a importância de integrar estas comunidades nas avaliações ambientais e nos planos de monitorização.

Em Mamede (2018), as comunidades de macrofauna foram categorizadas de acordo com as características dos sedimentos, o regime hidrodinâmico e a composição biológica. Os grupos A3, A2, B1, C1 e C2 correspondem às comunidades ecológicas que se sobrepõem à área de estudo do projeto PilotSTRATEGY (Figura 4.22). Esta classificação baseou-se na tipologia de habitats EUNIS (sistema hierárquico de classificação de habitats europeus), na *Marine Life Information Network* (MarLIN) (Hiscock *et al.*, 2004) e em adaptações locais para a plataforma continental portuguesa. A classificação integra a granulometria dos sedimentos (proporção de sedimentos lodosos, areia e cascalho), a exposição hidrodinâmica (correntes e turbulência), a composição taxonómica (comunidades macrobentónicas dominantes) e as características funcionais (tipo de alimentação, mobilidade, sensibilidade à perturbação). Cada grupo representa um tipo de habitat bentónico com funções ecológicas distintas, níveis de sensibilidade e respostas à pressão antropogénica, essenciais para a avaliação de riscos e para o desenvolvimento de programas de monitorização.

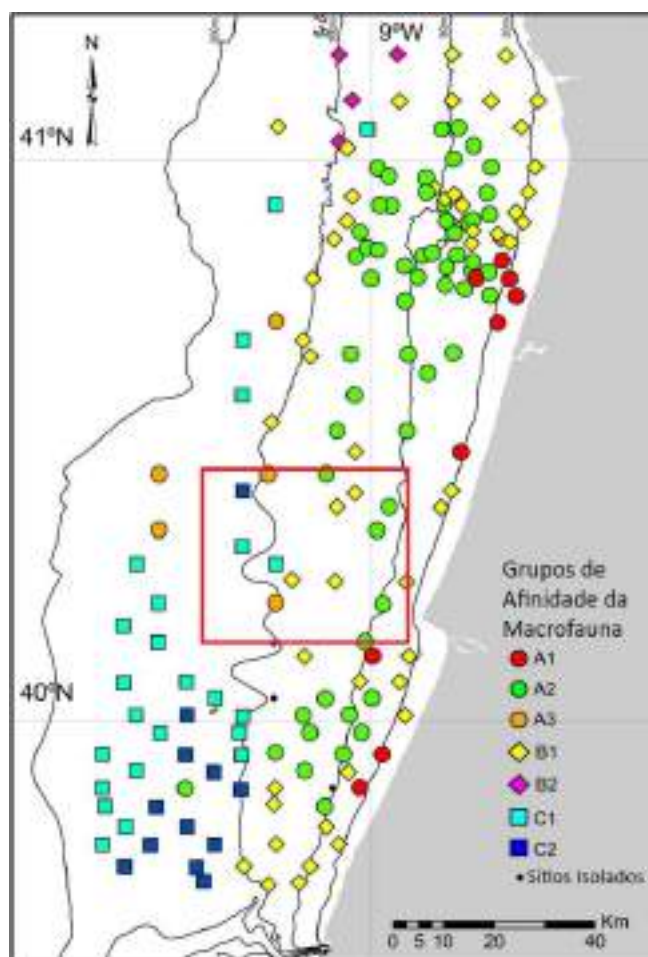


Figura 4.22 - Distribuição espacial dos grupos de afinidade da macrofauna na área de estudo (adaptado de Mamede, 2018).

A plataforma continental abrangida pela área de estudo do PilotSTRATEGY integra diversas estruturas geomorfológicas que condicionam a hidrodinâmica local e os processos de seleção sedimentar, exercendo uma influência direta na distribuição das comunidades A2, A3, B1, C1 e C2 (Martins *et al.*, 2012). A área de estudo engloba um gradiente sedimentar que varia

O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

Página 156

desde sedimentos arenosos e cascalhosos em áreas costeiras até substratos mistos e lodosos em zonas *offshore*, refletindo um mosaico de comunidades bentónicas com níveis contrastantes de sensibilidade ecológica (Tabelas 4.9 e 4.10).

Tabela 4.9 - Características espaciais, batimétricas e sedimentares das comunidades macrobentónicas A2, A3, B1, C1 e C2 definidas em Mamede (2018).

Comunidade	Intervalo de profundidade	Tipo de substrato dominante	Regime hidrodinâmico (estabilidade dos sedimentos)
A2 – Areias grosseiras e Cascalho fino	≈30–80 m (média 57.1 m)	Areia muito grosseira e Cascalho fino	Moderada a alta energia (sedimentos grosseiros bem calibrados, correntes de fundo fortes)
A3 – Areias grosseiras profundas	≈100–140 m (média 120.5 m)	Areia grosseira	Baixa energia e estável (areais grosseiros em ambientes mais profundos e de baixa mobilidade)
B1 – Areias finas	≈20–100 m (média 56.5 m; maior intervalo de prof.)	Areia fina (com baixa concentração de finos) conteúdo (≈6%)	Moderado (areias finas móveis, influenciadas por ondas e correntes tidais)
C1 – Areias muito finas profundas	≈100–140 m (média 126.8 m)	Areia muito fina	Baixo a moderado (acumulação de sedimentos finos no sector mais profundo e calmo)
C2 – Areias lodosas / lodo arenoso profundos	≈100–160 m (média 122 m)	Lodo ou lodo arenoso, Cascalho com concentrações muito baixas (0.04%)	Baixa energia (retenção de sedimentos, mobilidade reduzida, rico em matéria orgânica)

Com base no conjunto de dados bibliográficos disponíveis e em consonância com estudos regionais sobre comunidades bentónicas (Martins *et al.*, 2012a, 2013, 2014; Mamede, 2018), cada comunidade apresenta traços ecológicos relevantes que podem ser utilizados na avaliação ecológica, na análise de sensibilidade e em programas de biomonitorização no decurso do projeto piloto (Tabela 10). As espécies identificadas baseiam-se na composição típica dos bentos da plataforma continental portuguesa e estão em conformidade com as estruturas comunitárias esperadas descritas em Mamede (2018) e em estudos semelhantes realizados na Margem Oeste Ibérica (Martins *et al.*, 2012, 2013, 2014).

4.3.3.3.4 Caracterização detalhada de cada comunidade (A2, A3, B1, C1 e C2) e dos seus fatores estruturantes (abióticos/bióticos)

4.3.3.3.4.1 Comunidade A2 – Areias Muito Grosseiras e Cascalho Fino

A comunidade A2 encontra-se amplamente distribuída pela plataforma central e Norte, ocorrendo a profundidades entre aproximadamente 30 e 80 m. Esta comunidade compreende um total de 59 locais amostrados, dos quais apenas cinco sobrepõem-se à área de estudo do projeto piloto. É caracterizada pela presença de sedimentos muito grosseiros e cascalho fino, frequentemente associados a níveis moderados a elevados de hidrodinamismo.

Tabela 4.10 - Conjuntos ecológicos A3, A2, B1, C1 e C3 descritos por “espécies características”, “espécies exclusivas”, “nível de sensibilidade” e relevância ecológica, de acordo com Mamede (2018).*

Community	Characteristic Species	Exclusive Species	Sensitivity Level*	Ecological Relevance
A2 – coarse sands & fine gravel	<i>Gyptis propinqua</i> , <i>Malmgrenia ljunmani</i> ; the cephalochordate <i>Branchiostoma lanceolatum</i>	<i>Guernea</i> (<i>Guernea</i>) <i>coalita</i> ; <i>Eurysyllis tuberculata</i> ; <i>Megamphopus cornutus</i> (e outras; 147 no total)	Moderado	Indicativa de sedimentos grosseiros, bem oxigenados e de elevada energia hidrodinâmica; fauna intersticial sensível ao aumento da fração fina do sedimento. Resiliência moderada à perturbação.
A3 – Deep coarse sands	<i>Scalibregma celticum</i> ; <i>Urothoe marina</i>	5 espécies exclusivas	Moderado – Elevado	Espécies típicas de areias grossas estáveis em profundidade. Sensíveis a alterações hidrodinâmicas e à instabilidade sedimentar; não oportunistas nem indicadoras de eutrofização.
B1 – Fine sands	<i>Urothoe pulchella</i> ; <i>Glycera tridactyla</i>	<i>Bathyporeia tenuipes</i> ; <i>Westwoodilla caecula</i> ; <i>Lysippe labiata</i> (82 exclusive species total)	Moderado – Elevado	Comunidade típica de areias finas com diversidade β muito elevada e numerosas espécies exclusivas. Sensível a soterramento sedimentar, dragagens e perturbações físicas.
C1 – Deep very fine sands	<i>Auchenoplax worsfoldi</i> ; <i>Terebellides stroemii</i>	<i>Euclymene</i> sp. A; <i>Galathowenia oculata</i> ; <i>Callianassa subterranea</i> (53 espécies exclusivas)	Elevado	Comunidade profunda rica em biodiversidade; predominância de espécies construtoras de tubos e depositívoras. Elevada sensibilidade à turbidez e ao enriquecimento orgânico; recuperação lenta.
C2 – Deep muddy sands / sandy mud	<i>Paradiopatra bihanica</i> ; <i>Nephtys incisa</i>	2 espécies exclusivas (sem referências)	Muito elevado	Habitat lodoso estruturalmente frágil, com baixa resiliência. Dominado por organismos bioturbadores tolerantes a baixas concentrações de oxigénio. Considerado prioritário para monitorização e proteção.

* O nível de sensibilidade é baseado numa combinação de critérios ecológicos, incluindo características das espécies (modo de alimentação, características do ciclo de vida, mobilidade das espécies), dinâmica dos sedimentos (estabilidade), exposição hidrodinâmica e potencial de recuperação, conforme estabelecido em Mamede (2018) e amplamente utilizado na avaliação de impactes para atividades *offshore*.

De acordo com Mamede (2018), o “grupo A2” apresentou os valores médios mais elevados de diversidade α , riqueza específica total e número de espécies exclusivas (147 espécies), bem como o segundo valor médio mais elevado de abundância, diversidade β e índice de Shannon–Wiener. As espécies características desta comunidade incluem os poliquetas *Gyptis propinqua* (Marion & Bobretzky, 1875) e *Malmgrenia ljunmani* (Malmgren, 1867), e o cefalocordado *Branchiostoma lanceolatum* (Pallas, 1774). *G. propinqua* é um poliqueta intersticial típico de ambientes de elevada energia e de areias grosseiras. Trata-se de um pequeno detritívoro móvel que sustenta diversas formas de vida aquática, incluindo peixes e

invertebrados. A sua presença reflete a existência de substratos “limpos”, bem oxigenados e energeticamente ativos, constituindo um indicador útil de estabilidade do habitat e de qualidade sedimentar. Dado que esta espécie responde de forma sensível a alterações na composição do sedimento e nas condições hidrodinâmicas, pode ser utilizada como indicador precoce de alterações ambientais ou perturbações em ecossistemas bentónicos de sedimentos grosseiras (Pérez-Espinoza *et al.*, 2025).

M. Ijungmani, um anfípode predador móvel, está associado a sedimentos grosseiros estáveis. O seu valor para a monitorização ambiental reside na sua função como espécie indicadora do estado dos ambientes bentónicos (Ritter & Bourne, 2024). O cefalocordado *B. lanceolatum* é um organismo filtrador e indicador de um substrato de sedimentos grosseiros limpo e bem oxigenado.

4.3.3.3.4.2 Comunidade A3 – Areias Grosseiras Profundas

Esta comunidade é composta por cinco locais profundos, dos quais apenas dois se sobrepõem à área de estudo. Os locais são caracterizados por sedimentos arenosos grosseiros na plataforma externa, com uma profundidade média de cerca de 120 m. Estes sedimentos encontram-se bem calibrados, com baixo teor de lodo, refletindo ambientes deposicionais de baixa energia, mas estáveis, na plataforma externa. Em contraste com A2, a comunidade A3 apresenta a menor diversidade β , integrando apenas cinco espécies exclusivas, predominantemente táxons especializados associados a sedimentos grosseiros e a habitats profundos e bem oxigenados. As espécies características incluem o poliqueta *Scalibregma celticum* (Mackie, 1991), é um escavador que tipicamente ocorre num substrato profundo de areias grosseiras estáveis, e o anfípode móvel *Urothoe marina* (Spence Bate, 1857), que promove a bioturbação dos sedimentos. Esta comunidade apresenta sensibilidade moderada a perturbações do fundo marinho, uma vez que as suas espécies-chave dependem da estabilidade sedimentar e da existência de uma baixa concentração de partículas finas de sedimento (argilas) no fundo marinho.

4.3.3.3.4.3 Comunidade B1 – Areias Finas (amplo intervalo de profundidades)

Esta comunidade é constituída por 53 locais, dos quais apenas cinco sobrepõem-se à área de estudo. Representa o intervalo de profundidade mais amplo (desde os locais mais rasos até cerca de 100 m) e é predominantemente composta por areias com baixo teor de sedimentos finos ($\approx 5,9\%$). Encontra-se distribuída ao longo de toda a extensão Norte-Sul da área de estudo. O grupo B1 apresenta um elevado número de espécies exclusivas (82 espécies) e registou o valor mais elevado de β -diversidade. As espécies mais características incluem o anfípode *Urothoe pulchella* (A. Costa, 1853), um detritívoro móvel típico de areias finas móveis, e o poliqueta *Glycera tridactyla* (Schmarda, 1861), um predador ativo e indicador de estabilidade sedimentar e de renovação da matéria orgânica. A comunidade B1 corresponde a uma comunidade com funções ecológicas variadas, associada a areias finas de elevada dinâmica, apresentando sensibilidade moderada ao enterramento promovida pela deposição sedimentar e a perturbações físicas.

4.3.3.3.4.4 Comunidade C1 – Areias Muito Finas Profundas

Os sedimentos desta comunidade são caracterizados por areias muito finas, com alguma fração lódica, localizadas maioritariamente no setor Sudoeste, a uma profundidade média de cerca de 127 m. Esta comunidade está representada por dois locais na área de estudo.

Foi observada uma elevada α -diversidade, com 53 espécies exclusivas, dominadas por poliquetas construtores de tubos e depositívoros. As espécies mais características são os

poliquetas terebelídeos *Auchenoplax worsfoldi* (Jirkov & Leontovich, 2013), um estabilizador de sedimentos finos através da construção de tubos, e *Terebellides stroemii* (Sars, 1835), um detritívoro sensível e indicador de areias profundas estáveis. A comunidade C1 é uma das mais diversas, sendo sensível ao enterramento sedimentar, ao aumento da turbidez e à carga orgânica.

4.3.3.3.4.5 Comunidade C2 – Sedimentos Lodosos / Areia-Lodo Profundos

Esta comunidade ocorre em sedimentos profundos lodosos ou areia-lodo, apresentando o maior teor de finos (média entre 55–79%) e uma percentagem extremamente baixa de cascalho (0,04%). Localiza-se na margem Sul, maioritariamente ao largo do Mondego. Os locais situam-se em fundos profundos (profundidade média ≈122 m), sob condições hidrodinâmicas muito reduzidas, funcionando como zona de acumulação sedimentar. Apenas um local desta comunidade está representado na área de estudo.

Esta comunidade apresentou os valores mais baixos de abundância e α -diversidade, caracterizando um habitat reduzido, fino e rico em matéria orgânica. As espécies mais características e abundantes são os poliquetas *Paradiopatra bihanica* (Intes & Le Loeuff, 1975), um forte bioturbador, tolerante a baixos níveis de oxigénio, e *Nephtys incisa* (Malmgren, 1865), um carnívoro comum em sedimentos lodosos estáveis. A comunidade C2 é a menos resiliente, sendo altamente sensível à perturbação física, à cobertura de partículas de silte sobre o fundo marinho e ao enriquecimento orgânico.

4.3.3.3.4.6 Considerações finais

A estrutura das comunidades bentónicas na área de estudo do projeto piloto reflete uma forte interação entre a granulometria dos sedimentos, os gradientes de profundidade, a energia hidrodinâmica e o conteúdo de matéria orgânica, em consonância com os padrões descritos por Mamede (2018) para a plataforma continental adjacente. Cinco comunidades bentónicas bem definidas (A2, A3, B1, C1 e C2) ocupam nichos ambientais distintos no interior da área de estudo, fornecendo um enquadramento ecológico robusto para a avaliação de referência, a previsão de impactes e o planeamento das atividades de monitorização.

As comunidades A2 (areias muito grosseiras e cascalho fino) e A3 (areias grosseiras profundas) representam comunidades associadas a sedimentos grosseiros, desde ambientes de elevada energia até areias profundas estáveis. A comunidade A2 ocorre sobretudo na plataforma intermédia, em ambientes bem oxigenados e de alta energia, enquanto a A3 habita fundos mais profundos e estáveis. Os seus *taxa* característicos (*G. propinqua*, *M. Ijungmani* e *B. lanceolatum* em A2; *S. celticum* e *U. marina* em A3) estão associados a sedimentos permeáveis com elevada renovação hidrodinâmica. Apesar de apresentarem alguma resiliência, estas comunidades são altamente sensíveis ao enterramento sedimentar, à presença de partículas finas na cobertura sedimentar e a processos deposicionais que alteram o espaço intersticial ou a penetração de oxigénio, podendo ser utilizadas como indicadores fiáveis da estabilidade sedimentar e do regime hidrodinâmico. Devem ser preservadas como referência de condições ecológicas do sedimento num contexto de avaliação de perturbações do ambiente marinho.

A comunidade B1 estende-se por um amplo gradiente de profundidade (desde zonas costeiras rasas até cerca de 100 m) e caracteriza-se por areias finas com baixo teor de silte, suportando uma comunidade funcionalmente diversa e dominada por detritívoros móveis (*U. pulchella*) e predadores (*G. tridactyla*). Apresenta a maior β -diversidade da região e um elevado número de espécies exclusivas, sendo particularmente informativa para a detecção de gradientes de perturbação localizados ao longo da plataforma. As suas características funcionais

indicam uma sensibilidade de moderada a elevada à deposição de sedimentos, ao aumento da turbidez e a distúrbios físicos, sobretudo decorrentes de atividades que alteram os fluxos próximos ao leito ou que aumentam a ocorrência de sedimentos finos. A comunidade B1 deve ser priorizada para uma monitorização espacialmente consistente, incluindo o uso de espécie sentinela e indicadores baseados em traços funcionais.

As comunidades C1 (areias muito finas profundas) e C2 (sedimentos lodosos a lodos arenosos) dominam as zonas mais profundas do setor Sudoeste e Sul da área de estudo. São consideradas comunidades associadas a sedimentos finos profundos, altamente diversas, mas de baixa resiliência. A C1 apresenta elevada diversidade α e reflete ambientes deposicionais estáveis de baixa energia, sendo sensível a aumentos prolongados de turbidez, enriquecimento orgânico e perturbação sedimentar. A C2, por sua vez, é caracterizada pela presença de sedimentos finos, ricos em matéria orgânica e de muito baixa energia, apresentando a menor diversidade e resiliência, devendo ser considerada um receptor de alto risco em modelos preditivos e avaliações de impacto.

Em síntese, as comunidades bentónicas exibem respostas funcionais previsíveis aos gradientes de pressão ambiental: as comunidades de sedimentos grosseiros (A2, A3) são sensíveis ao enterramento sedimentar, a alterações na velocidade do fluxo e ao aumento da concentração de partículas finas na cobertura sedimentar; a comunidade de areias finas (B1) é transicional reagindo rapidamente ao aumento da turbidez e ao fluxo sedimentar; as comunidades de sedimentos finos profundos (C1) são diversas, mas frágeis, com trajetórias de recuperação lentas; e as comunidades lodosas (C2) são altamente vulneráveis a perturbações físicas, apresentando baixa resiliência e forte dependência funcional de espécies bioturbadoras. Estas características fornecem uma orientação clara para a modelação de impactos e definição de limiares ecológicos no âmbito das intervenções do projeto PilotSTRATEGY.

4.3.3.3.4 Peixes

A caracterização das comunidades de peixes na área de estudo do projeto PilotSTRATEGY baseou-se em informações provenientes dos inquéritos demersais (2005-2023) realizados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Os inquéritos seguem uma metodologia padronizada e consistem em operações de arrasto de fundo efetuadas em estações fixas e aleatórias distribuídas ao longo da plataforma continental portuguesa, abrangendo diferentes setores geográficos e estratos de profundidade. Cada operação de arrasto possui uma duração padronizada e utiliza uma rede de arrasto demersal adequada para amostrar espécies associadas ao fundo marinho e a ambientes bentopelágicos. Em cada operação são registadas a composição de espécies das capturas e o número total de indivíduos por espécie, permitindo a estimativa de índices de abundância através do CPUE (*Catch Per Unit Effort*), expresso como o número de indivíduos capturados por hora de arrasto (ind h^{-1}). Este indicador foi utilizado no presente estudo para caracterizar a ocorrência e a frequência relativa das espécies de peixes.

Para este estudo foram considerados dados correspondentes às estações localizadas dentro da área de estudo e numa área tampão circundante (Figura 23). O estado de conservação das espécies de peixes foi avaliado com base na Lista Vermelha da *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) para a Europa (www.iucnredlist.org), uma vez que a avaliação nacional se encontra atualmente em revisão. Esta opção metodológica garante a utilização de um referencial internacionalmente reconhecido e atualizado. Além disso, o valor económico foi determinado com base em estatísticas oficiais de desembarques e preços de primeira venda, permitindo classificar cada espécie segundo a sua importância comercial relativa (Tabela 4.11).

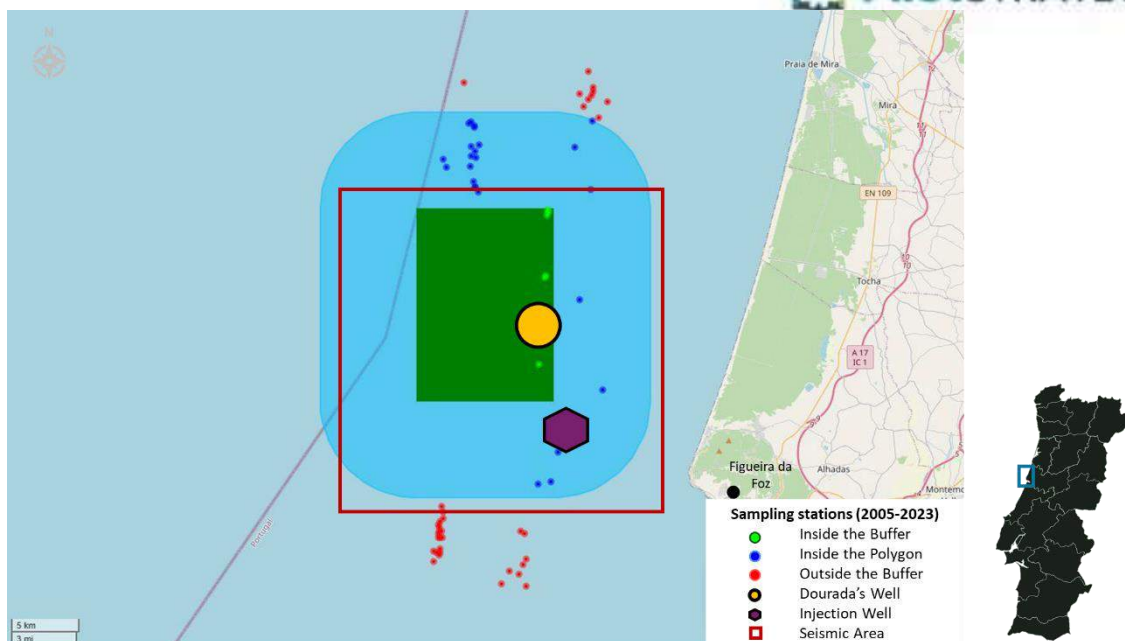


Figura 4.23 - Mapeamento das estações de pesca amostradas durante as campanhas de arrasto de fundo demersal do IPMA entre 2005 e 2023. O polígono a vermelho representa a área de estudo para ser coberta pela aquisição de dados de sísmica 3D; o polígono verde representa a área em avaliação; a área azul corresponde a uma zona tampão de 5 milhas náuticas.

A comunidade de peixes identificada na área de estudo, considerando o conjunto da área em avaliação e a área tampão circundante, compreende um total de 48 espécies pertencentes a 27 famílias, refletindo uma elevada diversidade taxonómica e uma estrutura comunitária típica de ecossistemas costeiros e de plataforma continental do Atlântico Nordeste. Este conjunto integra espécies com afinidades pelágicas, bentopelágicas e demersais, evidenciando a heterogeneidade ecológica da área e a influência de processos oceanográficos regionais, particularmente a elevada produtividade associada à dinâmica costeira ao longo da margem portuguesa.

Em termos de representatividade taxonómica, a família Sparidae é a mais diversa, representada por cinco espécies: Boga-do-mar *Boops boops* (Linnaeus, 1758), Sargo-safia *Diplodus vulgaris* (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817), Besugo *Pagellus acarne* (Risso, 1827), Pargo-legítimo *Pagrus pagrus* (Linnaeus, 1758) e Choupa *Spondyliosoma cantharus* (Linnaeus, 1758). Segue-se a família Triglidae, com quatro espécies: Cabra-vermelha *Chelidonichthys cuculus* (Linnaeus, 1758), Cabra-cabaço *Chelidonichthys lucerna* (Linnaeus, 1758), Cabra-de-bandeira *Chelidonichthys obscurus* (Walbaum, 1792) e Cabra-morena *Eutrigla gurnardus* (Linnaeus, 1758) (Tabela 11). Famílias como Bothidae, Callionymidae, Soleidae e Gadidae são representadas por três espécies cada, enquanto Carangidae, Scombridae, Gobiidae e Scophthalmidae incluem duas espécies cada. Um grande número de famílias era monoespecífico no conjunto de dados analisados, incluindo Alosidae, Engraulidae, Merlucciidae, Mugilidae, Trachinidae, Zeidae, Molidae, Scyliorhinidae e Congridae, entre outras (Tabela 4.11). Esta estrutura revela uma comunidade caracterizada por um pequeno número de famílias altamente diversificadas coexistindo com um grande grupo de famílias representadas por uma única espécie. Quando analisadas separadamente, as duas unidades espaciais apresentam diferenças claras em termos de riqueza. Na área em avaliação, foram registadas 23 espécies pertencentes a 17 famílias, enquanto na área tampão circundante foram capturadas todas as 48 espécies e 27 famílias (Tabela 11). Isto indica que a área tampão engloba a diversidade total observada na região,

enquanto a área em avaliação representa um subconjunto dessa diversidade, composto principalmente pelas espécies mais abundantes e ecologicamente dominantes.

A análise dos valores de CPUE revela que a comunidade de peixes é fortemente dominada por espécies pelágicas e bento-pelágicas de pequeno e médio porte, típicas de ecossistemas costeiros altamente produtivos. Na área em avaliação observa-se uma dominância particularmente acentuada do carapau-negrão [*Trachurus picturatus* (Bowdich, 1825)], que apresenta um CPUE extremamente elevado (20.380,8 ind h⁻¹), destacando-se claramente como a espécie mais abundante. Outras espécies altamente abundantes nesta área incluem a sarda *Scomber scombrus* (Linnaeus, 1758) (CPUE = 1.123,4 ind h⁻¹), a sardinha *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792) (CPUE = 32,6 ind h⁻¹), a cavala *Scomber colias* Gmelin, 1789 (CPUE = 216,6 ind h⁻¹) e o carapau *Trachurus trachurus* (Linnaeus, 1758) (CPUE = 184,8 ind h⁻¹). Estas espécies confirmam a importância ecológica das famílias Carangidae, Scombridae e Clupeidae na estruturação do conjunto pelágico. Outras espécies com CPUE relevante incluem a argentina-branca *Argentina sphyraena* Linnaeus, 1758, a pescada *Merluccius merluccius* (Linnaeus, 1758), a faneca *Trisopterus luscus* (Linnaeus, 1758), o biqueirão *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) e o peixe-aranha-menor *Echiichthys vipera* (Cuvier, 1829), evidenciando a coexistência de espécies pelágicas e demersais na comunidade.

Na área tampão circundante, a dominância está novamente associada a espécies pelágicas de pequeno porte e a gadídeos, embora a abundância se encontre mais uniformemente distribuída entre as espécies. A sardinha *S. pilchardus* apresenta o CPUE mais elevado (1.826,7 ind h⁻¹), seguida do verdinho *Micromesistius poutassou* (Risso, 1827), com 1.427,1 ind h⁻¹, da sarda *S. scombrus*, com 1.156,7 ind h⁻¹, do biqueirão *E. encrasicolus*, com 846,6 ind h⁻¹, e do carapau *T. trachurus*, com 781,5 ind h⁻¹. Outras espécies também apresentam valores elevados de CPUE na área tampão circundante, nomeadamente o carapau-negrão *T. picturatus*, a cavala *S. colias*, a pescada *M. merluccius* (Linnaeus, 1758) e a faneca *T. luscus*. Estes padrões reforçam o papel das espécies pelágicas e bentopelágicas como a base estrutural da comunidade ictiológica regional, enquanto as espécies demersais contribuem sobretudo para a diversidade taxonómica, mais do que para a abundância total.

De modo geral, a comparação entre a área em avaliação e a área tampão indica que, embora a primeiro suporte um menor número de espécies e famílias, capta efetivamente o núcleo da comunidade em termos de espécies dominantes e funcionamento ecológico. A área tampão, em contraste, reflete o espectro taxonómico completo e oferece uma visão mais abrangente da biodiversidade e complexidade ecológica. Os padrões de frequência derivados do mapa de calor corroboram a interpretação baseada em CPUE, mostrando que as espécies mais abundantes são também as de maior ocorrência em ambas as áreas. Na área em avaliação, o carapau-negrão *T. picturatus*, a sarda *S. scombrus*, a sardinha *S. pilchardus*, a cavala *S. colias* e o carapau *T. trachurus* são classificadas consistentemente como “Muito frequentes”, refletindo a sua forte dominância e presença regular na área de estudo (Tabela 1). Na área tampão, estas espécies mantêm elevada frequência, juntamente com o verdinho *M. poutassou* e o biqueirão *E. encrasicolus*, também com valores CPUE muito elevados. Estas espécies formam o núcleo da comunidade regional, representando os principais contribuintes para a abundância e biomassa na área em apreço.

Em contraste, um elevado número de espécies apresenta valores CPUE baixos, sendo classificadas como “Raras” em ambas as áreas, incluindo a raia-curva *Raja undulata* Lacepède, 1802, a raia-pintada *Raja montagui* Fowler, 1910, o pregado *Scophthalmus maximus* (Linnaeus, 1758), o peixe-lua *Mola mola* (Linnaeus, 1758), o peixe-lança-menor *Ammodytes tobianus* Linnaeus, 1758, caboz-de-Sanzo *Lesueurigobius sanzi* (de Buen, 1918) e diversas espécies de peixe-chato, como a carta-de-bico *Citharus linguatula* (Linnaeus, 1758) e a língua *Dicologlossa*

cuneata (Moreau, 1881). Estas espécies apresentam ocorrências esporádicas ou uma baixa densidade populacional natural na área contribuindo, principalmente, para a biodiversidade total.

Quanto ao estado de conservação, a maioria das espécies é classificada como LC (*Least Concern* - Pouco Preocupante), indicando ampla distribuição e populações estáveis à escala europeia (Tabela 4.11). Contudo, a presença de espécies com maior preocupação de conservação é ecologicamente relevante. O pregado *S. maximus* é classificado como VU (*Vulnerable* - Vulnerável), representando a espécie de maior preocupação dentro da comunidade. Três espécies são classificadas como NT (*Near Threatened* - Quase Ameaçada): tainha-fataça *Chelon ramada* (Risso, 1827), raia-curva *R. undulata* e sardinha *S. pilchardus*. No entanto, em Portugal, a tainha-fataça não possui estatuto de proteção específico ou medidas de proteção especial, pelo que não é considerada de particular preocupação para a conservação a nível nacional. Em oposição, a raia-curva está sujeita a restrições de captura (Portaria n.º 96/2016, 19 de abril), refletindo a sua elevada vulnerabilidade e uma prioridade para a sua conservação em águas nacionais. A sardinha *S. pilchardus* assume particular importância, uma vez que combina elevada relevância ecológica, grande abundância e um nível de conservação que indica uma vulnerabilidade crescente. Algumas espécies são classificadas como DD (*Data Insufficient* - Dados Insuficientes), incluindo o peixe-lança-menor *A. tobianus*, o peixe-lua *M. mola* (Linnaeus, 1758) e o galo-negro *Zeus faber* Linnaeus, 1758. A ocorrência destas espécies introduz um nível adicional de incerteza, uma vez que o conhecimento sobre o nível de conservação das suas populações é ainda insuficiente, justificando a adoção de uma abordagem precaucionária em avaliações sobre o estado ambiental.

A análise do valor económico indica que a maioria das espécies presentes na área de estudo tem baixo valor comercial (Tabela 4.11), dominando espécies que não são um alvo direto da atividade de pesca ou que têm baixa procura no mercado. Não obstante, um número limitado de espécies apresenta alto valor comercial, nomeadamente o salmonete-legítimo *Mullus surmuletus* Linnaeus (1758), o pargo-legítimo *P. pagrus* e o pregado *S. maximus*. Como referido, estas espécies assumem uma importância comercial considerável, sendo altamente valorizados no mercado. Um segundo grupo possui um valor comercial intermédio, incluindo o congro *Conger conger* (Linnaeus, 1758), o areeiro-de-quatro-manchas *Lepidorhombus boscii* (Risso, 1810), a pescada *M. merluccius*, a azevia-raiada *Microchirus variegatus* (Donovan, 1808) e o linguado-legítimo *S. solea*. Dentro deste conjunto, a pescada é particularmente relevante, uma vez que combina valores CPUE elevados, em particular na área tampão, com um valor comercial médio a elevado, o que a torna uma das espécies com maior relevância socioeconómica na área de estudo.

Quando as variáveis abundâncias, frequência, estado de conservação e valor económico, são consideradas em conjunto, é possível afirmar que as comunidades de peixes na área de estudo assumem relevância ecológica e socioeconómica significativa. A comunidade é dominada por pequenas espécies pelágicas muito abundantes, fundamentais para a dinâmica trófica e transferência de energia nos ecossistemas marinhos, apoiando ainda a pesca comercial. Por outro lado, a presença de espécies classificadas como vulneráveis (VU), quase ameaçadas (NT), bem como de espécies sobre as quais não existem dados suficientes para determinar o seu estado de conservação, destaca a área de estudo como tendo uma relevância comercial e de conservação elevadas. Assim, a comunidade de peixes representa um componente biológico chave a considerar na avaliação de impactes ambientais associados ao projeto PilotSTRATEGY, devendo sua estrutura, padrões de abundância e elementos sensíveis à conservação, ser cuidadosamente avaliados quando se proceder à análise e posterior mitigação das pressões relacionadas com o projeto.

Tabela 4.11 - Frequência de ocorrência com base na captura por unidade de esforço (CPUE, ind h⁻¹) da comunidade de peixes da área de estudo do projeto PilotSTRATEGY, registada durante as campanhas de amostragem do IPMA (2005–2023). As cores representam a frequência de ocorrência de cada espécie de peixe em cada área, nomeadamente na área em avaliação e na área tampão circundante (ver Figura 4). As espécies estão listadas de acordo com a sua classificação taxonómica (FishBase) e incluem tanto elasmobrânquios como teleósteos, com os respetivos estados de conservação segundo a Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da IUCN. Os dados fornecem uma visão geral dos padrões de distribuição espacial e da estrutura da comunidade de espécies de afinidade pelágica, bentopelágica e demersal, em relação à área em avaliação e à área tampão circundante. IUCN – Estado de conservação de acordo com a Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da IUCN: NE – Não Avaliada, DD – Dados Insuficientes, LC – Pouco Preocupante, NT – Quase Ameaçada, VU – Vulnerável, EN – Em Perigo, CR – Em Perigo Crítico, EW – Extinta na Natureza, EX – Extinta; CV – Valor comercial (€ – baixo; €€ – médio; €€€ – elevado).

	0-5 ind h ⁻¹	Raro
	5-50 ind h ⁻¹	Pouco freq
	50-500 ind h ⁻¹	Frequente
	≥500 ind h ⁻¹	Muito freq

ESPÉCIES	NOME COMUM	IUCN	EV	Frequência	
				ÁREA EM AVALIAÇÃO	ÁREA TAMPÃO
CLASSE ELASMOBRANCHII					
Ordem Carcharhiniformes					
Família Scyliorhinidae					
Scyliorhinus canicula (Linnaeus, 1758)	Pata-roxa	LC	€		
Ordem Rajiformes					
Família Rajidae					
Raja montagui Fowler, 1910	Raia-pontuada	LC	€		
Raja undulata Lacepède, 1802	Raia-curva	NT	€		
CLASSE TELEOSTEI					
Ordem Acanthuriformes					
Família Caproidae					
Capros aper (Linnaeus, 1758)	Pimpim, Mini-saia, Peixe-pau	LC	€		
Ordem Anguilliformes					
Família Congridae					
Conger conger (Linnaeus, 1758)	Congro	LC	€€		
Ordem Argentiniformes					
Família Argentinidae					
Argentina sphyraena Linnaeus, 1758	Argentina-branca	LC	€		
Ordem Blenniiformes					
Família Blenniidae					
Blennius ocellaris Linnaeus, 1758	Marachomba-borboleta	LC	€		
Ordem Callionymiformes					
Família Callionymidae					
Callionymus lyra Linnaeus, 1758	Peixe-pau-lira	LC	€		
Callionymus maculatus Rafinesque, 1810	Estragão-malhado	LC	€		
Callionymus reticulatus Valenciennes, 1837	Peixe-pau-listado	LC	€		
Ordem Carangiformes					
Família Carangidae					
Trachurus picturatus (Bowdich, 1825)	Carapau-negrão	LC	€		
Trachurus trachurus (Linnaeus, 1758)	Carapau	LC	€		
Ordem Clupeiformes					
Família Alosidae					

ESPÉCIES	NOME COMUM	IUCN	EV	Frequência	
				ÁREA EM AVALIAÇÃO	ÁREA TAMPÃO
<i>Sardina pilchardus</i> (Walbaum, 1792)	Sardinha	NT	€		
Família Engraulidae					
<i>Engraulis encrasicolus</i> (Linnaeus, 1758)	Biqueirão	LC	€		
Ordem Eupercaria incertae sedis					
Família Cepolidae					
<i>Cepola macrophthalma</i> (Linnaeus, 1758)	Suspensório	LC	€		
Família Sparidae					
<i>Boops boops</i> (Linnaeus, 1758)	Boga-do-mar	LC	€		
<i>Diplodus vulgaris</i> (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817)	Sargo-safia	LC	€		
<i>Pagellus acarne</i> (Risso, 1827)	Besugo	LC	€		
<i>Pagrus pagrus</i> (Linnaeus, 1758)	Pargo-legítimo	LC	€€€		
<i>Spondylus cantharus</i> (Linnaeus, 1758)	Choupa	LC	€		
Ordem Gadiformes					
Família Gadidae					
<i>Micromesistius poutassou</i> (Risso, 1827)	Verdinho	LC	€		
<i>Trisopterus luscus</i> (Linnaeus, 1758)	Faneca	LC	€		
<i>Trisopterus minutus</i> (Linnaeus, 1758)	Fanecão	LC	€		
Família Merlucciidae					
<i>Merluccius merluccius</i> (Linnaeus, 1758)	Pescada	LC	€€		
Ordem Gobiiformes					
Família Gobiidae					
<i>Lesueurigobius sanzi</i> (de Buen, 1918)	Góbio-de-Sanzo	LC	€		
<i>Pomatoschistus minutus</i> (Pallas, 1770)	Caboz-comum	LC	€		
Ordem Mugiliformes					
Família Mugilidae					
<i>Chelon ramada</i> (Risso, 1827)	Tainha-fataça	NT	€		
Ordem Muliiformes					
Família Muliidae					
<i>Mullus surmuletus</i> Linnaeus, 1758	Salmonete-legítimo	LC	€€€		
Ordem Perciformes					
Família Ammodytidae					
<i>Ammodytes tobianus</i> Linnaeus, 1758	Peixe-lança-menor	DD	€		
<i>Hyperoplus lanceolatus</i> (Le Sauvage, 1824)	Galeota-maior	LC	€		
Família Trachinidae					
<i>Echiichthys vipera</i> (Cuvier, 1829)	Peixe-aranha-menor	LC	€		
Família Triglidae					
<i>Chelidonichthys cuculus</i> (Linnaeus, 1758)	Cabra-vermelha	LC	€		
<i>Chelidonichthys lucerna</i> (Linnaeus, 1758)	Cabra-cabaço	LC	€		
<i>Chelidonichthys obscurus</i> (Walbaum, 1792)	Cabra-de-bandeira	LC	€		
<i>Eutrigla gurnardus</i> (Linnaeus, 1758)	Cabra-morena	LC	€		
Ordem Pleuronectiformes					
Família Bothidae					
<i>Arnoglossus imperialis</i> (Rafinesque, 1810)	Carta-imperial	LC	€		
<i>Arnoglossus laterna</i> (Walbaum, 1792)	Carta-do-mediterrâneo	LC	€		
<i>Arnoglossus thori</i> Kyle, 1913	Carta-pontuada	LC	€		
Família Citharidae					
<i>Citharus linguatula</i> (Linnaeus, 1758)	Carta-de-bico	LC	€		
Family Scopthalmidae					
<i>Lepidorhombus boscii</i> (Risso, 1810)	Areeiro-de-quatro-manchas	LC	€€		

ESPÉCIES	NOME COMUM	IUCN	EV	Frequência	
				ÁREA EM AVALIAÇÃO	ÁREA TAMPÃO
<i>Scophthalmus maximus</i> (Linnaeus, 1758)	Pregado	VU	€€€		
Família Soleidae					
<i>Dicologlossa cuneata</i> (Moreau, 1881)	Língua	LC	€		
<i>Microchirus variegatus</i> (Donovan, 1808)	Azevia-raiada	LC	€€		
<i>Solea solea</i> (Linnaeus, 1758)	Linguado-legítimo	LC	€€		
Ordem Scombriformes					
Família Scombridae					
<i>Scomber colias</i> Gmelin, 1789	Cavala	LC	€		
<i>Scomber scombrus</i> Linnaeus, 1758	Sarda	LC	€		
Ordem Tetraodontiformes					
Família Molidae					
<i>Mola mola</i> (Linnaeus, 1758)	Peixe-lua	DD	€		
Ordem Zeiformes					
Família Zeidae					
<i>Zeus faber</i> Linnaeus, 1758	Galo-negro	DD	€		

4.3.3.3.5 Aves marinhas

A caracterização da avifauna marinha baseou-se na compilação e integração da informação disponível no Atlas de Aves Marinhas (www.atlasavesmarinhas.pt), relativa às espécies com registos de probabilidade de ocorrência na área de estudo do projeto piloto, para as diferentes estações do ano.

Com base nesta base de dados, foi determinada, para cada estação, a probabilidade de ocorrência de cada espécie na área de estudo, adotando-se uma abordagem conservadora através da seleção do valor de probabilidade mais elevado sempre que estavam disponíveis mais do que uma estimativa. Subsequentemente, a probabilidade de ocupação espacial foi calculada como a percentagem da área de estudo que poderia ser potencialmente utilizada por cada espécie em cada estação, considerando os limites espaciais da área do projeto. Esta probabilidade de ocupação foi classificada de acordo com a seguinte escala: 0–10% (rara), 10–20% (muito pouco frequente), 20–40% (pouco frequente), 40–60% (frequente) e 60–100% (muito frequente). Assim, para cada espécie e estação, a área de ocupação provável foi expressa como uma percentagem da área total de estudo, permitindo uma avaliação espacialmente explícita da presença das espécies dentro dos limites da área.

Por fim, foi estimada uma métrica de vulnerabilidade sazonal para cada espécie, combinando a probabilidade de ocorrência com a percentagem da área ocupada. A vulnerabilidade foi interpretada como a maior ou menor probabilidade de as espécies serem afetadas pelas atividades associadas ao projeto e foi classificada de acordo com a seguinte escala: 0–25% (probabilidade muito baixa), 25–50% (probabilidade baixa), 50–75% (probabilidade considerável) e 75–100% (probabilidade elevada). Esta abordagem integrada permite identificar as espécies e as estações potencialmente mais sensíveis às atividades relacionadas com o projeto, considerando simultaneamente a probabilidade de ocorrência das espécies na área de estudo e a extensão espacial da sua ocupação potencial. O nome comum, a fenologia e o estado de conservação de acordo com a Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas (IUCN) e o Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal (Cabral et al., 2005) são apresentados na Tabela 12. Ainda que o Livro Vermelho de Vertebrados de Portugal tenha sido publicado em 2005 e não exista, até ao momento da preparação do presente estudo, uma versão atualizada, O projeto PilotSTRATEGY recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, ao abrigo do acordo de subvenção n.º 101022664.

a informação aí existente foi adotada como referência, por se tratar do conjunto de dados mais abrangente e fiável atualmente disponível para este fim.

De um modo geral, foram identificadas um total de 41 espécies de aves marinhas para a área de estudo, pertencentes a 12 famílias, independentemente da sua probabilidade sazonal de ocorrência (Tabela 12). Estas espécies representam um amplo espectro de grupos ecológicos, incluindo, patos-marinhos, tordas-mergulheiras (alcídeos), gaivotas e andorinhas-do-mar, falaropos, moleiros (skuas), mergulhões, rabos-de-palha, painhos, pardelas e petréis, corvos-marinhos e gansos-patola. Esta diversidade taxonómica reflete a importância ecológica da costa ocidental portuguesa como corredor migratório, área de inverno e, para algumas espécies, zona de reprodução ou de alimentação pós-reprodutiva.

A família Laridae é a mais representativa, tanto em termos de riqueza específica como de presença sazonal, incluindo várias espécies de gaivotas e garajaus, como a gaivota-de-cabeça-preta *Larus melanocephalus* Temminck, 1820, a gaivota-d'asa-escura *Larus fuscus* Linnaeus, 1758, a gaivota-de-patas-amarelas *Larus michahellis* Naumann, 1840, a gaivota-tridáctila *Rissa tridactyla* (Linnaeus, 1758), o garajau-comum *Sterna hirundo* Linnaeus, 1758, o garajau-do-ártico *Sterna paradisaea* Pontoppidan, 1763, a chireta *Sternula albifrons* (Pallas, 1764), o garajau-de-bico-preto *Thalasseus sandvicensis* (Latham, 1787) e a gaivota-de-sabine *Xema sabini* (Sabine, 1819) (Tabela 12). Em contraste, várias famílias estão representadas por uma única espécie, como Gaviidae [mobelha-grande *Gavia immer* (Brünnich, 1764)], Phaethontidae [rabijunco *Phaethon aethereus* Linnaeus, 1758], Oceanitidae [casquilho *Oceanites oceanicus* (Kuhl, 1820)] e Sulidae [alcatraz *Morus bassanus* (Linnaeus, 1758)], refletindo grupos com registos mais esporádicos ou com requisitos ecológicos mais especializados na região.

Do ponto de vista sazonal, o padrão geral indica que o outono e o inverno são os períodos com maior número de espécies potencialmente presentes na área de estudo (Tabela 12). Tal resulta da sobreposição entre espécies invernantes, espécies em passagem migratória e espécies residentes. Exemplos típicos incluem o alcatraz *M. bassanus*, a negrola *Melanitta nigra* (Linnaeus, 1758), a gaivota-tridáctila *R. tridactyla*, a torda-mergulheira *Alca torda* Linnaeus, 1758, o papagaio-do-mar *Fratercula arctica* (Linnaeus, 1758) e o airo *Uria aalge* (Pontoppidan, 1763), todas apresentando probabilidades de ocorrência mais elevadas durante os meses mais frios. Adicionalmente, espécies predadoras como o alcaide *Catharacta skua* (Brünnich, 1764) e o moleiro-pequeno *Stercorarius parasiticus* (Linnaeus, 1758) também apresentam probabilidades elevadas no outono e inverno, em consonância com o seu comportamento migratório e de invernada.

Na primavera e no verão, a comunidade altera-se, dando lugar a uma dominância de espécies associadas à época reprodutora, particularmente entre Procellariiformes e Laridae. A cagarra *Calonectris borealis* (Cory, 1881) apresenta elevadas probabilidades de ocorrência durante o verão, refletindo o seu ciclo reprodutor no Atlântico Nordeste. De forma semelhante, várias espécies de garajaus, como o garajau-comum *S. hirundo* Linnaeus, 1758, a chilreta *S. albifrons* (Pallas, 1764) e o garajau-de-bico-preto *T. sandvicensis* (Latham, 1787), evidenciam maior relevância durante os meses mais quentes, quando se encontram em reprodução ativa e utilizam áreas costeiras e *offshore* para alimentação (Tabela 12).

A análise da ocupação espacial indica que determinadas espécies são suscetíveis de utilizar uma boa parte da área de estudo, sobretudo nas estações em que a sua probabilidade de ocorrência é elevada. O alcatraz *M. bassanus* destaca-se como uma das espécies com maior amplitude de ocupação espacial ao longo de várias estações, refletindo o seu amplo raio de

alimentação e hábitos pelágicos. De igual modo, a gaivota-d'asa-escura *L. fuscus*, apresenta valores elevados tanto de probabilidade de ocorrência como de área ocupada, sugerindo uma presença forte e generalizada na região. A cagarra *C. borealis* também evidencia elevada ocupação espacial durante o verão, período em que a atividade de alimentação associada à reprodução é mais intensa. Durante as estações frias, alcídeos como a torda-mergulheira *Alca torda* Linnaeus, 1758, o papagaio-do-mar *F. arctica* e o airo *U. aalge* podem ocupar porções substanciais da área, em consonância com as suas distribuições de invernada no Atlântico Nordeste.

A vulnerabilidade, resultante da combinação da probabilidade de ocorrência com a área ocupada, destaca as espécies potencialmente mais expostas a pressões na área de estudo (Tabela 12). Os valores mais elevados de vulnerabilidade estão associados a espécies que combinam uma elevada probabilidade de presença com uma ampla distribuição espacial. Neste contexto, o alcatraz *M. bassanus* e a gaivota-d'asa-escura *L. fuscus* emergem como particularmente relevantes, dada a consistência dos seus valores elevados ao longo de várias estações. A cagarra *C. borealis* também apresenta vulnerabilidade elevada durante o verão. No inverno, alcídeos como a torda-mergulheira *A. torda*, o papagaio-do-mar *F. arctica* e o airo *U. aalge* evidenciam vulnerabilidade acrescida associada à sua elevada concentração sazonal e uso extensivo da área de estudo. A gaivota-tridáctila *R. tridactyla* destaca-se igualmente neste contexto, combinando elevada probabilidade de ocorrência com ampla ocupação espacial durante os meses mais frios.

Relativamente ao estado de conservação, a maioria das espécies encontra-se classificada como LC (*Least Concern* - Pouco Preocupante) de acordo com a Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da IUCN (Tabela 12). No entanto, várias espécies de maior preocupação de conservação estão presentes ou potencialmente presentes na área de estudo. Estas incluem espécies classificadas como VU (*Vulnerable* - Vulnerável), como a negrola-d'asa-branca *Melanitta fusca* (Linnaeus, 1758) e a gaivota-tridáctila *R. tridactyla*; espécies classificadas como NT (*Near Threatened* - Quase Ameaçada), como a pardela-preta *Ardenna grisea* (J.F. Gmelin, 1789) e o painho-de-swinhoe *Hydrobates monorhis* (Swinhoe, 1867); espécies classificadas como EN (*Endangered* - Em Perigo), como o papagaio-do-mar *F. arctica*; e espécies CR (*Critically Endangered* - Criticamente em Perigo), como a pardela-balear *Puffinus mauretanicus* Lowe, 1921. A presença destas espécies reforça a relevância da região para a conservação e sublinha a importância de uma abordagem precaucionária na interpretação de potenciais interações com atividades humanas.

De acordo com o estado de conservação atribuído no Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal (Cabral *et al.*, 2005) (Tabela 4.12), apenas uma parte das espécies listadas foi avaliada a nível nacional. No total, 17 espécies apresentam um estatuto de conservação atribuído. Duas espécies estão classificadas como Criticamente em Perigo (CR), nomeadamente a gaivina-dos-pauis *Chlidonias hybrida* (Pallas, 1811) e a pardela-balear *P. mauretanicus*, representando o nível mais elevado de ameaça e indicando uma elevada sensibilidade à perturbação ambiental. Três espécies estão classificadas como Em Perigo (EN): o negrola *M. nigra*, o tagaz *Gelochelidon nilotica* (Gmelin, 1789) e o garajau-comum *S. hirundo*, refletindo um risco elevado para o declínio das suas populações a curto-médio prazo. Três espécies estão incluídas na categoria Vulnerável (VU): a chilreta *S. albifrons*, o roque-de-castro *Hydrobates castro* (Harcourt, 1851) e a galheta *Phalacrocorax aristotelis* (Linnaeus, 1761). A maioria das espécies avaliadas encontra-se classificada como Pouco Preocupante (LC), incluindo o airo *A. torda*, o papagaio-do-mar *F. arctica*, a gaivota-de-cabeça-preta *L. melanocephalus*, a gaivota-tridáctila *R. tridactyla*, o alcaide *C. skua*, o corvo-marinho *Phalacrocorax carbo* (Linnaeus, 1758)

e o alcatraz *M. bassanus*. Adicionalmente, duas espécies apresentam classificações mistas ou diferenciadas (o airo *U. aalge*, com estatuto CR/NT, e a gaivota-d'asa-escura *L. fuscus*, com estatuto LC/VU), refletindo incertezas ou variações regionais no respetivo estado de conservação.

Por fim, importa salientar que, embora as aves marinhas constituam um grupo com importância ecológica e na conservação do ecossistema marinho, trata-se de organismos que passam a maior parte do tempo no ar e nas camadas superficiais do oceano e que se caracterizam por uma mobilidade muito elevada. Consequentemente, tendo em conta a natureza das atividades do projeto PilotSTRATEGY associadas, fundamentalmente, a domínios sub-superficiais e bentónicos, não são expectáveis impactes diretos significativos sobre as aves marinhas. Quaisquer efeitos potenciais deverão ser indiretos, localizados e de reduzida magnitude, como perturbações temporárias associadas à presença de embarcações ou ao ruído operacional, não sendo expectável que causem alterações relevantes na estrutura, distribuição ou estado de conservação da avifauna marinha à escala regional considerada.

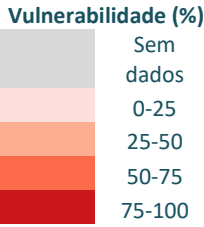
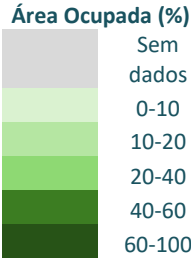
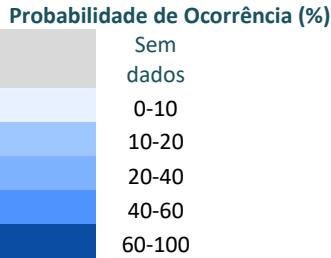
4.3.3.3.6 Mamíferos marinhos

A caracterização das comunidades de mamíferos marinhos para o projeto PilotSTRATEGY foi desenvolvida com base na bibliografia disponível, que, embora generalizada, representa a melhor informação existente para a costa portuguesa. Apesar desta informação ser necessariamente generalizada e não estar especificamente adaptada à área *offshore* da Figueira da Foz, constitui a linha de base atualmente disponível para a avaliação. A informação e o conjunto de dados direcionados sobre as comunidades de mamíferos marinhos na área de estudo específica foram formalmente solicitados ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA); no entanto, esta informação não foi recebida dentro do prazo possível para integração no presente estudo.

Das cerca de 90 espécies de cetáceos reconhecidas mundialmente, 28 ocorrem em águas portuguesas, incluindo 21 espécies de cetáceos dentados (superfamília Odontoceti) e 7 espécies de baleias de barbatanas (superfamília Mysticeti). As águas portuguesas suportam, portanto, um conjunto diverso de mamíferos marinhos que exploram uma ampla variedade de habitats, desde áreas costeiras rasas e plataforma continental até à borda da plataforma, talude e águas oceânicas adjacentes. Esta diversidade reflete os fortes gradientes oceanográficos da margem ibérica, incluindo a ampla plataforma continental nos setores central e norte, a presença de sistemas produtivos de *upwelling* e a proximidade de habitats de águas profundas. Neste contexto, várias espécies são consideradas nativas e residentes, enquanto outras ocorrem regularmente ou ocasionalmente, sendo que, para muitas espécies, o padrão de ocorrência permanece pouco conhecido. As espécies consideradas nesta avaliação, ilustradas na Figura 24, incluem uma baleia de barbatana e várias espécies de odontocetos, representando predominantemente guildas ecológicas associadas à plataforma, à borda da plataforma e ao ambiente oceânico.

Tabela 4.12 - A tabela resume a avifauna marinha registada ou potencialmente presente na área de estudo do projeto PilotSTRATEGY, organizada por ordem e família taxonómica, incluindo informação sobre o nome comum, fenologia, estado de conservação segundo a IUCN, probabilidade de ocorrência, área ocupada e vulnerabilidade para cada estação do ano (inverno, primavera, verão e outono). As células sombreadas a cinzento indicam ausência de dados ou registos considerados ocasionais ou muito ocasionais. A probabilidade de ocorrência (%) é representada por um gradiente de cor azul, onde 0–10% corresponde a probabilidade muito baixa, 10–20% a probabilidade baixa, 20–40% a probabilidade moderada, 40–60% a probabilidade elevada, e 60–100% a probabilidade muito elevada, sendo os tons de azul mais escuros indicativos de probabilidades mais altas de ocorrência. A área ocupada (%) é representada por um gradiente de cor verde e corresponde à percentagem da área de estudo potencialmente ocupada por cada espécie em cada estação, onde 0–10% corresponde a rara, 10–20% a muito pouco frequente, 20–40% a pouco frequente, 40–60% a frequente, e 60–100% a muito frequente, sendo os tons de verde mais escuros indicativos de uma maior proporção da área de estudo potencialmente ocupada. A vulnerabilidade (%) é representada por um gradiente de cor vermelho e expressa a suscetibilidade potencial de cada espécie às atividades associadas ao projeto, calculada através da combinação da probabilidade de ocorrência e da área ocupada, onde 0–25% corresponde a vulnerabilidade muito baixa, 25–50% a vulnerabilidade baixa, 50–75% a vulnerabilidade considerável e 75–100% a vulnerabilidade elevada, sendo os tons de vermelho mais escuros indicativos de uma maior vulnerabilidade potencial. O estado de conservação segundo a IUCN (IUCN Red List of Threatened Species) segue as categorias NE – Not Evaluated, DD – Data Deficient, LC – Least Concern, NT – Near Threatened, VU – Vulnerable, EN – Endangered, CR – Critically Endangered, EW – Extinct in the Wild, EX – Extinct. PT – Estado de conservação das espécies em Portugal, segundo as categorias da IUCN, de acordo com Cabral et al. (2005). Esta abordagem integrada codificada por cores permite uma avaliação visual rápida dos padrões sazonais de ocorrência, do uso espacial da área de estudo e da vulnerabilidade relativa de cada espécie, destacando períodos e espécies que poderão ser potencialmente mais sensíveis às atividades associadas ao projeto PilotSTRATEGY.

Espécies	Nome Comum	Fenologia	IUCN	PT	Probabilidade de Ocorrência				Área Ocupada				Vulnerabilidade			
					Inverno	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Ordem Anseriformes																
Família Anatidae																
<i>Melanitta fusca</i> (Linnaeus, 1758)	Negrola-d’asa-branca	Acidental	VU	-												
<i>Melanitta nigra</i> (Linnaeus, 1758)		Migrador de passagem e invernante	LC	EN												
Ordem Charadriiformes																
Família Alcidae																
<i>Alca torda</i> Linnaeus, 1758	Torda-mergulheira	Migrador de passagem e invernante	LC	LC												
<i>Fratercula arctica</i> (Linnaeus, 1758)	Papagaio-do-mar	Migrador de passagem e invernante	EN	LC												
<i>Uria aalge</i> (Pontoppidan, 1763)	Airo	Reprodutor e invernante	LC	CR/NT												
Família Laridae																
<i>Chlidonias hybrida</i> (Pallas, 1811)	Gaivina-dos-pauis	Reprodutor estival	LC	CR												
<i>Gelochelidon nilotica</i> (Gmelin, 1789)	Tagaz	Reprodutor estival e migrador de passagem	LC	EN												
<i>Hydrocoloeus minutus</i> (Pallas, 1776)	Gaivota-pequena	Migrador de passagem e invernante	LC	-												
<i>Hydroprogne caspia</i> (Pallas, 1770)	Garajau-grande	Migrador de passagem e invernante	LC	-												
<i>Larus canus</i> Linnaeus, 1758	Famego	Invernante	LC	-												
<i>Larus delawarensis</i> Ord, 1815	Gaivota-de-bico-riscado	Invernante	LC	-												
<i>Larus fuscus</i> Linnaeus, 1758	Gaivota-d’asa-escura	Invernante, migrador de passagem e reprodutor	LC	LC/VU												
<i>Larus genei</i> Brehm, 1839	Gaivota-de-bico-fino	Migrador de passagem	VU	-												
<i>Larus marinus</i> Linnaeus, 1758	Gaivotão-real	Invernante	LC	-												
<i>Larus melanocephalus</i> Temminck, 1820	Gaivota-de-cabeça-preta	Migrador de passagem e invernante	LC	LC												
<i>Larus michahellis</i> Naumann, 1840	Gaivota-de-patas-amarelas	Residente	LC	-												
<i>Rissa tridactyla</i> (Linnaeus, 1758)	Gaivota-tridáctila	Invernante	VU	LC												
<i>Sterna hirundo</i> Linnaeus, 1758	Garajau-comum	Reprodutor estival e migrador de passagem	LC	EN												
<i>Sterna paradisaea</i> Pontoppidan, 1763	Garajau-do-ártico	Migrador de passagem	LC	-												
<i>Sternula albifrons</i> (Pallas, 1764)	Chilreta	Reprodutor estival e migrador de passagem	LC	VU												
<i>Thalasseus sandvicensis</i> (Latham, 1787)	Garajau-de-bico-preto	Migrador de passagem e invernante	LC	-												
<i>Xema sabini</i> (Sabine, 1819)	Gaivota-de-sabine	Migrador de passagem	LC	-												
Família Scolopacidae																
<i>Phalaropus fulicarius</i> (Linnaeus, 1758)	Falaropo-de-bico-grosso	Migrador de passagem e invernante	LC	-												
Família Stercorariidae																
<i>Catharacta skua</i> (Brünnich, 1764)	Alcaide	Migrador de passagem e invernante	LC	LC												
<i>Stercorarius parasiticus</i> (Linnaeus, 1758)	Moleiro-pequeno	Migrador de passagem e invernante	EN	-												
<i>Stercorarius pomarinus</i> (Temminck, 1815)	Moleiro-do-ártico	Migrador de passagem	LC	-												
Ordem Gaviiformes																
Família Gaviidae																
<i>Gavia immer</i> (Brünnich, 1764)	Mobelha-grande	Invernante	LC	-												
Ordem Phaethontiformes																
Família Phaethontidae																
<i>Phaethon aethereus</i> Linnaeus, 1758	Rabijunco	Acidental	LC	-												
Ordem Procellariiformes																
Família Hydrobatidae																
<i>Hydrobates castro</i> (Harcourt, 1851)	Roque-de-castro	Reprodutor de inverno	LC	VU												
<i>Hydrobates monorhis</i> (Swinhoe, 1867)	Painho-de-swinhoe	Acidental	NT	-												
<i>Hydrobates pelagicus</i> (Linnaeus, 1758)	Alma-de-mestre	Migrador de passagem	LC	-												
Família Oceanitidae																
<i>Oceanites oceanicus</i> (Kuhl, 1820)	Casquilho	Migrador de passagem	LC	-												
Família Procellariidae																
<i>Ardenna gravis</i> (O’Reilly, 1818)	Pardela-de-barrete	Migrador de passagem	LC	-												
<i>Ardenna grisea</i> (J.F. Gmelin, 1789)	Pardela-preta	Migrador de passagem	NT	-												
<i>Bulweria bulwerii</i> (Jardine & Selby, 1828)	Alma-negra	Migrador de passagem	LC	-												
<i>Calonectris borealis</i> (Cory, 1881)	Cagarra	Reprodutor estival	LC	-												
<i>Puffinus mauretanicus</i> Lowe, 1921	Pardela-balear	Estival, migrador de passagem e invernante	CR	CR												
<i>Puffinus puffinus</i> (Brünnich, 1764)	Fura-bucho-do-Atlântico	Migrador de passagem	LC	-												
Ordem Suliformes																
Família Phalacrocoracidae																
<i>Phalacrocorax aristotelis</i> (Linnaeus, 1761)	Galheta	Residente e invernante	LC	VU												
<i>Phalacrocorax carbo</i> (Linnaeus, 1758)	Corvo-marinho	Residente e invernante	LC	LC												
Família Sulidae																
<i>Morus bassanus</i> (Linnaeus, 1758)	Alcatraz	Migrador de passagem e invernante	LC	LC												



Entre as baleias de barbatana, a baleia-anã *Balaenoptera acutorostrata* Lacépède, 1804 (Figura 4.24, Tabela 4.13) é regularmente observada em águas portuguesas ao longo do ano. Está principalmente associada à plataforma continental, ocorrendo geralmente em águas com profundidade inferior a 200 m. O padrão de distribuição mostrado na Figura 4.24A indica uma presença contínua e marcada ao longo da plataforma continental portuguesa, incluindo o setor central onde se encontra a área de estudo do PilotSTRATEGY. Consequentemente, a baleia-anã é considerada uma das espécies com maior probabilidade de ocorrência na envolvente da área do projeto, particularmente em períodos de maior disponibilidade de presas sobre a plataforma continental (principalmente durante a primavera e o verão, e provavelmente no início do outono).

Entre os odontocetos, o golfinho-comum-de-bico-curto *Delphinus delphis* Linnaeus, 1758 (Figura 4.24, Tabela 4.13) é a espécie de cetáceo mais abundante ao longo da costa portuguesa. Está amplamente distribuído de norte a sul e é frequentemente registado tanto em zonas costeiras como em águas mais profundas e afastadas da costa. A Figura 4.24B mostra uma faixa contínua de elevada densidade ao longo da costa oeste, incluindo o setor central em redor da área de estudo. Isto torna o golfinho-comum-de-bico-curto a espécie com maior probabilidade de presença regular na proximidade do local do PilotSTRATEGY, e uma das espécies mais relevantes do ponto de vista ecológico para a avaliação de impacte.

O roaz-corvineiro *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) (Figura 4.24, Tabela 4.13) é outra espécie com elevada probabilidade de ocorrência na área de estudo. Esta espécie ocupa uma gama ampla de habitats, desde sistemas costeiros e estuarinos até águas mais profundas e afastadas da costa. Em Portugal, sabe-se que forma uma população residente no estuário do Sado e é frequentemente observada em torno do arquipélago das Berlengas e do Canhão da Nazaré. A Figura 4.24C mostra uma distribuição clara ao longo da costa oeste, incluindo a região central, indicando que os golfinhos-roazes provavelmente ocorrem regularmente na área mais ampla influenciada pelo projeto, particularmente em associação com habitats de plataforma e bordo de plataforma.

O bôto *Phocoena phocoena* (Linnaeus, 1758) (Figura 4.24, Tabela 4.13) é uma espécie costeira, habitando águas subpolares e temperadas do Hemisfério Norte, tipicamente em águas com profundidade inferior a 200 m, estuários e baías. Em Portugal, distribui-se ao longo de toda a costa, embora seja mais frequente no setor norte, particularmente entre o Porto e a Nazaré. A Figura 24D mostra uma distribuição predominantemente costeira, sugerindo que esta espécie poderá ocorrer na região mais ampla da área de estudo, especialmente em águas rasas da plataforma, embora a sua abundância no setor central-Oeste possa ser inferior e mais variável do que a do golfinho-comum-de-bico-curto ou do golfinho-roaz.

O golfinho-riscado *Stenella coeruleoalba* (Meyen, 1833) é uma espécie cosmopolita com hábitos predominantemente oceânicos, mostrando preferência por águas profundas. Em águas portuguesas, distribui-se principalmente junto ao bordo da plataforma continental ou em áreas próximas de profundidades de 1000 m. As suas preferências conhecidas de profundidade indicam que a sua ocorrência perto da área de estudo do PilotSTRATEGY será provavelmente muito baixa. O golfinho-de-Risso *Grampus griseus* (G. Cuvier, 1812) ocorre ao longo de toda a plataforma continental portuguesa e pode ser observado tanto em águas relativamente rasas como mais próximas da costa, especialmente onde a plataforma é estreita e águas profundas se encontram nas proximidades. As suas preferências ecológicas conhecidas sugerem que poderá

ocorrer intermitentemente na área de estudo mais ampla, particularmente em associação com habitats de bordo da plataforma e talude continental.

As baleias-piloto *Globicephala* sp. (Figura 4.24, Tabela 4.13), incluindo *Globicephala macrorhynchus* (Gray, 1846) e *G. melas* (Traill, 1809), estão representados nos painéis inferiores da Figura 4.24 por registos de presença discretos ao longo da costa oeste, incluindo registos relativamente próximos da área de estudo. Estas espécies estão tipicamente associadas a habitats *offshore* e de talude continental, pelo que a sua ocorrência próxima da área do PilotSTRATEGY é esperada como intermitente, relacionada com a distribuição de presas e condições oceanográficas. O golfinho-pintado-do-Atlântico *Stenella frontalis* (G. Cuvier, 1829) (Figura 24, Tabela 13) também está representado por registos de presença na costa centro-Oeste portuguesa, incluindo um próximo da área de estudo. Isto indica que a espécie poderá ocorrer localmente, embora provavelmente com menor regularidade do que *D. delphis* ou *T. truncatus*.

Por fim, o Zífiu ou baleia-de-bico-de-Cuvier *Ziphius cavirostris* G. Cuvier, 1823 (Figura 4.24, Tabela 4.13) é representada por registos de presença discretos. Esta espécie está fortemente associada a águas profundas, canhões submarinos e sistemas de talude, sendo conhecida pelo seu comportamento de mergulho profundo. A sua presença próxima da área de estudo é, portanto, esperada como ocasional.

Embora todas as espécies listadas estejam atualmente classificadas na Lista Vermelha da IUCN como Pouco Preocupante (LC) para a Europa, a baleia-anã *B. acutorostrata* possui um estatuto de conservação Vulnerável (VU) segundo o Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal (Cabral et al., 2005). Os cetáceos são organismos de vida longa, reprodução lenta e dependentes do som para navegação, comunicação e alimentação, sendo particularmente sensíveis ao ruído e perturbação antropogénicos subaquáticos. Do ponto de vista ecológico e de gestão, as espécies de maior relevância para a área de estudo do PilotSTRATEGY são aquelas com elevada probabilidade de ocorrência e forte associação à plataforma, nomeadamente o golfinho-comum-de-bico-curto *D. delphis*, o roaz-corvineiro *T. truncatus*, e, dependendo da batimetria local, a baleia-anã *B. acutorostrata* e o bôto *P. phocoena*.

Em resumo, a informação disponível indica que a área de estudo do PilotSTRATEGY se encontra numa região de potencial elevada relevância para várias espécies de cetáceos, particularmente delfínídeos associados à plataforma e, potencialmente, baleias-anãs. A sua sensibilidade ecológica, especialmente ao ruído e vibrações subaquáticas, significa que os mamíferos marinhos constituem um grupo prioritário para a avaliação de impactes, planeamento de mitigação e monitorização ambiental, garantindo que as atividades do projeto sejam conduzidas de forma a minimizar distúrbios e preservar a integridade ecológica das populações locais de mamíferos marinhos.

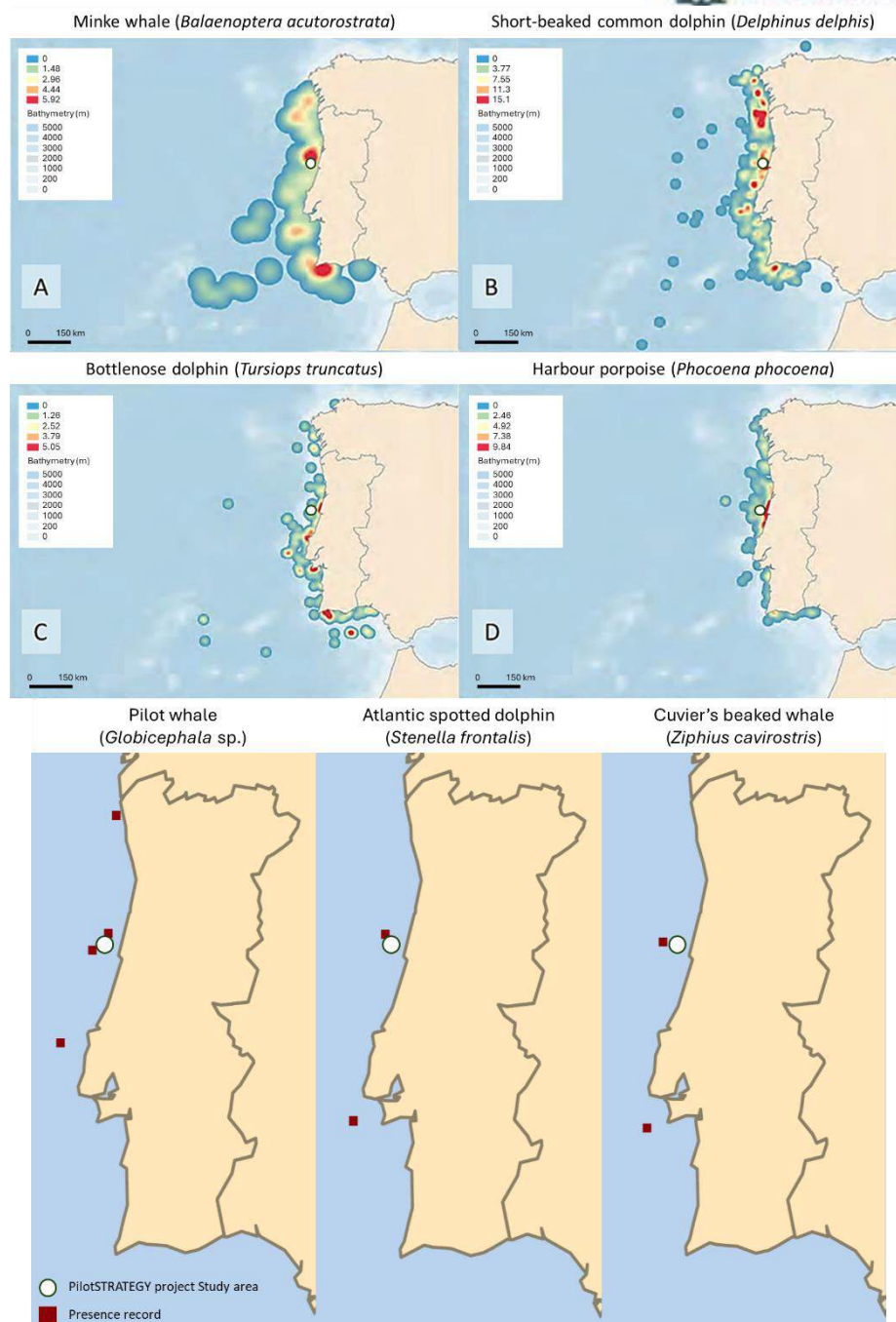


Figura 4.24 - Distribuição espacial e registos de ocorrência das principais espécies de cetáceos ao longo da costa portuguesa, com indicação da área de estudo do projeto piloto (círculo branco). (A) Baleia-anã *Balaenoptera acutorostrata*; (B) Golfinho-comum-de-bico-curto *Delphinus delphis*; (C) Roaz-corvineiro *Tursiops truncatus*; (D) Bôto *Phocoena phocoena*. Os mapas A-D, mostram a densidade relativa de registos de avistamento, expressa através de um gradiente de cores, sobreposta à batimetria. Os mapas inferiores apresentam registos pontuais de presença para (E) Baleia-piloto *Globicephala* sp.; (F) Golfinho-pintado-do-Atlântico *Stenella frontalis*; e (G) Zífiu ou Baleia-bicuda-de-Cuvier *Ziphius cavirostris*. Os quadrados vermelhos indicam registos de presença confirmada.

Tabela 13 - Lista de mamíferos marinhos registados ou com potencial ocorrência nas imediações da área de estudo do projeto PilotSTRATEGY, organizada por ordem taxonómica e família. Para cada espécie, apresentam-se o nome científico com autor, o nome comum, a origem da ocorrência (Nativa/Residente ou Regular/Ocasional) e o estatuto de conservação de acordo com a IUCN. O estatuto de conservação segundo a Lista Vermelha da IUCN (IUCN Red List of Threatened Species) segue as categorias: NE – Não Avaliada, DD – Dados Insuficientes, LC – Pouco Preocupante, NT – Quase Ameaçada, VU – Vulnerável, EN – Em Perigo, CR – Criticamente Em Perigo, EW – Extinta na Natureza, EX – Extinta. PT – Estatuto de conservação da espécie em Portugal, segundo as categorias da IUCN, de acordo com Cabral et al. (2005).

Espécies	Nome Comum	Origem	IUCN	PT
Ordem Cetartiodactyla				
Família Balaenopteridae				
<i>Balaenoptera acutorostrata</i> Lacépède, 1804	Baleia-anã	Nativo/Residente	LC	VU
Família Delphinidae				
<i>Delphinus delphis</i> Linnaeus, 1758	Golfinho-comum-de-bico-curto	Nativo/Residente	LC	-
<i>Globicephala</i> sp. (<i>Globicephala macrorhynchus</i> (Gray, 1846) e <i>G. melas</i> (Traill, 1809))	Baleia-piloto	Regular/Ocasional	LC	-
<i>Grampus griseus</i> (G. Cuvier, 1812)	Golfinho-de-Risso	Regular/Ocasional	LC	-
<i>Stenella coeruleoalba</i> (Meyen, 1833)	Golfinho-riscado	Nativo/Residente	LC	-
<i>Stenella frontalis</i> (G Cuvier, 1829)	Golfinho-pintado-do-Atlântico	Nativo/Residente	LC	-
<i>Tursiops truncatus</i> (Montagu, 1821)	Roaz-corvineiro	Nativo/Residente	LC	-
Família Phocoenidae				
<i>Phocoena phocoena</i> (Linnaeus, 1758)	Bôto	Nativo/Residente	LC	-
Família Ziphiidae				
<i>Ziphius cavirostris</i> G Cuvier, 1823	Zífiu ou Baleia-bicuda-de-Cuvier	Regular/Ocasional	LC	-

4.3.3.4 Socio-economia

Para a integração dos dados e da informação disponível relacionada com as atividades socioeconómicas, uma fonte de informação de relevo foi o Plano de Situação associado ao Ordenamento do Espaço Marítimo, acessível através do geoportal da Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM) (www.psoem.pt/geoportal_psoem).

O Ordenamento do Espaço Marítimo abrange a totalidade do espaço marítimo nacional e, conforme referido no site institucional da DGRM (www.dgrm.pt/en/web/guest/as-pem-ordenamento): “visa gerir as atividades humanas que ocorrem no mar português, tanto em termos espaciais como temporais, com o objetivo de minimizar conflitos, promover a compatibilidade entre atividades e usos, e assegurar a utilização sustentável dos recursos e serviços marinhos”.

As secções seguintes caracterizam o estado socioeconómico das áreas de estudo, incluindo a situação relativa a cabos submarinos, tráfego marítimo, zonas de pesca, indústria transformadora, turismo costeiro e áreas arqueológicas.

4.3.3.4.1 Cabos submarinos

A localização geográfica dos cabos submarinos ao longo da Margem Oeste Ibérica encontra-se representada na Figura 4.25. Conforme se pode observar, os cabos submarinos cartografados não interseam a área de estudo nem a localização prevista do futuro poço de injeção de CO₂.

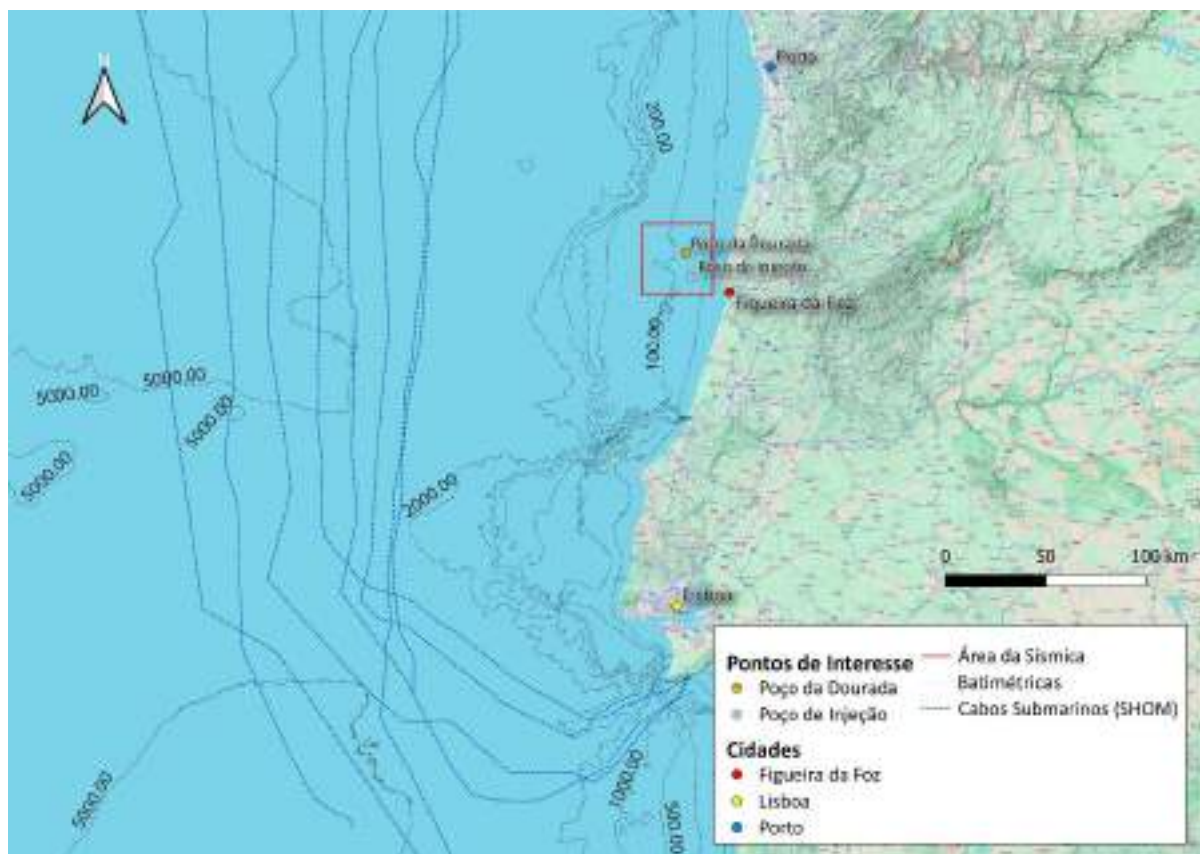


Figura 4.25 - Localização geográfica dos cabos submarinos ao longo da Margem Oeste Ibérica.

4.3.3.4.2 Tráfego marítimo

Tendo em conta a proximidade do porto da Figueira da Foz, é expectável a ocorrência de tráfego marítimo intenso. A Figura 26 ilustra a densidade de tráfego marítimo ao longo da costa atlântica portuguesa, destacando em particular os corredores que ligam os portos de Lisboa, Figueira da Foz e Porto. Conforme indicado pelos trajetos de navegação assinalados a vermelho, observa-se um corredor principal de elevada intensidade no sentido norte-sul, localizado ao largo, a partir do qual divergem rotas secundárias em direção à costa.

De forma mais detalhada, as zonas vermelhas de maior densidade correspondem ao principal corredor atlântico de navegação norte-sul, utilizado sobretudo por navios comerciais de grande tonelagem, contrastando com os padrões de tráfego costeiro mais difusos, típicos das frotas de pesca e da logística local.

Embora o mapa indique que algumas vias de navegação costeira intersectam a área designada para a campanha sísmica do projeto PilotSTRATEGY (delimitada a verde), não se antecipa qualquer perturbação significativa da logística marítima comercial. Adicionalmente, o mapa evidencia a proximidade do local proposto para o poço de injeção (“Poço de Injeção”) ao porto da Figueira da Foz. Esta localização apresenta vantagens estratégicas, ao reduzir as distâncias de transporte de CO₂ a partir do hinterlândia industrial da região, mantendo simultaneamente uma margem de segurança relativamente a poços legados, como o “Poço da Dourada”, de modo a garantir a contenção do armazenamento a longo prazo.

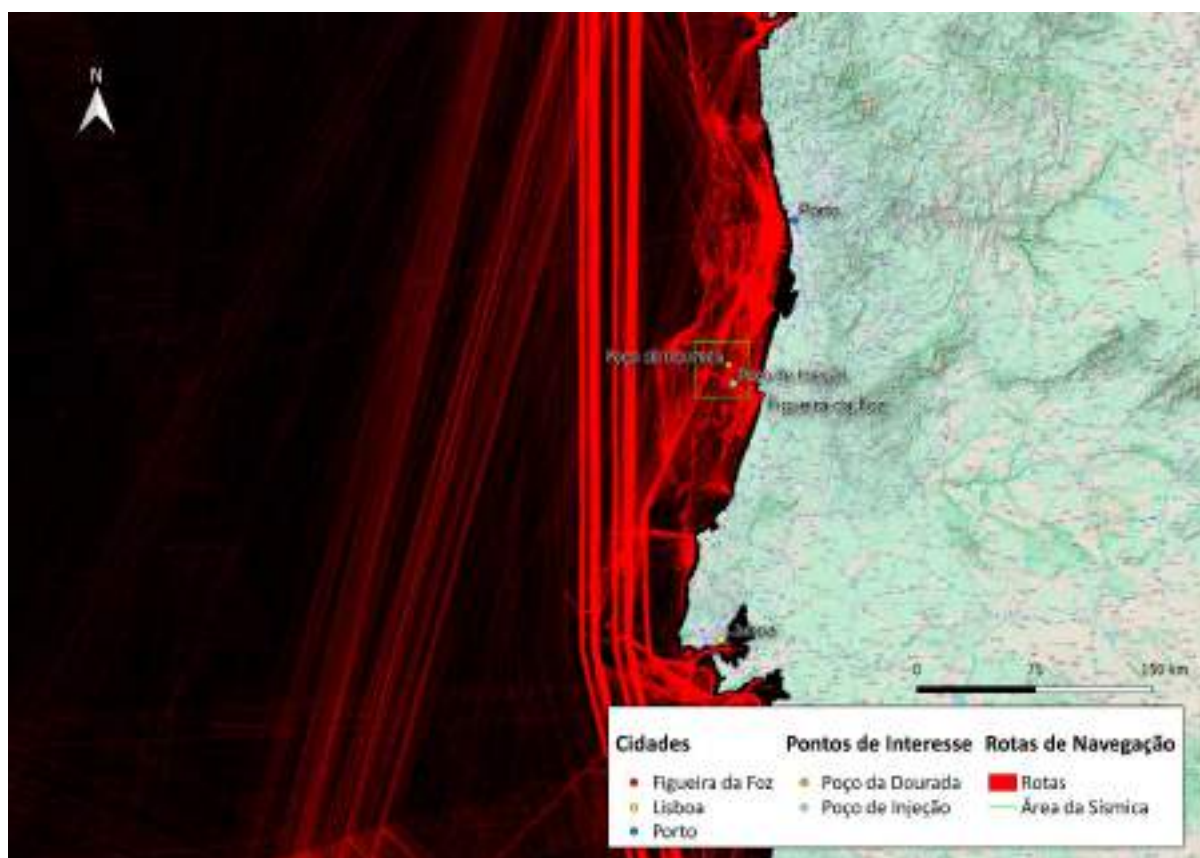


Figura 4.26 - Principais rotas marítimas de entrada e saída dos portos existentes ao longo da Margem Oeste Ibérica.

4.3.3.4.3 Zonas de Pesca

A Figueira da Foz apresenta uma atividade piscatória significativa. Assim, conforme referido anteriormente, é fundamental compreender de que forma as atividades do projeto poderão afetar esta atividade e em que áreas. A Figura 27 delimita os principais zonas de pesca da região, representados pelo polígono a laranja, o qual inclui a totalidade da área proposta para a campanha sísmica e envolve explicitamente o local estratégico do poço de injeção. Conforme evidenciado, a distribuição do esforço de pesca nesta zona é heterogênea; o mapa de densidade (Figura 28) revela aglomerados específicos de atividade de elevada intensidade no interior da área do projeto, que poderão requerer maior atenção.

Esta atividade encontra-se classificada de acordo com diferentes artes de pesca, identificadas nos dados como “Redes de emalhar” e “Arrasto”. No entanto, na região de estudo, apenas existe evidência da utilização do primeiro tipo de arte. Adicionalmente, a Figura 29 ilustra o enquadramento regulamentar das operações marítimas, demonstrando que a área sísmica atravessa várias zonas legais de operação. Esta análise espacial indica que o projeto irá coincidir com águas autorizadas para diferentes classes de embarcações e técnicas de pesca, sendo necessária a implementação de estratégias de gestão integradas.

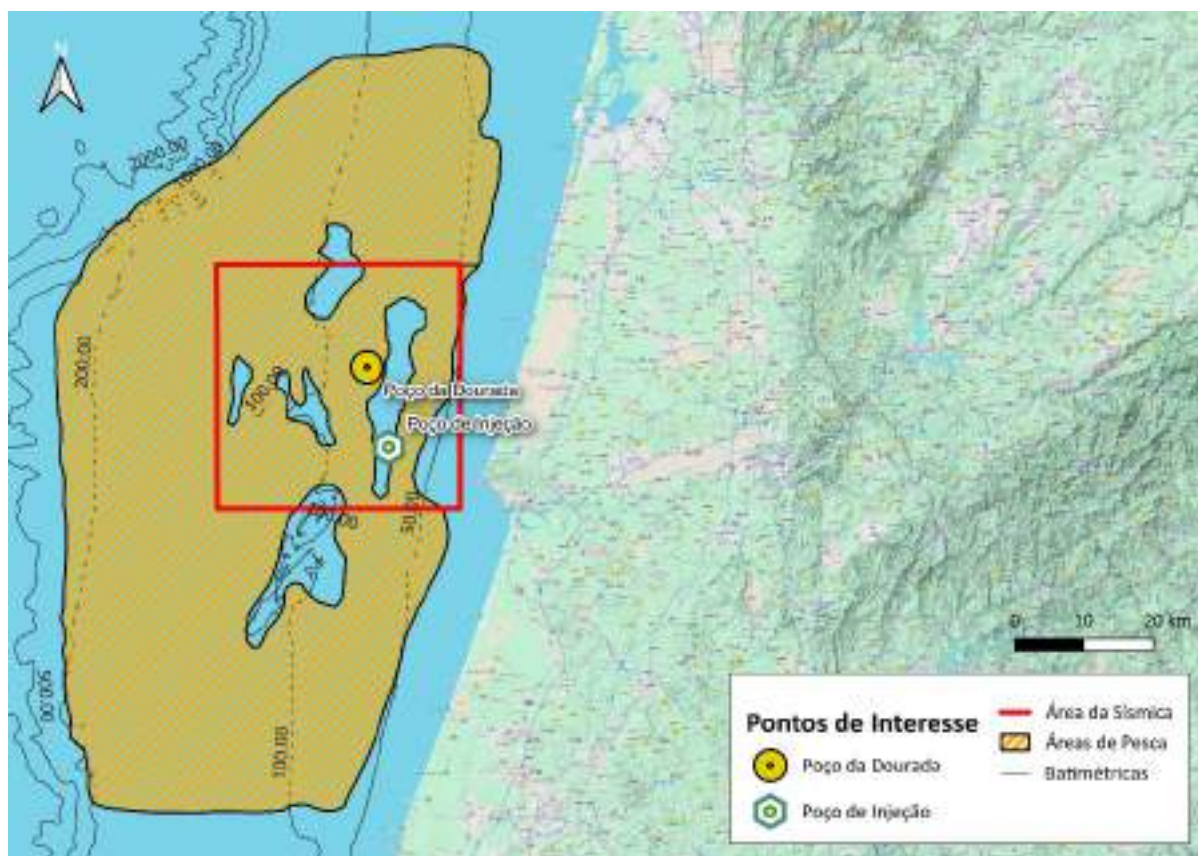


Figura 4.27 - Delimitação da zona de pesca em relação à infraestrutura do projeto.

Áreas de Pesca

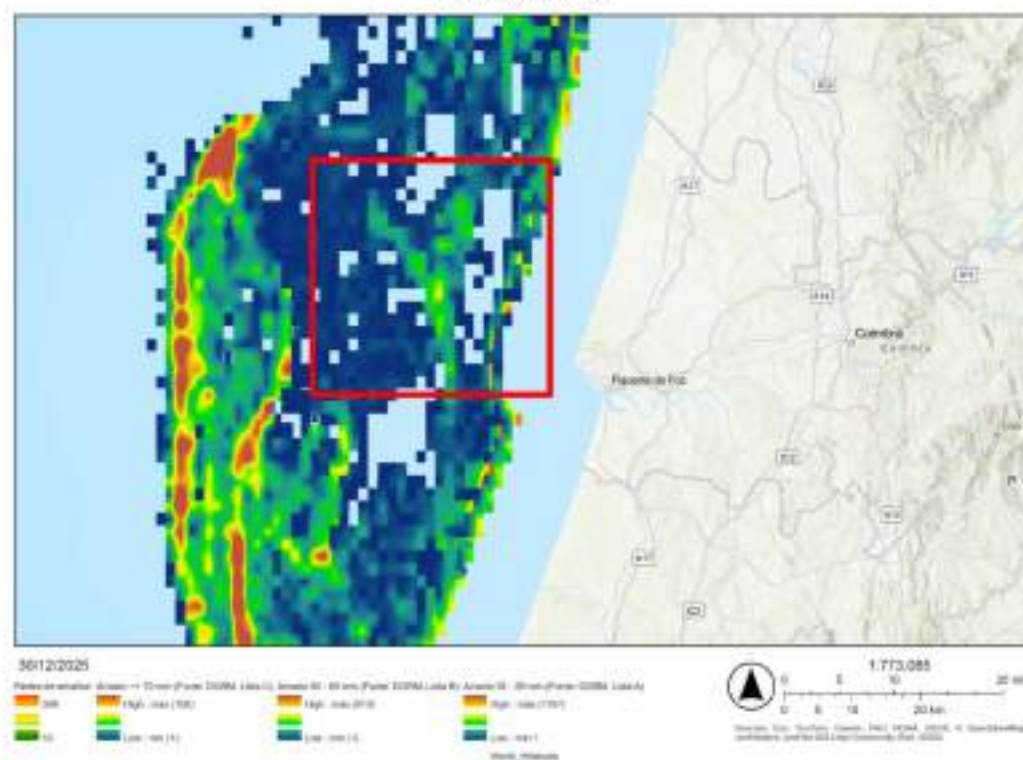


Figura 4.28 - Distribuição espacial da intensidade da atividade piscatória ao largo da Figueira da Foz.

Zonas Legais de Operação por Arte

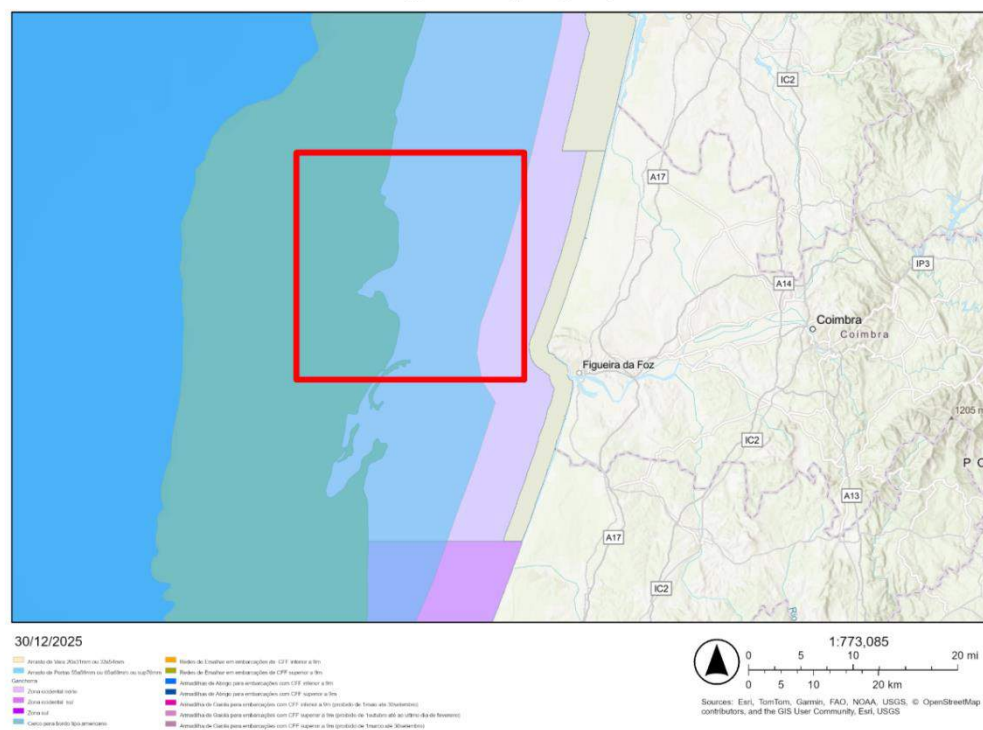


Figura 4.29 - Delimitação das zonas marítimas legais de operação de acordo com o tipo de arte de pesca.

4.3.3.4.3.1 Pesqueiros

A jurisdição marítima da região Centro é partilhada pelos portos da Figueira da Foz e de Aveiro. À escala regional, a atividade piscatória apresenta uma distribuição espacial heterogénea: a Ria de Aveiro concentra um esforço significativo e uma indústria de transformação densa, enquanto o estuário do Mondego e a área adjacente à Figueira da Foz registam uma presença relativamente menor de frotas e de unidades de transformação de pescado.

O setor marítimo na região integra múltiplas vertentes, incluindo a pesca por embarcação (local, costeira e do largo), a pesca apeada, a indústria de transformação do pescado (conservas, salga e secagem, congelação), a aquacultura, a produção de sal e as atividades recreativas associadas ao mar.

4.3.3.4.3.2 Infraestruturas de pesca

No que respeita às infraestruturas da frota, os dados de 2024 indicam que, a nível nacional, se encontravam registadas 6811 embarcações de pesca (com e sem motor), das quais 943 tinham base na região Centro (portos de Aveiro e da Figueira da Foz), representando cerca de 14% do total nacional; o porto da Figueira da Foz registava 159 embarcações (INE, 2025).

Do ponto de vista do licenciamento, cerca de 3614 embarcações estavam autorizadas a exercer a atividade da pesca, correspondendo a aproximadamente 53% da frota registada, tendo sido emitidas 553 licenças na região Centro e 79 no porto da Figueira da Foz.

A análise da evolução ao longo da última década evidencia uma redução da frota nacional, tendência que também se reflete a nível local: a Figueira da Foz registou uma diminuição de 17 embarcações entre 2014 e 2024 (INE, 2025). A Tabela 4.14 discrimina as embarcações registadas e licenciadas, bem como a sua tipologia quanto à existência ou não de propulsão a motor.

Tabela 4.14 - Embarcações de pesca na Figueira da Foz.

	Licenciados	Registados
Com motor	79	150
Sem motor	0	9

4.3.3.4.3.3 Emprego

Os indicadores de emprego e o perfil ocupacional reforçam o carácter vulnerável do tecido laboral associado às pescas. De acordo com os Censos de 2021 (INE, 2022), a região Centro contava com 2 562 pessoas empregadas nas atividades de pesca e aquacultura, num total nacional de 10 834, o que representa uma diminuição de cerca de 20% face a 2011. Em 2023, o setor primário (que inclui a agricultura e a pesca) representava apenas 2% da população empregada na Figueira da Foz (INE, 2023).

O nível de escolaridade predominante é o ensino básico (cerca de 75% do total) e a idade média situa-se nos 47.1 anos, valores que evidenciam um perfil relativamente envelhecido e um baixo nível médio de qualificação formal. Possivelmente por esta razão, o programa “MAR 2030” identifica como uma das suas prioridades a criação de incentivos ao início de atividade por jovens pescadores (MAR 2030, 2022).

Segundo as Estatísticas da Pesca do INE (2023), encontravam-se registados 1293 pescadores na região Centro, correspondendo a cerca de 9% do total nacional. De acordo com a mesma fonte, desde 2022 o número de pescadores (3466) registou uma redução acentuada, na ordem dos 62%.

4.3.3.4.3.4 Capturas

No que se refere às capturas e ao valor económico, a região Centro representou cerca de 13% das transações nacionais em 2024, com aproximadamente 18305 toneladas descarregadas e um volume de negócios estimado em 44,5 milhões de euros. O porto da Figueira da Foz foi responsável por cerca de 32% do valor regional, conforme apresentado na Tabela 15.

As descargas de pescado na Figueira da Foz ao longo da última década têm evidenciado ligeiras variações em ambos os sentidos, mantendo-se, contudo, num nível relativamente estável. Entre 2023 e 2024, registou-se um aumento de 6.7%, passando de 7654,7 toneladas para 8168 toneladas (INE, 2024; INE, 2025).

Apesar do aumento do preço médio por quilograma observado ao longo da última década, o valor médio por quilograma na Figueira da Foz em 2024 manteve-se significativamente inferior ao registado em Aveiro (1.69 €/kg face a 2.94 €/kg). Esta diferença poderá estar relacionada com a composição das espécies predominantes descarregadas, nomeadamente a sardinha e o carapau entre os peixes, e a lula-europeia entre os moluscos, espécies que tendem a apresentar preços unitários mais baixos no mercado nacional.

Tabela 4.15 - Descargas de pescado no porto da Figueira da Foz.

	Peixes de água salobra e doce	Peixes marinhos	Crustáceos	Moluscos	Total
Captura de peixe nominal (t)	24	7770	12	382	8186
Captura de peixe nominal (€)	188	12123	86	1824	14221
Valor médio do peixe capturado (€/kg)	7.76	1.54	7.32	4.65	1.69

De acordo com o projeto de investigação ARTFISH, desenvolvido pelo UC Mar (Universidade de Coimbra) em 2020–2021 e centrado na pesca local (embarcações de pequena dimensão, até 9 metros, utilizando redes de emalhar e redes de tresmalho), a época de pesca na Figueira da Foz decorre entre março/abril e setembro/outubro, registando-se maiores volumes de capturas nos meses de abril e setembro (Guerreiro et al., 2021). O número de espécies de peixes e marisco capturadas na Figueira da Foz é de 44, com predominância do “Sargo-legítimo” e da “Salema”.

A atividade piscatória na Figueira da Foz decorre ao longo de todo o ano, sempre que as condições meteorológicas o permitam. No entanto, existem zonas interditas à pesca, designadamente

áreas de desova ou reprodução e zonas de abrigo, bem como proibições temporárias da captura de determinadas espécies em períodos específicos do ano (defesos), com o objetivo de proteger os seus ciclos biológicos e assegurar a renovação dos recursos. Estas restrições são definidas pela Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM).

Em 2025 tiveram início obras de melhoria dos acessos e das infraestruturas do Porto da Figueira da Foz, com o objetivo declarado de responder às preocupações manifestadas pelos pescadores e pelas associações representativas, nomeadamente no que respeita à insegurança da barra do porto, resultante da sedimentação causada por fenómenos erosivos ao longo da costa a norte da cidade (Porto da Figueira da Foz, 2025). A deposição de sedimentos na barra tem vindo a reduzir a profundidade útil e a condicionar a navegabilidade em condições meteorológicas adversas, originando encerramentos temporários da barra e, consequentemente, dias sem atividade piscatória para a comunidade local.

Entrevistas realizadas às associações de pescadores no âmbito do projeto PilotSTRATEGY (Tarefa 6.2, WP6) indicam que a localização do poço não deverá afetar a pesca artesanal, uma vez que as embarcações de menor dimensão operam a distâncias inferiores a 20 km da costa, podendo inclusive limitar outros tipos de pesca (com embarcações de maior porte, como o arrasto) e contribuir para a preservação dos recursos haliêuticos. No entanto, os pescadores manifestaram preocupação relativamente ao impacto da campanha para aquisição sísmica 3D nas espécies piscícolas, em particular nos pequenos peixes que ocupam os níveis mais baixos da cadeia alimentar, com base na sua experiência em projetos anteriores de prospeção petrolífera. Foi solicitado que estas atividades não decorram durante os períodos de pesca mais intensa (verão) nem durante a época de desova (primavera).

Importa ainda salientar que os pescadores não operam exclusivamente a partir do seu porto de origem, mas também em áreas adjacentes, pelo que este projeto poderá afetar não apenas os pescadores da Figueira da Foz, mas também os de Peniche e Aveiro. Os pescadores chamaram igualmente a atenção para todo o setor económico e os postos de trabalho dependentes da atividade piscatória, em particular a indústria conserveira e o comércio retalhista (lotas e mercados). Os representantes das associações de pesca alertaram ainda para o facto de o estado do mar nesta área ser frequentemente adverso e para o aumento da frequência de tornados, fenómeno que associam às alterações climáticas.

4.3.3.4.4 Indústria de transformação, produção de sal e aquacultura

A indústria de transformação do pescado e as conserveiras, estas últimas com uma forte tradição na Figueira da Foz, constituem um segmento relevante da economia local, gerando emprego dependente das descargas locais. Em conjunto com a produção de sal e a aquacultura, estas atividades têm beneficiado de programas de financiamento, com destaque para o MAR 2030, que incentiva projetos nas áreas da produção, digitalização, eficiência energética e internacionalização (MAR 2030, 2022).

A aquacultura nacional, que em 2023 produziu cerca de 18 040 toneladas de peixes, moluscos e algas, com vendas na ordem dos 205,9 milhões de euros (cerca de um terço destinado à exportação), apresenta uma expressão significativa na região Centro: 4 583 toneladas (quase um quarto da produção nacional) e vendas de aproximadamente 49,7 milhões de euros, valor que corresponde a um aumento de cerca de 30% face a 2022.

4.3.3.4.5 Turismo Costeiro

De acordo com o POOC Ovar–Marinha Grande (Plano de Ordenamento da Orla Costeira), esta área integra um centro turístico de Nível I (Buarcos/Figueira da Foz) e um centro turístico de Nível III (Praia de Quiaios). O Estudo de Impacte Ambiental deste instrumento refere que “a Figueira da Foz é, desde há muito, a principal estância balnear da costa central e o principal polo turístico do litoral entre Ovar e Marinha Grande, apoiado numa diversidade de atrações turísticas que integram vários produtos de elevada procura, sendo o principal o turismo de ‘sol e mar’”.

As condições naturais da Figueira da Foz, nomeadamente o mar e a frente de praia, valorizam a oferta de lazer e de desportos náuticos. O Turismo do Centro promove a Figueira da Foz como um destino preferencial para o turismo ativo, desportivo e de mar. A Tabela 4.16 apresenta o número de estabelecimentos de alojamento turístico e o número de hóspedes registados em 2024.

Tabela 4.16 - Alojamento turístico na Figueira da Foz, 2024. Fonte: INE, Inquérito à permanência de hóspedes na hotelaria e outros alojamentos.

	Hóteis	Alojamento Local	Turismo Rural	Outros
Número de estabelecimentos	17	33	1	
Número de hóspedes	154,079			29,254

Os valores apresentados corroboram a sazonalidade da procura, concentrada nos meses de verão, período preferencial enquanto destino de férias (Figura 4.30).

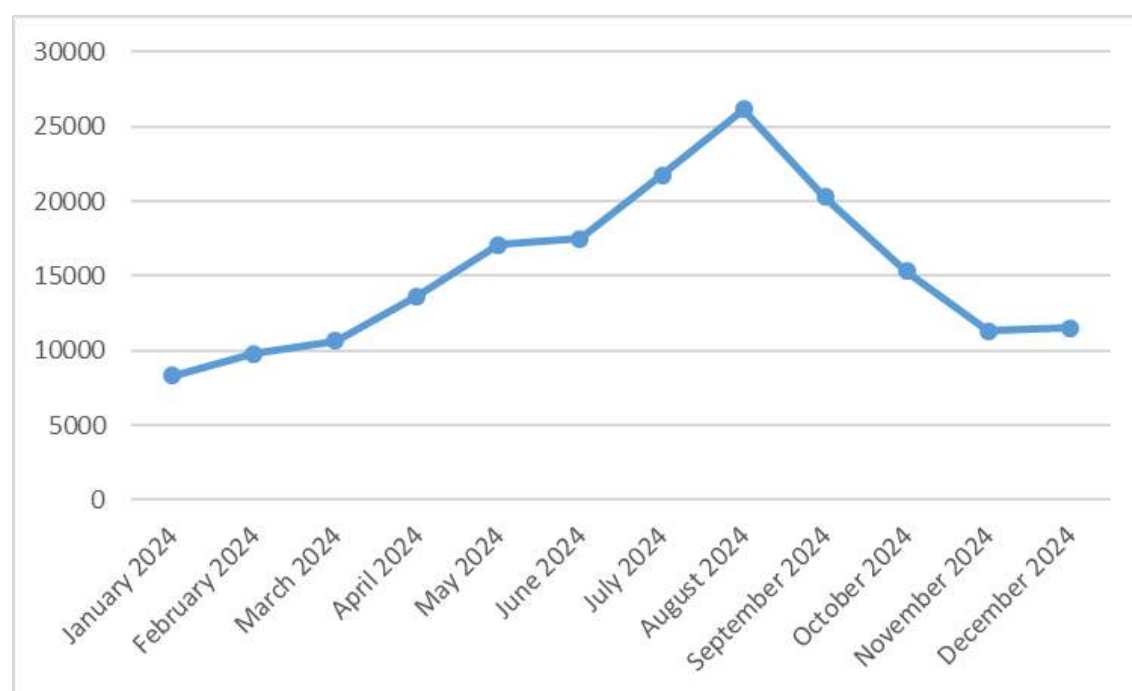


Figura 4.30 - Número de hóspedes nos estabelecimentos de alojamento turístico da Figueira da Foz, por mês, em 2024. Fonte: INE, Inquérito à permanência de hóspedes na hotelaria e outros alojamentos.

De acordo com as estatísticas de turismo do INE (INE, 2024; INE, 2025), o número de dormidas em estabelecimentos de alojamento turístico na Figueira da Foz registou um ligeiro aumento entre 2023 e 2024, na ordem dos 2%, acompanhado pelo acréscimo da receita total gerada nesses estabelecimentos, que passou de 19,147 € para 20,738 €, correspondendo a um aumento de cerca de 8%. Esta tendência de crescimento tem-se mantido de forma consistente desde 2017, com exceção do ano de 2020, marcado pela crise pandémica da COVID-19. Deste modo, o setor do turismo constitui uma área de forte interação com as atividades marítimas.

A existência de infraestruturas portuárias, como a marina, dotada de lugares de amarração e serviços de apoio, reforça a atratividade turística e a geração de receita local. Adicionalmente, a cidade tem vindo a ser promovida como um “destino de excelência para a receção de navios de cruzeiro de pequena dimensão” (Porto da Figueira da Foz, 2025), sublinhando o impacto dos projetos portuários planeados para a adaptação a embarcações de maior porte. A projeção destes investimentos evidencia a sua relevância para o desenvolvimento económico do município, em particular no domínio do turismo de mar e praia, bem como para o reforço do papel do porto enquanto plataforma logística relevante para a valorização da região Centro.

4.3.3.4.6 Áreas arqueológicas

A Figura 4.31 ilustra a distribuição do potencial património cultural subaquático identificado na área de interesse. Embora a informação arqueológica disponível para este setor específico do fundo marinho seja ainda limitada, os registos existentes indicam a presença de ocorrências submersas distintas no interior da área de aquisição sísmica.

A análise qualitativa do conjunto de dados sugere que estas ocorrências correspondem predominantemente a ocorrências não classificadas (descritas como “Ocorrências Externas” na Figura 31) que incluem potenciais naufrágios e anomalias do fundo marinho de natureza indeterminada. Adicionalmente, a cartografia identifica explicitamente a presença de vestígios submersos de uma aeronave localizada na área de levantamento. A distribuição espacial destas ocorrências, incluindo uma concentração significativa nas imediações da infraestrutura legada do “Poço da Dourada”, evidencia a necessidade de uma verificação cuidadosa através de técnicas de deteção remota, de modo a distinguir entre detritos modernos e bens com efetivo valor patrimonial.

4.4 Identificação de Áreas Classificadas Potencialmente Afetadas

Ao abrigo da Diretiva Habitats e da rede NATURA 2000, as áreas que poderão ser influenciadas pelas atividades planeadas no âmbito do PilotSTRATEGY correspondem às Zonas Especiais de Conservação (ZEC) Dunas de Mira, Gândara e Gafanhas (ZEC — PTCON0055) e Maceda/Praia da Vieira (ZEC — PTCON0063), bem como à Zona de Proteção Especial (ZPE) Aveiro/Nazaré (ZPE — PTZPE0060). Embora apenas Maceda/Praia da Vieira (ZEC) e Aveiro/Nazaré (ZPE) se sobreponham ao polígono do projeto (Figura 32), existem riscos diretos e indiretos mediados pela propagação acústica, conectividade trófica e transporte larvar.

A ZEC Dunas de Mira, Gândara e Gafanhas abrange extensos sistemas dunares costeiros, pinhais e zonas húmidas que se estendem ao longo do corredor Mira–Gândara–Gafanhas. Embora se trate de uma área predominantemente terrestre, esta encontra-se intimamente ligada aos processos costeiros e integra lagoas, depressões húmidas e ecossistemas de transição que suportam anfíbios, insetos e espécies dependentes dos sistemas dunares.

Pontos de Interesse Áreas Natura2000

- Poço da Dourada
- Poço de Injeção
- Área da Sismica
- Diretiva das Aves
- Diretiva dos Habitats

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664

Os habitats protegidos incluem dunas fixas e móveis, depressões húmidas interdunares e pinhais litorais, de elevada importância para espécies vegetais nativas e endémicas, invertebrados associados às dunas e algumas espécies de morcegos. O sistema dunar desempenha ainda um papel relevante na proteção costeira, ao regular as trocas sedimentares com o meio marinho.

A área de estudo localiza-se em meio *offshore* e não apresenta qualquer interação espacial direta com a ZEC (Figura 4.32). No entanto, a ZEC insere-se na bacia sedimentar costeira adjacente à zona de aquisição sísmica. Os riscos associados às atividades de prospeção para o projeto piloto são considerados baixos, sendo o único risco potencial de natureza indireta e cumulativa, relacionado com o ruído subaquático que poderá influenciar cardumes de peixes costeiros ou crustáceos que interagem com ecossistemas da zona de rebentação ligados às zonas húmidas dunares. Não se prevê que impactes sedimentares associados a atividades de perfuração se estendam em direção à linha de costa.

A ZEC Maceda – Praia da Vieira é uma zona costeira da rede Natura 2000 localizada ao longo da costa centro-norte de Portugal, que abrange sistemas dunares costeiros, praias arenosas, pinhais (Mata Nacional de Maceda), zonas húmidas e áreas de influência marinha próxima da costa. Esta zona inclui habitats protegidos listados no Anexo I da Diretiva de Habitats, nomeadamente dunas móveis e fixas com vegetação herbácea, depressões húmidas interdunares e ecossistemas costeiros de transição associados. Embora tenha uma natureza predominantemente terrestre e costeira, a ZEC encontra-se ecologicamente ligada ao meio marinho adjacente através da dinâmica sedimentar, da produtividade da zona de rebentação e da troca larvar entre as águas costeiras pouco profundas e as zonas húmidas costeiras.

A ZEC Maceda – Praia da Vieira poderá ser afetada pelas operações de aquisição de sísmica 3D e de perfuração do poço de injeção, como resultado da localização *offshore* do projeto. Os riscos ecológicos são diretos e de curta duração, estando associados à perturbação acústica das comunidades pelágicas, à mortalidade de zooplâncton e a possíveis efeitos sobre o fornecimento larvar aos ecossistemas costeiros. Os riscos para as comunidades bentónicas são considerados moderados, uma vez que a exposição repetida ao ruído contínuo poderá induzir stress e alterações comportamentais em bivalves e crustáceos, bem como comprometer a função imunitária e reduzir a atividade alimentar.

A ZPE Aveiro–Nazaré (Zona de Proteção Especial – Aves) é uma ZPE marinha extensa que abrange as águas costeiras entre Aveiro e Nazaré, designada principalmente pela sua importância para aves marinhas, como *Calonectris borealis* (cagarra), *Puffinus puffinus* e *P. mauretanicus* (pardela-preta e pardela-balear), *Hydrobates pelagicus* (painho-de-barriga-branca) e *Larus michahellis* e *L. fuscus* (gaivota-de-patas-amarelas e gaivota-d’asa-escura).

A ZPE engloba áreas de alimentação associadas a zonas de afloramento costeiro, sistemas frontais e elevadas concentrações de zooplâncton, suportando áreas *offshore* de alimentação, repouso e reprodução de aves marinhas migratórias. A ZPE sobrepõe-se ao polígono do projeto PilotSTRATEGY, situando as atividades de aquisição sísmica e perfuração no interior de uma área designada de alimentação de várias espécies de aves marinhas listadas no Anexo I.

O ruído gerado pelas “Airguns” sísmicas poderá afetar peixes forrageiros (como sardinhas e anchovas) e o zooplâncton, podendo reduzir a disponibilidade de presas a curto prazo para as aves marinhas. Poderá ainda ocorrer o afastamento temporário das aves marinhas de áreas de alimentação preferenciais devido à presença de embarcações e ao ruído associado.

Com base nos dados disponíveis, não se identificam habitats protegidos da Rede Natura 2000 (como recifes ou bancos de areia protegidos) no interior do polígono definido para a aquisição de sísmica 3D para o projeto piloto. As áreas que assumem maior relevância são os habitats bentónicos de sedimentos lodosos, biologicamente produtivos e ecologicamente conectados às áreas ZEC/ZPE. Estes sedimentos lodosos suportam invertebrados bentónicos como bivalves (por exemplo, *Spisula*, *Tellina*, *Chamelea*), poliquetas, anfípodes e crustáceos escavadores, bem como peixes demersais (por exemplo, *Solea*, *Merluccius*). Os principais riscos relacionam-se com a perturbação acústica da fauna bentónica, a mortalidade de zooplâncton e a perturbação a curto prazo das cadeias tróficas pelágicas.

4.5 Identificação preliminar de riscos e impactes

4.5.1 Riscos e impactes associados à aquisição sísmica 3D

As atividades na plataforma continental deverão gerar poluição sonora contínua ao longo de múltiplas zonas de profundidade, colocando riscos potenciais para a biodiversidade marinha. Muitos grupos taxonómicos marinhos, incluindo invertebrados, peixes e mamíferos, dependem do som para comunicação, navegação e detecção de predadores (por exemplo, peixes soníferos) (Williams et al., 2025). Nos últimos anos, tem-se verificado uma crescente preocupação relativamente aos efeitos do ruído oceânico na fauna marinha, em particular no que respeita ao impacto de sons de baixa frequência e elevada intensidade produzidos durante campanhas sísmicas marinhas.

As campanhas sísmicas constituem ferramentas essenciais para a investigação geológica e a exploração *offshore* de petróleo e gás. No entanto, geram sons de elevada intensidade e baixa frequência, maioritariamente entre 10 e 300 Hz (Carroll et al., 2017), configurando uma fonte significativa de poluição sonora subaquática. Diversos estudos sugerem que as campanhas sísmicas podem afetar negativamente cetáceos, peixes e invertebrados, embora a magnitude e extensão desses impactes permaneçam incertas (Day et al., 2017; Elliott et al., 2019). Apesar de as atividades sísmicas *offshore* serem há muito tempo consideradas perturbadoras para as pescas, poucos estudos ecológicos se têm focado especificamente em espécies de importância comercial, em particular invertebrados (Hynes et al., 2025).

Vários estudos concluem que tanto peixes como invertebrados exibem respostas comportamentais e fisiológicas às atividades sísmicas, perturbando comportamentos naturais e desencadeando mecanismos associados ao stress (Murchy et al., 2019; Williams et al., 2025). Em ecossistemas bentónicos da plataforma continental, invertebrados como os bivalves apresentam aumento da mortalidade e alterações comportamentais, incluindo respostas distintas após sinais sísmicos. Avaliações fisiológicas revelam ainda que estas perturbações influenciam a homeostase e reduzem a imunidade nas Vieiras (Day et al., 2017), salientando a necessidade de monitorização e gestão das atividades sísmicas para a proteção das populações de bivalves. Contudo, alguns resultados indicam que, embora o ruído de navegação também afete negativamente os invertebrados, as campanhas sísmicas podem apresentar um efeito positivo em termos de magnitude, sugerindo uma relação mais complexa que carece de investigação adicional (Murchy et al., 2019). A escassez de estudos focados nas respostas dos invertebrados evidencia uma lacuna significativa de conhecimento na compreensão das suas reações a perturbações sísmicas (Affatati & Camerlenghi, 2023). Assim, é fundamental integrar as comunidades bentónicas nos quadros de monitorização ambiental e avaliação de impactes. As comunidades de bactérias, meiofauna e macrofauna permitem uma compreensão abrangente das condições ecológicas dos sedimentos, respondendo a alterações ambientais em diferentes escalas espaciais e temporais e fornecendo informação complementar sobre o impacto de fatores de stress.

Os impactos fisiológicos imediatos das campanhas sísmicas marinhas não se limitam a peixes e macroinvertebrados. Existem também evidências de mortalidade significativa e diminuição da abundância em populações de zooplâncton, levantando preocupações mais amplas relativamente ao funcionamento e produtividade dos ecossistemas. McCauley et al. (2017) observaram uma redução substancial da abundância de zooplâncton após exposição ao ruído emitido por canhões de ar comprimido, com medições de sonar a indicarem uma diminuição de cerca de 3–4 dB no prazo de 15–30 minutos, assim como amostragens com redes a revelaram uma redução média de 64% no espaço de 1 hora, acompanhada por um aumento de duas a três vezes no número de indivíduos adultos e larvares mortos. Os efeitos foram detectados até 1.2 km da fonte, mais de duas ordens de grandeza acima da distância de impacto anteriormente assumida de 10 metros. Estes resultados poderão orientar futuras investigações para as consequências ecológicas de longo prazo das atividades sísmicas nas cadeias tróficas marinhas. Em contrapartida, Fields et al. (2019) demonstraram que os disparos sísmicos tiveram efeitos mínimos nos copépodes *Calanus finmarchicus* para além dos 10 metros de distância da fonte, sugerindo que estas campanhas poderão não afetar significativamente esta espécie-chave por ser presa essencial de peixes com importância comercial.

Para além das campanhas de aquisição sísmica, o ruído de navegação constitui uma das principais fontes de perturbação antropogénica para os invertebrados marinhos, afetando o seu comportamento, fisiologia e interações ecológicas. A exposição ao ruído de embarcações pode induzir respostas de stress, alterações metabólicas e mudanças nas interações comportamentais, com potenciais efeitos em cascata nos ecossistemas marinhos. Por exemplo, caranguejos costeiros expostos a ruído de navegação apresentaram uma probabilidade de movimento de 66% durante simulações de predadores, comparativamente a 32% nos grupos de controlo (Birch et al., 2025). Adicionalmente, Hudson et al. (2022) reportaram alterações no comportamento competitivo de juvenis de caranguejo-azul e lagosta-americana no prazo de 24 horas após exposição ao ruído de embarcações, evidenciando uma rápida perturbação comportamental. De forma semelhante, mexilhões (*Mytilus edulis*) expostos a ruído de navegação promovem desequilíbrios metabólicos, afetando vias energéticas cruciais para o seu desenvolvimento (Veillard et al., 2025).

Em conformidade com as normas ambientais europeias e internacionais, a avaliação e gestão do ruído subaquático no âmbito do projeto PilotSTRATEGY devem considerar os quadros regulamentares e orientações estabelecidos pela União Europeia (UE), pela Comissão OSPAR e pelo Conselho Internacional para a Exploração do Mar (ICES). A Diretiva-Quadro Estratégia Marinha (DQEM; Diretiva 2008/56/CE) identifica o ruído subaquático como uma pressão-chave sobre os ecossistemas marinhos e obriga os Estados-Membros a alcançar o Bom Estado Ambiental (BEA). Em particular, o Descritor 11 (D11) da DQEM incide sobre a energia, incluindo o ruído, introduzindo critérios para a monitorização de som contínuo de baixa frequência e de fontes de ruído impulsivo, como campanhas sísmicas e cravação de estacas. No âmbito da OSPAR (nomeadamente o Acordo OSPAR 2014-08), os eventos de ruído impulsivo devem ser registados em inventários de ruído, e atividades com riscos acústicos, como campanhas sísmicas, devem seguir uma abordagem baseada no risco. Por sua vez, o ICES fornece aconselhamento científico sobre os efeitos ecológicos cumulativos do som antropogénico, salientando que a gestão deve considerar as sensibilidades espaciais e temporais dos diferentes grupos taxonómicos, especialmente durante períodos reprodutivos ou migratórios. No que respeita à área piloto para armazenamento de CO₂, que inclui habitats bentónicos ecologicamente sensíveis e potenciais áreas de viveiro ou desova, o cumprimento destes enquadramentos será crucial para efeitos de licenciamento e aprovação operacional.

Durante a campanha sísmica 3D, o ruído subaquático impulsivo gerado pelos canhões de ar comprimido (*airguns*) constitui a principal pressão ambiental, com potencial para induzir stress fisiológico e alterações comportamentais na macrofauna bentónica (por exemplo, bivalves, crustáceos

e poliquetas), particularmente nas comunidades B1, C1 e C2, que apresentam maior sensibilidade à perturbação. Os efeitos comportamentais negativos incluem redução da atividade alimentar, perturbação dos processos de bioturbação e perda de respostas imunitárias nos organismos bentónicos. Poderão ainda ocorrer efeitos indiretos ao nível das cadeias tróficas, com mortalidade de zooplâncton a curto prazo e alteração da disponibilidade de presas, potencialmente propagando-se para níveis tróficos bentónicos. Espera-se uma perturbação física limitada, uma vez que a utilização de tecnologia de mini-streamers minimiza o contacto direto com o fundo marinho; assim, os impactos físicos são considerados baixos, localizados e temporários.

Devem ser evitados, sempre que possível, períodos biológicos sensíveis (por exemplo, fases de desova, reprodução, viveiro e migração). O período da primavera ao início do verão (março–junho) deverá ser evitado para atividades de elevada intensidade (por exemplo, pico da aquisição sísmica), uma vez que coincide com fases de desova e recrutamento de várias espécies características da macrofauna. Por exemplo, poliquetas como *Terebellides stroemii* (comunidade C1) e *Scalibregma celticum* (comunidade A3) apresentam atividade reprodutiva e libertação larvar do final do inverno à primavera, tornando os estádios iniciais de vida particularmente vulneráveis ao aumento da turvação, perturbação sedimentar e stress acústico. O período do final da primavera ao verão (abril–agosto) corresponde a uma fase de viveiro e crescimento para espécies bentónicas móveis e epibentónicas típicas de areias finas e mistas (comunidade B1), incluindo anfípodes como *Urothoe pulchella* e *Bathyporeia tenuipes*. Durante este período, os estádios juvenis ocupam as camadas superficiais do sedimento e são altamente sensíveis à perturbação física e à ressuspensão sedimentar. Em habitats lodosos e ricos em matéria orgânica (comunidade C2), dominados por espécies como *Sarsonuphis bihanica* e *Nephtys incisa*, as taxas de recuperação são lentas e a reprodução é tipicamente sazonal. A perturbação durante os períodos reprodutivos de pico (primavera–início do verão) poderá conduzir a reduções prolongadas da abundância; assim, as atividades com potencial de afetar o fundo marinho devem ser minimizadas durante estes meses.

4.5.2 Impactes gerados pelas operações de perfuração

As atividades de perfuração têm um impacto significativo nas comunidades bentónicas, sobretudo através do soterramento físico dos habitats por detritos de perfuração e do stress químico associado aos fluidos de perfuração. A descarga de resíduos de perfuração, em particular provenientes de plataformas de petróleo e gás, conduz à contaminação dos sedimentos, afetando organismos bentónicos até 20 km do ponto de descarga (Ellis et al., 2012). Podem ser libertados níveis elevados de diversos poluentes químicos, como Bário (Ba) e hidrocarbonetos, nos sedimentos, conduzindo à diminuição da abundância e da diversidade da macrofauna bentónica, especialmente nas proximidades dos centros de perfuração.

Paine et al. (2014), ao descreverem os efeitos da perfuração com lamas de base aquosa e sintética nas comunidades de macroinvertebrados bentónicos ao longo de um período de 10 anos no campo petrolífero *offshore* de Terra Nova, observaram alterações na estrutura das comunidades. Verificaram-se mudanças na composição comunitária, com o declínio de táxons sensíveis, como determinados poliquetas, e o aumento de táxons mais tolerantes, como os Phyllodocidae. Estes estudos de longo prazo indicam que a exposição crónica às descargas de perfuração pode originar respostas retardadas na dinâmica das comunidades, afetando a riqueza específica e a biomassa ao longo do tempo.

Currie et al. (2005), ao analisarem o impacto da perfuração exploratória *offshore* nas comunidades bentónicas do campo de gás de Minerva, detectaram uma redução significativa, entre 45% e 73%, dos filos mais abundantes (Crustáceos e Poliquetas) num raio de 100 m em torno da cabeça do poço após a perfuração. Na maioria dos casos, estas alterações tornaram-se indetectáveis

quatro meses após a conclusão das operações. O soterramento e a cobertura dos habitats bentónicos por detritos de perfuração podem ainda conduzir à redução da oxigenação e à atenuação da luz, afetando algas calcárias e outra flora bentónica (Tâmega et al., 2015; Reynier et al., 2015). Os táxons de recuperação são variáveis, podendo ser lentas, uma vez que efeitos residuais podem persistir muito tempo após o término da perfuração.

Durante as operações de perfuração propostas pelo projeto piloto, são expectáveis impactes associados à sufocação e soterramento resultantes da deposição de detritos de perfuração e partículas finas, com efeitos mais severos em sedimentos de granulometria fina e ricos em matéria orgânica, em particular na comunidade C2, classificada como apresentando sensibilidade muito elevada. Poderão ocorrer alterações na estrutura das comunidades, incluindo a diminuição de táxons sensíveis e o aumento de espécies tolerantes ou oportunistas, especialmente poliquetas. É igualmente expectável contaminação química local associada às descargas de perfuração (por exemplo, barite e aditivos das lamas durante as fases com lamas de base aquosa), geralmente restrita à proximidade imediata da cabeça do poço. Acresce ainda a geração contínua de ruído de baixa frequência associada às operações da plataforma do tipo “jack-up”, com potencial para induzir stress crónico em organismos bentónicos e epibentónicos.

De um modo geral, os impactes previstos são maioritariamente temporários, localizados e reversíveis, embora a sua magnitude varia consoante o tipo de comunidade bentónica. As comunidades associadas a sedimentos finos e lodosos (C1 e C2) constituem os sistemas ecológicos mais vulneráveis, devendo, por isso, ser prioritárias nas estratégias de monitorização e mitigação.

4.5.3 Impactes biológicos

A avaliação dos potenciais impactes ambientais associados ao projeto piloto de armazenamento de CO₂ foi desenvolvida com base na descrição técnica das atividades previstas, nomeadamente a aquisição sísmica e a perfuração exploratória, bem como na caracterização de referência das comunidades biológicas presentes na área de estudo, incluindo fitoplâncton, zooplâncton, macrofauna bentónica, peixes, avifauna marinha e mamíferos marinhos.

No processo de avaliação, os impactes identificados e analisados foram classificados, sempre que possível, de acordo com:

- a sua natureza (positiva ou negativa);
- a sua significância (muito significativa, significativa ou de baixa significância);
- a sua magnitude (elevada, média ou baixa);
- a sua probabilidade de ocorrência (certa, provável ou improvável);
- a sua duração (temporária ou permanente);
- o seu momento de ocorrência (imediato, a médio prazo ou a longo prazo);
- a sua reversibilidade (reversível ou irreversível);
- a sua incidência (direta ou indireta);
- a sua escala espacial (local, regional ou nacional).

No âmbito desta avaliação:

- a magnitude do impacte reflete o grau/intensidade do efeito potencial sobre um determinado recurso, nomeadamente através da extensão da área afetada, ou seja, da expressão espacial do impacte;

- A significância do impacto reflete a importância local, regional, nacional ou internacional do recurso afetado, bem como a sua sensibilidade/vulnerabilidade face ao tipo de ações previstas no projeto em avaliação.

Na Tabela 4.17 apresentam-se os critérios utilizados na classificação dos parâmetros para a caracterização dos impactos no fator “Comunidades Aquáticas”.

Tabela 4.17 - Critérios utilizados na classificação dos parâmetros para a caracterização dos impactos sobre as Comunidades Aquáticas.

Parâmetro	Classificação de Impacte	Explicação/ Limites Definidores das Classes de Impacte
Natureza	Positivo (+)	Um impacto é considerado positivo quando, no mínimo, não afeta as comunidades aquáticas, os respetivos habitats e biótopos, mantendo-os praticamente inalterados, e/ou quando promove o aumento da riqueza específica de espécies nativas, contribui para o aumento do grau de conservação dos habitats e para a melhoria ou contenção de processos de regressão e/ou degradação do estado de conservação do ecossistema aquático.
	Negativo (-)	Um impacto é considerado negativo quando afeta as comunidades aquáticas através da redução do número de espécies e da sua abundância, diminui o grau de conservação dos respetivos habitats, biótopos e contribui para processos de regressão e/ou degradação do estado de conservação do ecossistema aquático.
Significância	Muito Significativo	Os impactos são considerados muito significativos quando as comunidades aquáticas apresentam elevada sensibilidade ou vulnerabilidade às ações do projeto, provocando danos consideráveis e irreversíveis (por exemplo, elevadas taxas de mortalidade, alterações significativas na composição e estrutura das comunidades, desequilíbrios ecossistémicos), e quando a probabilidade de ocorrência é considerada certa ou provável.
	Significativo	Os impactos são considerados significativos quando as comunidades aquáticas apresentam sensibilidade ou vulnerabilidade média a elevada às ações do projeto, causando danos consideráveis (por exemplo, elevadas taxas de mortalidade, alterações significativas na composição e estrutura das comunidades), e quando a probabilidade de ocorrência é considerada certa ou provável. Neste caso, os impactos são reversíveis.
	Pouco Significativo	Os impactos são considerados de baixa significância quando as comunidades aquáticas apresentam baixa sensibilidade ou vulnerabilidade às ações do projeto, podendo ocorrer apenas alterações menores ao nível da comunidade, sem comprometer a sua estrutura ou o equilíbrio do ecossistema.

Magnitude	Elevada	A magnitude do impacto é elevada quando o número de espécies, populações e/ou habitats afetados é elevado e a área afetada é extensa.
	Média	A magnitude do impacto é média quando o número de espécies, populações e/ou habitats afetados é elevado e a área afetada é limitada, ou quando o número de espécies, populações e/ou habitats afetados é reduzido e a área afetada é extensa.
	Baixa	A magnitude do impacto é baixa quando tanto o número de espécies, populações e/ou habitats afetados como a área afetada são limitados.
Probabilidade	Certa	Os impactos são considerados certos quando o seu efeito sobre as comunidades aquáticas, habitats e/ou biótopos é inequívoco.
	Provável	Os impactos são considerados prováveis quando a probabilidade de ocorrência é média (por exemplo, cerca de 50%).
	Improvável	Os impactos são considerados improváveis quando a probabilidade de ocorrência é baixa.
Duração	Temporária	O impacto é temporário quando o seu efeito sobre as comunidades aquáticas, habitats e/ou biótopos cessa com o término da ação que lhe deu origem.
	Permanente	O impacto é permanente quando os seus efeitos persistem sobre as comunidades aquáticas, habitats e/ou biótopos mesmo após o término da ação que lhe deu origem.
Momento da Ocorrência	Imediato	O impacto é considerado imediato quando as alterações na composição e estrutura das comunidades aquáticas e/ou dos habitats e/ou biótopos ocorrem imediatamente após o início da ação que lhe deu origem.
	Médio / Long prazo	O impacto apresenta um início a médio ou longo prazo quando as alterações na composição e estrutura das comunidades aquáticas e/ou dos habitats e/ou biótopos ocorrem após um intervalo de tempo mais curto ou mais prolongado entre a ação e o impacto.
Reversibilidade	Reversível	O impacto é reversível quando, após a cessação das ações que o induzem, os seus efeitos sobre as comunidades aquáticas e/ou os habitats e/ou biótopos também cessam.
	Irreversível	O impacto é irreversível quando os seus efeitos persistem sobre as comunidades aquáticas e/ou os habitats e/ou biótopos por um período indefinido.
Incidência	Direta	O impacto é direto quando é causado diretamente pela construção ou operação do projeto.
	Indireta	O impacto é indireto quando é induzido por atividades decorrentes ou associadas ao projeto.

Escala Espacial	Local	O impacte é local quando os seus efeitos sobre as comunidades aquáticas e/ou os habitats e/ou biótopos se expressam à escala local.
	Regional	O impacte é regional quando os seus efeitos se expressam à escala regional.
	Nacional	O impacte é nacional quando os seus efeitos se expressam à escala nacional.

Em termos gerais, os potenciais impactes associados às fases de prospeção do piloto de armazenamento de CO₂ apresentam características distintas. A aquisição de dados de sísmica constitui essencialmente uma atividade transitória, cujo principal fator de pressão ambiental é o ruído subaquático e as vibrações associadas, bem como a presença temporária e a movimentação de embarcações. Os seus efeitos potenciais tendem a ser mais pronunciados em organismos que dependem da comunicação acústica e em espécies altamente móveis, para as quais o som desempenha um papel fundamental na orientação, interação social e utilização do habitat.

A perfuração, embora também temporária, envolve a instalação de uma estrutura fixa (*jack-up rig*) e a interação direta com o fundo marinho, sendo, por esse motivo, potencialmente mais relevante para os recetores bentónicos e para os organismos sensíveis à perturbação física dos habitats.

Seguidamente, procede-se à caracterização e avaliação dos impactes potenciais identificados no âmbito da fase de prospeção do projeto piloto sobre as Comunidades Aquáticas (CA), durante as fases de aquisição sísmica (SAQ) e de perfuração exploratória (EXD):

4.5.3.1 Impactes potenciais associados à aquisição sísmica (SAQ)

A aquisição sísmica 3D será realizada com recurso a mini-streamers e a fontes acústicas de alta resolução, abrangendo uma área relativamente extensa, mas por um período de tempo limitado. Esta atividade não envolve contacto físico direto com o fundo marinho; assim, os impactes expectáveis são sobretudo de natureza acústica e associados às vibrações geradas.

SAQ.AC.01 — Para o fitoplâncton e o zooplâncton, os impactes potenciais estão essencialmente relacionados com perturbações indiretas decorrentes do ruído subaquático e das vibrações associadas, bem como da presença e movimentação de embarcações, incluindo diferentes tipos de perturbação e potenciais fontes de contaminação. Estes organismos, em particular o fitoplâncton, apresentam elevadas taxas de renovação e uma rápida capacidade de recuperação, não sendo especialmente sensíveis a pressões acústicas ou vibratórias, nem à contaminação. No caso do zooplâncton, apesar da migração vertical diária de muitas espécies, a dinâmica populacional é rápida e a exposição ao ruído é temporária. Assim, para estes organismos, os impactes são considerados negativos, mas não significativos, de baixa magnitude, prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, indiretos e de escala espacial local.

SAQ.AC.02 — Relativamente às comunidades bentónicas, não se prevê qualquer perturbação física direta do substrato durante a aquisição sísmica. Os efeitos potenciais limitam-se a vibrações e perturbações acústicas que poderão ser percecionadas por organismos sensíveis, mas sem alteração estrutural do habitat, bem como a perturbações ligeiras e localizadas e a potenciais episódios de contaminação associados ao tráfego de embarcações, como libertações acidentais de poluentes e aumento da turvação da coluna de água. Deste modo, os impactes são negativos, não significativos, de baixa magnitude, improváveis a prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, indiretos e de escala espacial local.

SAQ.AC.03 — Para os peixes, a aquisição sísmica poderá induzir alterações comportamentais, incluindo o afastamento temporário da área, modificações nos padrões de alimentação ou agregação e, em espécies mais sensíveis, stress fisiológico. Adicionalmente, dependendo fortemente da intensidade do som, da distância à fonte e das características biológicas e fisiológicas das espécies, a aquisição sísmica poderá, a curta distância, causar lesões físicas, incluindo danos em tecidos e órgãos internos, particularmente em espécies com estruturas cheias de gás, como a bexiga natatória. Os peixes poderão ainda ser afetados por perturbações e potenciais fontes de contaminação associadas à atividade das embarcações, como o aumento da turvação, a ressuspensão de sedimentos e libertações acidentais de poluentes. Estes efeitos são considerados negativos, de significância baixa a moderada, de magnitude baixa a média, prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, tanto diretos (ruído) como indiretos (alterações comportamentais), e de escala espacial local.

SAQ.AC.04 — Poderá ocorrer uma redução temporária da disponibilidade de peixe para a atividade piscatória, resultante do afastamento de curto prazo dos peixes provocado pelo ruído subaquático e pela atividade das embarcações. Este impacto é negativo, de significância baixa a moderada, de magnitude baixa a média, provável, temporário, imediato, reversível, indireto e de escala espacial local.

SAQ.AC.05 — Na avifauna marinha, os impactes potenciais estão sobretudo associados à perturbação causada pela presença de embarcações, pelo ruído aéreo e pela iluminação noturna. Adicionalmente, as atividades associadas às operações das embarcações podem originar poluição atmosférica e aquática localizada, através de emissões gasosas, subprodutos da combustão de combustíveis e potenciais libertações de hidrocarbonetos ou outros contaminantes, que poderão afetar indiretamente as aves pela degradação da qualidade ambiental e dos recursos alimentares. Estes impactes são negativos, não significativos, de baixa magnitude, prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, indiretos e de escala espacial local. Atendendo a que estas espécies utilizam maioritariamente a interface ar-mar, não são expectáveis impactes diretos relevantes associados à componente acústica subaquática da aquisição sísmica.

SAQ.AC.06 — Os mamíferos marinhos, algumas espécies de peixes e invertebrados nectobentónicos são altamente sensíveis à aquisição sísmica devido à sua forte dependência do som para comunicação, navegação e alimentação. O ruído produzido pelas fontes sísmicas pode provocar perturbações comportamentais, evitamento temporário da área, alterações nos padrões de mergulho e stress fisiológico. Estes efeitos poderão ser cumulativos e potencialmente intensificados pela presença e movimentação de embarcações, que constituem uma fonte adicional de perturbação acústica e de pressão física no meio marinho. Assim, os impactes são negativos, considerados significativos, de magnitude média, prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, diretos e de escala espacial local a regional.

De um modo geral, os impactes da aquisição sísmica são dominados pela pressão acústica, assumindo maior relevância para os mamíferos marinhos e, em menor grau, para os peixes, sendo expectável que sejam maioritariamente temporários e reversíveis. Os restantes grupos biológicos são sobretudo afetados de forma indireta, temporária e com baixa magnitude.

4.5.3.2 Impactes potenciais associados à perfuração exploratória (EXD) para o poço de injeção

A fase de perfuração exploratória envolve a instalação de uma plataforma do tipo *jack-up*, a realização de operações de perfuração no fundo marinho e a utilização de lamas de perfuração, implicando uma interação direta com o substrato e um aumento significativo do ruído subaquático contínuo.

EXD.AC.01 — Para o fitoplâncton e o zooplâncton, os impactes potenciais estão principalmente associados a aumentos locais da turvação e a alterações temporárias da qualidade da

água, decorrentes da ressuspensão de sedimentos e das operações da plataforma. Estes impactos são negativos, não significativos, de baixa magnitude, prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, indiretos e de escala espacial local.

EXD.AC.02 — As comunidades bentónicas constituem claramente o grupo mais afetado durante esta fase. A instalação da plataforma *jack-up* implica contacto direto com o fundo marinho, resultando em destruição local de habitats, perturbação física dos sedimentos e mortalidade direta de organismos bentónicos dentro da área de implantação da estrutura. Estes impactos são negativos, significativos, de magnitude média a elevada no local de instalação, certos, temporários a potencialmente prolongados, imediatos, geralmente reversíveis (com recuperação lenta), diretos e de escala espacial local.

EXD.AC.03 — A ressuspensão e deposição de sedimentos podem provocar o soterramento de organismos bentónicos e alterações das características físicas e químicas dos sedimentos. Estes impactos são negativos, significativos, de magnitude média, prováveis, temporários a prolongados, imediatos, reversíveis, diretos e indiretos, e de escala local.

EXD.AC.04 — A descarga de lamas de perfuração de base aquosa nas secções superiores do furo constitui outro fator de pressão relevante, sobretudo para organismos bentónicos e nectobentónicos, peixes demersais e comunidades planctónicas. Embora consideradas ambientalmente menos agressivas do que as lamas de base oleosa, podem ainda assim provocar alterações físicas e químicas nos sedimentos. O impacto é negativo, significativo, de magnitude média, provável a certo, temporário a prolongado, imediato, reversível, direto e de escala local.

EXD.AC.05 — Para invertebrados bentónicos e nectobentónicos e para os peixes, o impacto resultante do ruído contínuo gerado pela plataforma e pelas embarcações de apoio pode conduzir ao afastamento temporário da área, a alterações comportamentais e à interferência com os padrões de alimentação. Este impacto é negativo, significativo, de magnitude média, provável, temporário, imediato, reversível, direto e de escala local.

EXD.AC.06 — Poderá ocorrer uma redução temporária da disponibilidade de peixe para a atividade piscatória, devido à presença contínua de infraestruturas, ao tráfego de embarcações e ao ruído operacional, que podem levar ao evitamento da área imediata por parte dos peixes. Este impacto é negativo, de significância baixa a moderada, de magnitude baixa a média, provável, temporário, imediato a médio prazo, reversível, indireto e de escala espacial local.

EXD.AC.07 — Poderão verificar-se alterações no esforço de pesca e nos padrões operacionais caso o acesso a determinadas áreas seja condicionado ou caso os pescadores evitem operar nas proximidades das atividades de perfuração. Este impacto é negativo para a atividade piscatória e positivo para os organismos, de significância baixa a moderada, de magnitude baixa a média, provável a certo, temporário, imediato a médio prazo, reversível, indireto e de escala local.

EXD.AC.08 — A avifauna marinha poderá ser afetada pelo aumento da presença humana e do ruído, pela iluminação noturna e pelo incremento do tráfego de embarcações, originando perturbação e alterações na utilização do espaço, particularmente durante a alimentação. Os impactos são negativos, de significância baixa a moderada, de magnitude baixa a média, prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, indiretos e locais.

EXD.AC.09 — Os mamíferos marinhos encontram-se, novamente, entre os grupos mais sensíveis, devido ao ruído contínuo e persistente associado às operações de perfuração. Este ruído pode alterar os padrões de movimento, alimentação e comunicação. Os impactos são negativos, significativos a muito significativos, de magnitude média (localmente elevada), prováveis, temporários, imediatos, reversíveis, diretos e de escala espacial local a regional.

Em síntese, a perfuração exploratória apresenta impactos potencialmente mais relevantes para as comunidades bentónicas, devido à perturbação física direta e à deposição de sedimentos e lamas, e para os mamíferos marinhos, devido ao ruído contínuo. Adicionalmente, outros organismos que dependem do som para comunicação, orientação ou detecção de presas, incluindo algumas espécies de peixes e invertebrados nectobentónicos, poderão também ser significativamente afetados pelas emissões acústicas e vibrações, bem como pela presença humana sustentada e pela atividade associada de embarcações na área. Em ambos os casos, os impactos são predominantemente temporários e reversíveis, com uma expressão espacial maioritariamente local. Contudo, a sensibilidade ecológica de determinados receptores, em particular comunidades bentónicas de baixa resiliência e mamíferos marinhos, confere-lhes um nível de significância que justifica especial atenção às medidas de mitigação, à calendarização das atividades e à monitorização ambiental.

4.5.3.3 Impactes cumulativos

Os impactos cumulativos potenciais de um determinado projeto correspondem àqueles que (i) resultam da acumulação de efeitos de pequena magnitude cuja expressão se torna perceptível após a ultrapassagem de um determinado limiar, ou (ii) decorrem da acumulação de efeitos semelhantes (impactes) no interior da área de intervenção ou da área de influência do projeto, nomeadamente na sua envolvente. No presente projeto, os impactos cumulativos não resultam da sobreposição de diferentes projetos na mesma área, mas sim da combinação e sucessão temporal das várias fases e atividades que o compõem. Uma vez que, até ao momento, não são conhecidos outros projetos em desenvolvimento ou planeados na proximidade da área do projeto piloto de armazenamento de CO₂, não se antecipam impactos cumulativos de natureza interprojetos. No entanto, reconhece-se a possibilidade de ocorrência de impactos cumulativos intraprojeto, resultantes da combinação das diferentes atividades previstas no âmbito do próprio projeto.

Assim, poderão ocorrer efeitos cumulativos, numa fase inicial, associados à interação entre a presença e movimentação de embarcações e as atividades de aquisição sísmica e, numa fase subsequente, à combinação do tráfego marítimo com as operações de perfuração exploratória. Embora cada uma destas atividades, quando considerada isoladamente, seja expectável que gere impactos predominantemente localizados e temporários, a sua ocorrência sequencial ao longo do tempo poderá conduzir a uma acumulação de pressões sobre o meio marinho, particularmente ao nível do ruído subaquático e das vibrações, da perturbação física associada à presença de embarcações e de alterações temporárias da qualidade ambiental. Esta acumulação de pressões poderá traduzir-se em períodos prolongados de perturbação para as comunidades biológicas, reduzindo os intervalos de recuperação entre as diferentes fases do projeto e potenciando o reforço de efeitos cumulativos ao longo do tempo na área de estudo.

Alguns impactos cumulativos poderão resultar da relativa proximidade do projeto de energias renováveis *offshore*, localizado a cerca de 20 km a oeste do projeto piloto de armazenamento de CO₂. O Plano de Afetação para as Energias Renováveis *Offshore* (Resolução do Conselho de Ministros No. 19/2025, de 7 de fevereiro de 2025) reconhece que os parques eólicos *offshore* projetados terão um impacto significativo sobre a atividade piscatória, referindo que “algumas artes de pesca ficarão severamente condicionadas e, por outro lado, será impossível exercer a pesca nas áreas ocupadas pelas próprias turbinas eólicas”.

A RCM No. 19/2025 reconhece ainda o risco de a implantação dos parques eólicos “empurrar” a pesca de arrasto para outras áreas próximas, gerando situações de sobrepesca e conflitos com outras modalidades de pesca, ao afirmar que:

“A compatibilização dos parques eólicos com a atividade piscatória deve assumir que as artes de pesca impedidas de operar nos parques eólicos, como as artes de arrasto ou, eventualmente, a pesca por cerco, poderão conduzir à cessação da atividade das embarcações de pesca. A cessação da atividade das embarcações de pesca afigura-se essencial para garantir que as embarcações impedidas de pescar nos parques eólicos não se desloquem para outras áreas e criem problemas irreparáveis de sobrepesca e conflitos com outras embarcações não afetadas pelas energias renováveis.”

A possibilidade deste impacto cumulativo deve ser considerada na gestão operacional da fase exploratória do projeto piloto, em particular tendo em conta o estado de desenvolvimento do projeto de energias renováveis *offshore*.

4.6 Medidas de mitigação

Deve ser adotado um planeamento sazonal das operações, de modo a evitar períodos biológicos sensíveis das principais espécies marinhas, reduzindo assim o risco de perturbações ecológicas significativas. Sempre que não seja possível evitar a ocorrência de perturbação, estas espécies deverão ser alvo de monitorização específica. O outono (setembro–outubro) poderá constituir o período mais favorável para a realização de operações sísmicas ou de perfuração de curta duração, uma vez que muitos invertebrados bentónicos já concluíram os seus principais ciclos reprodutivos e as comunidades apresentam, em geral, maior resiliência à perturbação temporária (Tabela 4.18).

Tabela 18 - Comunidades bentónicas que requerem maior atenção, períodos biológicos a evitar durante as operações sísmicas e de perfuração, e períodos recomendados.

Comunidade Bentónica (Tipo de Habitat)	Principais Períodos Biológicos Sensíveis	Planeamento Sazonal Recomendado
B1 – Areias finas (sensibilidade moderada–elevada; elevada β -diversidade)	Primavera–verão (abr–ago): fase de crescimento juvenil / viveiro nos sedimentos superficiais	Sempre que possível, evitar atividades sísmicas entre abr–ago; período mais favorável set–fev para linhas de levantamento de elevada intensidade.
C1 – Areias muito finas profundas (elevada sensibilidade; elevada diversidade)	Final do inverno–primavera (fev–mai): desova / libertação larvar; assentamento sensível à turvação	Evitar atividades geradoras de turvação/plumas entre fev–mai. Programar operações de maior risco para o final do verão–início do outono (ago–out) .
C2 – Areias lodosas profundas / lodo arenoso (sensibilidade muito elevada; baixa resiliência)	Primavera–início do verão (mar–jun): maior recrutamento / produção reprodutiva; elevada sensibilidade a períodos prolongados de baixo O ₂	Evitar perfuração e descargas no fundo marinho entre mar–jun. Privilegiar set–out para operações de perfuração e atividades com perturbação do fundo.

Deverá ser elaborado e implementado um Plano de Gestão de Resíduos de Perfuração, garantindo o tratamento adequado e a correta deposição dos fluidos e detritos de perfuração. Sempre que tecnicamente viável, deverá ser dada preferência à utilização de lamas de perfuração de base aquosa, devendo os resíduos associados ser totalmente contidos e recuperados para tratamento e eliminação em terra por operadores devidamente licenciados.

Antes, durante e após a campanha sísmica 3D, recomenda-se a recolha de amostras biológicas (por exemplo, peixes, água e sedimentos), com o objetivo de analisar eventuais alterações fisiológicas em organismos pelágicos e bentónicos resultantes da perturbação acústica induzida pelas operações sísmicas e de perfuração.

O trabalho desenvolvido no âmbito das Tarefas 6.2 e 6.5 do projeto PilotSTRATEGY (Comissões Regionais de Partes Interessadas) evidenciou a necessidade de manter as partes interessadas e os cidadãos informados e envolvidos ao longo de todas as fases do projeto. Para o efeito, deverão ser elaborados planos de comunicação e envolvimento, com ações direcionadas e ajustadas aos diferentes tipos de stakeholders, incluindo autoridades nacionais e locais, entidades reguladoras, indústria, pescadores, setor do turismo, associações locais e ONGA.

Este processo implicará a produção de materiais informativos escritos, alguns dos quais redigidos em linguagem clara e acessível para públicos não especializados, bem como a realização de reuniões presenciais e workshops locais, que permitam às partes interessadas colocar questões aos promotores do projeto e partilhar as suas preocupações, contributos e recomendações relativamente ao projeto-piloto.

4.6.1 Medidas de Mitigação Biológica

As medidas de mitigação (MM) são estabelecidas em função dos impactes expectáveis, sempre que estes sejam suscetíveis de ser minimizados ou evitados. Nesse sentido, são propostas medidas de mitigação específicas para as Comunidades Aquáticas (CA):

4.6.1.1 Medidas de mitigação para a fase de aquisição sísmica (SAQ)

Os impactes associados à aquisição sísmica estão principalmente relacionados com o ruído subaquático e as vibrações. Assim, as medidas de mitigação devem centrar-se na redução da exposição acústica e vibratória dos organismos marinhos, em particular mamíferos marinhos e peixes, bem como na minimização da perturbação associada à presença e movimentação de embarcações.

MM.AC.SAQ.01 — Implementação de um programa de observação de mamíferos marinhos e avifauna marinha, com cobertura contínua durante as operações, permitindo a intervenção atempada sempre que sejam identificadas situações críticas.

MM.AC.SAQ.02 — Aplicação de procedimentos de *soft-start/ramp-up*, com aumento gradual da intensidade acústica.

MM.AC.SAQ.03 — Estabelecimento de zonas de exclusão acústica; as operações deverão ser interrompidas caso sejam detetados mamíferos marinhos e avifauna marinha relevante (ver Situação de Referência) no interior dessas zonas.

MM.AC.SAQ.04 — Minimização da duração da campanha através de um planeamento operacional eficiente; redução do número de embarcações envolvidas, restringindo a sua presença às estritamente necessárias.

MM.AC.SAQ.05 — Implementação de procedimentos operacionais e de segurança rigorosos para prevenir derrames acidentais de óleos, combustíveis e hidrocarbonetos, incluindo manutenção adequada das embarcações e equipamentos, armazenamento seguro de substâncias e disponibilidade de kits de resposta a derrames a bordo.

MM.AC.SAQ.08 — Sempre que aplicável, minimização da iluminação noturna, de forma a reduzir a atração e o risco de colisão da avifauna marinha.

MM.AC.SAQ.09 — Planeamento das operações fora de períodos biológicos críticos. Com base na Situação de Referência, a primavera e o verão (de março a setembro) correspondem aos períodos de maior sensibilidade ecológica, associados a elevada produtividade planctónica, recrutamento bentónico, reprodução de peixes e desenvolvimento larvar, bem como a intensa atividade da avifauna marinha. Assim, recomenda-se que as atividades com maior potencial de impacto ambiental sejam preferencialmente realizadas entre **novembro e fevereiro**, período em que a sensibilidade biológica global é inferior, contribuindo para a minimização dos impactos sobre os principais processos ecológicos.

4.6.1.2 *Medidas de mitigação para a fase de perfuração exploratória (EXD) do poço de injeção*

A perfuração exploratória envolve impactos ambientais mais diretos; deste modo, a mitigação deverá centrar-se na limitação da área afetada, no controlo das descargas e na redução do ruído.

MM.AC.ESD.01 — Para o fitoplâncton e o zooplâncton, deverá ser efetuada a monitorização da turvação da água, devendo ser considerada a suspensão temporária das operações em caso de turvação anormal e persistente.

MM.AC.ESD.02 — Para as comunidades bentónicas, os habitats sensíveis deverão ser evitados sempre que possível. Com base na caracterização dos habitats bentónicos (Situação de Referência), os habitats **C2** (areias lodosas profundas / lodo arenoso) e **C1** (areias muito finas profundas) deverão ser evitados, uma vez que apresentam a maior sensibilidade e menor resiliência à perturbação física, deposição de sedimentos e aumento da turvação. O habitat **B1** (areias finas) deverá ser tratado com elevada precaução, devido ao seu elevado valor ecológico e sensibilidade ao soterramento sedimentar. Em contraste, os habitats de sedimentos grosseiros **A2** e **A3** apresentam uma resiliência comparativamente superior, sendo, por isso, menos críticos do ponto de vista da conservação.

MM.AC.ESD.03 — A área de contacto da plataforma *jack-up* com o fundo marinho deverá ser minimizada; deverá ser dada preferência à utilização de lamas de perfuração de base aquosa e de baixa toxicidade; o controlo das descargas de lamas e detritos deverá ser rigoroso; e a duração das operações num mesmo local deverá ser limitada.

MM.AC.ESD.04 — O ruído deverá ser reduzido através da adequada manutenção das embarcações e equipamentos e da adoção de boas práticas operacionais; as operações deverão ser programadas evitando períodos biológicos críticos (ver MM.AC.SAQ.09), e deverão ser estabelecidas zonas temporárias de segurança em torno da plataforma (ver MM.AC.ESD.02).

MM.AC.ESD.05 — Gestão cuidadosa da iluminação noturna, de forma a reduzir a atração da avifauna marinha; instalação de sistemas dissuasores passivos, caso se revele necessário.

MM.AC.ESD.06 — Implementação de um programa de observação de mamíferos marinhos e avifauna marinha relevante, com base nos critérios definidos na Situação de Referência (Tabela 2), assegurando cobertura contínua durante as operações; utilização de sistemas de monitorização acústica passiva (*Passive Acoustic Monitoring* – PAM); e suspensão temporária das operações sempre que seja detectada elevada abundância de mamíferos marinhos ou de espécies sensíveis de aves marinhas na proximidade da área de atividade. De forma global, as medidas de mitigação assentam em quatro pilares principais:

- 1) redução do ruído subaquático, essencial para a proteção de mamíferos marinhos e peixes;
- 2) minimização da perturbação física do fundo marinho, crucial para as comunidades bentónicas e para os peixes com afinidades bentónicas e demersais;
- 3) calendarização das atividades, evitando períodos biologicamente sensíveis e habitats bentónicos vulneráveis;

- 4) monitorização ambiental, permitindo a deteção precoce de impactes imprevistos e o ajustamento operacional em tempo real.

A aplicação combinada destas medidas permitirá reduzir significativamente a magnitude, a duração e a escala espacial dos impactes identificados, assegurando que o projeto PilotSTRATEGY é desenvolvido em plena compatibilidade com o valor ecológico da área de estudo.

4.7 Plano de Monitorização

4.7.1 Plano de Monitorização das Comunidades Bentónicas

O objetivo deste plano de monitorização é detectar, quantificar e gerir os potenciais impactes da fase exploratória (aquisição sísmica 3D e perfuração exploratória) do projeto piloto sobre as comunidades bentónicas e epibentónicas, com especial enfoque nas comunidades identificadas como sensíveis ou vulneráveis. O plano visa:

- Avaliar alterações na estrutura, diversidade e funcionamento das comunidades;
- Distinguir os efeitos associados ao projeto da variabilidade espacial e temporal natural;
- Apoiar uma gestão adaptativa e o cumprimento dos requisitos regulamentares.

4.7.1.1 Comunidades bentónicas prioritárias

Com base na caracterização de referência e na análise de sensibilidade, são priorizadas as seguintes comunidades:

- Comunidades C2, caracterizadas por areias lodosas profundas / lodos arenosos, classificadas como apresentando sensibilidade muito elevada e baixa resiliência. São consideradas receptores primários dos impactes associados à perfuração (soterramento, enriquecimento orgânico e depleção de oxigénio).
- Comunidades C1, caracterizadas por areias muito finas profundas, classificadas como de elevada sensibilidade e elevada biodiversidade. São consideradas vulneráveis ao aumento da turvação, à deposição de sedimentos finos e a perturbações prolongadas.
- Comunidades B1, caracterizadas por areias finas (amplo intervalo batimétrico), apresentam sensibilidade moderada a elevada e elevada β -diversidade, funcionando como comunidades sentinela eficazes para a detecção de gradientes de perturbação física e redistribuição sedimentar.
- Comunidades A2 e A3, associadas a sedimentos arenosos grosseiros, são avaliadas como apresentando sensibilidade moderada e são utilizadas principalmente como comunidades de referência e controlo, permitindo detetar processos de sedimentação e alterações hidrodinâmicas.

4.7.1.2 Design da Monitorização

Identificar as áreas de impacto potencial: 1) zona de impacto da perfuração — classes de distância concêntricas em torno da cabeça do poço (por exemplo, 50 m, 100 m, 250 m, 500 m e 1 km); 2) zona de aquisição sísmica — estações distribuídas no interior do polígono sísmico 3D, alinhadas com os principais habitats bentónicos.

Selecionar áreas de controlo ecologicamente comparáveis, localizadas fora da área de influência das atividades sísmicas e de perfuração, e correspondentes em profundidade, tipo de sedimento e regime hidrodinâmico.

Implementar uma abordagem BACI / Beyond-BACI (*Before–After–Control–Impact*), de modo a assegurar uma atribuição robusta dos impactes. Recolher amostras de organismos epibentónicos e

bentónicos, incluindo macrofauna, meiofauna e microbioma. Recolher amostras de sedimento para analisar a biogeoquímica e medir outros parâmetros ambientais, como pH, temperatura, pigmentos Clorofila *a* e Feopigmentos (pigmentos castanhos).

4.7.1.3 *Enquadramento temporal*

A monitorização será conduzida nas seguintes fases:

- Linha de base (pré-operação): pelo menos uma campanha completa para caracterização da variabilidade natural.
- Fase operacional:
 - i. Durante a aquisição sísmica (resposta de curto prazo);
 - ii. Durante e imediatamente após a perfuração (período de maior risco).
- Fase pós-operação / recuperação:
 - i. Curto prazo: 1–3 meses após a conclusão;
 - ii. Médio prazo: 6–12 meses após a conclusão;
 - iii. Longo prazo (se necessário): ≥24 meses para sedimentos finos e lodosos (C1 e C2).

4.7.1.4 *Plano de Monitorização Ambiental para a Fase de Perfuração Exploratória*

Deverá ser implementado um programa de monitorização que integre elementos biológicos e parâmetros ambientais, permitindo uma interpretação adequada das respostas ecológicas. O programa deverá ser estruturado de acordo com as características ecológicas de cada grupo biológico e com os objetivos específicos de avaliação de impactes e mitigação.

Para as comunidades bentónicas (macrofauna bentónica e habitats sedimentares) e peixes, a monitorização deverá seguir uma abordagem *before–after*, permitindo o estabelecimento de condições de referência antes de cada atividade (aquisição sísmica e perfuração exploratória) e uma avaliação pós-atividade para identificar alterações e efeitos atribuíveis ao projeto. Recomenda-se um desenho BACI, com a definição de locais de impacte (I), localizados na área imediata em torno da plataforma/poço e organizados ao longo de gradientes radiais ou transectos, e locais de controlo (C), situados em áreas com características ambientais semelhantes (por exemplo, batimetria, tipo de sedimento e hidrodinâmica), mas fora da zona de influência esperada das atividades do projeto. A replicação temporal das campanhas deverá ser considerada sempre que relevante, de modo a assegurar comparabilidade sazonal. Esta abordagem permitirá uma avaliação robusta de potenciais alterações na estrutura das comunidades, abundância e qualidade do habitat, atribuíveis ao projeto.

No caso dos mamíferos marinhos e da avifauna marinha, a monitorização deverá ser realizada principalmente durante as atividades do projeto, uma vez que o seu principal objetivo é a mitigação operacional e não a avaliação pós-impacte. A monitorização em tempo real permite a detecção de espécies sensíveis na proximidade da área de estudo e apoia a implementação de medidas de gestão imediatas, como a suspensão temporária das operações sempre que necessário. A monitorização de mamíferos marinhos deverá ser efetuada através de observações visuais por Observadores de Mamíferos Marinhos (OMM), com registo padronizado de informação como espécie (ou grupo), número de indivíduos, distância/azimute e comportamento (por exemplo, alimentação, deslocação, repouso), sendo complementada, sempre que tecnicamente viável, por Monitorização Acústica Passiva (MAP). A MAP poderá incluir sistemas operacionais em tempo real, particularmente úteis em condições de baixa visibilidade e durante operações noturnas, bem como sistemas autónomos (hidrofones/gravadores) para uma caracterização temporal mais alargada dos padrões de presença e atividade.

Em paralelo, deverão ser monitorizados parâmetros de qualidade ambiental que suportem a interpretação das respostas biológicas, incluindo temperatura da água, salinidade, oxigénio dissolvido

e turvação. Estas variáveis são essenciais para caracterizar as condições de referência, detetar alterações induzidas pelo projeto no meio físico e fornecer o contexto necessário à compreensão de potenciais efeitos sobre as comunidades bentónicas, os peixes, os mamíferos marinhos e a avifauna marinha.

4.8 Análise de Lacunas

4.8.1 Componentes e indicadores de monitorização

4.8.1.1 Indicadores biológicos

- Macrofauna: composição específica, abundância e biomassa; índices de diversidade (riqueza específica, Shannon–Wiener, equitabilidade); táxons indicadores e sensíveis (por exemplo, *Terebellides stroemii*, *Auchenoplax worsfoldi*, *Urothoe pulchella*);
- Meiofauna (recomendada para as comunidades C1 e C2): abundância de nemátodes, diversidade e traços funcionais;
- Indicadores de alerta precoce de stress sedimentar: padrões de composição das comunidades bacterianas;
- Índices de diversidade e funcionais que descrevam guildas tróficas, mobilidade, potencial de bioturbação e estratégias de história de vida, para avaliar a extensão da perturbação.

4.8.1.2 Indicadores sedimentares e geoquímicos

- Distribuição granulométrica e fração fina;
- Matéria orgânica (TOC);
- Clorofila *a* e feopigmentos;
- Potencial redox e profundidade de penetração do oxigénio;
- Contaminantes associados à perfuração (por exemplo, Bário (Ba) como indicador).

4.8.1.3 Indicadores de perturbação física

- Espessura e extensão espacial da deposição sedimentar;
- Evidências de soterramento ou alteração da estrutura do sedimento;
- Métricas de exposição acústica (a partir de registos operacionais e modelação).

4.8.1.4 Gestão adaptativa e reporte

Os resultados serão revistos após cada fase de monitorização. Caso sejam ultrapassados limiares definidos, poderão ser implementadas medidas corretivas, incluindo:

- Ajuste do faseamento temporal ou da intensidade operacional;
- Monitorização adicional ou campanhas dirigidas;
- Revisão das medidas de mitigação.

Os resultados da monitorização serão reportados às autoridades reguladoras e às partes interessadas, assegurando transparência e conformidade regulamentar.

4.9 Conclusões

O projeto para o armazenamento de CO₂ localiza-se ao largo da Figueira da Foz e sobrepõe-se a um ambiente de plataforma continental heterogéneo, no qual a informação de referência disponível (Mamede, 2018) sustenta a identificação de um mosaico de cinco grupos de afinidade de

macrofauna bentónica (A2, A3, B1, C1 e C2), moldados principalmente pela profundidade, regime hidrodinâmico e características sedimentares. Esta heterogeneidade espacial é central para a previsão de impactes, uma vez que cada comunidade apresenta traços funcionais, níveis de sensibilidade e potencial de recuperação distintos. As comunidades de sedimentos grosseiros A2 e A3 (areias grosseiras/cascalho fino e areias grosseiras profundas) apresentam sensibilidade moderada a moderada-elevada e constituem referências úteis para a detecção de alterações hidrodinâmicas. A comunidade B1 de areias finas, com elevada β -diversidade e ampla distribuição batimétrica, é classificada como de sensibilidade moderada-elevada e constitui um bom indicador para a detecção de gradientes de perturbação física e redistribuição sedimentar. Em contraste, as comunidades de sedimentos finos profundos C1 (areias muito finas profundas) e, em particular, C2 (areias lodosas profundas / lodo arenoso) exibem sensibilidade elevada a muito elevada, devendo, por isso, ser tratadas como indicadores prioritários em cenários de aumento da turvação, deposição de partículas finas, enriquecimento orgânico e soterramento.

A seleção preliminar de impactes indica que, no caso da aquisição sísmica, a pressão dominante é o ruído subaquático impulsivo, com potencial para induzir efeitos comportamentais e fisiológicos na macrofauna bentónica e em organismos epibentónicos (por exemplo, bivalves, crustáceos e poliquetas). Estes efeitos deverão ser mais relevantes nas comunidades B1, C1 e C2, em virtude da sua sensibilidade ecológica e estrutura comunitária. No caso da perfuração exploratória, as pressões mais significativas estão associadas ao soterramento e cobertura dos habitats do fundo marinho decorrentes da deposição de detritos de perfuração, à potencial contaminação localizada associada a fluidos/aditivos de perfuração (por exemplo, bário como traçador) e ao ruído operacional contínuo. Estes impactes deverão ser mais críticos em habitats de sedimentos finos e lodosos, designadamente nas comunidades C2, onde as trajetórias de recuperação são expectavelmente mais lentas e a resiliência ecológica é limitada.

Para reduzir a perturbação ecológica significativa, deverão ser implementadas medidas de mitigação padrão, incluindo procedimentos operacionais para minimizar a pegada acústica, a existência de um Plano de Gestão de Resíduos de Perfuração, e a adoção de janelas operacionais sazonais que evitem períodos biológicos sensíveis sempre que possível. No enquadramento proposto, recomenda-se evitar as operações mais intensivas durante o final do inverno até à primavera/início do verão (aproximadamente fev–jun), período em que a desova, o recrutamento e o desenvolvimento juvenil aumentam a vulnerabilidade do ecossistema. Janelas operacionais como o final do verão e outono (ago–out), ou de forma mais geral set–fev, poderão ser preferíveis, dependendo do tipo de atividade e da distribuição das comunidades bentónicas.

Deverá ser implementado um programa de monitorização bentónica com base numa abordagem BACI / Beyond-BACI, suportado por áreas de controlo ecologicamente comparáveis e por estações de amostragem estratificadas de acordo com os habitats dominantes. A monitorização deverá abranger: (i) um gradiente concêntrico de distâncias em torno do local de perfuração (por exemplo, 50 m, 100 m, 250 m, 500 m e 1 km), e (ii) locais de amostragem representativos distribuídos ao longo do polígono de aquisição sísmica. Os fatores biológicos a monitorizar deverão incluir a composição, abundância, biomassa e métricas de diversidade da macrofauna, com a adição fortemente recomendada da meiofauna e das comunidades microbianas bentónicas enquanto indicadores de resposta rápida (*early warning*). A monitorização sedimentar e geoquímica deverá incluir granulometria, fração fina, TOC, pigmentos, potencial redox/profundidade de penetração do oxigénio e traçadores/contaminantes associados à perfuração. O plano de monitorização deverá integrar uma campanha de linha de base pré-operacional, monitorização durante as operações (sísmica e perfuração) e avaliação da recuperação pós-operação.

Em conclusão, a informação de referência disponível sustenta que as intervenções do projeto são ambientalmente viáveis, desde que a implementação: (1) priorize as comunidades C1 e C2 como indicadores bentónicos de elevado risco; (2) assegure uma gestão rigorosa dos resíduos de perfuração e da deposição de sedimentos finos; (3) integre um planeamento sazonal que reduza a exposição durante períodos biológicos críticos; e (4) estabeleça um programa de monitorização capaz de detectar alterações estruturais e funcionais nas comunidades bentónicas e de acionar medidas corretivas sempre que necessário.

O presente Plano Ambiental Prévio (PEP) não substitui nem antecipa a necessidade de uma futura Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), caso tal procedimento venha a ser exigido pela legislação aplicável. Os resultados apresentados são produzidos no âmbito de um projeto de I&D (PilotSTRATEGY), podendo, contudo, constituir um suporte para efeitos de âmbito ambiental e tomada de decisão regulamentar em fase precoce, no que respeita à fase de prospeção.

4.10 Referências

Adão, H. (2022). Metazoan meiofauna: Benthic assemblages for sustainable marine and estuarine ecosystems. In W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia, & T. Wall (Eds.), *Life below water*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98536-7_41

Affatati, A., & Camerlenghi, A. (2023). Effects of marine seismic surveys on free-ranging fauna: A systematic literature review. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1222523. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1222523>

Bencatel, J., Sabino-Marques, H., Álvares, F., Moura, A.E. & Barbosa, A.M. (eds.) (2019). *Atlas de Mamíferos de Portugal*, 2ª edição. Universidade de Évora, Portugal. 271 pp.

Birch, A., Cox, K. D., Murchy, K. A., Emry, S., & Harley, C. D. G. (2025). Shipping noise tolerance in invertebrates: A case study of the shore crab *Hemigrapsus oregonensis*. *PLOS ONE*, 20(8), e0329098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329098>

Bonaglia, S., Hedberg, J., Marzocchi, U., Iburg, S., Glud, R. N., & Nascimento, F. J. A. (2020). Meiofauna improve oxygenation and accelerate sulfide removal in the seasonally hypoxic seabed. *Marine Environmental Research*, 159, 104968. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104968>

Brotas, V., Brewin, R. J. W., Sá, C., Brito, A. C., Silva, T., Mendes, C. R., ... Groom, S. B. (2019). Deriving phytoplankton size classes from satellite ocean colour data in the Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 6, 44. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00044>

Cabral, M.J. (coord.), Almeida, J., Almeida, P.R., Dellinger, T., Ferrand de Almeida, N., Oliveira, M.E., Palmeirim, J.M., Queiroz, A.I., Rogado, L., Santos-Reis, M. (eds.) (2005). *Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal*. Instituto da Conservação da Natureza. Lisboa.

Carroll, A. G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., & Bruce, B. (2017). A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.038>

Charrier, B. R., Ingels, J., Danielson, S. L., & Mincks, S. L. (2023). Infaunal community structure, diversity, and function in Pacific–Arctic shelf sediments: A comparison of meiofaunal- and macrofaunal-sized nematodes. *Marine Ecology Progress Series*, 720, 95–116. <https://doi.org/10.3354/meps14397>

Chen, Z., Cameron, T. C., Couce, E., Garcia, C., Hicks, N., Thomas, G. E., Thompson, M. S. A., Whitby, C., & O’Gorman, E. J. (2024). Oil and gas platforms degrade benthic invertebrate diversity and food web structure. *Science of the Total Environment*, 929, 172536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172536>

Coolen, J. W. P., Vanaverbeke, J., Dannheim, J., Garcia, C., Birchenough, S. N. R., Krone, R., & Beermann, J. (2022). Generalized changes of benthic communities after construction of wind farms in the southern North Sea. *Journal of Environmental Management*, 315, 115173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115173>

Cruz, J., Mendes, C. R., Sá, C., Brito, A. C., & Brotas, V. (2022). Variabilidade espacial e temporal da clorofila-a na costa portuguesa. In: *Resumo Alargado – Jornadas de Oceanografia*. IPMA, Lisboa.

Cunha, M.E. (1993a). Seasonal variation of the zooplankton biomass in relation to the hydrographic conditions of the Portuguese coast. *ICES, CM*. 1993/L:62.

Cunha, M.E. (1993b). Spatial variation of the zooplankton biomass in relation to the hydrographic conditions of the Portuguese coast. *ICES, CM*. 1993/L:63.

Currie, D. R., & Isaacs, L. R. (2005). Impact of exploratory offshore drilling on benthic communities in the Minerva gas field, Port Campbell, Australia. *Marine Environmental Research*, 59(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2004.05.001>

Day, R. D., McCauley, R. D., Fitzgibbon, Q. P., Hartmann, K., & Semmens, J. M. (2017). Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(40), E8537–E8546. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700564114>

Degraer, S., Carey, D. A., Coolen, J. W. P., Hutchison, Z. L., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, 33(4), 48–57. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>

Dias, J. M. A., & Nittrouer, C. A. (1984). Continental shelf sediments of northern Portugal. *Continental Shelf Research*, 3, 147–165. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(84\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0278-4343(84)90004-9)

Direção-Geral de Recursos Naturais, S. e. (2024). Plano de Situação do Ordenamento do Espaço Marítimo Nacional. Ordenamento do Mar Português (PSOEM), Accessible at https://www.uc.pt/site/assets/files/440050/resultados_artfish.pdf

Elliott, B., Read, A. J., Godley, B. J., Nelms, S. E., & Nowacek, D. P. (2019). Critical information gaps remain in understanding impacts of industrial seismic surveys on marine vertebrates. *Endangered Species Research*, 39, 247–254. <https://doi.org/10.3354/esr00968>

Ellis, J. I., Fraser, G., & Russell, J. (2012). Discharged drilling waste from oil and gas platforms and its effects on benthic communities. *Marine Ecology Progress Series*, 456, 285–302. <https://doi.org/10.3354/meps09622>

European Union-Copernicus Marine Service (EU-CMEMS). (2022). North Atlantic Ocean colour plankton, reflectance, transparency and optics MY L3 daily observations. EUCMEMS. doi:10.48670/MOI-00286

Favareto, L., Mendes, C. R., Sá, C., Brito, A. C., Silva, T., & Brotas, V. (2023). Response of phytoplankton to coastal upwelling: The importance of temporal and spatial scales. *Limnology and Oceanography*, 68(4), 1458–1475. <https://doi.org/10.1002/lno.12345>

Ferreira, A., Sá, C., Brito, A. C., Silva, T., Mendes, C. R., & Brotas, V. (2021). Phytoplankton bloom phenology along the Western Iberian Coast. *Remote Sensing*, 13, 675. <https://doi.org/10.3390/rs13040675>

Fields, D. M., Handegard, N. O., Dalen, J., Eichner, C., Malde, K., Karlsen, Ø., Skiftesvik, A. B., Durif, C. M. F., & Browman, H. I. (2019). Airgun blasts used in marine seismic surveys have limited effects on mortality, and no sublethal effects on behaviour or gene expression, in the copepod *Calanus finmarchicus*. *ICES Journal of Marine Science*, 76(7), 2033–2044. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz126>

Gallucci, F., Fonseca, G., Vieira, D. C., Yaginuma, L. E., Gheller, P. F., Brito, S., & Corbisier, T. N. (2023). Predicting large-scale spatial patterns of marine meiofauna: Implications for environmental monitoring. *Ocean and Coastal Research*, 71. <https://doi.org/10.1590/2675-2824071.22070fg>

Gallucci, F., Moens, T., Vanreusel, A., & Fonseca, G. (2008). Active colonisation of disturbed sediments by deep-sea nematodes: Evidence for the patch mosaic model. *Marine Ecology Progress Series*, 367, 173–183. <https://doi.org/10.3354/meps07537>

Gasparatos, A., Doll, C. N. H., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a green economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 161–184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>

Guerreiro, M., Martinho, F., Pardarl, M. (2021). A pesca local com redes de tresmalho

Harris, P. T. (2014). Shelf and deep-sea sedimentary environments and physical benthic disturbance regimes: A review and synthesis. *Marine Geology*, 353, 169–184. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.023>

Hiscock, K., Langmead, O., & Warwick, R. (2004). Identification of seabed indicator species from time-series and other studies to support implementation of the EU Habitats and Water Framework Directives (Report to the Joint Nature Conservation Committee and the Environment Agency; JNCC Contract F90-01-705). Marine Biological Association.

Hynes, H. B. N., Nguyen, K., Geoffroy, M., Martin, B., & Morris, C. J. (2025). Subtle shift in depth distribution of fish within the impact range of seismic surveying along a continental slope. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2025-0027>

INE. (2022). Recenseamento da população e habitação - Censos 2021. Obtido de INE: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_qa_populacao

INE. (2024). Estatísticas de Pesca 2023. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/yw5nps5d>

INE. (2024). Estatísticas do Turismo 2023. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/yd8km9tk>

INE. (2025). Estatísticas da Pesca 2024. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/498dz65e>

INE. (2025). Estatísticas do Turismo 2024. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/339ecjxw>

IPMA, 2025. Dados IPMA - campanhas demersais em zona offshore da Figueira da Foz. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. 8 pp.

Jokanovic, S., Kajan, K., Perovic, S., Ivani, M., Maci, V., & Orlic, S. (2021). Anthropogenic influence on the environmental health along Montenegro coast based on the bacterial and chemical characterisation. *Environmental Pollution*, 271, 116383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116383>

Jones, D. O. B., Simon-Lledó, E., Amon, D. J., Bett, B. J., Caille, C., Clément, L., & Wiklund, H. (2021). Environment, ecology, and potential effectiveness of an area protected from deep-sea mining (Clarion Clipperton Zone, abyssal Pacific). *Progress in Oceanography*, 197, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102653>

Kennedy, A. D., & Jacoby, C. A. (1999). Biological indicators of marine environmental health: Meiofauna – A neglected benthic component? *Environmental Monitoring and Assessment*, 54, 47–68. <https://doi.org/10.1023/A:1005854731889>

Kristensen, E., Penha-Lopes, G., Delefosse, M., Valdemarsen, T., Quintana, C. O., & Banta, G. T. (2012). What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences. *Marine Ecology Progress Series*, 446, 285–302. <https://doi.org/10.3354/meps09506>

Lastras, R.G. Arzola, D.G. Masson, R.B. Wynn, V.A.I. Huvenne, V. Hühnerbach, M. Canals (2009). Geomorphology and sedimentary features in the Central Portuguese submarine canyons, Western Iberian margin. *Geomorphology*, Volume 103, Issue 3, Pages 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.06.013>.

Li, C., Coolen, J. W. P., Scherer, L., Mogollón, J. M., Braeckman, U., Vanaverbeke, J., Tukker, A., & Steubing, B. (2023). Offshore wind energy and marine biodiversity in the North Sea: Life cycle impact assessment for benthic communities. *Environmental Science & Technology*, 57(16), 6455–6464. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07797>

MAMAOT. (2012). Estratégia Marinha Para a Subdivisão do Continente. Diretiva Quadro Estratégia Marinha. 906 pp.

Mamede, R., Sampaio, L., Ricardo, F., Magalhães, L., Lopes, M., Martins, R., Rodrigues, A. M., Freitas, R., & Quintino, V. (2022). Mapping the macrofauna communities of Portugal's continental shelf north of Nazaré Canyon using Community Distribution Modelling (CDM). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 270, 107849. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107849>

Martins, R., Azevedo, M., Mamede, R., Sousa, B., Freitas, R., Rocha, F., Quintino, V., & Rodrigues, A. (2012). Sedimentary and geochemical characterisation and provenance of the Portuguese continental shelf soft-bottom sediments. *Journal of Marine Systems*, 91, 41–52.

Martins, R., Quintino, V., & Rodrigues, A. M. (2013). Diversity and spatial distribution patterns of the soft-bottom macrofauna communities on the Portuguese continental shelf. *Journal of Sea Research*, 83, 173-186. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.03.001>

Martins, R., Sampaio, L., Quintino, V., & Rodrigues, A. (2014). Diversity, distribution and ecology of benthic molluscan communities on the Portuguese continental shelf. *Journal of Sea Research*, 93, 75–89.

McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R., & Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution*, 1(7), 0195. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0195>

McMahon, R., Taveras, Z., Neubert, P. L., & Harvey, H. R. (2021). Organic biomarkers and meiofauna diversity reflect distinct carbon sources to sediments transecting the Mackenzie continental shelf. *Continental Shelf Research*, 220, 104406. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104406>

Min, W. G., et al. (2023). Bathymetric trends of the deep-sea meiobenthos distributed on the continental slope of the Ulleung Basin and its adjacent area. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 200, 104136. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104136>

Moita, M. T. (2001). Estrutura, dinâmica e ecologia do fitoplâncton na costa portuguesa. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.

Morgado, F., Vieira, L.R., Ré, P., Soares, A.M.V.M. (2014). Atlas do Zooplâncton Marinho e Estuarino da Costa Atlântica. Departamento de Biologia, Universidade de Aveiro, Series Biologicando. Edições Afrontamento. ISBN 978-972-36-1376-6.

Murchy, K. A., Davies, H. L., Shafer, H., Cox, K., Nikolich, K., & Juanes, F. (2019). Impacts of noise on the behavior and physiology of marine invertebrates: A meta-analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 146(4), 040002. <https://doi.org/10.1121/2.0001217>

NASA/JPL. 2015. GHRST level 4 MUR global Foundation Sea surface temperature analysis (v4.1). NASA/JPL. doi:10.5067/GHGMR-4FJ04

Paine, M. D., DeBlois, E. M., Kilgour, B. W., Tracy, E., Pocklington, P., Crowley, R. D., Williams, U. P., & Janes, G. G. (2014). Effects of the Terra Nova offshore oil development on benthic macro-invertebrates over 10 years of development drilling on the Grand Banks of Newfoundland, Canada. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 110, 38–64. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.10.015>

Panieri, G., Argentino, C., Ramalho, P. S., Vulcano, F., Savini, A., Fallati, L., Brekke, T., Galimberti, G., Riva, F., Balsa, J., Eilertsen, H. M., Stokke, R., Steen, H. I., Sahy, D., Kalenitchenko, D., Büenz, S., Mattingsdal, R., & (2023). An Arctic natural oil seep investigated from space to the seafloor. *Science of the Total Environment*, 907, 167788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167788>

Pardal, M., Azeiteiro, U.M. (2001). Zooplankton biomass, abundance and diversity in a shelf area of Portugal (the Berlenga Marine Natural Reserve). *Arquipélago. Life and Marine Sciences* 18A: 25-33. Ponta Delgada. ISSN 0873-4704.

Patrício, J., Adão, H., Neto, J. M., Alves, A. S., Traunspurger, W., & Marques, J. C. (2012). Do nematode and macrofauna assemblages provide similar ecological assessment information? *Ecological Indicators*, 14, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.027>

Pérez-Espinoza, S. A., Rivera-Vera, L. A., Neira, J. Y., Arumí, J. L., & Barra, R. O. (2025). Burrowing crayfish (Crustacea: Decapoda: Parastacidae) as a tool for biomonitoring groundwater quality in South America. *Environmental Reviews*, 33, 1–20. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0057>

Pombo, J., Rodrigues, A., da Silva, P.F. (2025). Offshore Site Investigation of Sandy Sediments for Anchoring and Foundation Design of Renewable Energy Applications—NW Center of Portugal. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13, 1521. <https://doi.org/10.3390/jmse13081521>

Portaria n.º 96/2016, de 19 de abril. Diário da República n.º 76/2016, Série I de 2016-04-19, páginas 1342 – 1343.

Porto da Figueira da Foz. (12 de September de 2025). Porto da Figueira da Foz está na maior feira de cruzeiros da Europa. Obtido de Porto da Figueira da Foz: <https://portofigueiradafoz.pt/noticia/pt/422/>

Porto da Figueira da Foz. (28 de July de 2025). Arrancou a ampliação do Cais Comercial do Porto da Figueira da Foz: “uma obra que vai ficar para o futuro”. Obtido de Porto da Figueira da Foz: <https://portofigueiradafoz.pt/noticia/pt/418/>

Przeslawski, R., Brooke, B., Carroll, A. G., & Fellows, M. (2018). An integrated approach to assessing marine seismic impacts: Lessons learnt from the Gippsland Marine Environmental Monitoring (GMEM) project. *Ocean & Coastal Management*, 160, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.011>

Referencias dos bentonicos

Reuscher, M. G., Baguley, J. G., & Montagna, P. A. (2020). The expanded footprint of the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico deep-sea benthos. *PLOS ONE*, 15(6), e0235167. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235167>

Reynier, M. V., Tâmega, F. T. S., Daflon, S. D. A., Santos, M. A. B., Coutinho, R., & Figueiredo, M. A. O. (2015). Long- and short-term effects of smothering and burial by drill cuttings on calcareous algae in a static-renewal test. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(7), 1572–1577. <https://doi.org/10.1002/etc.2938>

Ridall, A., & Ingels, J. (2021). Suitability of free-living marine nematodes as bioindicators: Status and future considerations. *Frontiers in Marine Science*, 8, 685327. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.685327>

Ritter, C. J., & Bourne, D. G. (2024). Marine amphipods as integral members of global ocean ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 572, 151985. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2023.151985>

Schratzberger, M., & Ingels, J. (2018). Meiofauna matters: The roles of meiofauna in benthic ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 502, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.007>

Schratzberger, M., & Somerfield, P. J. (2020). Effects of widespread human disturbances in the marine environment suggest a new agenda for meiofauna research is needed. *Science of the Total Environment*, 728, 138435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138435>

Semprucci, F., & Balsamo, M. (2014). Free-living marine nematodes as bioindicators: Past, present and future perspectives. *Trends in Environmental Science*, 17–36.

Sroczyńska, K., Chainho, P., Vieira, S., & Adão, H. (2021). What makes a better indicator? Taxonomic vs functional response of nematodes to estuarine gradient. *Ecological Indicators*, 121, 107113. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107113>

Tillin, H. M. (2016). [*Echinocyamus pusillus*], [*Ophelia borealis*] and [*Abra prismatica*] in circalittoral fine sand. In H. Tyler-Walters & K. Hiscock (Eds.), *Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Reviews* [Online]. Marine Biological Association of the United Kingdom. <https://doi.org/10.17031/marlinhab.1131.1>

Vafeiadou, A. M., Materatski, P., Adão, H., Troch, M., & Moens, T. (2013). Food sources of macrobenthos in an estuarine seagrass habitat (*Zostera noltii*) as revealed by dual stable isotope signatures. *Marine Biology*, 160, 2517–2523.

Vanaverbeke, J., Merckx, B., Degraer, S., & Vincx, M. (2011). Sediment-related distribution patterns of nematodes and macrofauna: Two sides of the benthic coin? *Marine Environmental Research*, 71, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.09.006>

Vanreusel, A., Fonseca, G., Danovaro, R., da Silva, M. C., Esteves, A. M., Ferrero, T., Gad, G., Galtsova, V., Gambi, M. C., Fonseca-Genevois, V. G., et al. (2010). The contribution of deep-sea macrohabitat heterogeneity to global nematode diversity. *Marine Ecology*, 31, 6–20.

Veillard, D., Beauclercq, S., Palacios, E., Genard, B., Chauvaud, L., Olivier, F., Marcotte, I., & Tremblay, R. (2025). Metabolomic responses to shipping noise in early life stages of blue mussels, *Mytilus edulis*. *Journal of Experimental Biology*, 228(15). <https://doi.org/10.1242/jeb.250386>

Vieira, S., Adão, H., & Vicente, C. S. L. (2025a). Assessing spatial and temporal patterns of benthic bacterial communities in response to different sediment conditions. *Marine Environmental Research*, 204, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.106963>

Vieira, S., Pessoa, I., Ferreira, B., Vicente, C. S. L., & Adão, H. (2025b). Spatial and temporal distribution patterns of the estuarine nematode assemblages and their relationship with benthic bacteria communities. *Estuaries and Coasts*, 48, 144. <https://doi.org/10.1007/s12237-025-01578-1>

Vieira, S., Sroczyńska, K., Neves, J., Martins, M., Costa, M., Adão, H., & Vicente, C. (2023). Distribution patterns of benthic bacteria and nematode communities in estuarine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 108448. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108448>

Vingada, J.V., Eira, C. (2018). *Conservação de Cetáceos e Aves Marinhas em Portugal Continental. O projeto LIFE+ MarPro. LIFE+ MarPro, Aveiro. 258 pp.*

Wang, L., Wang, B., Cen, W., Xu, R., Huang, Y., Zhang, X., Han, Y., & Zhang, Y. (2023). Ecological impacts of the expansion of offshore wind farms on trophic level species of marine food chain. *Journal of Environmental Sciences*, 139, 226–244. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.05.002>

Wang, W., Tao, J., Liu, H., Li, P., Chen, S., Wang, P., & Zhang, C. (2020). Contrasting bacterial and archaeal distributions reflecting different geochemical processes in a sediment core from the Pearl River Estuary. *AMB Express*, 10, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-0950-y>

Williams, R., Cox, K. D., Amon, D., Ashe, E., Chapuis, L., Erbe, C., de Vos, A., Nielsen, K. A., Collins, M. S., Smith, C., Washburn, T., Young, K. F., & Clark, C. W. (2025). Noise from deep-sea mining in the Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean will impact a broad range of marine taxa. *Marine Pollution Bulletin*, 218, 118135. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118135>

Zeppilli, D., Leduc, D., Fontanier, C., Fontaneto, D., Fuchs, S., Gooday, A. J., Goineau, A., et al. (2018). Characteristics of meiofauna in extreme marine ecosystems: A review. *Marine Biodiversity*. <https://doi.org/10.1007/s12526-017-0815-z>

Zimmermann, J., Wentrup, C., Sadowski, M., Blazejak, A., Gruber-Vodicka, H. R., Kleiner, M., Ott, J. A., Cronholm, B., De Wit, P., Erséus, C., & Dubilier, N. (2016). Closely coupled evolutionary history of ecto- and endosymbionts from two distantly related animal phyla. *Molecular Ecology*, 25, 3203–3223. <https://doi.org/10.1111/mec.13554>

<https://www.atlasavesmarinhas.pt/>

<https://www.iucnredlist.org>

5 Ebro Bassin (Spain)

Estudio preliminar para la Evaluación de Impacto Ambiental para la solicitud del permiso de investigación y construcción de un piloto de acuerdo con el proyecto Lopin en Campo de Belchite, Aragón.

Author: Canteli, P.; Mediato, JF.; Garcia-Crespo, J.; Moreno, I. (IGME-CSIC)

5.1 Resumen ejecutivo

Este documento presenta una evaluación preliminar del posible desarrollo de un piloto de almacenamiento geológico de CO₂ en la estructura Lopín, situada en el Campo de Belchite, dentro de la Cuenca del Ebro, en Aragón. El documento tiene carácter técnico y exploratorio: reúne información geológica, ambiental, normativa y socioeconómica disponible para valorar la viabilidad inicial del emplazamiento y orientar fases posteriores de estudio, sin constituir un Estudio de Impacto Ambiental formal para su tramitación administrativa.

La actuación se enmarca en el proyecto europeo PilotSTRATEGY, financiado por Horizon 2020, cuyo objetivo es mejorar el conocimiento de acuíferos salinos profundos como posibles almacenes seguros de CO₂ en el sur y este de Europa. En el contexto español, Lopín se propone como caso de estudio para evaluar una formación triásica profunda, previamente identificada en trabajos del IGME y del Plan ALgeCO₂, y situada en una región con potencial geológico, baja densidad de población y experiencia histórica vinculada a actividades subterráneas.

El proyecto previsto se plantea de forma escalonada. En una primera fase se desarrollaría la exploración geológica y geofísica, incluyendo campañas sísmicas, revisión del modelo geológico y perforación de un pozo exploratorio. Si los resultados fueran favorables, se avanzaría hacia una fase piloto o precomercial, con perforación y completación de un pozo inyector e inyección controlada de hasta 100 kt de CO₂ durante aproximadamente tres años. Esta fase permitiría comprobar la respuesta del reservorio, la eficacia del sistema de sellado y las técnicas de monitorización necesarias antes de valorar un eventual desarrollo comercial.

Desde el punto de vista geológico, el reservorio principal corresponde a la unidad Buntsandstein B1, una formación arenosa triásica situada en torno a 1.700–1.760 m de profundidad, adecuada para el almacenamiento de CO₂ en condiciones densas o supercríticas. El sistema de confinamiento presenta una arquitectura multibarrera, formada por sellos primarios asociados a facies Röt y Buntsandstein B2, un sello local vinculado al Muschelkalk M2 y un sello regional constituido por las facies Keuper. La estructura muestra una geometría potencialmente favorable, aunque persisten incertidumbres sobre la conectividad lateral del reservorio, la continuidad de las unidades profundas, el comportamiento de fallas y la presión admisible durante la inyección.

La zona de estudio se localiza entre las provincias de Zaragoza y Teruel, en un entorno rural y semiárido caracterizado por relieves suaves, predominio de cultivos de secano, baja densidad de población y presencia de valores ambientales vinculados a hábitats esteparios. Aunque el emplazamiento no se sitúa dentro de espacios protegidos, en su entorno se encuentran áreas relevantes de la Red Natura 2000 y espacios de interés para aves esteparias, como El Planerón y La Lomaza de Belchite. También destaca el Conjunto Histórico de Belchite, situado fuera de la zona de afección directa prevista. No se prevén nuevas vías de acceso significativas, dado que el área cuenta con accesibilidad suficiente desde la red viaria existente.

Desde el punto de vista hidrogeológico, no se ha identificado conexión entre el acuífero salino profundo del Buntsandstein y los acuíferos superficiales con posible uso local. Las formaciones

cenozoicas presentan, en general, permeabilidad baja a media, mientras que los acuíferos cuaternarios se asocian principalmente a los sistemas fluviales. En materia sísmica, la zona muestra una sismicidad natural muy baja; no obstante, los estudios de PilotSTRATEGY recomiendan mantener una red sísmica local durante las fases de actividad para caracterizar adecuadamente la sismicidad de fondo, diferenciar eventos tectónicos de explosiones de cantera y apoyar la vigilancia del almacenamiento.

Los impactos ambientales previsibles se concentran principalmente en las fases de exploración, construcción y operación piloto. Entre ellos destacan la ocupación y compactación temporal del suelo, la retirada de cubierta vegetal agrícola, el tránsito de maquinaria, la generación de polvo, ruido y contaminación lumínica, el riesgo de vertidos accidentales, las molestias a la fauna, la posible alteración de hábitats esteparios y el impacto paisajístico temporal. No se prevén afecciones significativas sobre cauces permanentes, zonas inundables, patrimonio geológico, yacimientos arqueológicos conocidos, vías pecuarias, montes de utilidad pública o espacios Red Natura 2000, siempre que se apliquen las medidas preventivas y de seguimiento previstas.

Las medidas propuestas incluyen la limitación de la ocupación temporal, el uso preferente de accesos existentes, la restauración de suelos y superficies afectadas, la gestión adecuada de residuos y efluentes, la prevención y respuesta ante derrames, el control de polvo y ruido, la reducción de la contaminación lumínica, la protección de drenajes naturales y la revegetación con especies autóctonas. En relación con la fauna, se consideran esenciales las prospecciones previas, la restricción de obras durante el periodo de nidificación de aves sensibles, la limitación de velocidad, la minimización del tránsito fuera de caminos y la coordinación de posibles medidas compensatorias con la administración ambiental competente.

En conjunto, la estructura Lopín presenta interés como emplazamiento piloto para evaluar el almacenamiento geológico de CO₂ en la Cuenca del Ebro. La información disponible sugiere que los impactos ambientales serían, con carácter preliminar, compatibles o gestionables mediante una adecuada planificación, monitorización y aplicación de medidas preventivas, correctoras y compensatorias. No obstante, la continuidad del proyecto debe condicionarse a la obtención de nuevos datos geológicos y sísmicos, a la verificación del sistema almacén-sello, a una evaluación ambiental detallada, al cumplimiento del marco normativo aplicable y a una participación temprana y transparente de las administraciones, comunidades locales y demás partes interesadas.

5.2 Introducción

5.2.1 Objetivo y alcance del documento

Este documento constituye una propuesta preliminar de acuerdo con la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental aplicado al caso de una propuesta del permiso de exploración de una estructura como posible almacenamiento de CO₂ en el área del Campo de Belchite, estructura conocida como Lopín, en el marco del proyecto pilotSTRATEGY, incluida en el área denominada Cuenca del Ebro (Ebro Basin), en la Comunidad Autónoma de Aragón.

La información contenida en este documento ha sido obtenida de los estudios realizados en el marco de este proyecto y completada con información existente, pública y disponible sobre el medio físico y los recursos naturales.

Este documento no pretende ser un Estudio de Impacto Ambiental válido para su presentación a la administración competente sino una recopilación ordenada y preliminar de la documentación necesaria, que puede servir de primera aproximación para estudios posteriores. Por cuestiones prácticas, la información recogida en los documentos elaborados en el proyecto PilotSTRATEGY no se han incluido en este informe, en particular la descripción de las actividades y calendario, y estudio de alternativas (D4.9 Economic evaluation of alternatives and prioritization results, D4.5 From capture to the injection facilities definition, y D4.11 Description and results of the probabilistic assessment and sensitivity analysis of the development concept); propuesta de ubicación de pozo exploratorio y gestión del reservorio (D3.3. Report on optimization-injection strategy and storage capacity); y diseño del pozo exploratorio y medidas de control medioambiental antes y durante la actividad (D4.4 Injector well and injection facilities design: methodology, definition and recommendations, y D4.6 Permit Dossier: Operations, logistics and well maintenance plans descriptions. Well permits road map, MMV plan and HSE, emergency response and well containment plans.).

5.2.2 Justificación del proyecto de almacenamiento geológico en el marco climático español

La descarbonización de sectores industriales de difícil abatimiento, como el siderúrgico, el cementero y el químico, requieren la adopción generalizada de tecnologías de Captura, Almacenamiento, Uso de Carbono (CAUC o CCUS en inglés). Estas industrias representan una proporción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa y, en particular, en España alcanzando del orden de un 30% del total de las emisiones de CO₂ de la industria. Sin la implementación de estas tecnologías CAUC es improbable que se puedan alcanzar los objetivos climáticos establecidos en el Pacto Verde Europeo y en el Plan Nacional de Energía y Clima español (PNIEC, 2023-2030).

La UE ha desarrollado un sólido marco regulatorio y en políticas destinadas al despliegue de tecnologías CAUC. La Directiva 2009/31/CE1 garantiza un almacenamiento geológico de CO₂ seguro y eficaz, reforzada en julio de 2024 con la revisión de cuatro documentos de orientación: *Marco de Gestión del Ciclo de Vida y Riesgos del Almacenamiento de CO₂*; *Caracterización del Complejo de Almacenamiento*, *Composición del Flujo de CO₂*, *Monitoreo y Medidas Correctivas*; *Criterios para la Transferencia de Responsabilidad a la Autoridad Competente*, y *Seguridad Financiera y Contribución Financiera*. A este soporte jurídico se añade un fuerte empuje financiero —a través del Fondo de Innovación, el Connecting Europe Facility y LIFE 2025— así como el respaldo del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia en muchos Estados miembros.

En mayo de 2025, la Comisión Europea adoptó un Reglamento Delegado y una Decisión bajo el *Reglamento (UE) 2024/1735 de 13 de junio de 2024 por el que se establece un marco de medidas para reforzar el ecosistema europeo de fabricación de tecnologías de cero emisiones netas*, denominada Ley de Industria de Cero Emisiones Netas (Net-Zero Industry Act, NZIA, por sus siglas en inglés) de en el que ante la necesidad de Europa de eliminar estas emisiones manteniendo una industria independiente, sostenible y competitiva, establece para 2030 un objetivo de inyección anual de 50 millones de toneladas de CO₂ al año en emplazamientos de almacenamiento geológicos autorizados, y estima que se necesitarán alcanzar del orden de 460 millones de toneladas de CO₂ al año en 2050.

En este contexto se desarrolla el proyecto europeo PilotSTRATEGY, que recibe fondos del programa de investigación e innovación europeo Horizon 2020 con el número 101022664.

5.2.3 Proyecto PilotSTRATEGY

El proyecto pilotSTRATEGY es un proyecto internacional de investigación, de 5 años de duración, que tiene como objetivo la caracterización en detalle de acuíferos salinos profundos (Deep Saline Aquifers: DSA) para el almacenamiento geológico de CO₂ con el fin de apoyar el desarrollo de las tecnologías de captura y el almacenamiento de CO₂ (CAC), una tecnología fundamental en la transición a cero emisiones. Basándose en los resultados de proyectos anteriores financiados por la UE, especialmente STRATEGY CCUS, PilotSTRATEGY realizará estudios detallados en tres regiones prometedoras de Francia, Portugal y España, y mejorará el conocimiento de las opciones de almacenamiento de CO₂ en Grecia y Polonia.

El proyecto tiene 3 objetivos fundamentales: mejorar el conocimiento de los acuíferos salinos profundos como posible almacén de CO₂; apoyo a futuros proyectos piloto para que sean seguros y eficaces; y la integración de la sociedad a través de ciudadanos y otros agentes implicados, en el conocimiento de este tipo de proyectos. Y un objetivo último: ayudar al desarrollo seguro de almacenes de CO₂ en el sur y el este de Europa, donde el grado de madurez de estas tecnologías -frente al norte de Europa- es mucho menor, a pesar del gran potencial geológico.

La región española de estudio, denominada Cuenca del Ebro (Ebro Basin) se ubica en el noreste de España, en la Comunidad Autónoma de Aragón y, en particular, en la zona denominada Campo de Belchite, a unos 50 km al sureste de Zaragoza. La estructura geológica propuesta para el estudio, Lopín, fue estudiada inicialmente en el marco del Proyecto "Plan para la selección y caracterización de áreas y estructuras favorables para el almacenamiento geológico de CO₂ en España" (ID 64055, 2009-2011) dentro del Plan para el almacenamiento geológico de CO₂ del IGME "Plan ALgeCO₂", con el apoyo del Instituto para la Reestructuración de la Minería del Carbón y el desarrollo alternativo de los distritos mineros (IRMC).

5.2.4 Marco legislativo

La Ley 40/2010 de almacenamiento geológico de CO₂ es el resultado de la trasposición de la Directiva europea adaptándola a la realidad industrial, geológica y energética de nuestro país, y estableciendo una base jurídica para el almacenamiento geológico de dióxido de carbono, en condiciones seguras para el medioambiente, para contribuir a la lucha contra el cambio climático. Tal como se indica en la Ley, queda pendiente la regulación normativa que desarrolle su aplicación (aún pendiente) e indica que, en ausencia de esta, se aplicará el reglamento de la Ley de Minas.

Debe señalarse que para fines de investigación en los que el volumen de CO₂ total inyectado no superen las 100.000 toneladas, los permisos y procedimientos vienen regulados por la Ley 22/1973 de Minas, en las que sí existe desarrollo reglamentario. Como ejemplo, la solicitud de permisos de investigación y de almacenamiento solicitados en 2018 para el almacén piloto Hontomín, en la provincia de Burgos, se realizó de acuerdo con dicha reglamentación.

La Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental es de carácter nacional, ya que se entiende que la eficacia de la evaluación ambiental exige establecer un procedimiento que sea común en todo el territorio

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

nacional, sin perjuicio de la facultad constitucional de que las comunidades autónomas disponen para establecer normas adicionales de protección. En este sentido, la evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente, facilitando criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Y a través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación.

De acuerdo con el Gobierno Regional de Aragón, la evaluación ambiental Incluye el conjunto de estudios, informes técnicos y consultas que permiten estimar las consecuencias que un determinado proyecto, instalación o actividad causa sobre el medio ambiente. De esta forma, se puede formar un juicio objetivo a los solos efectos ambientales a partir del cual aprobar o rechazar un proyecto. En este contexto, se entiende por *proyecto* cualquier actuación que pretenda realizarse y que consista en la futura ejecución o explotación de una obra, una construcción, o instalación, así como el desmantelamiento o demolición o cualquier intervención en el medio natural o en el paisaje, incluidas las destinadas a la utilización de los recursos naturales o del suelo y del subsuelo; y se considera *plan o programa* el conjunto de estrategias, directrices y propuestas para satisfacer necesidades sociales, no ejecutables directamente, sino a través de su desarrollo por medio de uno o varios proyectos. La evaluación ambiental incluye tanto la evaluación ambiental estratégica de planes y programas como la evaluación de impacto ambiental de proyectos, instalaciones y actividades.

En Aragón, la Evaluación de Impacto Ambiental viene regulada por la Ley 11/2014, de 4 de diciembre, de Prevención y Protección Ambiental de Aragón (BOA número 241, de 10/12/2014). Esta Ley 11/2014 regula el régimen general de evaluación ambiental de planes, programas y proyectos, en coherencia con lo dispuesto en la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, así como el ámbito de aplicación y procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos. Según esta, corresponde al **Instituto Aragonés de Gestión Ambiental (INAGA)** la emisión de informes y la tramitación de los procedimientos de evaluación ambiental, y corresponde al órgano sustantivo, debido a la materia objeto del proyecto, plan o programa, el seguimiento, vigilancia y control del cumplimiento de las condiciones ambientales establecidas en el informe o declaración de impacto ambiental.

Los procedimientos de evaluación de impacto ambiental constituyen un trámite previo a la solicitud de los permisos para ejercer determinadas actividades. Dichos procedimientos pueden tramitarse de forma ordinaria o simplificada. La página web de INAGA permite conocer el procedimiento a seguir y la presentación de documentación, en la que debe incluirse (art. 27):

- a) Descripción general del proyecto y previsiones en el tiempo sobre la utilización del suelo y de otros recursos naturales. Estimación de los tipos y cantidades de residuos vertidos y de emisiones de materia o energía resultantes.
- b) Exposición de las principales alternativas estudiadas, incluida la alternativa cero, o de no realización del proyecto, así como una justificación de las principales razones de la solución adoptada, teniendo en cuenta los efectos ambientales.
- c) Evaluación y, si procede, cuantificación de los efectos previsibles directos o indirectos, acumulativos y sinérgicos del proyecto sobre la población, la salud humana, la flora, la fauna,

la biodiversidad, la geodiversidad, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el cambio climático, el paisaje, los bienes materiales, incluido el patrimonio cultural, y la interacción entre todos los factores mencionados, durante las fases de ejecución, explotación y, en su caso, durante la demolición o abandono del proyecto.

- d) Cuando el proyecto pueda afectar directa o indirectamente a los espacios protegidos Red Natura 2000, se incluirá un apartado específico para la evaluación de sus repercusiones en el lugar, teniendo en cuenta los objetivos de conservación del espacio.
- e) Medidas que permitan prevenir, corregir y, en su caso, compensar los efectos adversos sobre el medio ambiente.
- f) Programa de vigilancia ambiental.
- g) Resumen del estudio y conclusiones en términos fácilmente comprensibles.

Este documento tiene como objetivo dar una primera respuesta a estas cuestiones.

5.3 Descripción del proyecto

El proyecto propuesto consiste en el desarrollo de un piloto para el estudio y evaluación de la estructura de Lopín como almacén geológico comercial de CO₂. Corresponde a una fase exploratoria de acuerdo con la Ley 40/2010 de almacenamiento geológico de CO₂.

La estructura de Lopín se corresponde con un acuífero salino profundo de edad triásica situado al sur de la provincia de Zaragoza, en el noreste de España, una arenisca silíceas a unos 1.700 m de profundidad bajo un grueso sello rico en arcilla. Los datos geológicos existentes son de 1970-1980 y, aunque la geología regional es bien conocida, se necesitan nuevos datos para reducir las incertidumbres geológicas actuales.

El proyecto piloto propuesto incluiría:

- realización de una campaña sísmica 2D en la zona de estudio,
- confirmación de la localización de un pozo exploratorio,
- perforación de dicho pozo exploratorio con recuperación de testigos y diversos tests,
- revisión del modelo geológico y confirmación de la ubicación óptima de un pozo inyector
- perforación y completación del pozo inyector,
- inyección de un máximo de 100 kt de CO₂ durante aproximadamente 3 años.

La información obtenida de este piloto permitirá evaluar, en condiciones reales, la respuesta del yacimiento, la eficacia del sellado geológico y definir las técnicas de monitorización de CO₂.

La realización de cada una de estas actividades vendrá condicionada por el éxito de los datos obtenidos en la actividad anterior.

Con el objeto de realizar la toma de decisiones sobre el interés de esta estructura, en el proyecto pilotSTRATEGY se ha llevado a cabo la evaluación del ciclo completo de vida del almacén, es decir, esta fase exploratoria, incluyendo el desarrollo de este piloto, y suponiendo resultados

satisfactorios, el desarrollo y operación de dicho almacén hasta la fase de abandono, que tendría un rango estimado de capacidad entre 2 Mt y 35 Mt.

Basándose en el análisis del modelo geológico, la simulación dinámica y el análisis de riesgos, las tasas de inyección durante este periodo no suponen ningún riesgo teniendo en cuenta la presión inicial del almacén. Los modelos dinámicos actualizados confirman que el yacimiento puede soportar este volumen sin superar el gradiente de fractura ($\sim 0,17$ bar/m), la pluma de CO_2 se extiende hasta un en las proximidades del pozo, y a largo plazo, el CO_2 queda inmovilizado por disolución y atrapamiento residual. En consecuencia, los estudios iniciales indican que el depósito puede acomodar esta inyección piloto sin riesgos significativos.



Figura 5.1: Esquema de las instalaciones en caso de desarrollo comercial.

Este estudio va dirigido al estudio de la viabilidad geológica, ambiental y social del posible almacén. En ambos casos, piloto/precomercial y comercial, se asume la disponibilidad de CO_2 de una fuente industrial cercana; por lo tanto, los costes de captura y transporte no se incluyen en este análisis, y se asume que el CO_2 entregado cumple con las especificaciones adecuadas. Este enfoque aislado permite evaluar de forma realista la viabilidad técnica y económica del almacenamiento en Lopín, comparando alternativas de desarrollo.

5.3.1 Descripción de las etapas propuestas

5.3.1.1 Fase de inicial de exploración:

Suponiendo la obtención del permiso exploratorio solicitado en 2027, se incluyen en la fase de exploración un estudio G&G (geología y geofísica) incluyendo un estudio e interpretación sísmica 2D/3D, así como el diseño, perforación y pruebas en el pozo exploratorio. Se estima que la duración total de la fase de exploración oscila entre 4 y 6 años.

5.3.1.2 Fase piloto (precomercial o demostrativa):

Basado en los resultados de la fase exploratoria, se revisará la ubicación del pozo inyector del piloto, se perforará, completará y se iniciará la inyección controlada de 0,1 Mt de CO₂ (alrededor de 100.000 toneladas) durante 3 años a través de un solo pozo de inyección. El CO₂ será suministrado puro para estas pruebas. Se considera la posibilidad de iniciar la inyección con salmuera en lugar de CO₂ como prueba de inyectividad y a coste menor. En superficie, se instalará una estación móvil de bombeo y compresión para llevar el CO₂ a condiciones de inyección (fase supercrítica densa, típicamente 80–100 bar y 30 °C).

La fase piloto incluye 1 a 3 años iniciales de diseño, permisos y construcción (autorizaciones, ingeniería, perforación), seguidos de 3 años de operaciones de inyección y monitorización. Al finalizar la inyección de prueba, se analizarán los resultados técnicos y el rendimiento medioambiental, tomando la decisión de seguir adelante con un almacén comercial o abandonar el proyecto.

El diseño del pozo piloto contempla un pozo vertical completado de acuerdo a los estándares internacionales para inyección de CO₂. Se utilizarán aceros y cementos resistentes al CO₂ para aislar las capas permeables cruzadas, y se instalará un revestimiento de producción de 8 1/2" a lo largo del intervalo del yacimiento, asegurando la integridad frente a la corrosión.

Durante la inyección a baja tasa (alrededor de 30 kt/año de CO₂), se implementará una monitorización intensiva, con instrumentación avanzada desplegada (fibra óptica para monitorización de temperatura y sísmica, sensores de presión en el fondo del pozo, etc.).

5.4 Localización

La zona de estudio se ubica en el límite entre las provincias de Zaragoza y Teruel, en la Comunidad Autónoma de Aragón, ocupando un área de aproximadamente 80 km² en los municipios de Fuentes de Ebro, Quinto y Belchite. Considerando un radio de 20 km desde el centro de la zona como área de influencia, esta abarca 5 municipios de la provincia de Zaragoza (Belchite, Codo, Medina de Aragón, Fuentes de Ebro, y Quinto), y 3 de la provincia de Teruel (Azaila, Almochuel, y Vinaceite). Se encuentra a una distancia de las poblaciones más cercanas de 10 km a Fuentes de Ebro y Quinto, 12 km a Codo y 15 km a Belchite, y de las capitales de provincia, a 35 km de la ciudad de Zaragoza y 125 km de Teruel.

El área de interés queda recogida entre las siguientes coordenadas:

1. 41° 27' 77,55" N; 0° 40' 36.48" W
2. 41° 27' 77,55" N; 0° 33' 56.16" W
3. 41° 22' 41,72" N; 0° 33' 56.16" W
4. 41° 22' 41,72" N; 0° 40' 36.48" W



Figura 5.2: Localización de la zona de estudio

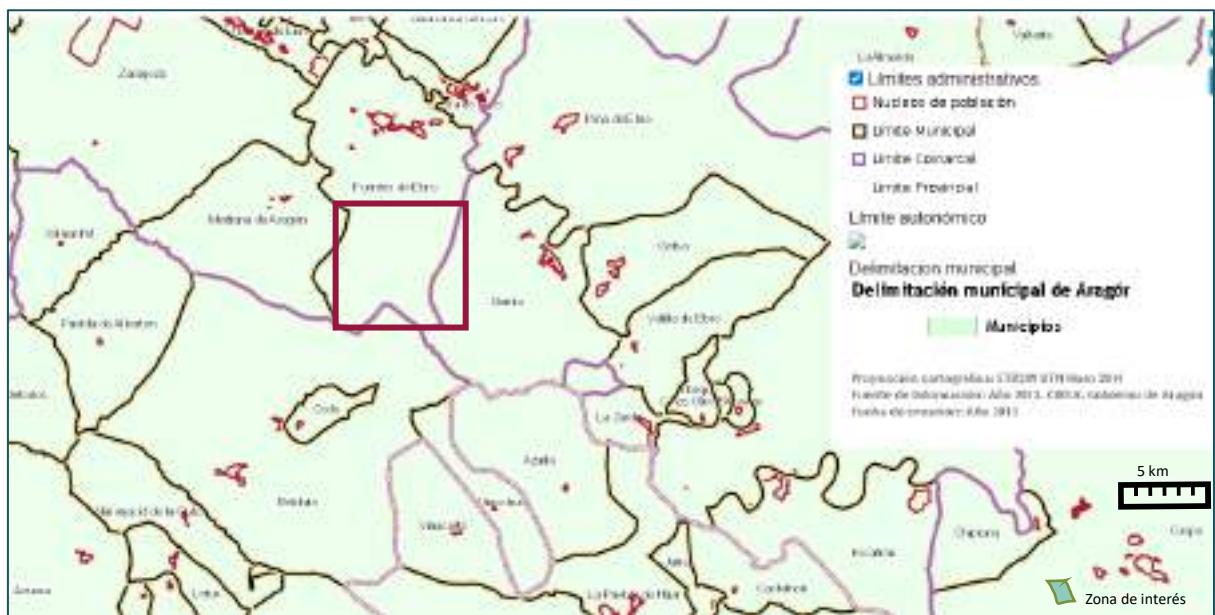


Figura 5.3: Area de interés para el proyecto en estudio

5.4.1 Accesibilidad

La zona de interés es fácilmente accesible por la carretera CV-306 que une Quinto y Belchite. Quinto, la mayor de las poblaciones, está bien comunicado hacia el norte (Zaragoza) y sur mediante la carretera nacional N-232 (eje importante del valle del Ebro), y las autonómicas A-221 y A-1105. El acceso a Belchite es posible mediante carretas autonómicas A-222 (norte y sur), A220 (este) o A-1307 (oeste).

Además, Quinto está conectado con la red ferroviaria nacional y dispone de estación propia. La estación (edificio) no se encuentra en uso, pero sí el servicio ferroviario, con varias conexiones diarias en la línea que une Zaragoza- Tarragona-Barcelona.

No se considera necesaria la apertura de nuevas vías de acceso para la realización del proyecto.

5.4.2 Infraestructuras de la zona

El área se encuentra en una zona no urbanizada, aunque existen infraestructuras básicas en las poblaciones cercanas de Quinto y Belchite: agua potable y saneamiento, electricidad y alumbrado público.

En la zona de influencia existen diversas instalaciones fotovoltaicas operativas (7 plantas fotovoltaicas (San Miguel A, B, C y D) y Valdompère (1, 2 y 3) al norte de la zona de estudio y otra al sur de Quinto), y parques eólicos, principalmente en el entorno de Belchite, lo que permite asegurar un punto de conexión.

De acuerdo con la base de datos del gobierno de Aragón, hay una solicitud en trámite de concesión minera incluida en la zona de interés que podría corresponder a un permiso de exploración de un piloto de Co2 de acuerdo con la ley de minas para inyecciones menores a 100.000 toneladas.

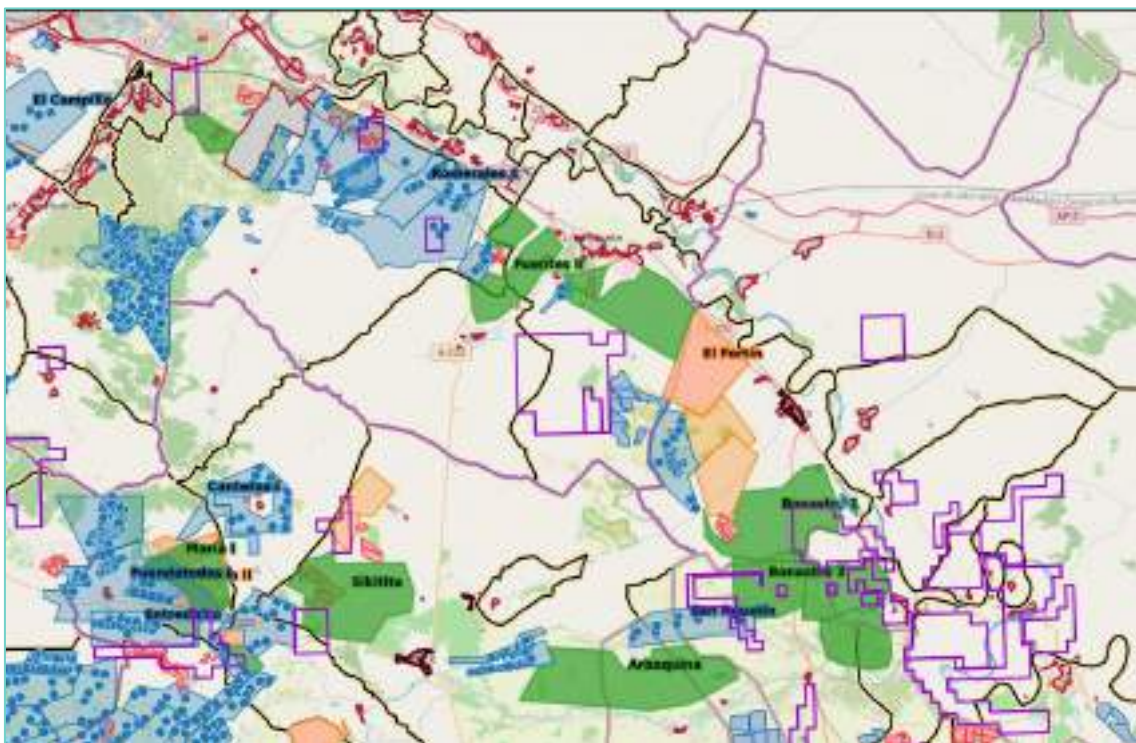


Figura 5.4: Parques eólicos en funcionamiento (área azul con puntos en su interior), y en trámite (área naranja), plantas fotovoltaicas en funcionamiento (área azul sin puntos) y en trámite (áreas rojas), y solicitud de concesiones mineras (área delimitada en púrpura) en la zona de interés y proximidades. (junio 2026)

5.4.3 Patrimonio histórico

En la proximidad de la zona de interés (15km) se cuenta el Conjunto Histórico de Belchite, Bien de Interés Cultural (BIC).

Belchite es un conjunto que sigue las tipologías urbanísticas utilizadas en la zona de la Ribera Baja del Ebro durante la Edad Media. En la actualidad se distinguen el núcleo histórico y el pueblo nuevo Belchite, fundado a medio kilómetro del pueblo viejo en 1954, tras la destrucción de la antigua villa en la Guerra Civil española. Durante esta contienda fue escenario de episodios bélicos como la Batalla de Belchite en la que el ejército republicano intentó lanzar una ofensiva para la conquista de Zaragoza. Tras un bombardeo iniciado por el bando contrario la población fue destruida y abandonada.

La Villa de Belchite fue declarada Conjunto de Interés Cultural el 28 de octubre de 2002. La declaración afecta al llamado Belchite Viejo, considerado un importante Sitio Histórico y cuya conservación es fundamental para no perder los restos de su rica arquitectura, fundamentalmente mudéjar y barroca.

Estudiosos afirman que el origen de esta villa pudo ser una población celtibérica ocupada por «los belos» denominada «Bellia». Alfonso I se la arrebató a los musulmanes en el siglo XII. Del periodo medieval se conservan los restos de edificios construidos en tapial bajo las técnicas mudéjares. Las ruinas de la Iglesia de San Martín de Tours, levantada en el siglo XIV, se han convertido en uno de los elementos más significativos de esta localidad. Es una de las tres parroquias que poseía Belchite, muestra de la importancia económica y religiosa de la villa en estos siglos. De factura mudéjar la iglesia de San Martín conserva el ábside, pero también otros elementos más tardíos como el último tramo y la fachada principal realizada en el siglo XIX. Las ruinas de la Torre del Reloj de la antigua iglesia de San Juan son posteriores, del siglo XVI, y también de estilo mudéjar. La prosperidad del Renacimiento se reflejó en la construcción de edificios de uso comercial, civil y ejemplos de arquitectura popular, en la Calle Mayor.



Figura 5. 5: Conjunto histórico de Belchite (pueblo viejo)



Figura 5. 6: Conjunto histórico de Belchite (pueblo viejo)

La calle desemboca en el Arco de la Villa, construido en el siglo XVIII entrada a la ciudad, junto con el Arco Capilla de San Roque, en el extremo opuesto y también de estilo barroco. La edad moderna supone un nuevo renacer de la localidad y la creación de grandes monumentos religiosos como son los conventos de San Rafael y San Agustín. Junto a la iglesia de San Martín se sitúa el Convento de San Rafael o de las Dominicas, fundado en 1781. Los agustinos se establecen a finales del siglo XVI en Belchite y construyen una gran iglesia barroca de planta de cruz latina, que hoy apenas conserva la envergadura de la que hizo gala en el pasado.

La oferta cultural de Belchite, además de la visita a este particular conjunto histórico, se completa con el Museo Etnológico y el Centro de Interpretación de las Estepas de Belchite, ambos en ubicados en la Ronda de Zaragoza, y el Santuario de Nuestra Señora del Pueyo situado a pocos kilómetros del pueblo.

No se prevén afecciones o interacción con la zona de estudio.

5.4.3.1 Memoria histórica

Además de su patrimonio arquitectónico, la ciudad vieja de Belchite se reconoce como lugar de interés cultural ligado a la Guerra Civil española. Como recoge la guía de turismo del Campo de Belchite, *“en agosto de 1937, el ejército republicano, que controlaba gran parte de la zona, diseñó una ofensiva para tomar la ciudad de Zaragoza y aliviar la presión del frente del norte, una acción militar en la que participaron el V Cuerpo del Ejército y las Brigadas Internacionales. Durante el primer año de contienda el pueblo había resistido ataques menores y se había convertido en una fortaleza casi inexpugnable, rodeada de acequias y coronada de grandes atalayas. Recibió la primera ofensiva el 24 de agosto y el enfrentamiento duró hasta el 6 de septiembre, cuando sucumbió definitivamente. Cuando la población civil, que había resistido a la batalla apiñada en las bodegas de la localidad, abandonó su refugio, lo que encontró fue un escenario desolador. Casas, iglesias y edificios derrumbados y un balance de más de 5000 bajas entre soldados de ambos bandos y población civil. La ocupación de Belchite fue importante para los republicanos, que llegaron a situarse a seis kilómetros de Zaragoza, pero que jamás pudieron tomar la capital aragonesa.*

Belchite fue también un importante símbolo para Franco, que al terminar la guerra decidió no reconstruir el pueblo, sino edificar un pueblo totalmente nuevo, situado a un kilómetro de las ruinas, y mantener el pueblo viejo como recuerdo de la cruenta batalla. Sin embargo, este abandono durante décadas –con la prohibición expresa en 1939 de llevar a cabo tareas de reconstrucción, y la obligación de abandonar completamente el pueblo en 1964– produjo grandes estragos en el ya muy herido patrimonio de un municipio, que atesora siglos de historia. Desde el año 2000, se han llevado a cabo rehabilitaciones en edificios significativos del pueblo viejo, y la puesta en valor de las ruinas como espacio para la conservación de la historia y la memoria de la zona.”



Figura 5.7: Estado actual del pueblo de Belchite

5.5 Descripción del entorno socio-económico

De acuerdo con esta demarcación, la zona de estudio integra comarcas de las provincias de Zaragoza y Teruel. El área definida como de posible influencia se ha fijado en 30 km de distancia desde la zona almacén, estando incluidas las comarcas de Campo de Belchite (4.526 habitantes, 2024), Comarca Central (incluyendo Zaragoza, 777.204 habitantes, 2024), Bajo Martín (6.204 habitantes, 2024), Ribera Baja del Ebro (8.476 habitantes, 2024) y Los Monegros (18.167 habitantes, 2024). La población combinada de estas comarcas es de 814.577 habitantes (2024), incluyendo Zaragoza que cuenta con 691.037 habitantes y, donde la población rural próxima a la zona de interés se reduce a 123.540 habitantes (actualizado a 2024 de Dütschke, E.; et al, 2022).

Importante en términos económicos y culturales, la región solía ser un distrito carbonífero que producía carbón para centrales eléctricas cercanas durante los últimos 40 años, por lo que existe una fuerte tradición y familiaridad con el trabajo subterráneo.

El territorio se caracteriza por una baja densidad de población, un alto número de municipios pequeños y una alta concentración de población en la ciudad de Zaragoza. La distribución por género y edad de la población es bastante similar a la nacional en España, pero en los municipios más pequeños que se encuentran en la región objetivo la población es relativamente mayor y, en algunos casos, hay una ausencia total de jóvenes. Se sabe ampliamente que la región está

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664

 @PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu
Page 226

perdiendo población y pertenece a la llamada España Vacía, un fenómeno que se está volviendo crucial en la agenda política nacional.

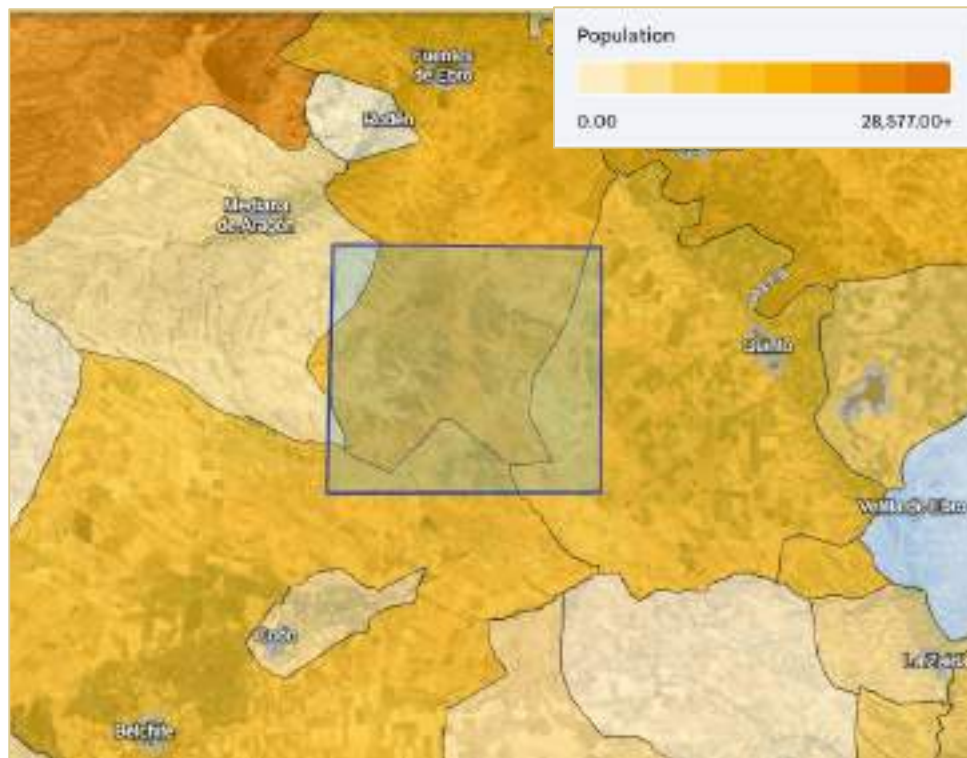


Figura 5.8: Mapa de población en la zona de interés (2024)

La identidad comunitaria se está convirtiendo en un tema crucial a través de, entre otros, movimientos ciudadanos como Teruel Existe (Teruel Existe), que surgieron ya en los años 90. Recientemente, se han realizado diversas iniciativas orientadas a la repoblación de la zona. Es importante señalar que en la zona de Teruel más del 40 % de las viviendas son segundas residencias. Había zonas mineras tradicionales cercanas, pero el cierre de la última mina en 2003 y el cierre de la central de Andorra en junio de 2020 obligaron a una reconversión industrial. El número de trabajadores en las minas disminuyó de 3.746 en 1986 a 430 en 2013. Cabe destacar que el área de Teruel está incluida en la Iniciativa de Regiones Carboníferas en Transición y en el Plan de Reconversión MINER, gestionado por el Ministerio español de Transición Ecológica y Desafío Demográfico. Se están llevando a cabo algunas iniciativas industriales y tecnológicas para reactivar la economía local, como proveedores de piezas de automóvil, la instalación de varios parques eólicos o empresas de gres y cerámica. En la zona estudiada, las tasas de desempleo son más bajas que en España o Aragón; sin embargo, los números deben interpretarse con cuidado debido al reducido número de ciudadanos en las regiones.

Desde enero de 2019, se han celebrado varias protestas públicas por el cierre de la central eléctrica de Andorra sin un plan alternativo para el futuro de las cuencas mineras. Los manifestantes han transmitido el miedo a un futuro con cada vez menos personas en el territorio. Al mismo tiempo, existe una creciente preocupación respecto al impacto de los macroproyectos renovables en los paisajes y territorios. En abril de 2021, una protesta ciudadana recorrió las calles de la ciudad de Teruel bajo el lema 'Por el futuro de Teruel'.

Renovables Sí, pero no así”. Las quejas se refieren a sus supuestos altos impactos ambientales, pero a los beneficios socioeconómicos locales limitados. La conservación del territorio y del paisaje se está convirtiendo en un tema prioritario para la comunidad.

Un hito importante en Aragón fue la creación en 1992 del Consejo para la Protección de la Naturaleza en Aragón (CPNA), un organismo participativo cuya función es, entre otros, informar sobre la protección de nuevas áreas naturales protegidas y sus planes de gestión. Además de los Espacios Naturales Protegidos, hay otras zonas integradas en la Red Natural de Aragón (Red Natura de Aragón). La región incluye espacios naturales relevantes, Áreas de Protección Especial para Aves y zonas especiales de conservación.

5.6 Descripción del medio físico

El **entorno natural** es principalmente rural, con una presencia de cultivos agrícolas y domios de paisaje piedemonte.

5.6.1 Relieve

La zona de interés se localiza en el borde meridional de la Depresión del Ebro, en una zona marcada por relieves suaves definidos por la dinámica fluvial en su mayoría (195 m a 205 m) y con mayor relieve en el límite noroeste (hasta 410 m). Los terrenos donde se pretende ubicar la planta piloto presentan una elevación de entre 200 m y 250 m.

No se prevén movimientos de tierra relevantes para la explanación.



Figura 5. 9: Relieve en la zona de interés (2025).

5.6.2 Clima

El clima se define como mediterráneo continental, de escasas e irregulares precipitaciones y fuertes contrastes de temperatura entre estaciones, junto a la escasez de agua y las heladas tardías, condicionan el rendimiento de los suelos. Todo ello propicia una zona de carácter semiárido que alberga parajes de singulares, desde las zonas más esteparias hasta las zonas de ribera cercas.

El clima presenta oscilaciones térmicas diarias superiores a 20 °C, con veranos muy calurosos y secos, y máximas medias en torno a 25–26 °C (máximas frecuentes entre 30 y 40 °C); inviernos fríos, con mínimas medias alrededor de 6–7 °C, heladas tardías y frecuentes inversiones térmicas con nieblas que aumentan la sensación de frío. Las temperaturas anuales oscilan entre 2 °C y 32 °C, con valores infrecuentes menores de –3 °C o superiores de 36 °C.

En cuanto a las precipitaciones, las lluvias son muy escasas e irregulares, con poco más de 300 mm al año en la comarca, y distribución muy irregular: la mitad de los años llueve por debajo de la media anual. Primavera y otoño son las estaciones más lluviosas, y la sequía estival es acusada, desde junio hasta octubre.

El viento dominante es el cierzo (NO), que tiene un fuerte efecto desecante. Puede reducir la humedad relativa hasta el 5 %, intensificando la evapotranspiración y el déficit hídrico. El ambiente es seco durante todo el año y los inviernos son especialmente ventosos.



Figura 5.10: Paisaje de la zona de interés (2025).

5.6.3 Paisaje y vegetación.

El paisaje dominante en la zona de interés es piedemonte con secanos – terrenos áridos, con vegetación baja y dispersa, propios del clima semiárido de la zona- y cultivos en mosaico, de acuerdo con el atlas de dominios de paisaje del Gobierno de Aragón. Se caracteriza por rampas con pendientes escasas, y ocupa el 13% del total de la Comunidad de Aragón. En la Depresión

del Ebro, los piedemontes coinciden generalmente con depósitos de glaciares de edad cuaternaria, por lo que no están afectados por deformaciones tectónicas. Se identifican relieves suaves que rompen la horizontalidad del paisaje, especialmente hacia el sur y el oeste.

La vegetación predominante es esteparia en las zonas más secas (ontinas, sisallos, esparto, tomillo.) combinada con matorral mediterráneo disperso en áreas no cultivadas. En la Ribera del Ebro (fuera de la zona de interés), se identifica una franja más verde con chopos, álamos, tamarices y carrizales que contrasta con la aridez del entorno.

5.6.4 Suelo

El tipo de suelo en la comarca está fuertemente condicionado por su geología semiárida dentro de la Depresión del Ebro. En conjunto, predominan suelos pobres, delgados, yesíferos y con tendencia a la salinización, propios de paisajes esteparios.

La zona se corresponde a tipo de suelo aridisoles: característicos de regímenes climáticos en los que la evapotranspiración es superior a la precipitación, al menos en gran parte del año. Como características edafológicas destacadas, pueden mencionarse:

- Baja materia orgánica por el clima seco y la escasa vegetación.
- Alta salinidad en zonas endorreicas y antiguas lagunas salobres.
- Suelos yesíferos frecuentes, que limitan el desarrollo agrícola.
- Escasa profundidad y tendencia a la erosión por viento (cierzo) y escorrentía.
- pH generalmente básico, típico de ambientes con carbonatos y yesos.

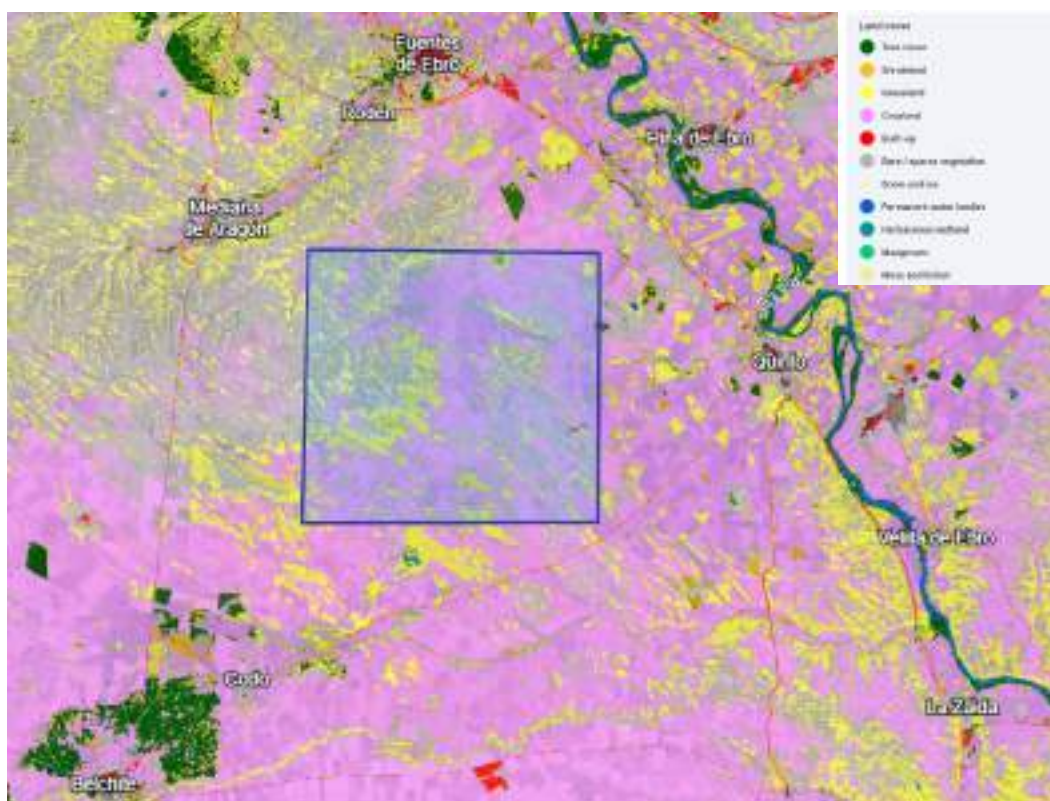


Figura 5.11: Usos del suelo en la zona de interés (zonas de secano y matorral).

5.6.5 Áreas protegidas

El área del Campo de Belchite presenta diversos espacios esteparios protegidos, centrados en la conservación de aves y hábitats únicos en Europa. Fresno del Ebro, por su parte, aporta ecosistemas de ribera que complementan la biodiversidad regional.

En la proximidad de la zona de interés han identificado tres Lugares de Importancia Comunitaria: la Lomaza de Belchite, el Planerón y las planas y estepas de la margen derecha del Ebro. También, dos Zonas de Especial Protección para las Aves: Estepas de Belchite – El Planerón – La Lomaza, y río Huerva y las Planas.

- Reserva Ornitológica El Planerón, a 15 km de Belchite y 5 km de Codo, creada por SEO/BirdLife en 1992 mediante la compra o cesión de terrenos de cultivo y baldíos, gracias a la colaboración de numerosas personas, colectivos sociales, empresas e instituciones públicas. Constituye un interesante espacio natural incluido en la red Natura 2000, declarado LIC y ZEPA por sus destacables valores botánicos y ornitológicos.

Actualmente tiene una superficie de unas 1500 has, en las que se desarrollan diversos programas de investigación, educativos y de promoción agroambiental orientados a asegurar la conservación de las aves esteparias y sus hábitats. Refugio de ganga ibérica, ganga ortega, sisón común y Alondra de Dupont (rocín).

- Refugio de Fauna Silvestre de la Lomaza de Belchite. Declarado por Decreto 68/1995, de 4 de abril, de la Diputación General de Aragón. Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), según la Directiva 79/409/CEE. Con una extensión de 961 hectáreas, y una altitud entre 280 metros y 405 metros, se han identificado las siguientes especies: Alcaraván, Alondra de Dupont, Bisbita campestre, Calandria, Cogujada montesina, Ganga, Ortega, Terrera común, Terrera marismeña. También está clasificado como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC).
- Muelas del Jiloca, Huerva y Aguasvivas”, Lugar de Importancia Comunitaria (LIC). Incluye parte del término de Belchite y municipios cercanos. Presenta relieves de muelas y cortados yesíferos, con hábitats rupícolas y esteparios. Su interés radica en conecta ecosistemas esteparios con zonas de relieve más abrupto. Se identifican fauna característica: águila real, halcón peregrino, búho real.
- Zona esteparia de Codo, Almonacid de la Cuba, Letux y Lécera (área de interés ambiental dentro de la Red Natura 2000), zona. de interés por la continuidad del paisaje estepario, presencia de aves esteparias y lagunas salinas temporales (área de Lécera). Actúa como corredor ecológico.

El desarrollo del proyecto no se encuentra dentro de ninguna de estas áreas ni se desarrollan actividades que puedan perjudicar los espacios protegidos y/o la fauna protegida. Sin embargo, se presentará especial atención a la protección de éstas en las actividades a realizar, así como medidas de protección a las aves en su paso durante la actividad.



Figura 5. 12: Fauna protegida del área (Ganga ibérica)

5.7 Descripción geológica

La Cuenca del Ebro es, geográficamente, una depresión relativa enmarcada por los Pirineos, la Cordillera Ibérica y las Cadenas Costero Catalanas. De forma triangular, en su extremo occidental enlaza con la Cuenca del Duero por el corredor de La Bureba. Representa la última fase de evolución de la cuenca de antepaís surpirenaica, y sus límites y estructura actual se establecieron entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, cuando los cabalgamientos frontales surpirenaicos alcanzaron su emplazamiento definitivo.

La formación de la cuenca de antepaís comenzó durante el Paleoceno, inducida por el hundimiento flexional resultante del desarrollo de estas tres cadenas montañosas. Hacia la parte central de la cuenca del Ebro, la estructura corresponde a un sinclinal suave (el sinclinal del Ebro) que se interpretó, basándose en datos superficiales (cartografía y datos estructurales) y subsuperficiales (pozos y datos de reflexión sísmica), como un pliegue de flexión.

5.7.1 Contexto tectónico

Desde el punto de vista tectónico, el basamento paleozoico fue afectado por la Orogenia Varisca durante el Carbonífero. Posteriormente, dos fases de rifting mesozoico —Pérmico-Triásico y Jurásico Superior-Cretácico Inferior— generaron fallas normales y estructuras extensionales. Más tarde, la compresión alpina, asociada al choque entre las placas ibérica y europea durante el Cretácico Superior-Mioceno, invirtió parcialmente estas estructuras, originó pliegues y cabalgamientos, y dio lugar a la cuenca de antepaís del Ebro.

El basamento subyacente está constituido por rocas paleozoicas con cierto grado de metamorfismo. Sobre él se disponen sedimentos triásicos de facies germánicas típicas, que incluyen capas rojas del

Buntsandstein, dolomías y calizas del Muschelkalk, y evaporitas del Keuper. En este sector se distinguen tres secuencias evaporíticas triásicas: una capa basal delgada asociada a las facies de Röt; una sucesión espesa de evaporitas del Triásico Medio, correspondiente a la facies Muschelkalk media (M2); y una sucesión de evaporitas continentales y materiales clásticos de grano fino del Triásico Superior, correspondientes a las facies Keuper. Las rocas jurásicas más antiguas de la cuenca del Ebro comprenden unos 50 m de dolomías cubiertas por una unidad cíclica de anhidritas con intercalaciones dolomíticas, atribuida a la Formación Lésera, con un espesor total de 200 a 450 m (Jurado, 1990; Gómez et al., 2007). Esta sucesión está cubierta por hasta 300 m de secuencias carbonatadas someras de plataforma, formadas por dolomías, calizas y calizas con intercalaciones margosas, sobre las que se disponen depósitos continentales carbonatados y detríticos cretácicos. La base de las rocas evaporíticas y detríticas continentales cenozoicas es discordante y erosiona los depósitos cretácicos y jurásicos.

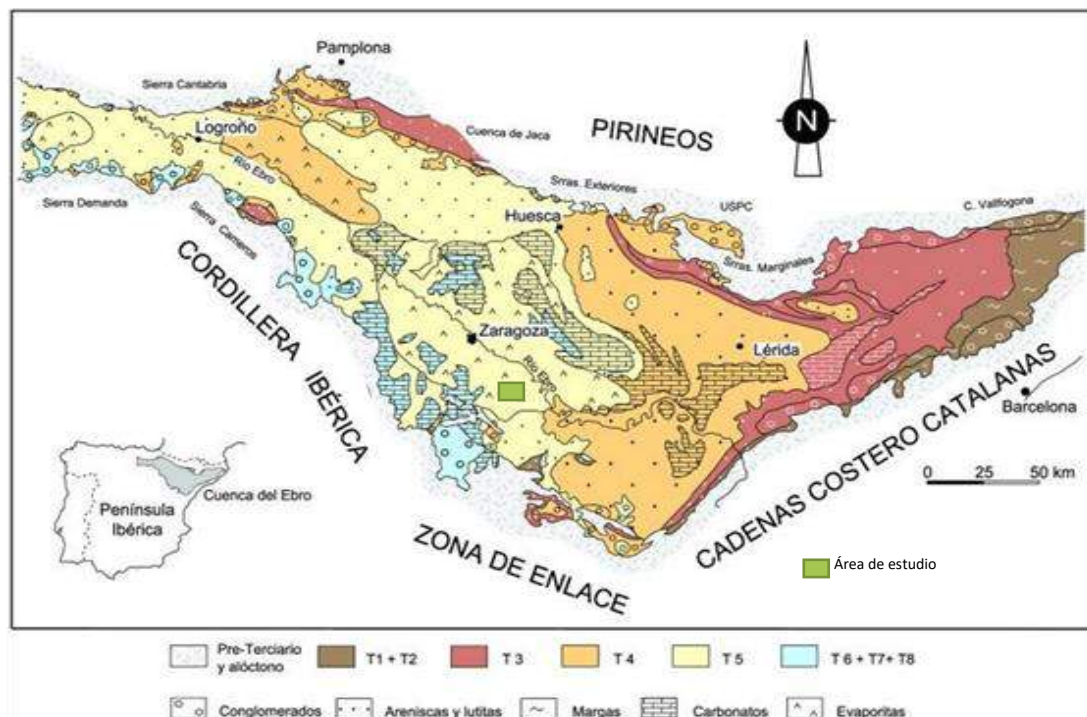


Figura 5.13.- Cartografía de las unidades tectosedimentarias de la Cuenca del Ebro. (Vera, J.A., *Geología de España*, 2004).

Los datos disponibles indican la presencia de varias estructuras en la cuenca del Ebro que afectan a las rocas paleozoicas y mesozoicas situadas bajo los depósitos cenozoicos subhorizontales. Estas estructuras se alinean de forma paralela a los frentes de deformación ibérica y catalana, con orientaciones NO-SE y NE-SO, respectivamente.

La estructura Lopín se localiza en la zona meridional de la Cuenca del Ebro, en el noreste de la Península Ibérica. donde la estructura general corresponde a un sistema sedimentario desarrollado sobre un basamento paleozoico parcialmente metamorfozado (Moreno et al, 2023).

5.7.2 Contexto estructural

La interpretación estructural de la Cuenca del Ebro se basa en la integración de datos geológicos, sísmicos, gravimétricos y de sondeos existentes en el área, con el objetivo de caracterizar la arquitectura y evolución tectónica de la cuenca, así como la distribución y geometría de sus principales unidades y estructuras.

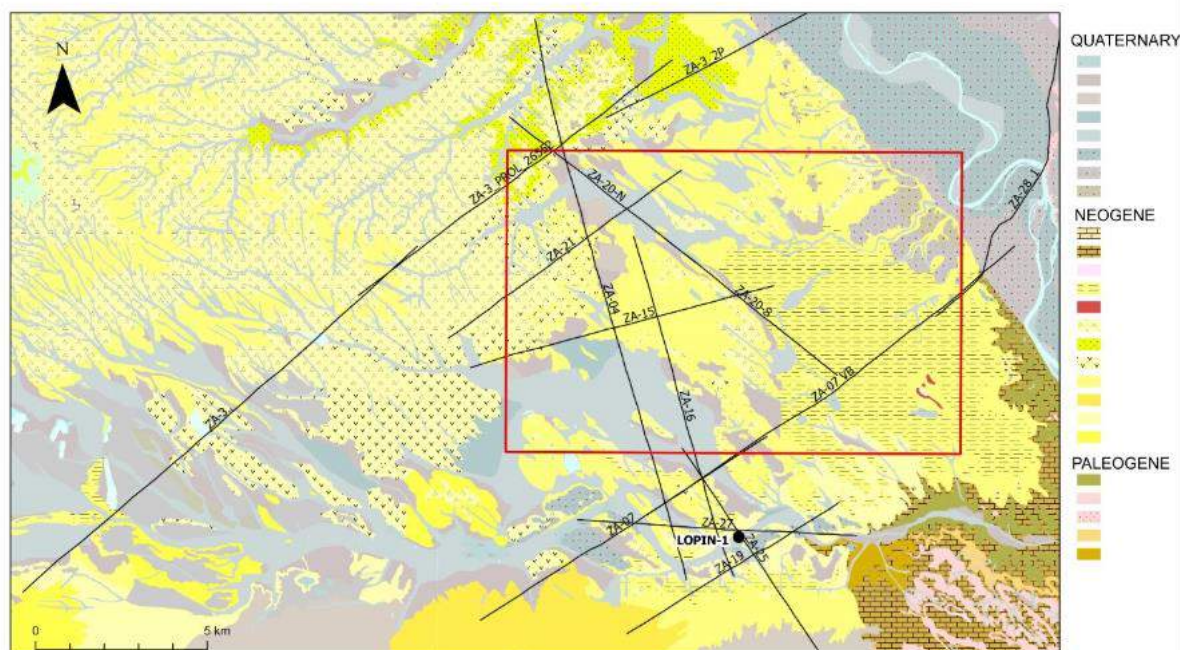


Figura 5.14 Mapa de la zona de interés y líneas sísmicas disponibles.

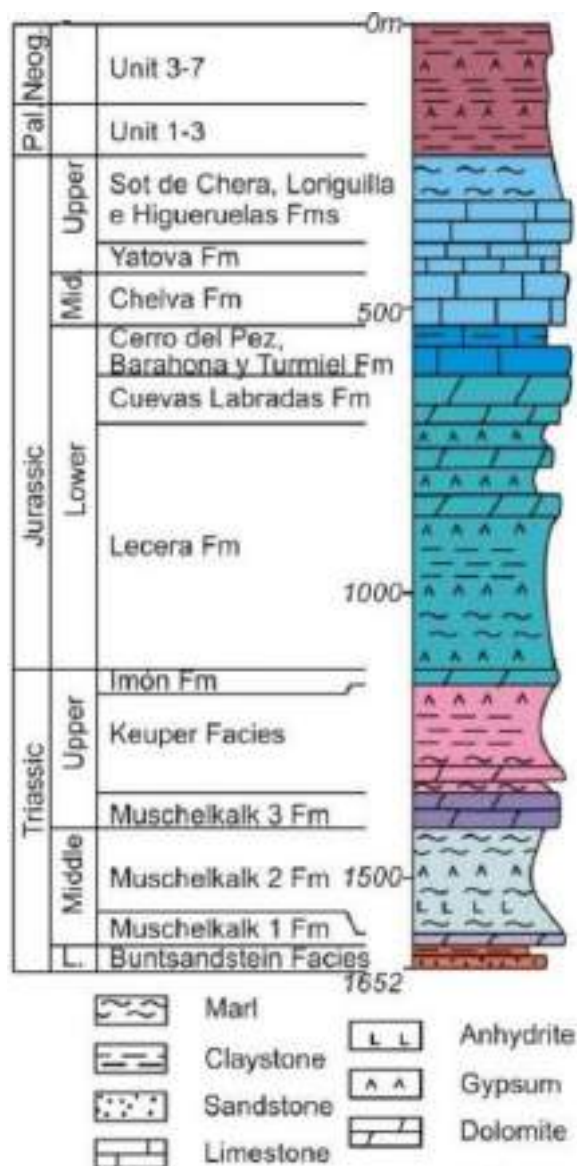
La interpretación estructural se basó en el análisis integrado de nueve líneas sísmicas con orientaciones SW-NE y NW-SE, junto con los datos del sondeo Lopín-1. A partir de esta información se identificaron siete unidades sísmicas principales, que abarcan desde los depósitos cenozoicos hasta el basamento paleozoico. Las facies sísmicas indican que las unidades triásicas inferiores, correspondientes al Buntsandstein y al Muschelkalk M1, están afectadas por fallas normales de orientación NW-SE, que generan una geometría de horsts y grabens. Las evaporitas del Muschelkalk M2 actúan como nivel de desacoplamiento, limitando la propagación de estas fallas hacia niveles superiores. La modelización gravimétrica 2D, calibrada con datos sísmicos y de pozo, confirma la geometría de estas estructuras y contribuye a definir su profundidad y continuidad lateral en sectores donde la resolución sísmica es limitada.

El informe PilotSTRATEGY indica que el grado de sellado lateral de estas fallas normales aún se encuentra bajo evaluación, aunque los datos de presión procedentes de ensayos DST sugieren que podrían sellar parcialmente la unidad Buntsandstein B1, especialmente en la zona central de la cuenca (Eguilior et al., 2025). En Lopín, el punto de inyección previsto se sitúa aproximadamente a 400–600 m de las fallas normales más próximas, mientras que el pozo profundo conocido más cercano, Lopín-1, se encuentra a unos 10 km de distancia (Eguilior et al., 2025).

5.7.3 Caracterización del reservorio y sello

El reservorio principal de la estructura Lopín corresponde a la unidad Buntsandstein B1, de edad triásica. Esta unidad se describe como una formación arenosa de ambiente fluvio-lacustre situada a unos 1.760 m de profundidad, valor suficiente para permitir el almacenamiento de CO₂ en fase densa o supercrítica, al superar ampliamente el umbral de 700–800 m generalmente recomendado para alcanzar condiciones favorables de presión y temperatura. El Buntsandstein B1 presenta espesores variables, estimados entre 20 y 70 m hacia el noreste, y constituye el principal intervalo considerado como formación almacén. Litológicamente, está formado por canales fluviales anastomosados y areniscas cuarzosas subangulares, con recubrimientos de óxidos de hierro tipo goethita, cemento cuarcítico y contenidos menores de feldespatos y minerales arcillosos. Lateral y verticalmente, puede evolucionar hacia areniscas rojas de grano más fino, lo que introduce heterogeneidad en sus propiedades petrofísicas.

Figura 5. 15. Columna estratigráfica del almacén de Lopín



Esta heterogeneidad es relevante para la modelización numérica, ya que la porosidad y la permeabilidad controlan tanto la capacidad efectiva de almacenamiento como la inyektividad del sistema. En Lopín, el informe PilotSTRATEGY identifica ambos parámetros como críticos para reducir la incertidumbre en las predicciones de presión, especialmente en escenarios de inyección a escala industrial. El techo estructural de la Formación Buntsandstein presenta una configuración favorable para el almacenamiento, con un cierre probable situado a una profundidad aproximada de 1.650 m. Esta geometría permite interpretar la estructura Lopín como una trampa potencial para el CO₂, aunque su capacidad efectiva dependerá de la conectividad lateral, de la interacción con fallas y de las restricciones de presión admisible durante la inyección (Eguilior et al., 2025). El sistema de confinamiento se caracteriza por una arquitectura multibarrera. El sello primario está formado por la unidad Buntsandstein B2 y la Formación Rané, correspondiente a facies Röt, situadas por encima de la unidad almacén B1. La unidad Buntsandstein B2, también denominada Formación Carcalejo, se interpreta como una formación arcillosa con intercalaciones arenosas, asociada a sistemas fluviales aislados en llanuras de inundación.

Sobre este sello primario se dispone el sello local Muschelkalk M2, constituido por evaporitas, arcillas y niveles carbonatados de espesor variable. Esta unidad, situada sobre la Formación Muschelkalk M1, desempeña un papel relevante en la limitación de la migración vertical del CO₂ en caso de interacción con niveles superiores. El sistema se completa con un sello regional asociado a las facies Keuper del Triásico superior, compuestas por arcillas y evaporitas de gran espesor. En el sondeo Lopín-1, el Keuper alcanza aproximadamente 445 m entre 905 y 1.350 m de profundidad, mientras que la caracterización del proyecto considera una sucesión de hasta 400 m de evaporitas continentales y rocas detríticas finas (Eguilior et al., 2025). Por su extensión y espesor dentro de la cuenca del Ebro, esta unidad se interpreta como el principal sello regional. La presencia de varios niveles de sellado —primario, local y regional— refuerza la robustez del sistema de confinamiento, al proporcionar una contención escalonada frente a posibles trayectorias de migración del CO₂ (Eguilior et al., 2025).

La geometría del relleno de la cuenca, exceptuando el sector occidental, presenta una forma de prisma abierto hacia el norte con la base del Cenozoico situada a más de 3000 m bajo el nivel del mar en el margen pirenaico. Sobre esta superficie basal, el Cenozoico presenta una tendencia al solapamiento expansivo hacia el sur, con los materiales más antiguos recubriendo tal superficie en el margen pirenaico y los más modernos hacia el margen ibérico.

5.8 Descripción hidrogeológica

La estructura geológica objeto del estudio se sitúa en el sector sur oriental de la cuenca del Ebro, ocupando parte de la cuenca baja de dos importantes afluentes de la margen derecha del Ebro, los ríos Guadalope y Matarraña.

Las cotas topográficas oscilan entre 100 m s.n.m. en el entorno del río Ebro y 466 m s.n.m. del alto de Puig Moreno. La orografía es suave, con pequeños desniveles que condicionan la aparición de una importante red hidrográfica, de trazado meandriforme, y el despliegue de numerosos barrancos de fondo plano, con estructura dendrítica y pequeño o mediano desarrollo, que confluyen hacia los cauces de los principales ríos: Ebro, Guadalope, Matarraña y Algars. Al oeste de Caspe, a la altura de la localidad de Chiprana, se localiza un pequeño número de depresiones cerradas que dan origen a un escenario de endorreísmo similar al que se observa en otros sectores próximos del Bajo Aragón y de Monegros, donde la acumulación de aguas de escorrentía superficial y aporte subterráneo generan una somera lámina de agua permanente, de carácter salino, que tiene gran trascendencia medioambiental por la diversidad de ecosistemas que sostiene.

En el aspecto climatológico, la temperatura media anual oscila entre 14 y 16 °C, mientras que la precipitación media anual ronda los 350 mm. Estos datos reflejan un clima semiárido con importantes déficits hídricos, especialmente durante los periodos estivales. El elevado grado de aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales en la producción agraria local, especialmente para cultivos de regadío, unido a la irregularidad de las precipitaciones y a la acusada aridez climática, con valores de ETP de 800-1.000 mm/año, da lugar a una importante merma de los caudales que circulan por los ríos. De este modo, las aportaciones medias anuales medidas en las estaciones de aforo son del orden de 77, 2 hm³/año en el río Guadalope a su

paso por Caspe (E. A. nº 99) y de 32,94 hm³/año del río Matarraña a la altura de Nonaspe (E. A. nº 176).

5.8.1 Principales acuíferos

La actual discretización de los acuíferos de la cuenca del Ebro en masas de agua subterránea, establecida por la Confederación Hidrográfica atendiendo a los nuevos criterios señalados por la Directiva Marco del Agua, no ha dado lugar a que se pueda incluir el sector de estudio en ninguna de estas masas, puesto que en los materiales terciarios y cuaternarios aflorantes no se localizan acuíferos de interés con fines de explotación y aprovechamiento de las aguas subterráneas (figura 5.16).

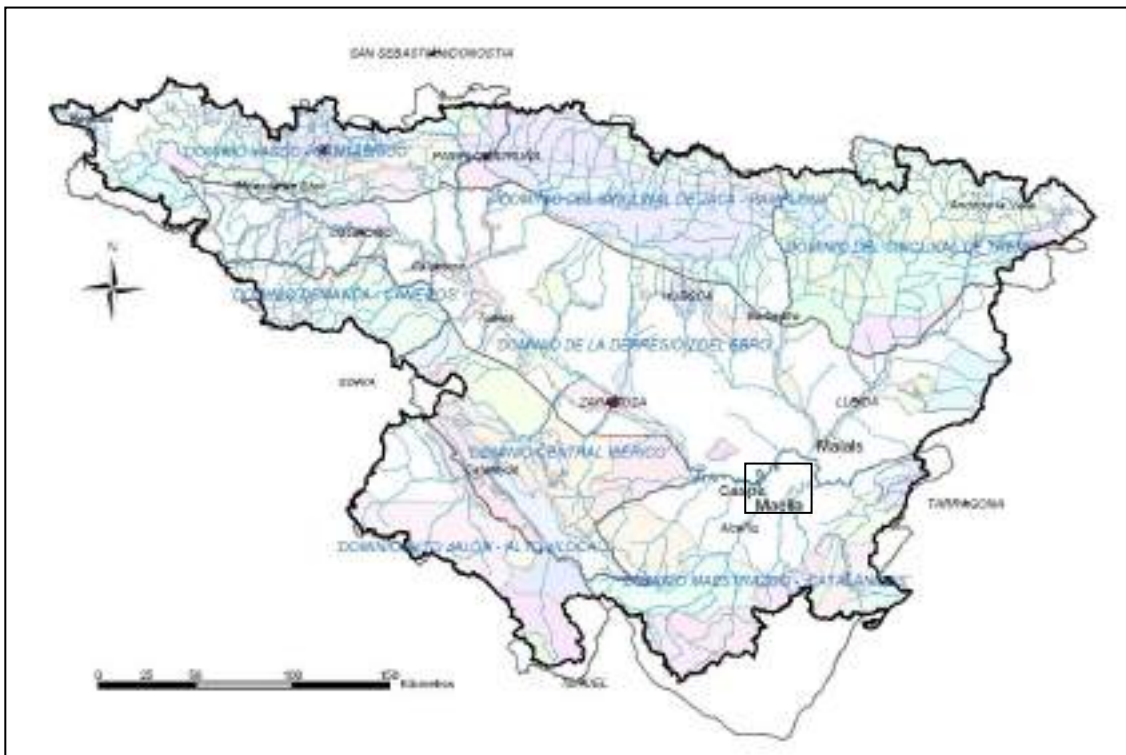


Figura 5.16. Situación del área de estudio en el contexto de los dominios hidrogeológicos y masas de agua subterránea definidos en la cuenca del Ebro.

No obstante, el Plan Hidrológico de Cuenca, en su anterior discretización de los acuíferos basada en dominios hidrogeológicos y unidades hidrogeológicas, incluía dentro del Dominio Ibérico Maestrazgo-Catalánides, la unidad 09.808: Puig Moreno, una banda aproximadamente de dirección E-O, tal como muestra la figura 2.5, que englobaría a una estructura anticlinal asimétrica integrada por un acuífero carbonatado mesozoico que, inicialmente y en función del escaso conocimiento hidrogeológico hasta entonces existente, se asignó como perteneciente al Cretácico inferior y Jurásico.

También, en superficie, se calificaron de cierto interés otras posibles formaciones acuíferas localizadas en los niveles conglomeráticos y estratos calizos de las formaciones terciarias continentales y en los depósitos aluviales cuaternarios que tapizan la red hidrográfica.

Dado que la principal formación acuífera no aflora en la unidad y que sus flancos poseen fuertes buzamientos, no se llegaron a establecer unos límites cerrados y precisos a la misma, por lo que se tomó también como parte integrante de esta Unidad a una serie de estructuras anticlinales que afectan al terciario y que se supone consisten en una réplica de los pliegues que caracterizan al mesozoico subyacente. El afloramiento de materiales paleozoicos del cerro de Puig Moreno, en plena depresión terciaria, está por tanto relacionado con un alto en estas estructuras mesozoicas. Con estos límites quedarían perfectamente integradas todas las manifestaciones hidrogeológicas que constituyen las descargas más septentrionales de la Cordillera Ibérica en la Depresión del Ebro comprendidas entre los ríos Martín y Matarraña.

Los únicos datos que se conocen de esta estructura proceden de las campañas geofísicas de sísmica de reflexión y de los sondeos perforados con fines de investigación petrolífera (Caspé-1 y Caspé estratigráfico) o hidrogeológica (sondeos de La Mangrana y Baños de Fonté). Posteriormente, en el año 2000, para llegar a garantizar el abastecimiento de agua para consumo y riego en situaciones de sequía, la CHE llevó a cabo una serie de “Obras de emergencia de aporte de recursos hídricos a la cuenca del río Matarraña” (CHE, 2002), por las que se construyeron una serie de sondeos en la zona objetivo del presente estudio (sondeos Maella-1 y Maella-2) y se obtuvieron nuevos datos que permitieron mejorar la interpretación y el escaso conocimiento existente hasta ese momento acerca del funcionamiento hidrogeológico de esta estructura acuífera.

Pese a este esfuerzo por localizar nuevos recursos de agua, las captaciones se consideraron negativas para su explotación debido a la deficiente calidad de las aguas, el exiguo caudal extraído de los sondeos y la baja transmisividad de las formaciones atravesadas. Se desestimó, por tanto, el interés de esta estructura acuífera para ser definida como parte integrante de una masa de agua subterránea en la cuenca del Ebro, pero esto no ha impedido que se continúe hasta la actualidad con el control piezométrico de estos sondeos.

Gracias a estas nuevas actuaciones, se han catalogado las principales formaciones permeables en la estructura anticlinal de Caspé como pertenecientes al Triásico y Jurásico inferior-Rethiense. Concretamente son los miembros dolomíticos con aspecto oqueroso y brechoide de las facies Muschelkalk (miembros M-I y M-III), atravesados por los sondeos Maella-2, Caspé estratigráfico y Caspé -1, y las calizas dolomíticas de la Fm. Cortes de Tajuña (Lías), alcanzadas en los sondeos de La Mangrana y Caspé estratigráfico. Otras formaciones también permeables, aunque de menor entidad, son los niveles calizos del Eoceno, los niveles conglomeráticos y las arenas que aparecen intercaladas entre las arcillas de edad Oligoceno-Mioceno.

5.8.2 Inventario de puntos de agua

Se han recopilado los puntos de agua comprendidos en los inventarios: base de datos AGUAS XXI (IGME); base IPA (CHE); Servicio de Hidrocarburos, además de otros trabajos y estudios hidrogeológicos específicos. El área abarca principalmente las siguientes hojas topográficas E. 1:50.000: 29-17, 30-17, 30-18, 31-16, 31-17, 31-18 y 32-16; además, se han situado los sondeos petrolíferos localizados en otras hojas vecinas.

Dadas las particulares características hidrogeológicas del área, se ha supervisado el inventario y se han seleccionado los puntos de agua más significativos (figura 2.4), aquellos que pueden proporcionar mejor información de las formaciones terciarias y posibles acuíferos mesozoicos: manantiales o surgencias singulares o con caudal superior a un litro por segundo, pozos en explotación y sondeos sin equipar con profundidad igual o superior a 100 m, puntos de redes de control y sondeos petrolíferos.

Como resultado, la selección consta de 42 puntos acuíferos, con la distribución que muestra la tabla 5.1 y un resumen de sus características en la tabla 5.2.

NATURALEZA	29- 16	29- 17	30- 15	30- 16	30- 17	30- 18	30- 19	31- 15	31- 16	31- 17	31- 18	32- 16	TOTAL
Manantial		3			3	1				1	1		9
Piezómetro					3								3
Pozo		2				1			2			4	9
Sondeo Petrolífero	1	1	1	1	2			1	1			1	9
Sondeo		2			1	3	1			1	2	2	12
TOTAL	1	8	1	1	9	5	1	1	3	2	3	7	42

Tabla 5.1. Distribución de los puntos de agua seleccionados en la zona de trabajo en función de su naturaleza.

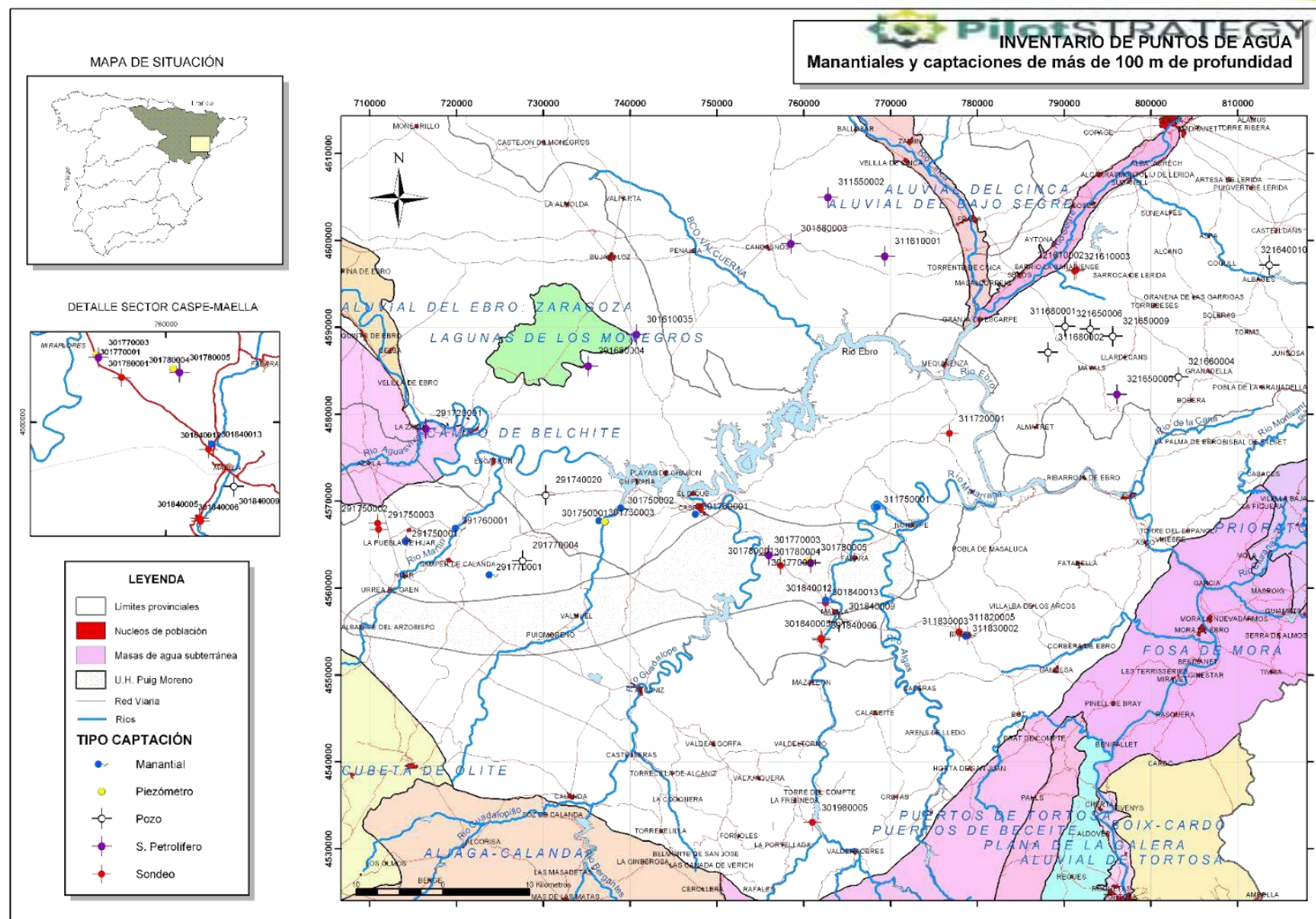


Figura 5.16. Inventario de puntos de agua. Selección de manantiales y captaciones con más de 100 m de profundidad.

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664



REFERENCIA	X (Huso 30)	Y (Huso 30)	X (Real)	Y (Real)	COT A	TIPO CAPTACIÓN	PROFUNDIDAD (m)	MUNICIPIO	PROVINCIA	TOPONIMIA	USO	PROFUNDIDAD PIEZOMÉTRICA (m)	NIVEL PIEZOMÉTRICO (m s.n.m.)
291680004	735180	4585610	735180	4585610	327	S. Petrolífero	1969,7	Sástago	Zaragoza	Ebro-1	Investigación H.	-	
291720001	716470	4578421	716470	4578421	165	S. Petrolífero	1698	La Zaida	Zaragoza	La Zaida-1	Investigación H.	-	
291740020	730275	4570755	730275	4570755	210	Pozo	180	Escatrón	Zaragoza	Bonete (Po:507, Pa:24)	Desconocido	-	
291750001	714487	4565460	714487	4565460	255	Manantial		La Puebla de Híjar	Teruel	Partida Jaime La Sierra	Ganadería		255
291750002	710947	4567531	710947	4567531	275	Sondeo	100	La Puebla de Híjar	Teruel	Partida Jaime La Sierra	Sin uso	-	
291750003	711042	4566829	711042	4566829	275	Sondeo	100	La Puebla de Híjar	Teruel		Sin uso	-	
291760001	720254	4566949	720254	4566949	200	Manantial		Castelnou	Teruel	Partida Millares	Sin uso		200
291770001	724172	4561602	724172	4561602	240	Manantial		Samper de Calanda	Teruel	Fuente Valdellego	Agricultura		240
291770004	727612	4563239	727612	4563239	285	Pozo	100	Samper de Calanda	Teruel	Escosanilla (PO:50 PA:44)	Agricultura	-	
301580003	758525	4599694	257747	4599129	282,4	S. Petrolífero	1550,4	Candasnos	Huesca	Candasnos-1	Investigación H.	-	
301610035	740735	4589233	740735	4589233	344,2	S. Petrolífero	2824,9	Bujaraloz	Zaragoza	Bujaraloz-1	Investigación H.	-	
301750001	736799	4567824	736799	4567824	150	Manantial		Caspe	Zaragoza	Baños de Fonté. Sr. Morales	Antiguo Balneario		150
301750002	739343	4569276	739343	4569276	160	Manantial		Caspe	Zaragoza	Calabazar	Agricultura		160
301750003	737082	4567741	737082	4567741	160	Piezómetro	305	Caspe	Zaragoza	Baños de Fonté	Sin uso	6,61	153,39
301760001	747900	4568584	747900	4568584	140	Manantial		Caspe	Zaragoza	Fuente Los Chorros	Ganadería		140
301770001	755876	4564017	252637	4563723	200	Piezómetro	135	Caspe	Zaragoza	La Mangrana SG	Sin uso	4,88	195,12
301770003	755981	4563848	252730	4563547	195	S. Petrolífero	276	Caspe	Zaragoza	Caspe-1 Estratigráfico	Investigación H.	4,48	190,52
301780001	757377	4562669	254042	4562275	215	Sondeo	100	Maella	Zaragoza	Casa Girona. Club de Caza	Sin uso	11,03	203,97
301780004	760439	4563195	257132	4562589	318	Piezómetro	574,6	Maella	Zaragoza	Maella-2 (CHE). Balsa Bardina	Sin uso	108,23 (*)	209,77 (*)
301780005	760811	4562966	257487	4562335	280	S. Petrolífero	1810	Maella	Zaragoza	Caspe-1	Investigación H.	-	
301840005	762023	4554293	258100	4553600	310	Sondeo	200	Maella	Zaragoza	El Pontet (izquierda)	Sin uso	12,42	297,58
301840006	762085	4554122	258150	4553425	298	Sondeo	200	Maella	Zaragoza	El Pontet (derecha)	Sin uso	1,99	296,01
301840009	764048	4556187	260250	4555350	300	Pozo	110	Maella	Zaragoza	Granja San Sebastián	Ganadería	15,51	284,49
301840012	762551	4558403	258899	4557665	285	Sondeo	600	Maella	Zaragoza	Maella-1 (CHE)	Sin uso	11,98	273,02
301840013	762921	4558716	259300	4557950	275	Manantial		Maella	Zaragoza	Font de L'Aldovara Baixa	Sin uso		275

301980005	761024	4533127	255650	4532555	450	Sondeo	800	La Fresneda	Teruel	La Fresneda-2	Sin uso	5,41	444,59
311550002	762814	4605036	262396	4604160	281,29	S. Petrolífero	3450	Ballobar	Huesca	Ballobar-1	Investigación H.	-	
311610001	769343	4598239	268436	4596928	296,49	S. Petrolífero	2143	Fraga	Huesca	Fraga-1	Investigación H.	-	
311680001	790123	4590179	288600	4587450	-	Pozo	220	Serós	Lérida	Finca Masada	Desconocido	-	
311680002	788132	4587187	286408	4574604	295	Pozo	270	Serós	Lérida	Vall de Jaca (PO:18 PA:12)	Desconocido	-	
311720001	776805	4577892	274470	4576119	300	Sondeo	212	Mequinenza	Zaragoza	Barranco de Amán	Desconocido	-	
311750001	768838	4569410	265938	4568209	160	Manantial		Nonaspe	Zaragoza	Fuente del Borrego	Sin uso	-	160
311820005	777952	4555051	274040	4553260	350	Sondeo	240	Batea	Tarragona	Pla del pou	Sin uso	-	
311830002	779050	4554546	275100	4552681	340	Manantial		Batea	Tarragona	Fuente del Lavadero	Agricultura	-	340
311830003	778900	4554597	274954	4552742	340	Sondeo	150	Batea	Tarragona	Lavadero	Sin uso	2,85	337,15
321610002	791426	4596696	290351	4593858	170	Sondeo	527	Aytona	Lérida	Finca Carrió	Agricultura	6	164
321610003	791249	4596546	290165	4593721	170	Sondeo	150	Aytona	Lérida	Finca Carrió	Sin uso	-	
321640010	813656	4597230	312550	4592850	355	Pozo	286	L'Albages	Lérida	Abelles, Polígono 2, Parcela 5	Agricultura	-	
321650000	796080	4582368	294000	4579250	356	S. Petrolífero	1401,2	Mayals	Lérida	Mayals-1	Investigación H.	-	
321650006	793002	4589877	291450	4586950	-	Pozo	290	Llardecans	Lérida	Terme Ada	Agricultura	-	
321650009	795607	4589045	293989	4585939	280	Pozo	149	Llardecans	Lérida	Deume (PO:6; PA:149)	Desconocido	-	
321660004	803163	4584364	301200	4580750	-	Pozo	290	La Granadella	Lérida		Desconocido	-	

Table 5.2. Inventario de puntos de agua. Selección de manantiales y captaciones con más de 100 m de profundidad. (*) Datos para el acuífero del Muschelkalk (M-3).

AGUA	TOPONIMIA	TIPO	PROFUNDIDAD m	COTA (m s.n.m.)	TRAMO m	LITOLOGÍA	ESPESOR m	EDAD	SALINIDAD ppt	FACIES	CONDUCTIVIDAD µS/cm	NE (m s.n.m.)	k (m/s)	T (m/s)	β	TEMPERATURA m °C	ENSAYOS
30100000	MAYAL-1	SP	1491,28	358,30	0 a 976	Arcillas, calizas arcillosas, arenosas y masas	876	Terziario									
					976 a 1305	Arcillas y masas	309	Triásico									
					1305 a 1401	Arcillas limosas arenosas	36,2	Pleistoceno								1401	88,2
30110035	ECUENALOE-1	SP	2624,98	344,20	0 a 738	Arcillas y masas	128	Mioceno-Oligoceno				-241,17	Cenozoico				D87
					738 a 1312	Carbonífero y masas	174	Cenozoico Inf.									
					1312 a 1318	Carbonífero y arcillas	127	Paraná Sup. (Cenozoico y Mioceno)	Abr.								
					1318 a 1401	Calizas y dolomías	63	Lias									
					1401 a 1428	Arcillas y dolomías	48	Sarmiento	140000	CS-Na	118,82						D87
					1428 a 2197	Arcillas, arcillas y dolomías	147	Kempes	200000	CS-Na	41,60						D87
					2197 a 2225	Carbonífero-dolomías	128	MG-3	240000	CS-Na	-38,40						D87
					2225 a 2648	Arcillas y arcillas	315	MG-2									
					2648 a 2714	Dolomías	64	MG-1	salina								
					2714 a 2812	Tronco masivo conglomerático	68	Barrandiera				-263,36					D87
					0 a 705	Arcillas calizas y masas	105	Terziario									
					705 a 1258	Arcillas y dolomías	351	Sarmiento									
					1258 a 1378	Arcillas y arcillas	120	Kempes									
					1378 a 1514	Carbonífero-dolomías	140	MG-3			174,33						D87
					1514 a 1571	Arcillas y masas	58	MG-1									
					1571 a 1874	Dolomías	99	MG-1									
					1874 a 1899	Tronco masivo conglomerático	110	Barrandiera									
					1899 a 1899	Pleistoceno	76	Pleistoceno									
30110005	CASPE-1	SP	1300,08	396,30	0 a 277	Calizas, masas, arcillas y arcillas	177	Terziario									
					277 a 284	Carbonífero-dolomías	67	MG-3									
					284 a 487	Arcillas y arcillas	63	MG-2									
					487 a 581	Dolomías	134	MG-1									
					581 a 785	Arcillas y arcillas	144	Barrandiera E. Est. y E. Acuña									
					785 a 921	Tronco masivo conglomerático	118	Barrandiera									
					921 a 1313	Arcillas y masas	187	Pleistoceno									
					0 a 27,5	Arcillas, masas y masas	27,5	Mioceno-Oligoceno									
					27,5 a 131	Calizas dolomías y arcillas	121,5	Lias				198,97					
					131 a 240	Masas y arcillas	69	Kempes									
					240 a 275	Calizas	36	MG-3									
30110012	MAELLA-1	S	600,00	281,30	0 a 608	Arcillas y masas	600	Oligoceno		CO-HCO ₃ 300-Mg	3108-3408 4811	279	0,04 a 1,62 m/s	6,307 a 1,17		48 365 50	30 25,5 19
					30 a 298	Calizas y masas	184	Terziario									
					298 a 339	Calizas	44	Ecena		90-Co-3a	1800-1900	244,12	0,028-0,011 (2,26 m)			205	25,5
					339 a 351	Calizas	17	Dolomías					0,048	0,5-3			
					351 a 385	Dolomías	44	MG-3		CS-Na	hasta 10000	211,4		28,35			
					385 a 482	Arcillas	105	MG-2									
					482 a 547	Dolomías	65	MG-1		CS-Na	hasta 10000			28,35			
					547 a 575,5	Arcillas	28,5	Barrandiera									
					0 a 15	Arcillas masas y masas	29	Mioceno									
					15 a 101	Calizas dolomías	66	Lias	3941	90-3a		185,12					
					101 a 135	Yacis	34	Kempes									
30110013	MAEDOS PUNTE	P	305,00	180,30	0 a 305	Arcillas y masas	305	Mioceno		90-3a 90-Co-3a	5214 a 12610	155,39					
30110015	LA FRESCEDA	P	800,00	418,30	1 a 800	Arcillas, masas y conglomerados	795	Mioceno-Oligoceno		90-3a	1410 a 5140	444,8	0,07 a 6,8	0,5-2,4	5-8%		

Table 5.3 Síntesis de la información hidrogeológica de los sondeos petrolíferos y de los principales puntos de agua del sector Caspe-Maella.

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664



Las litologías predominantes son gravas, arenas y limos correspondientes a terrazas fluviales, canales y llanuras aluviales. El espesor del acuífero cuaternario varía entre 5 y 80 m, pero una media de 20 m es bastante representativa. Las unidades subyacentes son las formaciones detríticas del Cenozoico de baja permeabilidad. La transmisividad muestra una distribución según el espesor de los sedimentos, de 100 a 12.000 m²/día. Los valores más bajos se encuentran cerca del contacto con las formaciones del Cenozoico y los más altos en valles fluviales. El coeficiente de almacenamiento es de 0,06 a 0,12, según la prueba de bombeo. Los valores de permeabilidad varían entre 15 y 1500 m/d, aunque un buen valor medio es 280 m/d.

El comportamiento hidrogeológico está vinculado a los ríos que depositaron los sedimentos. La recarga se produce a lo largo de toda la extensión de las terrazas aluviales y fluviales, principalmente por la infiltración del agua de lluvia y los retornos del riego. El vertido ocurre en el lecho del río y también a través de la extracción. El flujo de agua subterránea coincide aproximadamente con la dirección del agua superficial, convergiendo desde los bordes aluviales hasta los arroyos principales. En periodos de inundación, la dirección del flujo puede invertirse, dando lugar a un almacenamiento temporal de agua en las orillas del río.

5.8.3 Propiedades hidrogeológicas

No se han realizado pruebas hidrofísicas en estas formaciones, pero se puede establecer una estimación de la porosidad y permeabilidad efectivas promedio (López Gutiérrez, 2015). Para las formaciones intercaladas del Cenozoico, se puede asumir que la porosidad efectiva de las capas de arcilla es del 0,1% y la permeabilidad de $6,3 \times 10^{-4}$ m/d. Para los conglomerados aluviales, la porosidad efectiva media es del 9% y la permeabilidad de 1,6 m/d. Para arcillas y yeso, la porosidad efectiva es del 0,4% y la permeabilidad de $3,3 \times 10^{-4}$ m/d. Solo las capas de conglomerado se consideran acuíferos, pero las formaciones son predominantemente ricas en arcilla, por lo que la utilidad de toda la secuencia es bastante limitada desde el punto de vista del suministro de agua. Con respecto a las formaciones aluviales cuaternarias, predomina grava (terrazas) y limos (llanura de inundación fluvial). Para el primero, una porosidad efectiva media puede ser del 18% y una permeabilidad de $1,1 \times 10^3$ m/d. En el caso de limos de llanura de inundación, la porosidad efectiva media puede ser del 2% y la permeabilidad de $5,6 \times 10^{-3}$ m/d. No existen mapas piezométricos de las formaciones del Cenozoico, ya que se consideran que estas formaciones tienen permeabilidad baja a media y el acuífero regional importante es el Jurásico. Por tanto, no hay datos representativos para dibujar mapas piezométricos fiables. En lo que respecta a las formaciones cuaternarias, presentan condiciones hidrogeológicas más favorables y existen algunos datos que permiten trazar un mapa piezométrico aguas arriba de la estructura de Lopín.

5.8.4 Usos locales de las aguas subterráneas

No se han identificado usos geotérmicos de aguas subterráneas. La mayoría de los pozos de perforación en la zona se encuentran dentro del masa de agua subterránea del Campo de Belchite (ES091079). Corresponden a pozos que capturan el acuífero regional jurásico IGME-DGA (2009). Algunos pequeños pozos artesanales antiguos se usaban para captar niveles de conglomerado del Cenozoico para usos agrícolas, aunque muchos de ellos están abandonados actualmente.

5.8.5 Interacción entre el acuífero salino almacén y los acuíferos superficiales

El yacimiento de almacenamiento considerado en el proyecto está compuesto principalmente por el embalse Buntsandstein facies B1 (formación Aranda) y B2 (formación Carcalledo), además de las facies Röt (formación Rané), lutitas, margas y anhidrita como unidad de sellado del embalse. Los límites del complejo de almacenamiento incluirán la formación regional extendida de sellos (facies de Keuper) y la zona de descarga interpretada del sistema Triásico (según el modelo numérico de flujo de Fe), situada a 90 km al noreste de la estructura de Lopín, en la dirección del flujo de aguas subterráneas. En cuanto a la aparición de fallas subverticales en el yacimiento de almacenamiento, no diseccionan la facies de Keuper, que es la unidad de sello definitiva en la zona de prospecto española, evitando un posible impacto sobre el acuífero jurásico, que es el principal acuífero estratégico en este sector de la cuenca del Ebro.

En consecuencia: no se ha identificado conexión entre la zona de interés del Buntsandstein triásico y los acuíferos superficiales que podrían tener un uso local.

5.9 Condiciones sísmicas

La cuenca del Ebro, donde se encuentra Lopín, presenta una actividad sísmica relativamente baja de acuerdo al catálogo sísmico del Instituto Nacional Geográfico de España (IGN), que incluye registros de terremotos que datan de 1371. La sismicidad es más pronunciada en la Cadena Ibérica al sur, la Cordillera Costera de Cataluña al este y los Pirineos al norte. En 2003, todas las estaciones sísmicas de la red IGN se actualizaron a banda ancha, proporcionando datos en tiempo real con una cobertura amplia. La actividad sísmica cerca de Lopín es mínima, con solo 13 eventos registrados por la red entre 2020 y 2022.

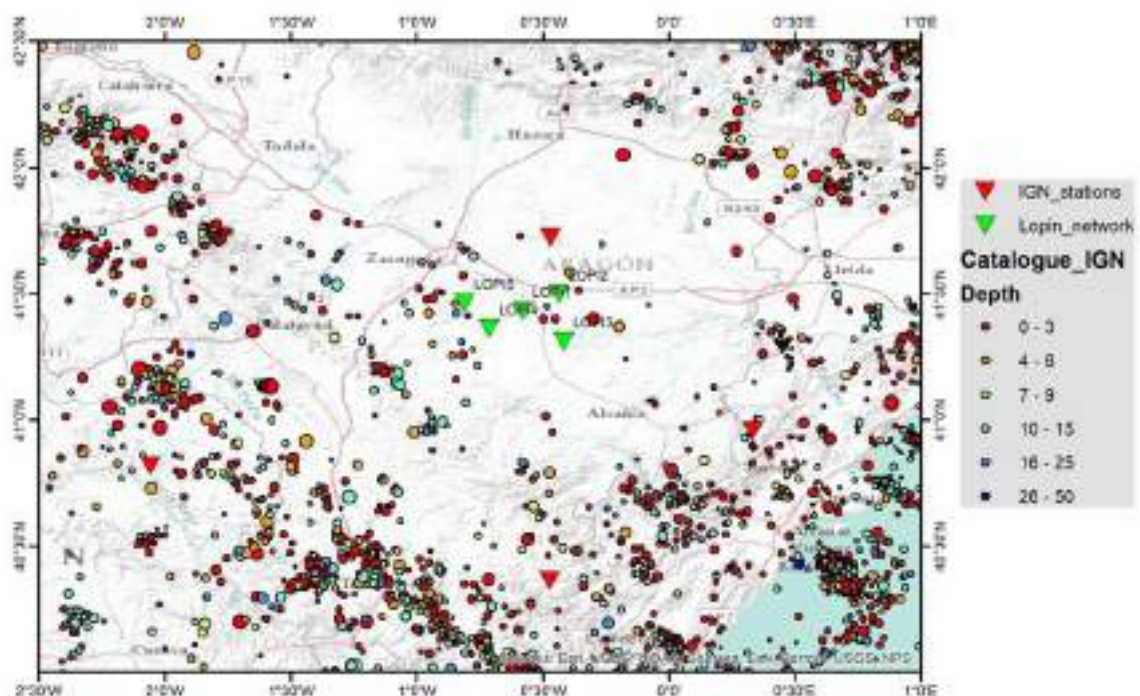


Figura 5. 15: Localizaciones de eventos sísmicos desde enero de 2003 hasta septiembre de 2024 (IGN)

Estos datos han sido revisados y estudiados los mecanismos focales para definir una red auxiliar de seguimiento y monitorización sísmica implementada durante 2025 y 2026 en el marco del proyecto PilotSTRATEGY. Esta red sísmica, de 5 sismógrafos, concluye que la región presenta un nivel de sismicidad muy bajo. Además, la configuración de las redes permanentes del IGN no favorece la detección de terremotos de pequeña magnitud. Por ello, para caracterizar adecuadamente la sismicidad local es necesario desplegar una red sísmica específica y mantenerla operativa durante un periodo suficiente para registrar un número representativo de eventos.

Los eventos sísmicos registrados con mayor frecuencia en la zona corresponden a explosiones asociadas a la actividad minera en canteras cercanas. Los registros de estas explosiones pueden diferenciarse claramente de los eventos tectónicos mediante las estaciones de la red temporal de Lopín.

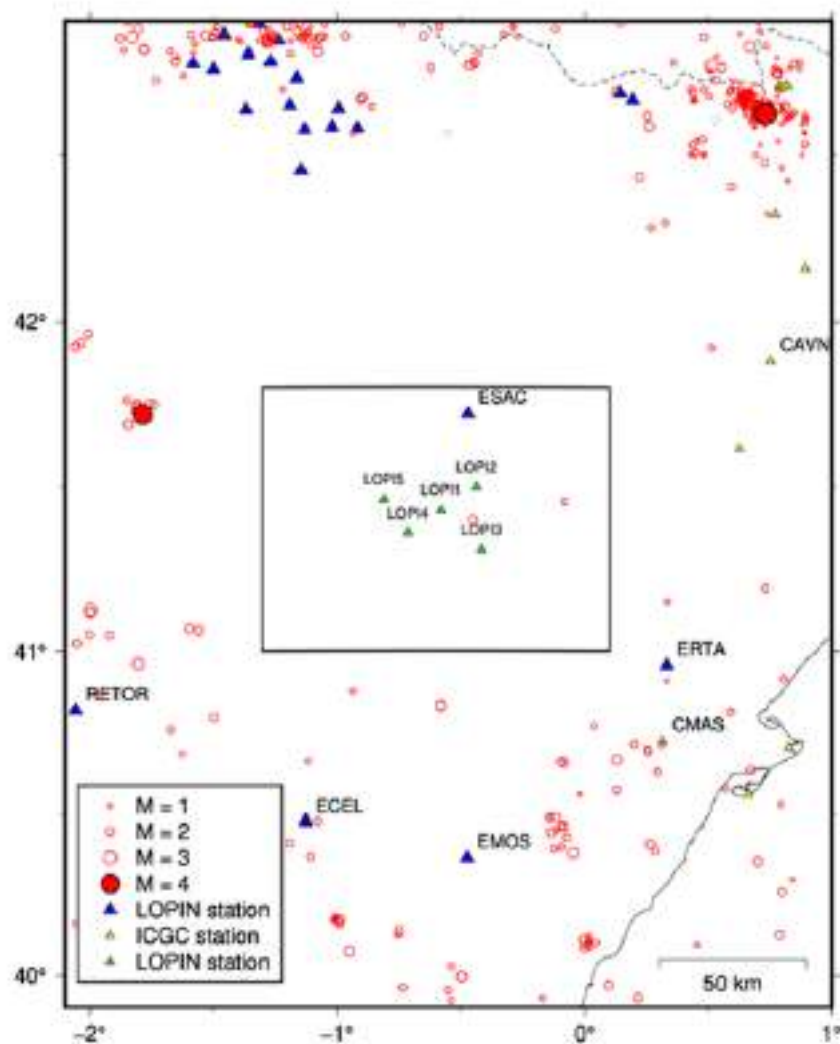


Figura 5. 16: Red sísmica instalada en la zona de estudio durante agosto de 2025 y agosto 2026

5.10 Tratamiento de los principales impactos del proyecto.

5.10.1 Calidad atmosférica, población y salud.

Teniendo en cuenta los núcleos de población más cercanos, los principales impactos sobre la calidad del aire en la fase de construcción se producirán por la emisión de partículas en suspensión y de gases de combustión, debido al desbroce de la vegetación, los escasos movimientos de tierra y el tráfico de vehículos. El EsIA considera que las partículas en suspensión no serán perceptibles a una distancia mayor a 100 m y que el impacto por la emisión de gases de combustión será compatible debido a la ventilación del área y al número de vehículos que se utilizarán. Asimismo, se prevé un incremento de los niveles de ruido debido a los trabajos de ejecución de la obra y al transporte de materiales y personas y, durante la fase de explotación, debido a las tareas de mantenimiento. Estos impactos se consideran poco significativos debido a la ausencia de núcleos de población cercanos.

Las principales medidas propuestas para garantizar la protección de la atmósfera y la calidad del aire son: humedecer las superficies, cubrir los vehículos que transporten material polvoriento, reducir la altura de descarga y no circular a más 30 km/h por caminos de tierra. Además, la maquinaria y los camiones deberán haber pasado las correspondientes inspecciones técnicas, se revisará la maquinaria para minimizar el ruido, se realizarán los transportes por carretera en los momentos con menor intensidad de tráfico y se tratará de reducir la duración de las obras, en la medida de lo posible.

Por otra parte, para prevenir la contaminación lumínica durante la fase de exploración y fase piloto, se propone instalar luminarias que no alumbren por encima del plano horizontal, controlar las intensidades de ciertas longitudes de onda, utilizar pavimentos oscuros y solo iluminar las zonas necesarias.

5.10.2 Suelo, geología y geomorfología.

El ámbito de actuación se sitúa en el borde meridional de la Depresión del Ebro, en un entorno semiárido caracterizado por relieves suaves. Los terrenos previstos para la actividad presentan pendientes muy reducidas, por lo que no se esperan movimientos de tierra significativos para la explanación. Tampoco se prevén afecciones al patrimonio geológico, ya que el Lugar de Interés Geológico más próximo, IB069 “Sucesión del Jurásico Inferior y Medio de Belchite-Almonacid de la Cuba”, se localiza a más de 5 km del proyecto.

Durante la fase de exploración se producirá ocupación y compactación del suelo, tránsito de maquinaria, acopio de materiales y pérdida de suelo fértil asociada a la retirada de la cubierta vegetal agrícola. Para minimizar el impacto en el ecosistema, durante la construcción en la fase piloto se trabajará en superficie vallada temporal y será restaurada tras la finalización de las obras. Asimismo, se identifican riesgos de contaminación del suelo y del subsuelo por vertidos accidentales y por las cimentaciones, junto con alteraciones geomorfológicas derivadas de la construcción de caminos internos y de la nivelación del terreno necesaria para implantar la infraestructura.

Durante la fase de piloto, la zona de trabajo estará muy limitada al entorno del pozo por lo que se limitará a esta zona el riesgo de compactación del suelo y el riesgo de vertidos accidentales.

No obstante, se prevé una mejora de las condiciones edáficas como consecuencia del abandono de la actividad agrícola y de la aplicación de actuaciones de integración ambiental.

Las principales medidas de protección del suelo y la geomorfología se centran en la correcta gestión de los residuos y en la prevención de derrames accidentales. Para ello, los aceites usados se almacenarán en depósitos herméticos, el mantenimiento de vehículos y la limpieza de canaletas se realizarán únicamente en zonas habilitadas, y los lavados de hormigoneras se efectuarán en origen. En caso de vertido accidental, se retirará el suelo contaminado y se emplearán sepiolita u otros materiales absorbentes para recoger los derrames.

Los suelos fértiles retirados se almacenarán adecuadamente y se reutilizarán en las labores de restauración. En la apertura de zanjas, la instalación del tramo de línea y el cierre de la zanja se realizarán de forma inmediata. Además, se ejecutarán obras de drenaje superficial para evitar la formación de regueros o cárcavas, y los viales se ajustarán, siempre que sea posible, a las trazas y anchuras existentes.

No se prevé una alteración significativa de la topografía o probabilidad de desencadenar procesos erosivos es reducida. Para garantizar la protección del suelo y la geomorfología, la resolución incorpora medidas específicas en su condicionado.

5.10.3 Hidrología.

El proyecto se localiza en la Cuenca Hidrográfica del Ebro, siendo el principal cauce del ámbito de estudio el río Aguasvivas, ubicado a 2 km al suroeste de la zona de implantación. Asimismo, la actividad se sitúa fuera de las zonas de inundación, según el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, localizándose la más próxima a más de 2 km al sur de la zona preliminar de ubicación del pozo exploratorio.

El principal impacto sobre la hidrología consiste en la alteración de la calidad de las aguas debido a posibles arrastres de material durante los movimientos de tierras o vertidos accidentales, principalmente de aceites procedentes de la maquinaria. También se prevé un incremento en el consumo de agua para riego de viales, vehículos y zonas de instalaciones, que se abastecerá mediante camión aljibe. El abastecimiento de agua para las instalaciones de higiene se realizará mediante camión cisterna y no se prevé la extracción de agua de cauces naturales. En la fase de explotación, se prevé una mejora en la calidad de las aguas debido al cese del uso de productos de construcción.

Para proteger la calidad de las aguas, se propone gestionar adecuadamente los efluentes sanitarios, no realizar vertidos al Dominio Público Hidráulico (DPH) y contratar a una empresa especializada para el riego, situar todas las instalaciones y áreas de acopios temporales fuera del DPH, solicitar autorización para realizar las canalizaciones bajo cauces y garantizar así el mantenimiento de la red fluvial actual y el régimen de escorrentías, evitar actuaciones que impliquen un aumento de la turbidez del agua y asegurar el correcto dimensionamiento de los drenajes.

Se confirma que no discurren cursos de agua superficial de carácter permanente, ni tampoco se identifican cursos temporales destacables.

5.10.4 Flora y vegetación. Hábitats de Interés Comunitario (HIC).

La vegetación potencial de la zona se corresponde con vegetación de clima semiárido en los que pueden crecer otros arbustos de clima mediterráneo. No obstante, debido a la actividad agrícola, los terrenos donde se ubicará la planta se localizan en el entorno de tierras de labor en secano, sin presencia de vegetación natural.

El principal impacto previsto sobre la vegetación es la eliminación de la cubierta vegetal agrícola por el acondicionamiento y la ocupación de los terrenos donde se localizan las infraestructuras del proyecto. Asimismo, no se han identificado ejemplares de taxones de flora protegida incluida en los catálogos nacionales o autonómicos.

No se prevé ninguna afección a Lugares de Interés Comunitario (LIC).

Se propone para el área de ocupación temporal posterior restauración y se aplicarán medidas de integración ambiental y paisajística. Durante la fase de explotación, el control de la vegetación situada bajo los seguidores se realizará mediante métodos mecánicos.

5.10.5 Fauna.

De acuerdo con la información pública existente, y realización de seguimiento durante 1 año para identificar los ejemplares a proteger en la zona, distancia a la zona de interés y posibles nidos se identifican en la zona de estudio y un radio de 5 km, se considera posible la presencia de varias especies de aves esteparias temporales, entre las que destacan: Aguilucho pálido (*Circus cyaneus*); Alcaraván común (*Burhinus oedicnemus*); Chorlito carambolo (*Charadrius morinellus*); Alondra ricotí (*Chersophilus duponti*); Aguilucho cenizo (*Circus pygargus*); Cernícalo primilla (*Falco naumanni*).

Además, otras especies con carácter permanente y que tienen un seguimiento por diversas organizaciones:

- Ganga ibérica (*Pterocles alchata*) que residente todo el año, aunque detectada con menos frecuencia durante el periodo reproductor, probablemente debido a que disminuye su detectabilidad. Se localizaron 1.387 ejemplares al este de la zona de implantación, a más de 2 km de distancia, coincidiendo con el final de los aerogeneradores del parque eólico «Belchite». Sin evidencias directas de nidificación, aunque debido a las características del hábitat y la presencia de ejemplares todo el año, el promotor considera que es muy posible la reproducción en el área.
- Ganga ortega (*Pterocles orientalis*): detectada durante todo el año, con mínimos en verano y principios de otoño. Se identificaron 85 ejemplares al este de la ubicación de la planta, con las detecciones más cercanas ubicadas a más de 2 km de esta. Con evidencias indirectas de reproducción, es probable que la especie críe en la zona de estudio.

Las zonas afectadas por el proyecto pueden quedar incluidas en el ámbito de aplicación del Plan de Conservación del cernícalo primilla en Aragón, aprobado en virtud del Decreto 233/2010, de 14 de diciembre, del Gobierno de Aragón, por el que se establece un nuevo régimen de protección para la conservación del Cernícalo Primilla (*Falco naumanni*) y se aprueba el plan de conservación de su hábitat, afectando tanto al ámbito de conservación, como a áreas críticas de la especie.

Adicionalmente, se localizaron otras especies de fauna en la zona de estudio, entre las que se encuentran el corzo (*Capreolus capreolus*), la gineta (*Genetta genetta*), la liebre común (*Lepus europaeus*), el conejo común (*Oryctolagus cuniculus*), el jabalí (*Sus scrofa*) o el zorro rojo (*Vulpes vulpes*), así como el sapo corredor (*Epidalea calamita*), o quirópteros como el murciélago enano (*Pipistrellus pipistrellus*), el murciélago de Cabrera (*Pipistrellus pygmaeus*) o el murciélago rabudo (*Tadarida teniotis*).

Durante la fase de exploración y construcción, se podría producir la alteración y pérdida de hábitats faunísticos, con una pérdida de refugios, de áreas de alimentación o puntos de cría, debido al cambio de uso del suelo y a la eliminación de la cubierta vegetal, que afectará especialmente a las aves, sobre todo a las especies esteparias que aniden en el suelo, y a los reptiles. Asimismo, las obras podrían producir un incremento de molestias y ruidos, que podría ocasionar el alejamiento de las especies más sensibles y la proliferación de las más adaptables, especialmente en época de reproducción. Se considera que esta afección es temporal y limitada durante el tiempo de duración de las obras. Por otra parte, se podría incrementar el riesgo de mortalidad por atropello, debido al aumento del tráfico de vehículos, aunque el promotor señala que este riesgo ya existe, debido al tráfico de la carretera existente. No se prevé afección a anfibios, dada la ausencia de zonas húmedas.

Durante la fase de explotación, el proyecto podría ocasionar efecto barrera y fragmentación del hábitat para la fauna terrestre, que podría conllevar la disminución de las poblaciones de algunas especies, además de las molestias y el riesgo de atropello derivado del tránsito de vehículos y de personas para las labores de mantenimiento.

No se prevé riesgo de impacto por colisión, dado que la infraestructura final se limita a una caseta y el riesgo de colisión para aves y quirópteros es bajo.

Las medidas propuestas para la protección de la fauna consisten en limitar la velocidad de circulación de los vehículos en la obra a 30 km/h, diseñar los viales de forma que se minimice el riesgo de atropello, evitar la apertura de nuevos viales y el tránsito de maquinaria fuera de los caminos, realizar una prospección en búsqueda de nidos en un radio de 1 km respecto a la zona de trabajo, previo al inicio de las obras, adoptando las medidas necesarias en caso de detección; e instalar sistemas de escape de fauna en zanjas que queden abiertas durante la noche.

Durante la fase de explotación, se propone poner en conocimiento del órgano ambiental los posibles incidentes con avifauna que ocurran, para adoptar las medidas complementarias necesarias. Además, no se utilizarán productos fitosanitarios y el control de la vegetación solo se realizará mediante métodos manuales, mecánicos o pastoreo ovino.

A la vista de resoluciones anteriores realizadas por el Gobierno de Aragón para la realización de actividades similares en la zona, dado que la presencia de especies de avifauna incluidas en los Catálogos Aragonés y Español de Especies Amenazadas y en el Listado Aragonés de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial (LAESRPE) es significativa, y que el proyecto se ubica en Área Crítica para el cernícalo primilla y, casi en su totalidad, en zonas preseleccionadas como áreas críticas en el Plan de Recuperación de las aves esteparias, se deberá llevar a cabo una prospección previa a la ejecución de las obras para la detección de ejemplares de avifauna amenazada o puntos de nidificación y que, durante el periodo de nidificación, entre marzo y julio, no se deberán iniciar las obras ni realizar tareas de mantenimiento durante la fase de

explotación, excepto aquellas urgentes. Asimismo, cualquier medida compensatoria adicional deberá ser valorada y consensuada con la Dirección General de Medio Natural del Gobierno de Aragón y puesta en marcha antes del inicio de la ejecución del proyecto o a la mayor brevedad posible, si es consecuencia de afecciones detectadas durante el seguimiento.

Asimismo, se contempla la posibilidad de medidas compensatorias como la incorporación de terrenos a un programa específico de manejo de hábitats destinado a la conservación de avifauna esteparia, cuya propuesta concreta será coordinada con el Servicio de Biodiversidad de la Dirección General de Medio Natural del Gobierno de Aragón.

5.10.6 Espacios Naturales Protegidos. Red Natura 2000.

No se prevé la posibilidad de un impacto directo o indirecto de importancia sobre las especies de aves o hábitats relacionados con estos espacios, aunque no se descarta por completo debido a los movimientos esporádicos que pueden realizar estas especies por la zona. En todo caso, los impactos previsibles sobre la vegetación, los hábitats y la fauna de estos espacios protegidos, las medidas previstas por el promotor en el documento ambiental y el contenido de los informes se describen en los apartados correspondientes.

5.10.7 Paisaje.

Según el Atlas de los Paisajes de España, el área de estudio se integra en la unidad paisajística «Glacis y mesas del sureste de Zaragoza y norte de la tierra de Belchite». Se trata de un paisaje característico de la Depresión del Ebro, formado por amplias planicies, localmente accidentadas, con una suave inclinación hacia el centro de la depresión o hacia los valles de sus principales afluentes.

El principal impacto paisajístico previsto se asocia a la alteración temporal de los componentes del paisaje durante las obras, debido a los movimientos de tierra, la retirada de la cubierta vegetal, la presencia de maquinaria, la apertura de zanjas y el acopio de materiales. Durante la fase de explotación, el impacto visual estará vinculado a la presencia de las infraestructuras de la planta, como módulos, inversores, viales y vallado. No obstante, el estudio de cuenca visual incluido en el EsIA concluye que la planta proyectada no incrementará, dentro de un radio de 10 km, la superficie desde la que serían visibles las infraestructuras fotovoltaicas y eólicas existentes o en tramitación.

Las medidas previstas incluyen la restauración de todas las superficies ocupadas temporalmente durante las obras y la revegetación de las áreas próximas a la planta y a la zanja de la línea de evacuación, conforme a un Plan de Integración Ambiental. Este plan contempla el desbroce y almacenamiento adecuado de la tierra vegetal para su posterior reincorporación a las zonas restauradas, previa descompactación cuando sea necesario. Asimismo, se prevé la creación de una pantalla vegetal con especies autóctonas para reducir el impacto visual y mejorar la conectividad paisajística, previa conformidad del órgano autonómico competente en materia de medio ambiente si así se requiere.

Además, se tendrá en cuenta que la zahorra utilizada en los viales sea de un color similar al de los viales existentes y se instalarán paneles informativos sobre la ubicación de los contenedores de residuos y otras medidas ambientales a tener en cuenta.

Para minimizar los efectos negativos sobre el paisaje durante la explotación, sería necesario que el plan de restauración incluya un apantallamiento vegetal en el vallado exterior de la planta, con vegetación autóctona y especies arbóreas.

5.10.8 Patrimonio cultural. Vías Pecuarias y Montes de Utilidad Pública.

En la zona de estudio no se localiza ningún yacimiento arqueológico, vía pecuaria o monte de utilidad pública que pueda verse afectado por la construcción de la planta. Considerando la posibilidad de localizar restos arqueológicos de interés debido a los movimientos de tierra, se extremará la precaución durante las obras y se comunicará al órgano competente la aparición de cualquier hallazgo, paralizándose la obra.

No se prevé afección a los dominios públicos forestal o pecuario, y en caso de producirse, se solicitará la concesión de uso privativo o la ocupación temporal de terrenos en vías pecuarias de titularidad de la Comunidad Autónoma de Aragón.

5.10.9 Sinergias y efectos acumulativos.

En la zona, se localizan varias plantas solares y, más alejados, dos parques eólicos en funcionamiento, uno de ellos con el que se plantea la hibridación, tres plantas solares y un parque eólico autorizados, pero no construidos; y dos plantas solares y un parque eólico en tramitación. Además, en este ámbito, se localizan tres carreteras y varias líneas eléctricas aéreas de alta tensión.

El principal impacto por efectos sinérgicos se producirá sobre la fauna por la pérdida de hábitat, el efecto barrera, la fragmentación y la transformación del paisaje y la pérdida de conectividad, aunque se considera que es un impacto compatible si se llevan a cabo las medidas propuestas centradas en la mejora de la conectividad del paisaje y de los hábitats.

Respecto al paisaje, la actividad no tendrá un efecto acumulativo y sinérgico importante sobre el paisaje de la zona de estudio, debido a la presencia de otras infraestructuras, como el parque eólico «Belchite» y las plantas solares próximas, y el bajo impacto visual de esta actividad.

Como conclusión del estudio de sinergias, se puede afirmar que los impactos ocasionados por el proyecto se consideran compatibles con el medio siempre y cuando se lleven a cabo las medidas correctoras que se planteen, centradas en la mejora de la conectividad del paisaje y de los hábitats.

5.10.10 Seguimiento actividad sísmica

De acuerdo con los estudios realizados durante el proyecto PilotSTRATEGY, se recomienda mantener la red sísmica durante el tiempo de la actividad.

5.11 Conclusiones

Los impactos ambientales previsibles se concentran principalmente en las fases de construcción y operación del piloto. Entre ellos destacan la ocupación y compactación temporal del suelo, la retirada de cubierta vegetal agrícola, el tránsito de maquinaria, la generación de polvo, ruido y contaminación lumínica, el riesgo de vertidos accidentales, las molestias a la fauna, la posible alteración de hábitats esteparios y el impacto paisajístico temporal. No se prevén afecciones significativas sobre cauces permanentes, zonas inundables, patrimonio geológico, yacimientos

arqueológicos conocidos, vías pecuarias, montes de utilidad pública o espacios Red Natura 2000, siempre que se apliquen las medidas preventivas y de seguimiento previstas.

Las medidas propuestas incluyen la limitación de la ocupación temporal, el uso preferente de accesos existentes, la restauración de suelos y superficies afectadas, la gestión adecuada de residuos y efluentes, la prevención y respuesta ante derrames, el control de polvo y ruido, la reducción de la contaminación lumínica, la protección de drenajes naturales y la revegetación con especies autóctonas. En relación con la fauna, se consideran esenciales las prospecciones previas, la restricción de obras durante el periodo de nidificación de aves sensibles, la limitación de velocidad, la minimización del tránsito fuera de caminos y la coordinación de posibles medidas compensatorias con la administración ambiental competente.

En conjunto, la estructura Lopín presenta interés como emplazamiento piloto para evaluar el almacenamiento geológico de CO₂ en la Cuenca del Ebro. La información disponible sugiere que los impactos ambientales serían, con carácter preliminar, compatibles o gestionables mediante una adecuada planificación, monitorización y aplicación de medidas preventivas, correctoras y compensatorias.

5.12 Bibliografía

5.12.1 Legislación de interés

Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono. <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0031>

Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. [BOE-A-2010-20049 Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.](#)

Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. [BOE-A-1973-1018 Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas.](#)

Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-12913>

Ley 11/2014, de 4 de diciembre, de Prevención y Protección Ambiental de Aragón. [BOE-A-2015-186 Ley 11/2014, de 4 de diciembre, de Prevención y Protección Ambiental de Aragón.](#)

Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas. [BOE-A-2015-10565 Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas.](#)

Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera

Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular

Ley 7/2010, de 18 de noviembre, de protección contra la contaminación acústica de Aragón

Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad

Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo del Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y del Catálogo Español de Especies Amenazadas

Real Decreto 556/2011, de 20 de abril, para el desarrollo del Inventario Español del Patrimonio Natural y la Biodiversidad

Real Decreto 1432/2008, de 29 de agosto, por el que se establecen medidas para la protección de la avifauna contra la colisión y la electrocución en líneas eléctricas de alta tensión

Real Decreto 204/2010, de 2 de noviembre, del Gobierno de Aragón, por el que se crea el Inventario de Humedales Singulares de Aragón y se establece su régimen de protección

Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición

Real Decreto 212/2002, de 22 de febrero, propuesto por los Ministerios de Medio Ambiente y de Ciencia y Tecnología, por el que se regulan las emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre

Real Decreto 524/2006, de 28 de abril, por el que se modifica el Real Decreto 212/2002, de 22 de febrero, resultado de la trasposición de la Directiva 2005/88/CE, por el que se regulan las emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre

Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.

Decreto 129/2022, de 5 de septiembre, del Gobierno de Aragón, por el que se crea el Listado Aragonés de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y se regula el Catálogo de Especies Amenazadas de Aragón

Decreto 45/2003, de 25 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se establece un nuevo régimen de protección para el quebrantahuesos

DECRETO 13/2021, de 25 de enero, del Gobierno de Aragón, por el que se declaran las Zonas de Especial Conservación en Aragón, y se aprueban los planes básicos de gestión y conservación de las Zonas de Especial Conservación y de las Zonas de Especial Protección para las Aves de la Red Natura 2000 en Aragón

5.12.2 Enlaces de interés

Instituto aragonés de Estadística. Censo anual de población. <https://www.aragon.es/-/censo-anual-de-poblacion>

<https://icearagon.aragon.es/atlas/Aragon/info/organizacion-politico-administrativa/delimitacion-administrativa/delimitacion-municipal>.

Instituto geográfico de Aragón. Visor 2D.
https://idearagon.aragon.es/visor/index.html?ACTIVE_LAYER=LIC_ES24%26VISIBLELAYERS=LIC_ES24,ENP_ES24,ZEPA_ES24

<https://patrimonioculturaldearagon.es/patrimonio/conjunto-historico-de-belchite/>

<https://belchite.es/wp-content/uploads/2024/01/Campo-de-Belchite-06-Memoria-de-la-contienda.pdf>

Gobierno de Aragón: Tramites relativos a la Evaluación Ambiental de proyectos [Trámites relativos a la Evaluación Ambiental de proyectos - Proyectos. 319. Gobierno de Aragón](#)

Resolución de 29 de septiembre de 2025, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto «Planta solar fotovoltaica hibridación "Belchite", de 13,5 MW de potencia instalada, y su infraestructura de evacuación, en el término municipal de Belchite, en la provincia de Zaragoza. [BOE-A-2025-21291 Resolución de 29 de septiembre de 2025, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto «Planta solar fotovoltaica hibridación "Belchite", de 13,5 MW de potencia instalada, y su infraestructura de evacuación, en el término municipal de Belchite, en la provincia de Zaragoza».](#)

Red natura. Ficha Estepas de Belchite. El Planerón-La Lomaza.
<https://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/sdf/#/sdf?site=ES0000136>

5.12.3 Documentos de interés

Aarnes, Jorg et al. (2024). DNV. UE Climate action. Guidance document 1. CO2 storage life cycle and risk management framework. Recuperado de 951d14ea-ce0f4753-92dd-35ba88920888_en

Aarnes, Jorg et al. (2024). DNV. UE Climate Action. Guidance document 3. Criteria for transfer of responsibility to the competent authority. Recuperado de f647725ce86f-4bea-b698-48c6b0390ad3_en

Aarnes, Jorg et al (2024). DNV. EU Climate Action. Guidance document Financial security and financial contribution. 9a6b221d-642e-499e-a5a0- 298ce1068b21_en

Blanco Pericana, A. et al. (2024). Report on optimization- injection strategy and storage capacity. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2024-10/PilotSTRATEGY_D3-3_Storage%20capacity%20optimization-FINAL_v1_1x.pdf

Canteli, P. et al (2024). Conceptual scenarios definition to enable decisión support. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2024-04/PilotSTRATEGY_WP4_D4_2_Conceptual%20scenarios_final.pdf

Canteli, P. et al (2025). Economic evaluation of alternatives and prioritization results. D4.9. pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2025-02/PilotSTRATEGY_WP4_D4_9_%20Economic%20evaluation%20of%20alternatives%20and%20prioritisation%20results_FINAL_23012025.pdf

Canteli, p. et al. (2026). Description and results of the probabilistic assessment and sensitivity analysis of the development concept. D4.11. pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2026-05/PilotSTRATEGY_WP4_D4.11_Economic%20assessment%20of%20the%20development%20concept%20by%20regions.pdf

De Dios, JC.; Martínez, R. The permitting procedure for CO₂ geological storage for research purposes in a deep saline aquifer in Spain. International Journal of Greenhouse Gas Control, 91, 102822 (2019)

Eguilior, Sonsoles et al (2025). Recommendations for safety and performance analyses of stoarge pilot in Ebro Basin. D5.3 pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2026-01/PilotSTRATEGY_D5.3_Safety%20and%20performance%20analysis%20Ebro%20Basin.pdf

Garcia Valderrama et al. (2023). Petrophysics. Reporto f all regions. D2.6 pilotstrategy. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2023-04/D2.6_PilotSTRATEGY_Petrophysics.pdf

Garcia F.-Valderrama et al. (2023). Report on geomechanical results. D2.8. PilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2023-04/D2.8_PilotSTRATEGY_Geomechanics.pdf

Garcia F.-Valderrama et al. (2024). Report on static modelling uncertaties. D3.2. PilotSTRATEGY. [Microsoft Word - PilotSTRATEGY D3-2 StaticModelling and Uncertainties Final 28022024 clean.docx](https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2024-03/PilotSTRATEGY_D3-2_StaticModelling_and_Uncertainties_Final_28022024_clean.docx)

Garcia F.-Valderrama et al (2024). Injector well and injection facilities design: methodology, definition and recommendations. D4.4 pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2024-04/PilotSTRATEGY_D4.4%20Injection%20Well%20and%20facilities%20method.pdf

Goncalves, Lila et al. (2026). Stakeholders engagement. D6.4 pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2026-02/PilotSTRATEGY_D6-4_RSC.pdf

Goncalves, Lila et al. (2026). Policy Brief. Guidelines for public engagement and recommendations. D6.7. PilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2026-03/PilotSTRATEGY_Deliverable_6-7.pdf

Lanchen, Lorenzo et al. (2025). From capture to the injection facilities definition. D4.5. pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2025-07/PilotSTRATEGY_WP4_D4.5_FINAL_16072025.pdf

Lechón, Y. et al. (2025). Socioeconomic impacto f CCUS pilot implementation. Methodology and application to Ebro Basin. D4.10. PilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2025-04/PilotSTRATEGY_D4.10_Socioeconomic%20impact%20of%20CCUS%20pilot%20implementati on_FINAL_03032025.pdf

López, Julio et al. Report on the regional hydrogeology of the three study areas. Deliverable 2.11, PilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2023-09/D2.11_PilotSTRATEGY_Regional_Hydrogeological_Systems_Final.pdf

Mediato, JF. et al. (2023). Conceptual Geological models. D2.7 pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2023-08/D2.7_ConceptualGeolModels.pdf

Moreno, Iván et al. (2023). Conceptual Geological models. ANEXO: Ebro basin Spain. D2.7 pilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2023-08/Deliverable_2.7_Ebro_Basin_Onshore_ANNEXES_v01-compressed.pdf

Olaiz, Antonio et al. Report on local seismicity for Lusitania & Ebro basin, including earthquake catalog. Deliverable 2.5 https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2024-10/PilotSTRATEGY_WP_2_D2_5_Report%20on%20Local%20Seismicity%20for%20Lusitania%20Ebro%20Basin_FINAL.pdf

Oltra, Christian et al (2025). Summary report on public acceptance. D6.5. PilotSTRATEGY. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2026-01/PilotSTRATEGY_Deliverable_6-5%2BAnnex.pdf

Osmond, Johnathon et al. (2024). DNV. UE Climate Action. Guidance document 2. Characterisation of the storage complex, CO2 stream composition, monitoring and corrective measures. Recuperado de 6f19cb98-b791-466d-8f3c-32c5bb12be2d_en

Ron, Manuel et al. (2025). Compiling of environmental impact assessment legal frame and permit requirements for CO2 geological storage. https://pilotstrategy.eu/sites/default/files/2025-07/PilotSTRATEGY_WP4_D4_7_FINAL_20250721_clean.pdf

Ron, Manuel et al. (2026). Permit Dossier: Operations, logistics and well maintenance plans descriptions. Well permits road map, MMV plan and HSE, emergency response and well containment plans. D4.6. pilotSTRATEGY <https://pilotstrategy.eu/about-the-project/work-packages/pilot-development>

Rubiera, Fernando et al. (2023). PTECO2. Objetivo Descarbonización. Necesidad de un Marco Normativo Favorable para las Tecnologías CAUC; CSIC, CIEMAT, [Objetivo Descarbonización. Necesidad de un Marco Normativo Favorable para las Tecnologías CAUC – PTECO2](#)

Rubio et al. (2022). D2.2 Gravimetric Survey. Lopín structure, Onshore Ebro Basin, Spain. PilotSTRATEGY deliverable. EU H2020 PilotSTRATEGY project 101022664, report, pp 30

Rud Pedersen para PTECO2. II Barómetro de las tecnologías CAUC 2025, (2025) [II Barómetro de las tecnologías CAUC 2025 – PTECO2](#)

6 Upper Silesia and West Macedonia environmental assessment frame

6.1 Upper Silesia Basin (Poland)

6.1.1 Introduction

This chapter presents the regulatory, environmental, and socioeconomic context for the proposed CO₂ storage project in the Pągów-Milanów area (Upper Silesian Basin, Poland). The concept is based on a phased approach, encompassing a pilot-scale injection phase and a potential commercial phase, subject to geological verification, permitting, and financial viability assessment.

The Polish legal framework for geological CO₂ storage is based on the transposition of Directive 2009/31/EC into the Geological and Mining Law. Following the amendment adopted in 2023, onshore CO₂ storage is legally permissible provided that projects meet geological, environmental, and safety requirements. However, Poland currently does not have an active CO₂ storage site, and CCS is still in the early stages of implementation. Upper Silesia is a region with a high concentration of industrial CO₂ emitters, a long history of underground mining, and significant cumulative environmental pressures. This combination makes it a significant, yet socially and environmentally sensitive, context for testing onshore CCS implementation. This chapter analyzes the proposed development path in light of the applicable legal framework, environmental impact assessment requirements, and regional conditions.

6.1.2 Legislative background and scope

The legal framework for geological storage of CO₂ in Poland is shaped by the implementation of the EU Directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide and the national Geological and Mining Law. Following the amendment of the GLA in 2023, Polish law allows for underground CO₂ storage on land, which is a significant step towards the development of CCS/CCUS in the country. Despite its large geological and industrial potential, this technology remains at an early stage of implementation in Poland, and the CCS infrastructure has not yet been built.

The primary legislation regulating geological CO₂ storage is the Geological and Mining Law, which defines the principles of geological activities, as well as requirements for safety, environmental protection, and technical conditions for work in underground structures. In 2023, amendments to the Geological and Mining Law and the Energy Law were adopted, aimed at facilitating the development of CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) technology and removing regulatory barriers that previously hindered activity in this area. The regulations require the preparation of geological work plans and environmental decisions consistent with EU directives, as well as compliance with regulations specifying areas where underground CO₂ storage is permitted. The new regulation expanded the list of permissible areas to include land, including the Łódź Basin, which represents a significant milestone for the planned pilot project near Pągów-Milanów.

Poland still faces regulatory and implementation challenges. Due to the legal and administrative environment, the actual development of CCS in onshore formations could take up to 10 years to achieve full operational readiness. Importantly, there is currently no separate national CCS strategy as a standalone document; work is underway on a CCUS strategy, and related international collaborations are planned (e.g., with Norway). Formal national commitments regarding minimum CO₂ storage targets have not been established.

The following Polish acts and regulations concern CCS

- Act of 9 June 2011 – Geological and Mining Law, Journal of Laws of 2024, item 1290, as amended. – The basic act regulating geological storage of CO₂, geological works, priority rights, and conditions for conducting geological activities.
- Act of 16 June 2023 amending the Geological and Mining Law and certain other acts, Journal of Laws of 2023, item 2029. – Amendment expanding the scope of regulations enabling CCS operations, including underground CO₂ storage.
- Act of April 27, 2001 – Environmental Protection Law, Journal of Laws (consolidated text, as amended). – Regulates general principles of environmental protection and environmental obligations for projects that may impact the environment.
- Act of October 3, 2008 – On the Provision of Information on the Environment and its Protection, Public Participation in Environmental Protection, and Environmental Impact Assessments, Journal of Laws 2008, No. 199, item 1227 (consolidated text, Journal of Laws 2024, item 1112). – Establishes the Environmental Impact Assessment (EIA) procedure and principles of public participation.
- Regulation of the Minister of the Environment of October 30, 2015, on detailed requirements for the operation of an underground carbon dioxide storage site, the injected carbon dioxide stream, and the monitoring of an underground carbon dioxide storage complex, Journal of Laws 2015, item 1840. – Specifies detailed technical and monitoring requirements for CCS.
- Regulation of the Council of Ministers of September 10, 2019, on projects that may have a significant impact on the environment, Journal of Laws of 2019, item 1839. – Defines a catalogue of projects that always or potentially have a significant impact on the environment and are subject to the EIA procedure.
- Regulation of the Council of Ministers of August 10, 2023, amending the regulation on projects that may have a significant impact on the environment, Journal of Laws of 2023, item 1724. – Amends the catalogue and conditions for conducting an environmental impact assessment, also applicable to CCS projects subject to EIA.
- Regulation of the Minister of Climate and Environment on areas in which underground carbon dioxide storage complexes are permitted – act under consultation (draft to be published in the Journal of Laws). – Draft new regulation that will expand the permitted locations, particularly in the onshore context, for CCS; the legal status in 2026 indicates ongoing legislative work without final publication.

6.1.3 The proposed scenario for the DSA Pągów-Milanów (Upper Silesia Basin, Poland)

The proposed development concerns a phased onshore geological CO₂ storage project located in the Pągów-Milanów area (Ładzice DSA, Jurassic Częstochowa District), within the broader Upper Silesia Basin case analysed in PilotSTRATEGY. The concept follows a staged approach, comprising a pilot phase followed by a potential commercial phase, contingent upon the results of geological verification and economic assessment.

- Capture
 - At this stage, no single CO₂ source has been formally selected. The concept assumes that CO₂ would originate from industrial emitters located within approximately 30–80 km from the storage site, including cement plants, steelworks, chemical plants, waste-to-energy installations and power or heat generation facilities.

- The capture technologies considered correspond to the industrial structure of the region and include mainly post-combustion systems (amine-based), while alternative technologies (membranes, PSA, oxy-fuel) may be relevant depending on flue gas characteristics. Capture costs and technical parameters were not re-evaluated in this project; indicative ranges are based on prior project assessments and literature.
- No detailed engineering design of capture installations has been prepared within this project.
- Transport

Two transport modes are foreseen, differentiated by project phase:

- Pilot phase (30 kt CO₂/year for 3 years): road transport using cryogenic tankers. Estimated volume corresponds to approximately 30,000 tonnes per year.
- Commercial phase (300 kt CO₂/year for 25 years): transition to pipeline transport over an assumed distance of approximately 80 km .

Road transport is considered technically feasible for limited volumes and enables separation of capture and storage investment timing. However, it is not regarded as scalable for long-term operation. Pipeline transport represents the target configuration for commercial deployment.

Detailed routing, land acquisition status and environmental corridor analysis have not yet been conducted and would require separate feasibility studies.

- Storage

The storage concept is based on modelling results obtained within WP3 of the PilotSTRATEGY project. The IN-1A injection well was identified as a reference case. Key reservoir parameters reported include:

- Estimated storage capacity: approx. 31 Mt,
- Average thickness: ~63.8 m,
- Porosity: 14.9–19.3%,
- Permeability: 153.8–955.9 mD,
- Reference depth: ~1000 m,
- Initial reservoir pressure: 108 bar,
- Temperature: ~38°C .

The pilot phase assumes injection of 30 kt/y for three years, while the commercial phase assumes 300 kt/y for 25 years, resulting in approximately 7.5 Mt injected over both phases. Monitoring obligations after closure are assumed to extend for at least 20 years, in line with Polish Geological and Mining Law requirements.

No final investment decision has been taken. The proposed development remains at conceptual and pre-investment stage, and further geological verification, environmental assessment, permitting and financial structuring are required before implementation.

6.1.4 The framework of environmental assessment

The proposed CCS concept for Upper Silesia, which includes a pilot project of 30 ktCO₂/y for 3 years, followed by a potential increase to 300 ktCO₂/y for 25 years, with post-closure monitoring, is located in a region with a long history of industry and mining and a high population density, making public acceptance and cumulative environmental burdens key issues. Upper Silesia is a region with significant air quality challenges, primarily related to particulate matter, as well as other pollutants associated

with industry, energy sources, and residential heating. This baseline is important for CCS because it shapes risk perception and expectations of environmental benefits beyond climate change mitigation.

The following environmental aspects and potential impacts were identified:

- Surface and land use: oil platforms, temporary construction sites, and (in the commercial case) a linear pipeline corridor; These may conflict with local spatial planning and sensitive receptors (residential areas, agricultural land).
- Transportation-related impacts: During the pilot project, additional traffic, noise, and local emissions occur; these are usually significant socially, even if they are not climate-related compared to CO₂ emissions.
- Underground hazards: EIAs and permits cover tank integrity, potential leakage pathways, and monitoring/remediation measures. A key requirement in Poland is long-term post-closure monitoring (the minimum period specified in practice in the Polish Geological and Mining Law and project documentation).
- Factors for issuing an environmental permit: Exploratory drilling and the storage project are subject to the Polish EIA system (screening/potential full EIA depending on the scope and classification in accordance with the Regulation of the Council of Ministers on Projects That May Have a Significant Impact on the Environment, amended in 2023).

Public acceptance of CCS technology is strongly influenced by trust, perceived local risks/benefits, and transparency of monitoring and liability arrangements, not solely by climate considerations. This is particularly important in industrialized regions, where communities have prior experience with environmental impacts. Therefore, the following actions are essential:

- Early and ongoing stakeholder engagement (local authorities, residents, landowners), with a clear explanation of what constitutes a pilot project versus a commercial project, and what decisions trigger the scaling process.
- Transparent MMV reporting: publicly available monitoring summaries (without disclosing safety-sensitive details) to address trust and the "unknowns" typical of underground projects.
- Traffic and nuisance management during the pilot (procedures) and careful corridor selection and pipeline restoration plans.

At the feasibility/permitting stage, before making the final decision on the investment, it is necessary to prepare social research on specific locations (survey results, stakeholder mapping, local constraints), as well as to conduct a full environmental impact assessment (EIA) for the planned scope of drilling/injection.

6.1.5 Monitoring strategy and corrective measures

Within the reservoir formation and overlying containment layers, the following are planned:

- Pressure and temperature monitoring in the injection well – continuous measurement of pressure at the wellhead and in the reservoir zone (using installed permanent sensors) and temperature, which will enable observation of the injection process and detection of deviations (e.g., sudden pressure increases that may indicate capacity constraints or blockages).
- Passive seismic monitoring (microseismic) – installation of geophones (e.g., in the injection well or nearby existing wells) to listen for possible minor earthquakes induced by injection. This will allow the detection and localization of microseismic events, providing insight into

fracturing processes or fluid movement within the reservoir. Periodic geophysical profiling of the wellbore – e.g., cased-hole measurements (read: behind the column) such as saturation logs, temperature logs, cement bond logs, etc., performed during and after injection to assess wellbore integrity and potential changes in CO₂ saturation in the near-wellbore zone.

- 4D seismic (time-lapse) surveys – repeated 3D seismic surveys are being considered before injection (to establish a baseline) and after injection of a sufficient amount of CO₂ to image the distribution of CO₂ in the reservoir. Although expensive, 4D seismic can provide direct confirmation of the location and extent of the CO₂ plume in the formation. The pilot project likely involves conducting at least two such surveys (a baseline survey and one monitoring survey), depending on available funding and the effectiveness of other methods. Other underground techniques – e.g. geochemical measurements of formation fluids (analysis of water samples from the deposit zone, if possible, to detect the presence of dissolved CO₂ and chemical changes) or geomechanical observations (e.g. inclinometers, measurements of deformation in the borehole) if the risk of rock mass deformation is identified.

The plan assumes several complementary methods in subsurface geological layers, groundwater, soil, or the atmosphere:

- Groundwater monitoring – periodic sampling in nearby wells or specially drilled shallow piezometers (e.g., reaching the first usable aquifer) for chemical analysis. Increases in dissolved inorganic carbon concentration, changes in pH, or the appearance of trace gases may indicate CO₂ migration into groundwater.
- Measurements of soil gases and CO₂ flux from the ground – deployment of a network of measurement points above the landfill area (and in reference zones) to detect anomalies in CO₂ concentration in the soil and to measure CO₂ leakage from the ground surface. This type of monitoring allows for the identification of even small CO₂ leaks to the surface and is required by regulations as part of verifying the integrity of the landfill. Surface atmospheric monitoring – optionally, near-surface CO₂ concentration sensors or mobile measurements (e.g., using drones or vehicles equipped with analyzers) to detect and localize potential CO₂ emissions into the atmosphere.
- InSAR (Insar Interferometry) – analysis of satellite data to detect vertical movements of the terrain above the repository. Significant elevation of the terrain (a few mm) could indicate an increase in subsurface pressure. This technique, combined with modeling, can help assess pressure and volume changes within the reservoir.
- Visual inspection and site surveys – regular inspections of nearby geological outcrops, old boreholes and wells (if any), and surface installations to detect potential leaks (e.g., gas bubbles in the water, mineral deposits associated with leaks, etc.).

Sources of CO₂ leakage into the air during the storage process may include:

- 1) transport pipeline components: flanged connections, shut-off fittings (valves, gate valves), measuring devices mounted on the pipeline (flow meters, pressure gauges, thermocouples), pumps.

Carbon dioxide has no erosive or corrosive properties; pipelines operate within stable pressure and temperature parameters, so pipelines and welded joints can only be a source of emissions in emergency situations (tectonic movements, mechanical damage, e.g., related to road accidents or acts of terrorism).

2) storage tanks, including:

- the tank roof, where diffusion processes can occur through layers with good gas permeability,
- discontinuities and faults resulting from the tectonic structure of the tank, especially in layers close to the ground surface,
- damage to the tank structure resulting from the presence of high pressures during the filling phase,
- outcrops of low-permeability geological layers on the tank surface, as well as outcrops of aquifers and underground water reservoirs,
- gas injection wells and wells for monitoring the tank filling level (corroded well casing, flow on the outer casing wall),
- unexploited wells from drillings made in the past for research or production purposes,
- drinking water wells.

CO₂ escaping through these pathways can accumulate, as mentioned above, in artificial or natural depressions, building basements, but also in deep water reservoirs (lakes, ponds).

The primary goal of monitoring will be to ensure the health and safety of people both employed in the operation and living along the pipeline route, within the reservoir, and in the adjacent zone. Air monitoring has only limited application in balancing the injected CO₂ volume and can be helpful in identifying sources of losses.

3) Continuous monitoring of the transmission pipeline should include the installation of CO₂ detectors in pumping rooms, around gate valves and valves, around injection heads, and a network of sensors along the pipeline.

4) Technical monitoring of the tanker – pressure and temperature sensors, safety valves, liquid level control, periodic ADR inspections; logistics monitoring, detectors in unloading areas, cameras/SCADA in the yard, safety zones around the unloading point, with a focus on point safety – the yard, quick connectors.

5) Monitoring of the reservoir surface will include two networks:

- a system for measuring gas concentrations in soil air in areas with a potentially high leak probability (old boreholes, wells, tectonic disturbances). The number and placement of sensors should be determined after a thorough site analysis and a series of measurements conducted during the initial phase of CO₂ injection.
- the Eddy Covariance System, which is a technique for continuously measuring changes in CO₂ concentration above the ground while simultaneously measuring meteorological changes (wind speed, humidity, temperature).

Potential emergency scenarios identified in the risk analysis and the associated corrective actions were developed using the results of the MiReCOL project, which developed a set of remedial techniques and procedures for CO₂ storage (gfzpublic.gfz-potsdam.de). The following categories of corrective measures were identified:

- Reservoir pressure increase – continuous measurement of well pressure. Operational (preventive) actions: If pressure increases above predetermined limits or other alarming trends are observed, immediate steps such as reducing the injection rate or temporarily

suspending injection are planned. This will stabilize the situation and prevent potential damage to the formation seal. CO₂ migration in the reservoir – 4D/VSP seismic every 2-3 years

- Pressure management: If CO₂ is spreading in an undesirable direction or too rapidly, a relief well (producing formation fluid from elsewhere in the structure) is considered to reduce the pressure and inhibit CO₂ migration. Alternatively, it would be possible to reverse the process – i.e., partially extract the injected CO₂ back (so-called back-production), which has already been demonstrated, for example, in the Ketzin project in Germany (co2ketzin.de). Well leaks – well logs, cement bond logs every 1-2 years
- Surface leak – piezometers, CO₂ detectors, continuous monitoring
- Terrain deformation – quarterly InSAR measurements
- Sealing migration in a fault or conductive layer: If monitoring indicates CO₂ leaking along a fault or through a semi-permeable layer, the plan includes the possibility of special sealing treatments. Examples include selective injection of sealing materials (e.g., particle suspensions, polymer resins) through an existing well or an additional technical well to block migration paths. MiReCOL provides potential solutions, such as the injection of sealing gel into the fault zone.
- Well intervention (well remediation): If a leak is suspected in an injection well or other old well in the area, immediate maintenance actions are planned. These may include: applying additional cement (squeeze cementing) to potential micro-channels in the annular cement, replacing damaged well components, or even re-plugging the problem hole to the highest standards. The operator will ensure that a workover team and appropriate materials are available for rapid intervention.
- Enhanced monitoring: In parallel with the above activities, if anomalies are detected, monitoring will be intensified – using denser measurements and additional methods (e.g., a 3D seismic campaign outside the planned schedule) – to accurately assess the scale of the problem and the effectiveness of the remedial measures taken.

6.1.6 Summary

The proposed CO₂ storage project in the Pągów-Milanów area is being implemented in stages, consisting of a pilot phase and potential commercial scale-up.

The concept assumes CO₂ supplies from industrial sources within a 30-80 km radius and envisages road transport in the pilot phase, with a transition to pipeline transport in the commercial phase.

The Polish regulatory framework for CO₂ storage provides a legally defined, sequential permitting process under the Geological and Mining Law and environmental regulations. While this framework ensures regulatory transparency and is aligned with EU requirements, it is characterized by a multi-stage approval process and a concentration of risks and costs in the pre-investment phase.

From an environmental perspective, the project requires compliance with the national EIA system, including subsurface integrity assessment, leakage scenarios, and long-term monitoring obligations. Public acceptance is particularly important in Upper Silesia due to the high population density and the cumulative impact of industry. The project remains in the conceptual and pre-investment stages. Final feasibility depends on geological confirmation, completion of environmental procedures, economic assessment, and investment decision. A final investment commitment has not yet been made.

6.2 Macedonia Basin (Greece)

6.2.1 Introduction

Greece is progressively establishing a more coherent regulatory framework for the environmental permitting of Carbon Capture and Storage (CCS) projects, including geological CO₂ storage developments such as the Prinos CO₂ Storage Project. In recent years, Greece has introduced targeted legislative amendments that clarify the environmental licensing requirements for CO₂ storage activities, strengthen climate-related assessment criteria, and align national procedures with Directive 2009/31/EC^[1] on the geological storage of CO₂. The newly enforced Law No. 5216/2025^[2] refers to the adoption of a dedicated national CCS law, establishing for the first time a comprehensive and straightforward legal framework for CO₂ capture, transport and geological storage in Greece. From now on, the geological CO₂ storage is recognised as a distinctly regulated activity, rather than being indirectly evaluated under generic industrial or offshore categories. According to this Law, the Prinos CO₂ Storage Project constitutes a reference case for the implementation of the new CCS legal framework, particularly for offshore storage.

These changes significantly affect the scope, content, and procedural steps of EIA for CCS projects, particularly those involving offshore storage and long-term subsurface operations. Additionally, the updated legal amendments emphasise the transition from a general EIA-based approach to a CCS-specific, climate-aligned permitting regime.

6.2.2 Legislative background and scope

Prior to the recent legal updates, environmental permitting in Greece was determined by Law 4014/2011^[3], which deployed a horizontal EIA framework applicable to all major projects. According to this legislative framework, projects were classified into Category A or B based on their expected environmental impacts, whereas CO₂ storage was not recognised as a distinct activity (Government Gazette A' 209/21.09.2011, Articles 1-4, pp. 1-6). As a result, CCS projects were evaluated indirectly under broader industrial, energy, offshore, or drilling-related categories, without specific requirements to address long-term subsurface storage or climate performance.

Law No. 5216/2025^[2] has fully transposed the EU Directive 2009/31/EC^[1] into Greek law and defines the scope, governance, and permitting procedures for CCS activities. According to Article 2 of new legal form (pp. 3-6), CCS activities include capture (including Direct Air Capture), transport, liquefaction, injection, and permanent geological storage of CO₂. Article 2 (pp. 6-8) depicts the amendments covering all cases of onshore, offshore, sub-seabed, and sub-lacustrine storage. Moreover, in Article 7(2) (pp. 12-13) is mentioned the distinction of small-scale pilot experimental storage from full-scale storage operations, which is below 100 kt CO₂. Law No. 5216/2025^[2] in its Article 4(3) (pp. 9) has clarify the characterisation of CO₂ as non-waste, removing previous legal gaps in environmental permitting.

6.2.3 Alignment with the National Climate Law (Law 4936/2022)

The implementation of the National Climate Law (Law 4936/2022)^[4] introduces national defined climate goals established by law and required the systematic integration of climate aspects into environmental permitting. In Article 18 (pp.15-17), it is referred that the assessment of greenhouse gas emissions, mitigation measures, and long-term climate risks within EIAs is mandatory. Combining

the National Climate Law (Law 4936/2022)^[4] with the Law No. 5216/2025^[2], CCS is promoted as a strategic mitigation tool that supports national climate targets, as CCS projects are now legally framed as climate-relevant infrastructures and not merely environmental risk sources. National climate objectives are promoted and not questioned through the deployment of CO₂ storage projects.

6.2.4 Scope of application

These requirements apply to all Category A projects under Law 4014/2011^[3], which include CCS projects and activities that are expected to have significant environmental impacts due to their scale, nature, location, or duration. Category A projects are further classified into Subcategory A1 (projects with very significant environmental impacts of national or transboundary importance) and Subcategory A2 (projects with significant environmental impacts at regional level), based on criteria such as project size, use of natural resources, emissions, waste generation, and potential risks to sensitive environmental receptors. Due to their long operational lifetimes, subsurface interventions, and potential long-term environmental effects, CCS and geological CO₂ storage projects are classified under Category A, Subcategory A1, and are therefore subject to full Environmental Impact Assessment and approval of Environmental Terms (AEPO). Offshore projects, such as Prinos, fall fully within national jurisdiction under the new Law No. 5216/2025^[2]. According to this, exploration permits, storage permits, and EIAs are now legally interconnected, shaping a compact regulatory chain rather than separate procedures.

6.2.5 Changes to the content of Environmental Impact Assessments

Following the adoption of the National Climate Law, the mandatory content of Environmental Impact Assessments (EIAs) for Category A projects was revised through Ministerial Decision YPEN/DIPA/143898/9866/2024^[4]. According to these revisions, EIAs are now required to explicitly address lifecycle greenhouse gas emissions, climate mitigation, and adaptation measures, and long-term climate-related environmental risks ensuring that EIAs are fully aligned with national climate objectives (Government Gazette B' 7322/31.12.2024, Article 1, Annex I, pp.3-18). However, Law No. 5216/2025^[2] describes the additional requirements for EIAs to demonstrate long-term storage integrity, including containment performance, plume behavior, and pressure management. It is mandatory to evaluate leakage scenarios, corrective measures, and contingency planning, directly linked to CCS risks. Moreover, the integration of monitoring plans and post-closure obligations has already described in details at the EIA stage. Financial guaranteed and operator responsibilities for environmental protection and remediation are required to be provided.

6.2.6 Implications for environmental permitting

Compared to the previous environmental permitting legislation, the updated legal framework broadens the scope of environmental assessments in order to include climate performance as a major evaluation element. Additionally, it emphasises on long-term impacts, rather than short- or medium-term effects as previously. Moreover, it provides greater regulatory clarity regarding the complex projects involving subsurface and offshore operations. The new amendment enhances the legal certainty for both competent authorities and project developers. Concerning the CCS projects, these changes create a more straightforward and predictable permitting pathway that reflects their strategic role in climate mitigation. Articles 9-11 (pp. 15-22) of Law No. 5216/2025^[2] indicate the legal shift from fragmented permitting to a clear, sequential CCS licensing procedure, following the stages of exploration, storage, operation, closure, and post-closure accordingly. As a result, the CCS permitting procedures are integrated with environmental licensing ones under Law 4014/2011^[3]. The role of Competent CCS Authority (HEREMA-Hellenic Hydrocarbons and Energy Resources

Management Company), is strengthened and promoted as a central coordinating body alongside environmental procedures. The legal certainty for developers is increased through defined responsibilities, monitoring obligations, and liability transfer mechanisms. The treatment of long-term and post-closure risks should be definitely part of permitting decisions and not residual or secondary issues.

6.2.7 Relevance for CO₂ storage and CCS projects

Under the revised legal framework, CCS projects, such as Prinos CO₂ project and the PilotSTRATEGY Mesohellenic Basin pilot are subject to a permitting process aligned with climate objectives and long-term risk management. The new requirements ensure the detailed consideration of long-term subsurface integrity, monitoring, and post-closure obligations, and cumulative environmental risks. The Table E-1 below mentions the evolution of the EIA framework for CO₂ storage projects in Greece.

Table E-1 : Evolution of the EIA framework for CO₂ storage projects in Greece (Before / After)

Aspect	What applied before	What changed now	Legal reference
Legal recognition of CO ₂ storage	CO ₂ storage not explicitly recognised; assessed indirectly under broader industrial, energy, offshore or drilling-related project categories	CO ₂ storage explicitly recognised as a distinct regulated activity within a dedicated CCS legal framework	Law 4014/2011 Law 5216/2025
Regulatory framework	Horizontal EIA framework applicable to all projects, without CCS-specific provisions	Dedicated CCS framework defining scope, governance, and permitting procedures	Law 4014/2011 Law 5216/2025
Project classification	Case-by-case classification under general project categories	CCS projects explicitly classified as Category A – Subcategory A1 , reflecting their scale, duration, and long-term impacts	Law 4014/2011 Law 5216/2025
EIA obligation	EIA required under general criteria, without CCS-specific assessment elements	Full EIA mandatory for CCS projects, integrated with CCS-specific permitting stages	Law 4014/2011 Law 5216/2025
Climate considerations in EIA	Limited or implicit consideration of climate aspects	Mandatory assessment of greenhouse gas emissions, mitigation measures, and long-term climate risks	Law 4936/2022, Art. 18

EIA content	Standard environmental parameters (air, water, soil, biodiversity)	Expanded EIA content including lifecycle GHG emissions, climate mitigation and adaptation measures, and long-term climate-related risks	MD YPEN/DIPA/143898/9866/2024
Long-term subsurface risks	Not systematically addressed; limited focus on post-operational phase	Explicit assessment of long-term storage integrity, leakage scenarios, monitoring, corrective measures, and post-closure obligations	Law 5216/2025 MD YPEN/DIPA/143898/9866/2024
Pilot vs commercial storage	No clear legal distinction between pilot-scale and commercial storage	Clear differentiation between pilot/experimental storage (<100 kt CO ₂) and full-scale commercial storage	Law 5216/2025, Art. 7
Legal status of CO ₂	Legal ambiguity regarding classification of CO ₂ (potentially treated as waste)	CO ₂ intended for geological storage explicitly classified as non-waste	Law 5216/2025, Art. 4
Permitting pathway	Fragmented permitting under multiple sectoral regimes	Structured, sequential CCS permitting pathway (exploration, storage, operation, closure, post-closure)	Law 5216/2025
Regulatory certainty for CCS	High regulatory uncertainty, especially for offshore and long-term projects	Increased legal clarity, predictability, and robustness for CCS investment and implementation	Law 5216/2025

Prinos is the first CCS project deployment under the new national legal framework and its potential alignment with PilotStrategy pilot case of Mesohellenic Trough would promote EU-level CCS principles, enabling future scaling. The Greek State has now a clearer regulatory condition to manage investment decisions, particularly regarding liability, monitoring, and post-closure procedures.

Overall, the transition from the former general EIA framework to the current climate-integrated regulatory approach provides clearer and more predictable conditions for CCS development, helping projects move from conceptual and pre-FEED stages towards implementation and operation by significantly reducing regulatory uncertainty.

6.2.8 Linking the Law No. 5216/2025 with the techno-economic maturity of the Prinos CO₂ Storage Project

The adoption of Law No. 5216/2025^[2] has set the fundamentals of shaping the economic concept of the CO₂ Storage in Prinos. The precise definition of permitting procedures, long-term operational responsibilities, monitoring requirements, and post-closure obligations, reduces regulatory uncertainty and provides a stable basis for economic planning over the full life cycle of the storage site. Although numerical cost values, (CAPEX/OPEX) are not publicly disclosed, the techno-economic assessment of Prinos is developed using assumptions that are fully aligned with legally defined obligations.

At this stage, detailed CAPEX and OPEX figures for the Prinos CO₂ Storage Project have not been made public, which is common practice for CCS projects that are advancing through permitting and investment decision processes. Nevertheless, as documented in publicly disclosed Non-Technical Summary^[5], Prinos is designed as a phased, large-scale offshore storage project (initially up to 1 MTPA, expandable to ~3 MTPA), leveraging existing infrastructure and addressing long-term storage integrity, monitoring, and risk management requirements in accordance with the Law No. 5216/2025^[2]. In this context, the new CCS legislation goes beyond enabling environmental permitting and provides solid foundation for the Prinos techno-economic case, promoting its economic viability, investment readiness, scalability assumptions, and facilitating the project's transition from conceptual and pre-FEED stages to implementation and operation.

1. Directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide, in 2009/31/EC. 2009, L 140/114, 5.6.2009.
2. Regulations on the capture, utilisation, transport and storage of carbon dioxide – Transposition of Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide, and amending Council Directive 85/337/EEC, Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC and 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council, and Regulation (EC) No 1013/2006 (OJ L 140). in Law No. 5261. 2025, Government Gazzete A' 231/12.31.2025.
3. Specification of the procedures for opinions, public information, and participation of the interested public in the public consultation process during the environmental permitting of Category A projects and activities under Ministerial Decision No. 1958/2012 (Government Gazette A' 21), pursuant to Article 19, paragraph 9 of Law 4014/2011 (Government Gazette A' 209), as well as any other relevant detail., in No. 1649/45. 2014, Government Gazette B' 45/15.01.2014.
4. Amendment of the contents of the environmental impact studies for Category A projects and activities under Law 4014/2011, in order to align them with Article 18 of the National Climate Law (Law 4936/2022). in Government Gazette B' 7322/31.12.2024. 2024, Ministerial Decision YPEN/DIPA/143898/9866.
5. EnEarth Greece, CO₂ Storage Unit in Prinos, Non-Technical Summary (NTS). 2025.

7 Annex A: Preliminary Environmental Plan for Lusitania Basin- English version

Preliminary Environmental Plan

Deliverable 4.8

Lusitanian basin pilot - Portugal

Release Status: Public

Authors:

University of Évora: Rui Veloso, Pedro Madureira, Carlos Ribeiro, Júlio Carneiro

ICS-UNL: Ana Delicado,

GALP: Maria Helena Caeiro, João Casação

MARE (Marine and Environmental Sciences Centre): Soraia Vieira, João Paulo

Medeiros, Helena Adão, José Lino Costa

Date: 02 / 02 / 2026

Filename and Version: PilotStrategy_EIA_ENG_V1

Project ID Number: 101022664

PilotSTRATEGY (H2020- Topic LC-SC3-NZE-6-2020 - RIA)

@pilotstrategy

www.pilotstrategy.eu

© European Union, 2021

No third-party textual or artistic material is included in the publication without the copyright holder's prior consent to further dissemination by other third parties.

Reproduction is authorised provided the source is acknowledged.

Veloso, R.; Madureira, P.; Ribeiro, C.; Carneiro, J.; Delicado, A.; Caeiro, MH.; Casacão, J.; Vieira, S.; Medeiros, JP.; Adão, H.; Costa, JL. 2026. EIA report. WP4-Deliverable D4.8, Annex PilotSTRATEGY EU project (101022664)

Disclaimer

The information and views set out in this report are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union institutions and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information contained therein.



1. Executive summary

This deliverable constitutes the Preliminary Environmental Plan (PEP) that supports the environmental screening of the CO₂ storage pilot of the PilotSTRATEGY project in Portugal, located offshore from Figueira da Foz. The document aims to identify potential environmental risks and define preventive, mitigation and monitoring measures associated exclusively with the exploration phase, comprising 3D seismic acquisition and exploratory drilling of the injection well. Activities related to CO₂ transport, injection and operation are not included and will be subject to a dedicated environmental assessment procedure before implementation of the Pilot project.

The project area is located on the Portuguese continental shelf within the Lusitanian Basin and is characterised by environmental heterogeneity. Based on available baseline information, five benthic community types (A2, A3, B1, C1 and C2) were identified. Communities associated with fine and muddy sediments (C1 and C2) present higher sensitivity and lower resilience to physical disturbance, while coarse sediment communities (A2 and A3) exhibit greater recovery potential and may serve as reference conditions.

The assessment indicates that seismic acquisition may generate temporary acoustic disturbance, while exploratory drilling constitutes the phase with higher potential environmental significance due to direct seabed interaction, sediment deposition and continuous noise. Provided that the proposed mitigation measures, seasonal planning constraints and the BACI-based monitoring programme are implemented, the exploration phase is considered environmentally acceptable for screening purposes.

This Preliminary Environmental Plan (PEP) does not replace or anticipate the need for a future Environmental Impact Assessment (EIA), should such a procedure be required under applicable legislation. The results presented are produced in the framework of a R&D project (PilotSTRATEGY), but can constitute the support for environmental screening, scoping and early regulatory decision-making for the exploration phase.

Index

1. Document History	Error! Bookmark not defined.
1.1 Location	Error! Bookmark not defined.
1.2 Revision History	Error! Bookmark not defined.
1.3 Authorisation	Error! Bookmark not defined.
1.4 Distribution	Error! Bookmark not defined.
2. Executive summary	3
3. Introduction	6
3.1 The PilotSTRATEGY project	6
3.2 Scope of the document.....	8
4. Regulatory, Environmental and Technical Context of the CO₂ Storage Site	9
4.1 Legal and institutional framework for CCS activities	10
4.1.1 Pilot Phase Permitting.....	11
4.1.2 Commercial Phase Permitting.....	12
4.1.3 Environmental Impact Assessment.....	14
4.1.4 EIA Requirements and Regulatory Context for CCS Projects	15
4.1.4.1 Environmental Impact Assessment Process.....	17
4.1.5 Seismic acquisition and well drilling operations – Legal Framework.....	18
4.1.5.1 3D seismic acquisition	19
4.1.5.2 Well Drilling.....	19
4.2 Activities during the exploration stage	19
4.2.1 3D seismic acquisition operations.....	19
4.2.1.1 Geological setting.....	21
4.2.1.2 Acquisition recommendations	22
4.2.1.3 Expected operational challenges	24
4.2.2 Injection well drilling.....	25
4.2.2.1 Well Prognosis.....	25
4.2.2.6 Drilling Hazards.....	26
4.2.2.7 Well Perforation and Completion	26
4.3 Characterisation of the study area	29
4.3.1 Bathymetry.....	29
4.3.2 Geology	30
4.3.3 Environment and ecology	31
4.3.3.1 Phytoplankton	31
4.3.3.2 Zooplankton	35
4.3.3.3 Continental Shelf Benthic Ecosystems - Benthic Communities in Environmental Assessment.....	38
4.3.3.4 Fish	45
4.3.3.5 Seabirds	52
4.3.3.6 Marine Mammals	56
4.3.4 Socio-economy.....	60
4.3.4.1 Submarine cables	60
4.3.4.2 Marine traffic.....	60
2.3.1.1. Fishing areas.....	61
4.3.4.3 Processing industry, salt production and aquaculture.....	66

4.3.4.4	Coastal tourism	66
4.3.4.5	Archaeological areas	67
5.	Identification of Potentially Affected Classified Areas.....	68
6.	Preliminary risk and impact identification	70
6.1	Risks and impacts associated with the 3D seismics acquisition	70
6.2	Drilling generated impacts.....	72
6.3	Biological Impacts.....	73
6.3.1	Potential impacts associated with seismic acquisition (SAQ)	76
6.3.2	Potential impacts associated with exploratory drilling (EXD) for the Injection well	77
6.3.3	Cumulative Impacts.....	78
7.	Mitigation measures	79
7.1	Biological Mitigation Measures	80
7.1.1	Mitigation measures for the seismic acquisition phase (SAQ)	80
7.1.2	Mitigation measures for the exploratory drilling phase (EXD) of the injection well	80
8.	Monitoring plan	82
8.1	Benthic Communities Monitoring Plan	82
8.1.1	Priority benthic communities	82
8.1.2	Monitoring design	82
8.1.3	Temporal framework	82
8.1.4	Environmental Monitoring Plan for the Exploratory Drilling Phase	83
9.	Gap Analysis.....	83
9.1	Monitoring components and indicators	83
9.1.1	Biological indicators	83
9.1.2	Sediment and geochemical indicators	84
9.1.3	Physical disturbance indicators	84
9.1.4	Adaptive management and reporting	84
10.	Conclusions	84
11.	References	85

2. Introduction

Portugal has been consolidating its position as a leading European Union member State in implementing the transition to a renewable energy-based economy through the adoption of a national decarbonisation strategy. The Roadmap for Carbon Neutrality (RNC 2050) is a strategic document aligned with international guidelines for tackling climate change, serving as a baseline for the design of roadmaps for the decarbonisation of national industrial sectors. The work carried out under the RNC 2050 is coordinated with the National Energy and Climate Plan ("Plano Nacional de Energia e Clima", PNEC 2030), which is the main energy and climate policy instrument for the period between 2021 and 2030. The National Energy and Climate Plan (PNEC 2030) was first introduced in 2019, setting the strategic framework to achieve carbon neutrality by 2050. The plan was revised in 2024, where more ambitious targets for the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions were defined. It now aims for a 55% reduction in GHG emissions by 2030 compared to 2005 levels (~75 Mt) and accelerates the goal of achieving carbon neutrality in 2045 instead of 2050. Moreover, in the revised PNEC 2030, Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) is mentioned as an essential technology to help Portugal meet its decarbonisation targets in hard-to-abate industries where reducing emissions is challenging (e.g. Cement) and where other forms of decarbonisation might be more difficult or less effective. The plan also emphasizes the need for innovation and investment in CCUS, pointing to the need for research and development to improve the efficiency and cost-effectiveness of these technologies and to plan the necessary infrastructure. Furthermore, CO₂ utilisation may foster the production of low-carbon hydrogen and other sustainable fuels.

The national strategy also aligns with the Net-Zero Industry Act, which entered into force in June 2024, aiming to enhance European manufacturing capacity for net-zero technologies and their key components, addressing barriers to scaling up production in Europe. It is envisaged that the Act can foster the increase of competitiveness of the net-zero technology sector, attract investments, and improve market access for clean tech in the EU. This supports the clean energy transition and improves the EU's energy resilience. The Act sets a goal for net-zero manufacturing capacity to meet at least 40% of the EU's annual deployment needs by 2030, providing predictability, certainty and long-term commitments to manufacturers and investors.

2.1 The PilotSTRATEGY project

PilotSTRATEGY is a European project funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664. The project is focused in five regions (Figure 1) where previous projects and, notably the EU project STRATEGY CCUS¹, has identified possibilities for local CCUS schemes in highly industrialised areas.

¹ The STRATEGY CCUS project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 837754.

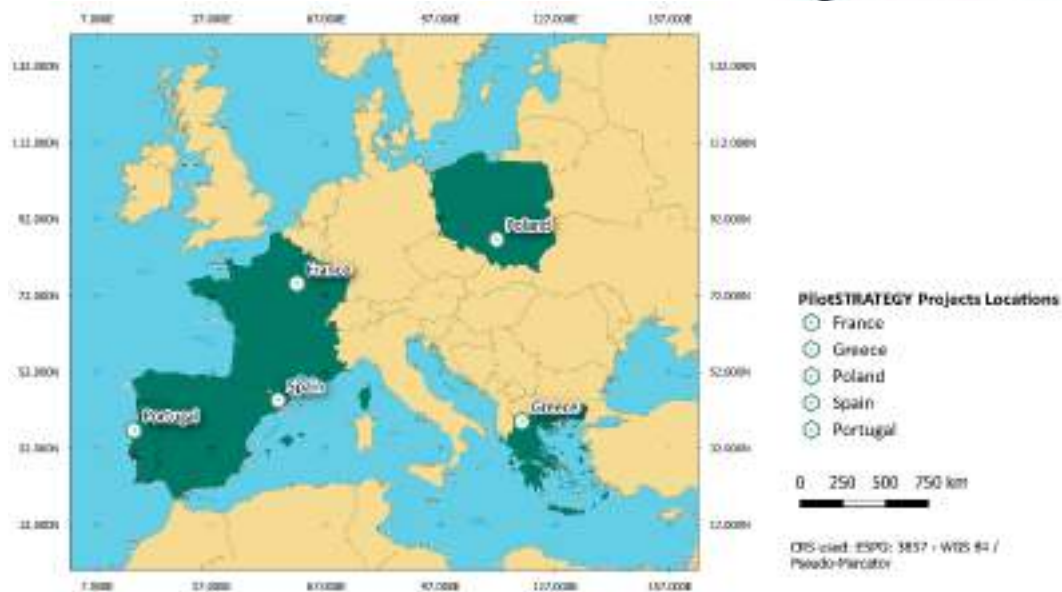


Figure 1 - European map PilotSTRATEGY target countries and the location of the storage pilots.

Within these five regions, the Portuguese offshore area located near Figueira da Foz was targeted for a detailed characterisation aiming for the implementation of a pilot site for CO₂ injection and geological storage in a deep saline aquifer. The offshore area is included in the geological domain of the northern Lusitanian Basin, which was preliminary characterised using existing 2D and 3D seismic datasets, 13 oil exploration wells, and rock samples collected at outcrops of onshore analogue formations. Available aeromagnetic data and a passive seismic survey were also integrated into the geological characterisation of the pilot site (see PilotSTRATEGY deliverable D2.7).

One of the main objectives of the PilotSTRATEGY project is to characterise the geological reservoir and seal in the selected study area and to provide a location to implement a pilot for CO₂ injection and storage. Apart from testing the geological reservoir, the pilot will also provide the opportunity to develop protocols for *in situ* measurement, monitoring, and verification (MMV), which can reduce uncertainty and contribute to building confidence in CCS projects.

The pilot scenario was developed taking into consideration emitters interested in installing pilot capture plants, namely the cement factory in Souselas. Flexible transport options, including direct injection from a ship were considered for offshore storage to avoid the deployment of “permanent” infrastructures, such as offshore pipelines or platforms. The design aimed at providing the CO₂ required to conduct an injection pilot to validate the reservoir and injection models that have been developed in the in the scope of the PilotSTRATEGY project for the Lusitanian basin. As mentioned above, the complete cycle, from capture to injection, was considered with a focus on minimising the deployment of permanent or hard-to-shift infrastructures. In this sense, CO₂ transport by train was thus considered between the capture facilities and the Figueira da Foz port and by ship between the port and the offshore injection site (Figure 2). The CO₂ volume and transport conditions will be matched between train, the port operator and the ship to allow for the CO₂ to be moved without the need for intermediate storage and/or intensive reconditioning. During the pilot phase, CO₂ will be injected directly from the ship, aiming to store less than 100 kt in the geological reservoir from 2031 to 2033.



Figure 2 - Conceptual workflow of the CO₂ capture, transport and injection for the Pilot Phase (transport pressure and temperature conditions are indicative).

If the pilot confirms the suitability of the geological setting to safely store the injected CO₂, then the long-term scenarios predict the scale up of the technology to a commercial phase that includes CO₂ capture (increasing from 2034 to 2050 from 0.5 Mt/year to 4.7 Mt/year) and transport from other important emitters located further south. For the commercial phase the CO₂ will be transported exclusively by pipeline (Figure 3).



Figure 3 - Conceptual workflow of the CO₂ capture, transport and injection for the Commercial Phase, with the connection by pipeline between the sources and the onshore hub at the Figueira da Foz (Transport pressure and temperatures are indicative).

2.2 Scope of the document

The aim of this document is to develop a PEP - Preliminary Environmental Plan ("Plano Ambiental Prévio") to identify potential environmental risks and define early mitigation strategies for the exploration stages preceding the Pilot Phase implementation. It encompasses exclusively the activities inherent to conducting 3D seismic surveys for baseline acquisition and clarification of the geological structure, drilling of the borehole to be used as injection well during the pilot and acquisition of the environmental baseline. Thus, and although in accordance

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664



@PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu

with Decree-Law 60/2012, the Pilot Phase is exempted from requesting an exploration permit since it will inject less than 100 kt, this PEP covers the environmental studies that are usually within the framework of the exploration permit. Moreover, the CO₂ injection and transport activities are not addressed in the PEP, as they correspond already to the Pilot itself.

Therefore, the PEP nearly corresponds to the screening phase of the environmental assessment process for the storage component, during which key environmental issues and study requirements are identified. The PEP is intended to:

- a) Identify the issues and activities that are likely to be important for the exploration stages;
- b) Provide a description of available environmental data and identify existent gaps;
- c) Address the inherent uncertainties through the application of a precautionary approach;
- d) Include an environmental risk assessment (ERA) to ensure that all relevant activities and associated impacts are identified.

3. Regulatory, Environmental and Technical Context of the CO₂ Storage Site

Within the PilotSTRATEGY project, the Lusitanian Basin case comprehends the area surrounding the Figueira da Foz port, with an offshore storage site, designated as Q4-TV1 structure, located about 22 km away from the Figueira da Foz port, and the possible sources emitters previously identified (Figure 4). The pilot concept devised in PilotSTRATEGY considers the CIMPOR Souselas cement plant as the CO₂ provider, which primary source of CO₂ emissions is the fuel burned in kilns, and the NAVIGATOR pulp and paper facility in Figueira da Foz as a possible backup supplier. According to the roadmap for achieving the decarbonisation targets, the Souselas facility will still produce around 0.5 Mt of CO₂ in 2050. The concept comprehends two injection phases: Phase 1 – it is the Pilot-scale project itself, with injection of less than 100 kt of CO₂ in 3 years, and Phase 2 – the Commercial upscaling in the same location and injection well, with an injection rate of at least 0.5 Mt/year over a 30-year period, with the potential to expand to 4.7 Mt/year to encompass other source emitters, and resorting to additional injection wells and storage structures already identified in the northern sector of the Lusitanian basin. The pilot phase will use the existing infrastructure at the Figueira da Foz port, including loading/unloading facilities and onboard injection systems. The commercial phase will replace these facilities to include an onshore pipeline from Souselas to the Figueira da Foz hub, located south from the Figueira da Foz port, which would have a booster station to provide pressure and pump CO₂ by offshore pipeline to the injection site. These facilities are designed to handle increased CO₂ volumes and ensure long-term efficiency and safety.

The project targets the injection of CO₂ within the bottom section of the Early Cretaceous Torres Vedras Group (Aptian-Albian), composed of alternating sandstone and shale. The injection simulations demonstrate that the CO₂ plume does not reach the nearby legacy well (Dourada-1C) and avoids the major identified faults (Figure 4). The injection well is being planned to cover this reservoir with cemented casings to prevent any leakage, particularly along the well. The coordinates of the study area, the Dourada-1C and injection well are presented in Table 1.

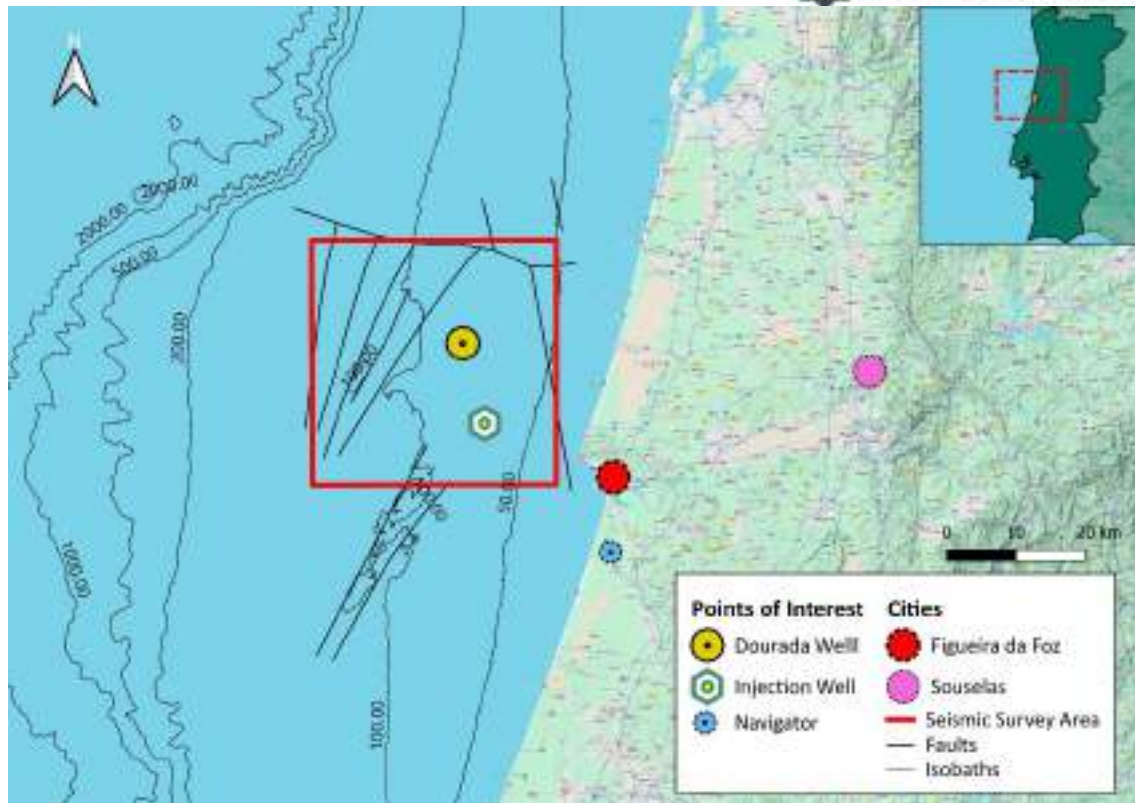


Figure 4 - Study area with the location of the Dourada-1C legacy well and the proposed CO₂ injection well. Inset: Portugal mainland with the location of the area represented in the figure.

Table 1 - Coordinates of the study area, the Dourada-1C legacy well and the proposed injection well (WGS 84 EPSG: 4326).

Polygon corners	Latitude (N)	Longitude (W)
Upper right	40°27'43"	8°56'54"
Upper left	40°27'43"	9°21'40"
Lower left	40°08'47"	9°21'40"
Lower right	40°08'47"	8°56'54"
Dourada-1C legacy well	40°19'44"	9°06'23"
Future injection well	40°13'32"	9°04'09"

3.1 Legal and institutional framework for CCS activities

The presentation of the European Green Deal [COM (2019) 640 final] in December 2019 established the framework for the adoption of a renewed growth strategy based on a green transition aligned with the long-term decarbonization goals of the European Union (EU). The subsequent adoption of the European Climate Law [Regulation (EU) 2021/1119 of 30 June 2021] shaped the objectives set out in the Green Deal, defining a binding EU 2030 net GHG emission reduction target of at least 55% compared to 1990 levels and aiming to achieve climate neutrality by 2050. The REPowerEU Plan [COM (2022) 230 final] was presented in May 2022 as the EU's plan to accelerate the energy transition and end dependence on fossil fuels. In order to achieve the climate-neutrality target set out in the European Climate Law, the European

Commission presented its assessment on the 2040 climate target [COM (2024) 63 final] in February 2024, recommending a 90% reduction in GHG emissions by 2040 compared to 1990 levels. Thus, it was considered that in addition to the full implementation of the 2030 climate and energy framework, it will be necessary to enhance the contribution of CCUS technologies. The latter are also recognized in the Net Zero Industry Act [Regulation 2024/1735 of 13 June], which identifies zero emission technologies and sets the goal for geological storage of 50 Mt per year in the European Union.

The EU has established a robust legal framework to ensure that CCUS projects are thoroughly assessed before implementation. This includes mandatory Environmental Impact Assessments (EIA) for qualifying projects under Directive 2011/92/EU, as transposed into national legislation by Member States, including Portugal. This section outlines the permits relevant to different phases or subprojects to be developed as part of the underground CO₂ storage program, according to the scope of this Permit Plan. Below is a general list of the permits reviewed, with detailed descriptions provided later in the document.

3.1.1 Pilot Phase Permitting

The Net Zero Industry Act triggered the revision of the National Energy Plan and Climate 2021-2030 (NECP 2030) to ensure the alignment of previously established policies, objectives and targets with the new international and EU context. In the revised plan submitted in 2024 it is recognized the need to increase the level of carbon removal to counterbalance hard-to-abate GHG emissions in industrial sectors where existing technological solutions do not yet fully eliminate emissions (e.g. process emissions from the decarbonization of materials used, waste incineration). Consequently, the geological potential for geological carbon storage is being assessed with a view to contribute to achieve the national climate neutrality objective in 2045. The National Act No. 98/2021 establishes the Portuguese Climate Framework Law, which refers that the State will monitor and support the development of CCUS technologies (Article 59). Moreover, paragraph 2 of Article 59 affirms that the State, its autonomous and local administrations shall promote pilot projects for the implementation of these technologies in areas with major CO₂ emissions. The Decree Law No. 60/2012 establishes the legal framework for CO₂ storage in accordance with the European Parliament and Council's Directive 2009/31/CE. However, in its Article 2, paragraph 3, it is stated that the document does not apply to CO₂ storage in geological reservoirs when the total injected CO₂ mass is less than 100 kt and the storage is foreseen to develop scientific research or new products and processes. This is the case of the pilot phase that is envisaged to be developed offshore Figueira da Foz, as proposed by PilotSTRATEGY.

Offshore CCUS activities must also consider the regulatory framework of activities in the maritime area, namely the PSOEM (the Portuguese Maritime Spatial Plan). According to the Decree Law No. 38/2015 and the Resolution of the Council of Minister No. 203-A/2019, which develops the policy for the planning and management of the national maritime space in accordance with the European Directive 2014/89/UE, the pilot phase does require the acquisition of a "Title for the private use of the maritime space" (TUPEM) that shall be attributed by the Directorate-General for Natural Resources, Safety and Maritime Services (DGRM, Article 51). The Decree Law No. 38/2015 states that the attribution of a TUPEM for new activities depends on the previous approval of an allocation plan (Article 50(1)). According to Article 23(1), the allocation plan is considered as a project and subject to an EIA following the Decree Law No. 151-B/2013. As stated in Part B of the Resolution of the Council of Minister No. 203-A/2019, the allocation plan shall take into consideration the other uses included in the same area and/or volume of the national maritime space, providing its legal, scientific and technical reasoning and a cost-benefit analysis to assist the decision-making process (Figure 5). Nevertheless, for the

development of a scientific research activity, the TUPEM may be exempted from previous approval of an allocation plan by decision of the members of the Government responsible for the sea affairs and environment (Article 50(2)).

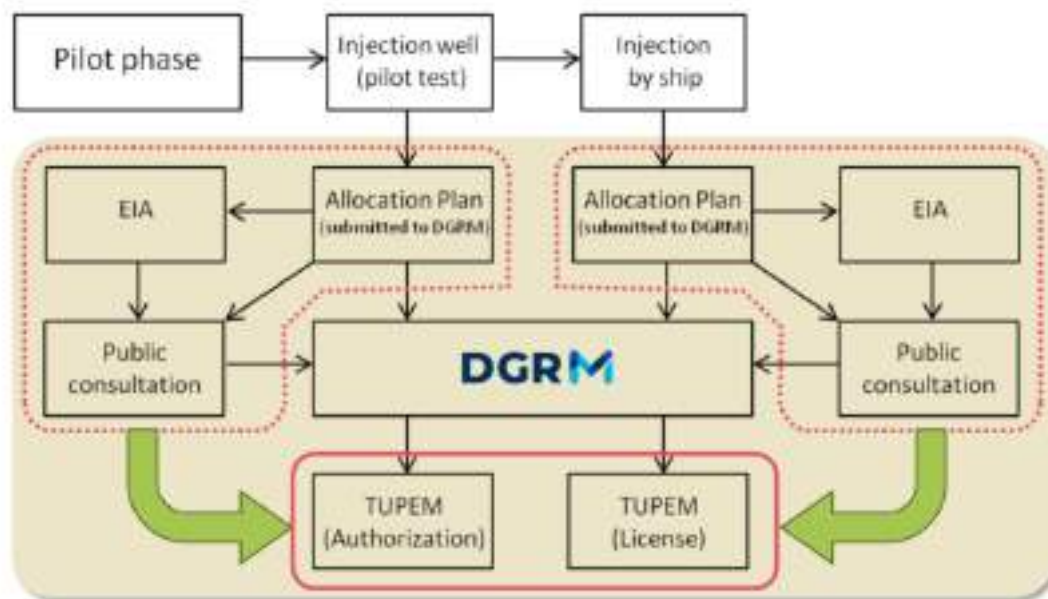


Figure 5 - Flow diagram for the licensing procedure for the Pilot Phase. For scientific research activities, the TUPEM may be exempted from previous approval of an allocation plan, simplifying the procedure.

It is envisaged that for the pilot phase a TUPEM could be issued as a “license” (Articles 54 to 56) or as “authorisation” (Article 57). A “license” refers to the temporary use (less than 12 months) or intermittent use during one or more discontinuous periods over the year. It has a maximum duration of 25 years, and a tax should be applied on the use of the maritime space. The “authorisation” refers to a TUPEM within the scope of scientific research projects or non-commercial pilots. It has a maximum duration of 10 years and is exempted from taxes. According to Article 66, the payment of a bond may be required to ensure the maintenance of the biological and physical-chemical characteristics of the marine environment. The bond may be exempted if it is foreseen that the activity will not cause impacts on the marine environment, and it will not require construction or placement of mobile structures. An exemption may also result from the application of environmental regulations that may be imposed to a specific activity, also ensuring the protection and conservation of the marine environment.

3.1.2 Commercial Phase Permitting

For the commercial phase and for CO₂ storage over 100 kt, the Decree Law No. 60/2012 will apply. In this case, the geological formations with potential for CO₂ storage are considered as mineral deposits within the public domain (Article 5 (1)). It should be noted that the Decree Law 30/2021 in its Article 3, paragraph 2, refers that the mineral deposits located in the national maritime space are subject to special legislation. However, it does not revoke the Decree Law 60/2012, which attributes to the Ministry responsible for the mineral resources and to the Directorate-General for Energy and Geology (DGEG) the competence to act within the established legal framework concerning the CO₂ storage. According to the Decree Law 60/2012, a distinction is made regarding the concession for CO₂ storage and the authorisation to operate the structures for injection at surface that results in the permission to perform the storage, which is also regulated by the Regime of Operation of Industrial activities (RAI). In accordance with Article 6(1), the concession contracts for CO₂ storage shall be granted by the Ministry

responsible for the geological resources. Paragraph (2) defines DGEG as responsible for granting a license for exploration regarding the direct evaluation of the potential of a given subsoil reservoir for CO₂ storage through drilling or injection trials. It is not obvious if a similar license will be required for the implementation of the pilot phase, and if so, what regulation or law will be applied. The duration of an exploration license shall not exceed 5 years, but it can be extended further 3 years if the approved exploration plan was duly completed but insufficient to comply with the criteria for the characterisation of the potential storage complex (Article 13). Article 17 (3) states that the owner of an exploration license shall have preference for the attribution of a concession contract for CO₂ storage, as long as the exploration work has been concluded in accordance with the approved plan and the application for the concession contract submitted within 45 working days after concluding the exploration work. Paragraph (4) defines that the duration of a concession should be adjusted to the full capacity of CO₂ storage of the studied geological reservoir, and it will be fixed under the contract. Article 18 describes the different data and information that must be included in the application for a concession contract, as well as for the license allowing the establishment of the installations at surface needed for CO₂ injection. Amongst the list of data and information, some points can be emphasized:

- (i) The characterisation of the reservoir and storage complex (including dynamic modelling), as well as an assessment of risks;
- (ii) Total quantity of CO₂ to be injected and stored, including the prediction for its sources and transport, the composition of the CO₂ flow, the injection pressure and the location of the injection facilities;
- (iii) The execution plan, including the measures to prevent or mitigate the occurrence of anomalies;
- (iv) The monitoring plan, which must include (in accordance with Annex II of the Decree Law No. 60/2012) the monitoring of emissions that may result from CO₂ leaks, volumetric CO₂ flow at the head of the injection well, reservoir pressure and temperature in order to determine the CO₂ phase and its behaviour. The monitoring plan must also include the post-closure phase.

As stated in point i) above, the application for the concession contract must also include an assessment of risks related with CO₂ storage, as described in Annex I of Decree Law No. 60/2012. This assessment should include the characterisation of hazard and risks, and the assessment of exposure and effects. The characterisation of hazard is focused on the potential for CO₂ leakage from the storage complex. Different parameters such as the identification of potential conduits for leakage, the potential magnitude of leakage inferred from flux rates, the critical parameters affecting potential leakages (e.g. maximum pressure in the reservoir, maximum rate of injection, temperature), the secondary effects of CO₂ storage including fluid displacement in the reservoir and creation of new substances, and other factors that may represent a threat to human health or to the environment. The exposure assessment is based on the characteristics of the natural environment and distribution of human population and its activities and the destination of the potential CO₂ leakage through the conduits identified in the previous point. The effects assessment is focused on the sensitivity of certain species, communities or habitats to potential CO₂ leakage. It may refer to the effects of exposure to high CO₂ concentrations on the biosphere, including soils, marine sediments, and benthic waters and the effects of pH reduction in those environments. The assessment should also include the effects caused by other substances that may be present in the CO₂ flow from leakage. The characterisation of risks should be based on the assessment of hazard, exposure and effects, considering the sources of uncertainty and the possibilities envisaged for their reduction. It should result in the assessment of the safety and integrity of the storage reservoir at short and

long-term, including an
@PilotSTRATEGY
www.pilotstrategy.eu



assessment of the risks for CO₂ leakage concerning the predicted operations and for human health in the worst-case scenario.

In the case of the transfer of responsibility, Article 22 requires the creation of a reserve fund to be allocated by the contractor to DGEG. The amount of the reserved fund shall be determined considering the contractual obligations that remain active after the transfer and the cost estimated for monitoring for a minimum period of 30 years.

In the PilotSTRATEGY concept, during the commercial phase, it is envisaged that the CO₂ will be conditioned at an onshore hub and transported by pipeline to the storage site located offshore. In accordance with the legislation referred to above (Decree Law No. 38/2015 and the Resolution of the Council of Minister No. 203-A/2019), the installation of a pipeline offshore will require an allocation plan to be approved and the acquisition of a TUPEM granted by DGRM. In this case, the TUPEM is expected to be issued as a “concession” type, since it allows the use of the area occupied by the pipeline for a long period that cannot exceed 50 years.

3.1.3 Environmental Impact Assessment

In what concerns the protection and conservation of the marine environment, the Environmental Impact Assessment and monitoring activities related with CCUS projects in the national space are regulated by the framework outlined below (Table 2), which aligns the Portuguese policy with the EU’s strategies and guidelines.

Table 2 - EIA Regulatory Framework associated to CCS projects.

Instrument / Legislation	Type	Scope	Competent Authority	Key Notes	Link
Directive 2011/92/EU + 2004/35/EU	EU Directive	EIA	European Commission / APA	Establishes EIA requirements for industrial projects, including CCS	https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/92/oj/eng
Directive 2009/31/EC	EU Directive	Geological storage of CO ₂	European Commission / APA, DGEG	Defines criteria for selection, monitoring, and closure of CO ₂ storage sites	https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/31/oj/eng
Directive 2004/35/EU	EU Directive	Maritime spatial planning	European Commission / DGRM	Sets a framework for maritime spatial planning (compatible with CCS projects) within the EU. Aims for sustainable use of the sea	https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/35/oj/eng
OSPAR Convention	International Convention	Protection of the marine environment	OSPAR Commission / Portuguese State	Primary international framework for the protection of the marine environment in the North-East Atlantic	https://www.ospar.org/en/works-areas/marine-ecosystem-and-climate
Decree-Law No. 153-B/2013	Decree-Law	Legal regime for EIA	APA	Establishes the legal regime for evaluating the environmental impact of public and private projects that are likely to have significant effects on the environment. Defines when EIA is mandatory or subject to screening. Includes capture, transport, and storage of CO ₂	https://dre.pt/publico/pt/pt/dre/dre/legislacao/decreto-lei/153-b-2013-5-13891
Decree-Law No. 60/2013	Decree-Law	Geological storage of CO ₂	APA, DGEG, DGRM	Transposes the CCS Directive. Regulates licensing, monitoring, closure, and responsibility	https://dre.pt/publico/pt/pt/dre/dre/legislacao/decreto-lei/60-2013-5-13467
Decree-Law No. 17/2014	Decree-Law	Marine geological resources	DGEG, DGRM	Regulates exploration activities and use of the marine subsoil	https://dre.pt/publico/pt/pt/dre/dre/legislacao/decreto-lei/17-2014-2-243897
Decree-Law No. 38/2015 (complemented by the Decree-Law No. 89/2015)	Decree-Law	National maritime spatial planning	DGRM	Establishes a framework for maritime spatial planning. Implements planning instruments (PSOM)	https://dre.pt/publico/pt/pt/dre/dre/legislacao/decreto-lei/38-2015-2-27181
Law No. 19/2014	Law	Environmental Framework Law	Portuguese Parliament / APA	Defines fundamental principles of environmental policy	https://dre.pt/publico/pt/pt/dre/dre/legislacao/lei/19-2014-2-244933
Law No. 17/2014	Law	Activities in maritime space	DGRM	Defines the foundations for the Policy on Maritime Spatial Planning and Management. It implements the planning instruments and establishes the requirement for a private use license (TUPEM) for areas of the outmost maritime space	https://dre.pt/publico/pt/pt/dre/dre/legislacao/lei/17-2014-2-242997

The Directive 2011/92/EU of the European Parliament and of the Council of 13 December 2011 establishes the framework for assessing the environmental impacts of certain public and private projects, ensuring that potential effects on the environment are considered before development consent is granted. According to Article 4 of this Directive, “Member States shall adopt all measures necessary to ensure that, before consent is given, projects likely to have significant effects on the environment by virtue, inter alia, of their nature, size or location are made subject to a requirement for development consent and an assessment with regard to their

effects". As outlined in Annex I of the same directive, the projects referred to in Article 4(1) include:

1. "Storage sites pursuant to Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide."
2. "Installations for the capture of CO₂ streams for the purposes of geological storage pursuant to Directive 2009/31/EC from installations covered by this Annex, or where the total yearly capture of CO₂ is 1.5 megatonnes or more."

Pilot projects such as that proposed in PilotSTRATEGY fall under category 1 above since it does not consider the capture component, but only the transport and storage part of the CCUS chain.

The EIA process in Portugal is governed by Decree-Law No. 151-B/2013 of October 31, which transposes Directive 2011/92/EU (as amended by Directive 2014/52/EU) into national law. This decree establishes the legal regime for evaluating the environmental impact of public and private projects that are likely to have significant effects on the environment. Under this Decree-Law, the Portuguese Environment Agency (APA) is the EIA authority. Pilot projects are referenced in Annex I and fall under these categories mentioned in point (a) of Article 1(3). This is also consistent with Article 4(1) of Directive 2011/92/EU, as referenced above.

Pilot CO₂ storage projects, such as the one designed by PilotSTRATEGY, may be subject to EIA based on case-by-case analysis (subjective criteria), according to the environmental sensitivity factors listed in Annex III, mentioned in subpoints ii) and iii) of points b) and c) of Article 1(3).

3.1.4 EIA Requirements and Regulatory Context for CCS Projects

According to Article 3 of Directive 2011/92/EU (context previously described), the EIA shall identify, describe and assess in an appropriate manner, the effects of a project on the following factors:

- Human beings, fauna and flora;
- Soil, water, air, climate and the landscape;
- Material assets and the cultural heritage;
- The interaction between these factors.

The Decree-Law No. 151-B/2013 of October 31, which transposes Directive 2011/92/EU (as amended by Directive 2014/52/EU), sets on Annex V, mentioned in article 13 (1) and article 14 (2), the minimum required content of an EIA, which includes (non-exhaustive list):

- a) Project Characterisation:
 - Location and characteristics of the storage site
 - CO₂ capture and transport technologies
 - Injection and storage process
- b) Assessment of Reasonable Alternatives
- c) Materials, Resources and Energy
- d) Baseline Environmental Description
- e) Expected Emissions, Effluents and Waste
- f) Environmental Impact Identification and Evaluation
 - Impacts on Geology and Water Resources
 - Impacts on Atmosphere and Climate
 - Impacts on Biodiversity
 - Impacts on Population and Human Health
- g) Impact Prediction Methodology
- h) Mitigation and Prevention Measures and Monitoring Programs:

- Leak detection systems using CO₂ sensors and passive seismic monitoring
 - Emergency response plan, including evacuation and mitigation measures
 - Environmental rehabilitation plan for the site after closure
- i) Limitations and Uncertainties
- j) Public Consultation
- The project will undergo a public consultation process, allowing citizens, environmental organizations and local entities to provide input. The Portuguese Environment Agency (APA) will analyse the feedback and may require project adjustments.
- k) Non-Technical Summary

Regarding dedicated CCS regulatory guidelines, the Directive 2009/31/EC establishes the legal framework for the geological storage of CO₂ and clearly states that storage sites must be operated under a storage permit. This permit serves as a key instrument to ensure compliance with the Directive's substantive requirements and to guarantee that geological storage is conducted in an environmentally safe manner. The Decree-Law No. 60/2012 of March 14, which transposes this EU Directive for the Portuguese law, reinforces this in Article 9(1), stating that "a geological formation may only be selected as a storage site if, under the proposed conditions of use, there is no significant risk of leakage or significant risk to the environment or human health". Since geological CO₂ storage projects, other than those for research purposes, are subject to an EIA by default (Annex I of Decree-Law No. 151- B/2013 of October 31), this process ensures that they comply with environmental standards and legal requirements before implementation. Moreover, according to Article 18 of 7 Decree-Law No.60/2012 of March 14, the operator must define and submit to DGEG various data, including:

- Monitoring plan prepared in accordance with the requirements set out in Annex II of this decree
- Description of measures for the prevention of anomalies
- Corrective measures plan, in accordance with Article 35(3)
- A proposal for a provisional post-closure plan, pursuant to Article 37(2)

The proper selection of a suitable site for the geological sequestration of CO₂ must also consider the National Land Use Planning Policy Programme (Plano Nacional de Ordenamento do Território), the Natura 2000 Network, and other Classified Areas with high importance for biodiversity.

The OSPAR Convention is the primary international framework for the protection of the marine environment in the North-East Atlantic, to which Portugal is a contracting party. It establishes obligations for the prevention of marine pollution, the protection of ecosystems, and the sustainable management of maritime activities. It refers that "The Contracting Parties shall, in accordance with the provisions of the Convention, take all possible steps to prevent and eliminate pollution and shall take the necessary measures to protect the maritime area against the adverse effects of human activities so as to safeguard human health and to conserve marine ecosystems and, when practicable, restore marine areas which have been adversely affected".

In 2007, the OSPAR Commission amended Annexes II and III of the Convention to permit the storage of carbon dioxide in geological formations beneath the seabed. In connection with this, OSPAR also adopted two key decisions: OSPAR Decision 2007/1, which prohibits the storage of CO₂ streams in the water column or directly on the seabed, and OSPAR Decision 2007/2, which establishes the conditions under which CO₂ streams may be stored in geological formations, ensuring such activities do not compromise the marine environment.

The Directive 2014/89/EU of July 23 establishes a framework for maritime spatial planning (compatible with CCS projects) within the European Union. According to Article 5, Member States shall consider economic, social, and environmental factors to support sustainable development in the maritime sector. Furthermore, Member States should aim to contribute to the sustainable development of offshore energy sectors, maritime transport, fisheries, and aquaculture, as well as to the protection and improvement of the environment, including resilience to climate change impacts.

As already stated in section 4.1.1, the Decree-Law No. 38/2015 of March 12 (complemented by the Decree-Law No. 39/2015 of July 30) transposes Directive 2014/89/EU of the European Parliament and of the Council of 23 July 2014, establishing a framework for maritime spatial planning. This decree-law builds upon Law No. 17/2014 of April 10, which defines the Foundations for the Policy on Maritime Spatial Planning and Management. Although not explicitly mentioned, it is highly recommended that CO₂ storage pilots align with these guidelines. The project developer is responsible for ensuring the adoption of all necessary measures to achieve and maintain the good environmental status of the marine environment. Furthermore, once the private use license is terminated, the holder is obliged to restore any altered physicochemical conditions, unless those changes result in a proven environmental benefit.

In accordance with Article 23, and in connection with Decree-Law No. 151-B/2013 of October 31, an Allocation Plan, an instrument that designates specific areas of the maritime space for certain uses and activities is subject to an EIA when required under that decree. The EIA for the allocation plan must consider the environmental report approved (Article 13). As discussed in section 4.1.1, research activities may be exempted from the submission of an Allocation Plan by ministerial decision.

Law No. 19/2014 of April 14 establishes the foundations of environmental policy in Portugal, including the instruments necessary for effective environmental management. According to Article 18, environmental assessment instruments are designed to ensure that projects whether public or private, that may impact the environment, land use, or the quality of life of citizens are subject to a prior EIA before their approval. This evaluation considers, among other factors, the current state of the environment, assessment of alternatives, baseline scenarios, cumulative impacts from other planned or existing developments, and input received through public consultation. In the case of projects likely to cause significant adverse environmental effects, the assessment must also include a life cycle analysis.

3.1.4.1 Environmental Impact Assessment Process

Following the overview of the legal and regulatory framework for Environmental Impact Assessment (EIA), this section outlines the key steps, institutional responsibilities, and indicative timelines involved in the EIA process for projects that are not regarded as research focused and inject more than 100 kt of CO₂, falling other the scope of the Decree-Law No. 60/2012. The EIA process steps, including CCS projects, are depicted in Figure 6.



Figure 6 - EIA process main stages (1 – As requested on Annex IV DL 151-B/2013; 2 – According to Annex III DL 151-B/2013; 3 – According to Annex I DL 151-B/2013; 4 – Working Days; 5 – Minimum content listed on Annex V DL 151-B/2013; 6 – Multidisciplinary team, according to Article 9 DL 151-B/2013; 7 – Timings can vary).

The authorities and relevant parties that are or may be involved in EIA process related to carbon capture and storage, such as PilotSTRATEGY, are listed in Table 3.

Table 3 - Competence authority and main entities associated to EIA process for CCS projects Authorities Providing Opinions on Projects and Activities under Subcategory A1 of Group 11 "Transport of energy, fuels and chemical substances".

Competence authority	Entity	Description
CCS Authority	Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG)	Issues permits for exploration and geological storage of CO ₂
National EIA Authority	Agência Portuguesa do Ambiente (APA)	Coordinates and oversees the EIA process
Authority for Marine Activities	Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marinhos (DGRM)	Issues permits (e.g., TUPEM) for private use of maritime space and ensures compliance with maritime regulations
Nature Conservation Authority	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF)	Issues opinions on impacts in protected areas and on protected species, including marine biodiversity

Note that the list includes the main entities involved, but additional parties may participate depending on the stage of the EIA process and the specific nature of the project and subject, such as the Direção Geral para o Património Cultural (Directorate General for Cultural Heritage). However, if the pilot phase injects less than 100 kt and there is an alignment with authorities, it qualifies as scientific research and is exempt from full requirements. The mandatory step for a pilot project injecting less than 100 kt and lasting more than 2 years is the **screening** step at which the licensing authority is APA, defines the environmental scope and process to be pursued by the pilot project.

3.1.5 Seismic acquisition and well drilling operations – Legal Framework

This section comprehends the compliance checklist for seismic acquisition operations and exploration well drilling in

The PilotSTRATEGY project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 101022664



@PilotSTRATEGY
 www.pilotstrategy.eu

Portugal. The competencies over mineral deposits exploration and exploitation activities and geological CO₂ storage are distributed among:

DGEG – Directorate-General for Energy and Geology: is the main licensing entity for exploration projects and geological storage, including CCS;

APA – Portuguese Environment Agency: responsible for EIA and environmental licensing;

DGRM – Directorate-General of Natural Resources, Safety and Maritime Services: issues technical opinions on maritime safety and navigation; coordinates interministerial opinions on the use of maritime space and the issuance of TUPEM (Title of Private Use of Maritime Space), according to Art. 50 of DL 38/2015.

3.1.5.1 3D seismic acquisition

Seismic acquisition remains subject to 1) prior environmental licensing (or justified exemption) by APA; 2) obtaining a TUPEM; and 3) communication to DGEG with technical plan and execution schedule. A conformity checklist can be resumed as follows:

- Submission of technical plan to DGEG;
- Request for exemption or submission of EIA to APA;
- Request for TUPEM to DGRM;
- Technical opinion from DGRM;
- Notification of start of activity.

3.1.5.2 Well Drilling

The updated legal framework for well drilling activities requires:

- Exploration license issued by DGEG;
- Mandatory Environmental Impact Assessment (EIA), unless expressly waived by APA;
- TUPEM for maritime space occupation, issued by DGRM;
- Safety and emergency plan approved by DGRM;
- Notification of activity initiation.

The EIA process highlights the need to align the Portuguese process with European practices, including a clear separation between licensing and the EIA for seismic, drilling, and storage activities. Additionally, in certain cases, especially those involving potential cumulative impacts, sensitive environments, or projects exempt from EIA, a separate, in-depth baseline study may be required.

3.2 Activities during the exploration stage

This PEP covers those activities required during the exploration phase for implementing the CO₂ storage site, namely the **acquisition of seismic data and the drilling of the injection well**. The actual pilot injection and monitoring will need to be the subject of a specific PEP as the volume to inject, the depth of injection and the injection rate, will be revisited with the data resulting from the exploration phase.

3.2.1 3D seismic acquisition operations

A 3D reflection seismic survey is planned to be conducted in the offshore area of the Lusitanian Basin, located approximately 22 km from the shore of Figueira da Foz (Figure 7).

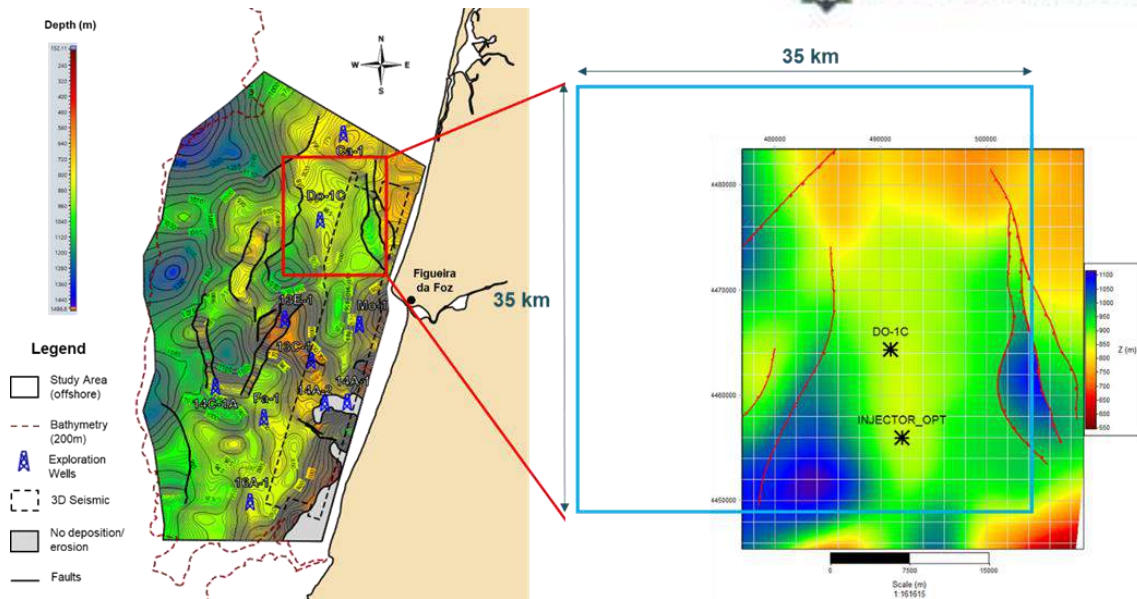


Figure 7 - Location of the 3D seismic survey, in the offshore of the Lusitanian Basin. Full fold area is identified in blue rectangle.

The seismic acquisition campaign will cover an area (full fold) that includes the CO₂ injection site and its surroundings, and accounts for a total area of 1,225km² (35x35km) at water depths varying from nearly 50 m to less than 180 m (with the injection site being at 85m water depth). The coordinates of the seismic full fold area are presented in Table 4. The proposed area extends beyond the prospect location to include surrounding areas that currently lack 3D seismic data, ensuring continuity and completeness of geophysical information for characterising the storage complex, particularly the reservoir and caprock. The extension of the area westwards and northwards is relevant for an improved characterisation of faults continuity, connectivity, and transmissibility, which is crucial for assessing potential future induced seismicity risks. The extended area also supports long-term monitoring of CO₂ dispersion, and more importantly, allows coverage of pressure propagation and the pressure front (over the 30-year injection period), which is critical for retrieving time-lapse volumes of pressure and gas saturation based on the 4D signal from multiple 3D seismic surveys. By considering a broader area, it is also possible to further improve the development and monitoring strategy, as well as characterise the placement of additional CO₂ injection wells.

Table 4 - Coordinates of the 3D seismic full fold area (WGS84 EPSG: 4326)

Polygon corners	Latitude (N)	Longitude (W)
Upper left	40°27'43"	9°21'40"
Lower left	40°08'47"	9°21'40"
Lower right	40°08'47"	8°56'54"
Upper right	40°27'43"	8°56'54"

The target for the imaging work locates between 800-1400 m TVDSS, including the reservoir and seal geological formations. This data will be fundamental to:

- Support information for CO₂ injection well design, as it provides crucial data for confirming the site location, depth prognosis and drilling hazards;
- Characterise the structure, stratigraphy and fluid properties of the storage complex (reservoir and caprock). It should provide high quality products for advanced seismic

interpretation, as well as quantitative interpretation of rock and fluid properties (seismic inversion);

- Characterise the storage complex in a broader region around the planned CO₂ injection site. It accounts for an overlap area with 3D Cabo Mondego seismic survey in the Eastern part. More than half of the prospect extension was only mapped/ interpreted based on old 2D seismic lines;
- Assess the potential induced seismicity risks (characterisation of fault continuity, connectivity and transmissibility), namely in the western part of the injection site which accounts for a complex fault area identified in the 2D seismic lines in the region;
- Create a baseline for potential induced seismicity studies over time;
- Establish a baseline (pre-injection) for the long-term monitoring of the CO₂ plume dispersion, as initial/time zero survey of a 4D seismic timelapse analysis (pressure propagation and pressure front);
- Improve the injection and monitoring strategies, including support decisions for additional injection well locations for commercial scale development;
- Conduct multi component recording.

3.2.1.1 *Geological setting*

In the area of acquisition, the main storage potential is identified in the lower Cretaceous, denominated Torres Vedras Group (locally designated as Figueira da Foz formation²). This formation is mainly composed of sandstones deposited in a fluvial environment with interbedded sealing clays that have been observed and described in some of the wells in the region. The caprock is composed by a thick sealing layer on the top of the reservoir in the upper cretaceous, which combines in the topmost part mainly limestone deposited in a marine carbonate platform and, dolomites, marls and clays in the base, which provides a strong seismic reflector, easily identified. In this area, there is also the presence of salt-diapirs, bounded by faults and identified in the legacy 2D seismic lines (Figure 8).

² The complex tectonic record of the Lusitanian Basin led to the differentiation of many sub-basins between which the Cretaceous formations, although maintaining the overall sedimentological features, do present differences and, accordingly, to local specific designations for lateral equivalent formations. In this report, as in all others PilotSTRATEGY, we will adopt primarily the designations from Petroleum Systems in Portugal, as adopted by DGEG (see DGEG website for [Petroleum Systems](#)), since most of the data used in the project results from the hydrocarbon exploration efforts conducted in the Lusitanian basin.

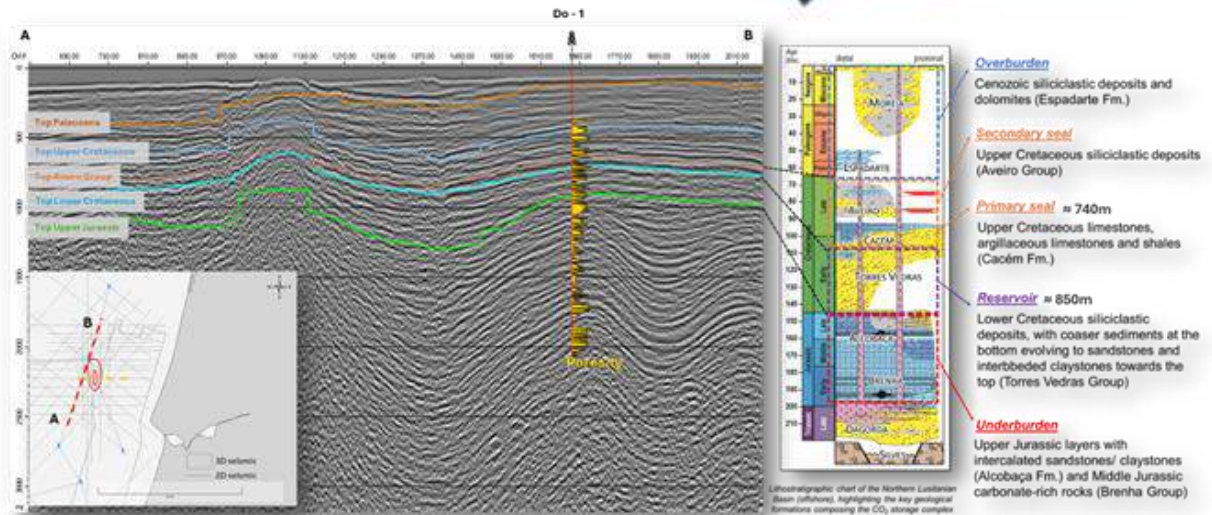


Figure 8 - Legacy 2D seismic line tied with Dourada-1C (Do-1C) well and stratigraphic correlation across the storage site, the Q4-TV1 structure, indicated by red contours in the inset. The orientation of the seismic line also shown in the inset.

3.2.1.2 Acquisition recommendations

It is recommended to conduct an offshore Extended High Resolution (XHR) mini-streamers seismic acquisition campaign, starting operations in 2027, taking into account geophysical and logistical considerations, and a detailed subsurface imaging for geological characterisation and carbon storage monitoring. A schematic illustration of mini-streamers seismic survey is depicted in Figure 9. Seismic survey vessels are used to tow streamers below the sea surface which carry hydrophones. Sound waves are transmitted from the vessel using compressed air guns which travel down through the seabed and reflect from the different layers of rock. These reflected sound waves are received by the hydrophones located along the seismic streamers which when processed give a three-dimensional picture of the substrata.

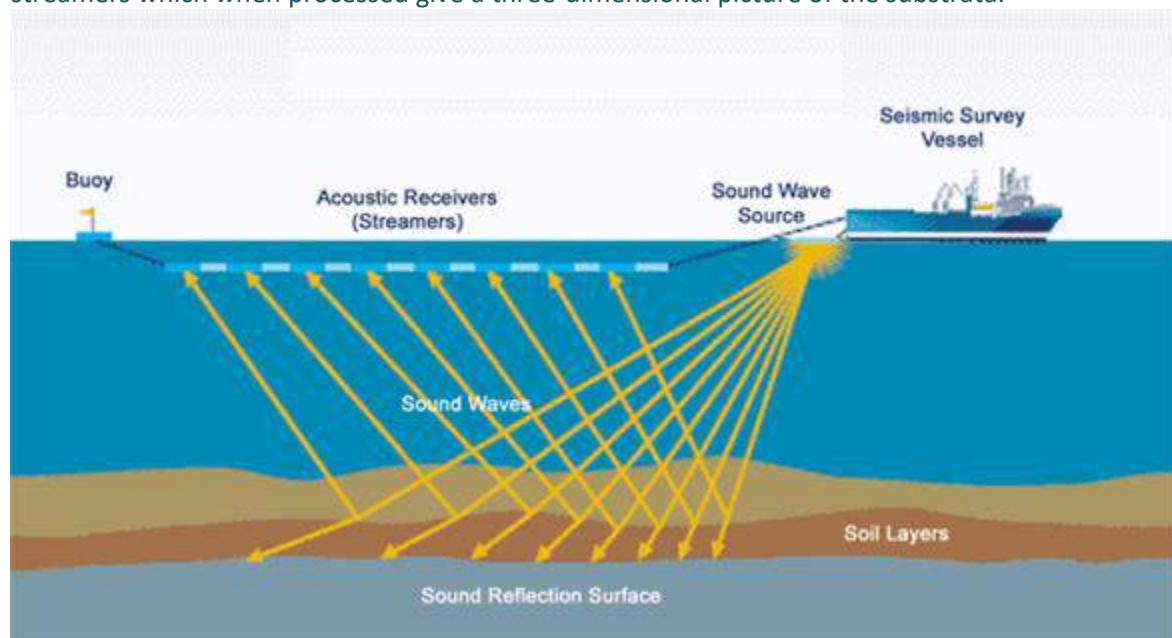


Figure 9 - Illustration of seismic surveying with streamers (source: fishsafe.org/en/offshore-structures/seismic-surveys).

Seismic survey vessels usually tow several streamers behind them (from 1 to 12) and of varying lengths up to 5,000 meters. They show shapes and lights for a vessel restricted in its ability to manoeuvre. The streamers (cables) are spread by diverters, like a type of mid-water trawl door, and can extend to over 500 meters in width. The end of each streamer is marked by a tail buoy carrying radar reflector and flashing lights. Seismic survey vessels tow at a speed of 4 – 5 knots and need to be on a straight line whilst surveying and are usually accompanied by a “Chase Boat” who will assist in notifying other vessels of the seismic operation. Survey areas vary greatly in size and can reach great areas of the sea surface. Figure 10 presents a graphic representation of this system’s constituents and equipment.

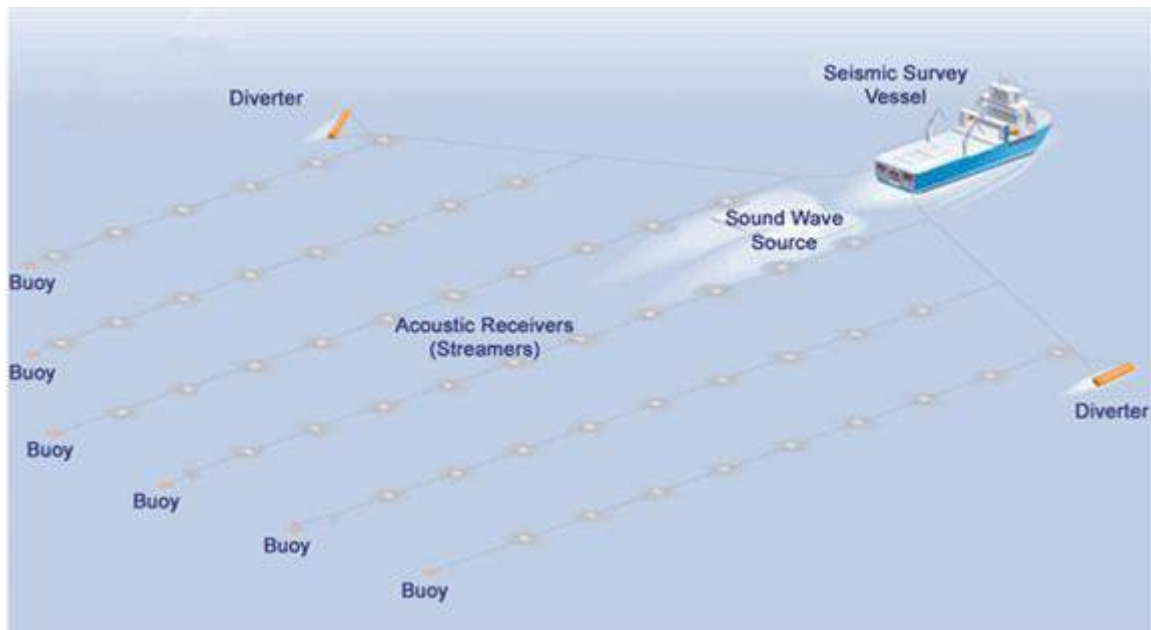


Figure 10 - Illustration of Seismic survey vessel and associated equipment (source: fishsafe.org/en/offshore-structures/seismic-surveys).

Mini-streamers are high-resolution towed arrays of hydrophones used in marine seismic surveys and have been successfully deployed in various CCS projects, notably at the Sleipner field in the North Sea. The main advantages of mini-streamers acquisition for CO₂ storage are the following:

- High resolution, by providing a good shallow imaging and detailed views of CO₂ plumes because it uses much shorter streamers (tens to hundreds of meters) than conventional streamer acquisition campaigns;
- Cost-effectiveness, given the lower costs due to smaller vessel and shorter mobilisation times;
- A higher resolution baseline survey than conventional streamers, providing a better repeatability for time-lapse studies for plume tracking through 4D time-lapse seismics;
- Reduced environmental footprint, as there is no need to land nodes in the seabed as Ocean Bottom Nodes acquisition, have smaller sources (reduced acoustic impact) than conventional streamers, and uses shorter streamers (easier handling in shallow water).

Nevertheless, this acquisition faces challenges in deeper velocities estimation and multiple attenuation compared to long streamers, requiring innovative processing or combined approaches for deeper imaging.

The general parameters for the design are summarised in Table 5. The recommendation in terms of survey design is to have, as much as possible, dense acquisition parameters for high resolution image, multi-azimuth coverage (to improve the repeatability), high fold (to ensure high S/N ratio, i.e., less noise than conventional streamer-based surveys).

Table 5 - 3D seismic parameters and target characterisation.

Survey area	1 225km ²
Water column	80-85m (shallow marine)
Target imagine depth	800-1 500m
Target time	0.8-1.3 seconds
Reservoir/caprock type	Structural and stratigraphic
Reservoir/caprock lithology	Reservoir: siliciclastic (Lower Cretaceous); Caprock: carbonates (Upper Cretaceous)
Acquisition type	XHR Mini streamers reflection seismic survey

The recommendation for the mini-streamer configuration is presented in Table 6, and the source configuration in Table 7.

Table 6 - Typical XHR design of mini-streamer configuration.

Number of streamers	6–12 mini-streamers
Streamer length	600–1,000 m
Streamer separation	25–50 m
Streamer depth	2–4 m
Group interval	3.125–6.25 m

Table 7 - Source configuration.

Source type	Small airgun array
Total volume	300–1,000 in ³
Dominant frequency	80–200 Hz
Tow depth	1.5–3 m
Shot interval	6.25–12.5 min

3.2.1.3 Expected operational challenges

Some operational challenges for conducting the seismic surveys are expected due to the proximity to the Portuguese coast, imposed both by anthropogenic activities, like marine traffic and fishing activities, but also due to the local conditions, including current flow and direction, rip currents, high winds and swell peaks.

The survey area shows significant fishing activity, with much of the prospect covered by fishing gear. To minimise disruptions of both the seismic acquisition and local fishing activities, it is recommended to liaise with local officials and fishing unions.

Given how close the 3D seismic survey area is to the port of Figueira da Foz, marine traffic is expected to be significant. It is recommended to contact the port authorities and update them with the vessel locations throughout the survey acquisition to avoid complications.

3.2.2 Injection well drilling

The CO₂ injection well site is planned to be drilled in the offshore of the Lusitanian Basin and is located around 22 km away from Figueira da Foz (Figure 11). This well is planned to be used to inject less than 100 kt of CO₂ during a period between 12 and 15 months in the pilot phase, as well as acquire a comprehensive logging and testing program. This data collection is going to be crucial to assure the objective to use this same well later in a potential commercial phase.

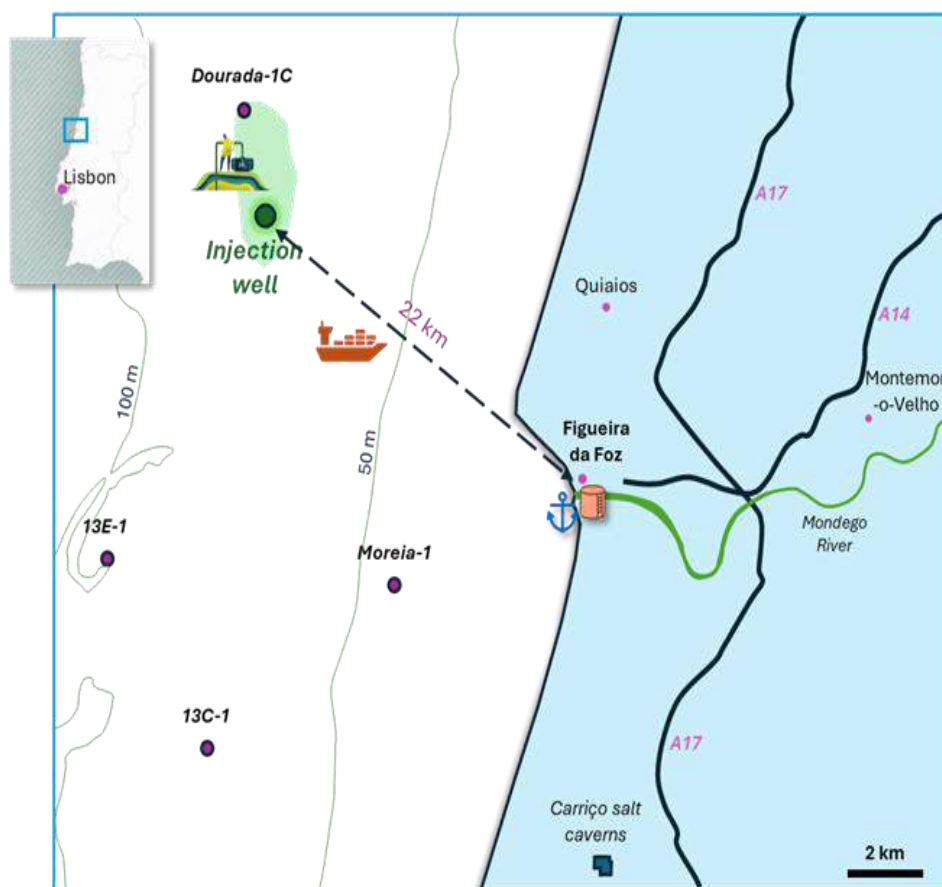


Figure 11 - Location of the CO₂ injection well.

3.2.2.1 Well Prognosis

The well depth prognosis is based on the data from the nearest legacy well Dourada-1C, located 11.7 km north from the selected injection location. The depth prognosis is presented in Table 8.

Table 8 - Well depth prognosis.

	Depth (m)	Formation	Lithology
Overburden		Fm. Espadarte	Siliciclastic deposits and dolomites from Cenozoic
Top Secondary Seal	415	Aveiro Group	Siliclastic deposits from the late Cretaceous
Top Primary Seal	770	Fm. Cacém	Limestones/dolomites, marls and clays from the Upper Cretaceous
Top Reservoir	880	Torres Vedras Group	Lower Cretaceous siliciclastic deposits, with coarse sediments at the bottom evolving into sandstones and interbedded mudstones towards the top.

3.2.2.6 Drilling Hazards

No drilling hazards are expected.

3.2.2.7 Well Perforation and Completion

The well design of the CO₂ injector is presented in Figure 12. The well has 4 sections: 20" conductor, 13 3/8" surface casing, 9 5/8" and open hole section. The lower part of the well is open hole to reduce the formation damages. At the 20" conductor, it a safety valve (DHSV - Downhole Safety Valve) will be installed, an emergency shut-off to prevent the uncontrolled release of reservoir fluids in case of a surface emergency. The total depth (TD) of the well is at 1,400m deep, in order to safely account for 2 injection intervals at 1,025 –1,065 m and 1,155 – 1,205 m below sea level.

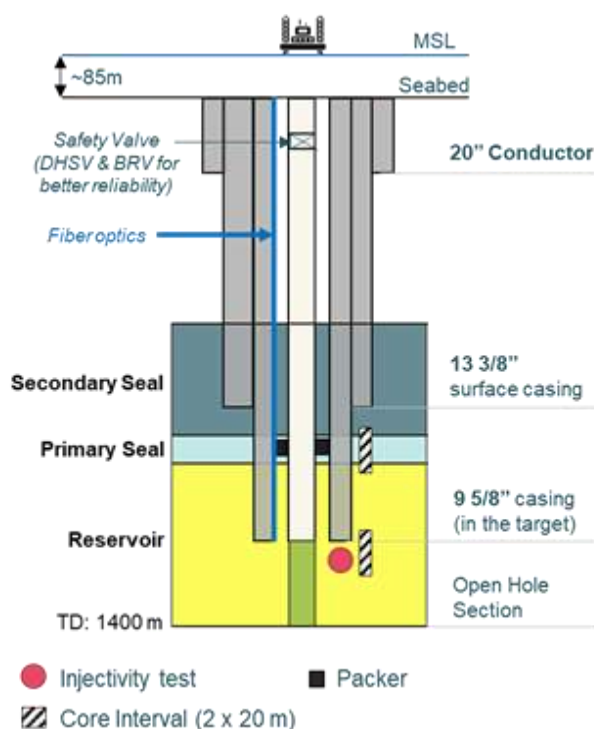


Figure 12 - Well design.

The well considers casing up to the topmost part of the well to provide an additional safety barrier. The surface casing shoe is 20", i.e, circa 0.5m. A wellhead will be installed during

all the perforation activities, and, on top of it, a Blow Out Preventer (BOP), as shown in Figure 13 to Figure 15. The wellhead is the critical surface assembly that seals the top of a wellbore, providing structural support for casing/tubing and serving as the control point to manage high-pressure flow of oil water from the reservoir to surface facilities and of CO₂ from the surface facilities to the reservoir. It acts as the "gatekeeper," connecting subsurface pipes to surface equipment. The BOP is high-pressure safety system installed on the wellhead to seal the wellbore and control dangerous oil/gas surges (blowouts) during drilling, acting as the rig's critical last line of defence for preventing environmental disasters and protecting personnel and equipment. The main functions of a BOP are well control (shuts off the well to contain formation fluids if pressure exceeds drilling fluid weight); sealing and environmental protection, by preventing uncontrolled release of fluids.

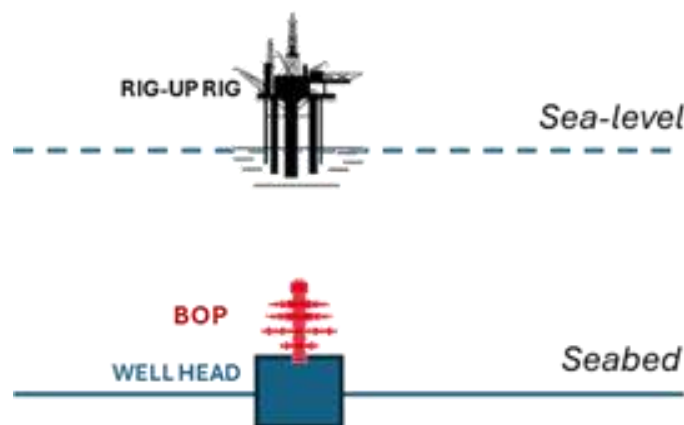


Figure 13 - Scheme of the well head and BOP installation.

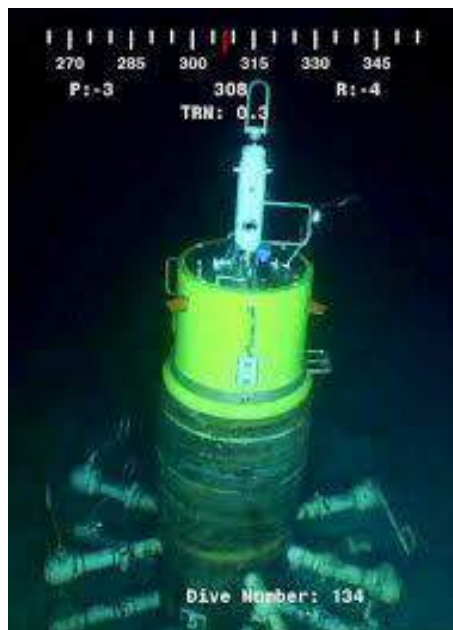


Figure 14 - Example of an offshore wellhead (Source: www.offshore-energy.biz/universal-subsea-installs-defender-on-talos-subsea-well/).



Figure 15 - Example of a BOP installation (Source: www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/rigs-and-equipment/pressure-control-equipment/).

The perforation of the 20" conductor and 13 3/8" surface casing well sections will be performed without riser and BOP, and using water-based mud, which will be discharged to the sea. This type of drilling mud is composed by fresh or saltwater with additives such as bentonite, barite or polymers. It has lower costs and less environmental harm. The deeper drilling sections (9 5/8" casing and open hole) are planned to be perforated with the support of a riser in the drill pipe and with BOP installed. In this case, oil-based muds can be an option because they provide a better well control; those muds are not released to the sea and are collected in the rig.

During the completion of the injection well, the wellbore is filled with a completion fluid or a brine, which is "clean", i.e, particle-free to avoid blocking perforations. The fluid is also specified to not damage the formation, and to provide a specific hydrostatic pressure in the wellbore. The fluid is typically a heavy-weight brine with a density chosen to achieve an overbalance pressure relative to the formation pore pressure, which helps ensure well stability and control fluid flow during the operation.

Jack-up rigs (Figure 16) are commonly used for drilling CO₂ injection wells in shallow to medium waters (up to 150 m), such as it happened in the CO₂ storage Greensand project, in Denmark. These types of self-elevating units provide a stable platform for precise drilling and injection operations and are often more cost-effective than fixed platforms for shallower CO₂ storage projects. They consist of a buoyant hull fitted with several movable legs, capable of raising its hull over the surface of the sea. The Jack-up rig dimensions vary widely, but generally include a hull (e.g., 55-70 m long, 53-72 m wide, 7-9 m thick) and long legs (e.g., 30-122 m or more), supporting large decks (e.g., 65x62 m² to 89x102 m²).



Figure 16 - Example of a Jack-up rig (Source: www.aquaterraenergy.com/the-only-way-is-jack-up-rigs-cost-effective-solutions/).

The Jack-up rig noise during drilling is significant, characterised by high Sound Pressure Levels (SPLs) up to 120 dB, and varying with operation intensity (louder drilling vs. holding), with dominant low frequencies (2-1400 Hz) but also higher tunes, impacting marine life with potential for behavioural changes and creating challenges for worker hearing protection, requiring controls for engine load and vibration. The sounds originate from machinery (pumps, engines) and drill-bit interactions, creating distinct frequency signatures that differ from support vessels, dropping off quickly at high frequencies.

3.3 Characterisation of the study area

The characterisation of the study area includes a description of the bathymetry, and geological, environmental, ecological, and socio-economic features, which constitute the preliminary baseline developed from the available data and information.

3.3.1 Bathymetry

Bathymetric data was collected from the EMODnet (<https://emodnet.ec.europa.eu/>) site which compiles the available multibeam and single beam data along the West Iberian margin. The study area is located offshore to the NW of the city of Figueira da Foz and is included in the geomorphological domain of the continental shelf and upper slope of Portugal's mainland (Figure 17). In this region, the continental shelf has an average width of 40-45 km, extending from the coastline to a depth varying between 50 to 100 m. It is generally characterised by a relatively flat surface, with seafloor slopes ranging between 0.23% and 0.35%.

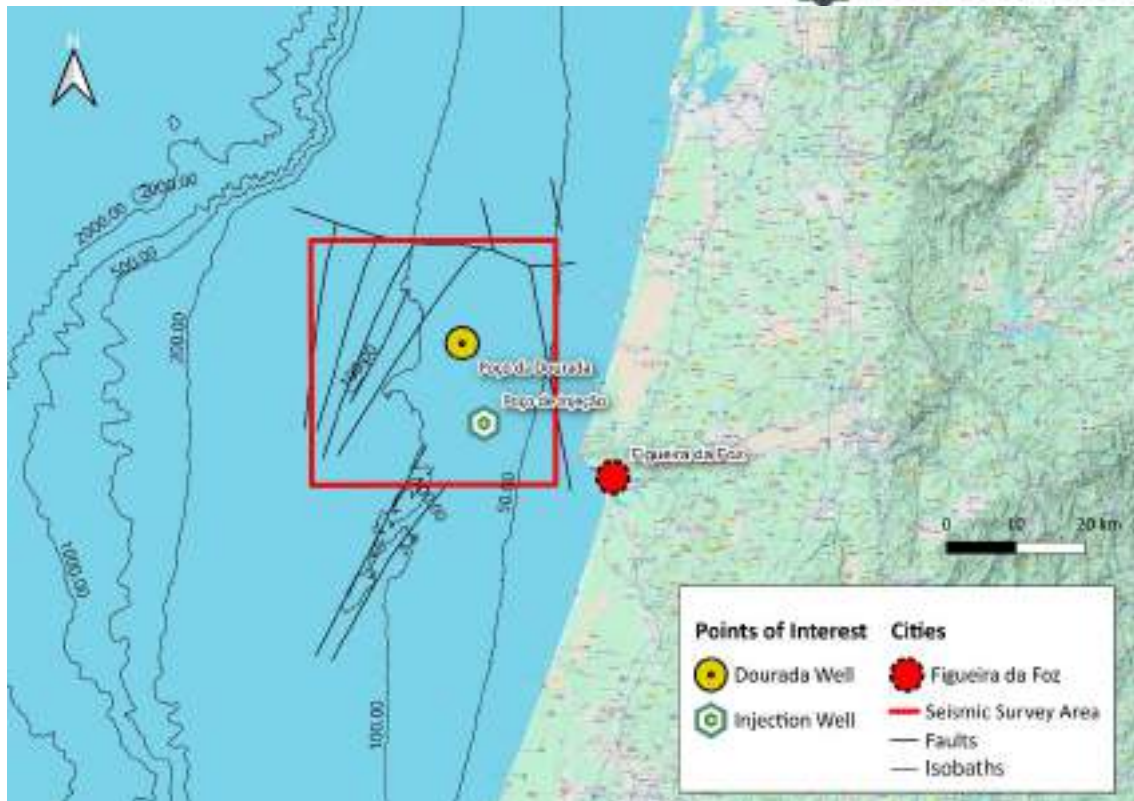


Figure 17 - Geographical setting of the study area (coordinates of the red polygon as in Table 3).

Regionally, the Western Iberian margin shows an irregular but generally narrow continental shelf with a shelf-break depth often near ~160 m. The margin is dissected by submarine canyons in an east-west direction, particularly in the areas south to the latitude of Figueira da Foz (e.g. Nazaré, Cascais and Setúbal–Lisbon canyons), from the continental shelf, at water depths shallower than 50 m, down to the Iberian abyssal plain, at water depths down to 5,000 m. Inherited tectonic features control the location of these submarine canyons, which result from erosive processes and sediment instability (e.g. Lastras et al., 2009).

3.3.2 Geology

Data from surface sediment composition (mainly based on grain size) was collected from EMODnet and is mapped as presented in Figure 18. The sediment type varies across the continental shelf, which is significant to interpret on the different benthic habitats: across the continental shelf, the sediment types exhibit significant variation, directly influencing the character of different benthic habitats (Mamede et al., 2022; Martins et al., 2013). As observed on the map, the coastal area and inner shelf within the study region are predominantly covered by coarse sediments and sands. Specifically, the map identifies extensive areas of sand (“Areia”, depicted in orange) and gravelly sand (“Areia Cascalhenta”, light yellow/beige). These coarse sediments are typical for dynamic coastal environments, supporting specific types of infauna and epifauna adapted to shifting substrates (Mamede et al., 2022).

Further offshore, in the mid-shelf region, the map indicates the presence of rock (“Rocha”, dark green). These rocky substrates represent significant hard-bottom habitats, which are vital for sessile organisms and provide shelter for diverse marine life. This aligns with the general description of the mid-shelf often featuring rocky outcrops. Transitional zones from these rocky areas and extending towards the shelf-break (though the shelf-break itself is not explicitly delineated by a specific sediment type on this map), are characterised by finer

sediments. The map shows areas of mud/silt (“Lodo”, grey) and gravel (“Cascalho”, light blue), which would correspond to the “muddy sands” mentioned in the broader regional description. These finer sediments typically host communities adapted to less energetic environments, often with higher organic content (Martins et al., 2013). Studies on the Portuguese continental shelf have shown that gravel sediments and shallow, sheltered areas tend to exhibit higher diversity values compared to mud sediments and deeper sites (Martins et al., 2013).

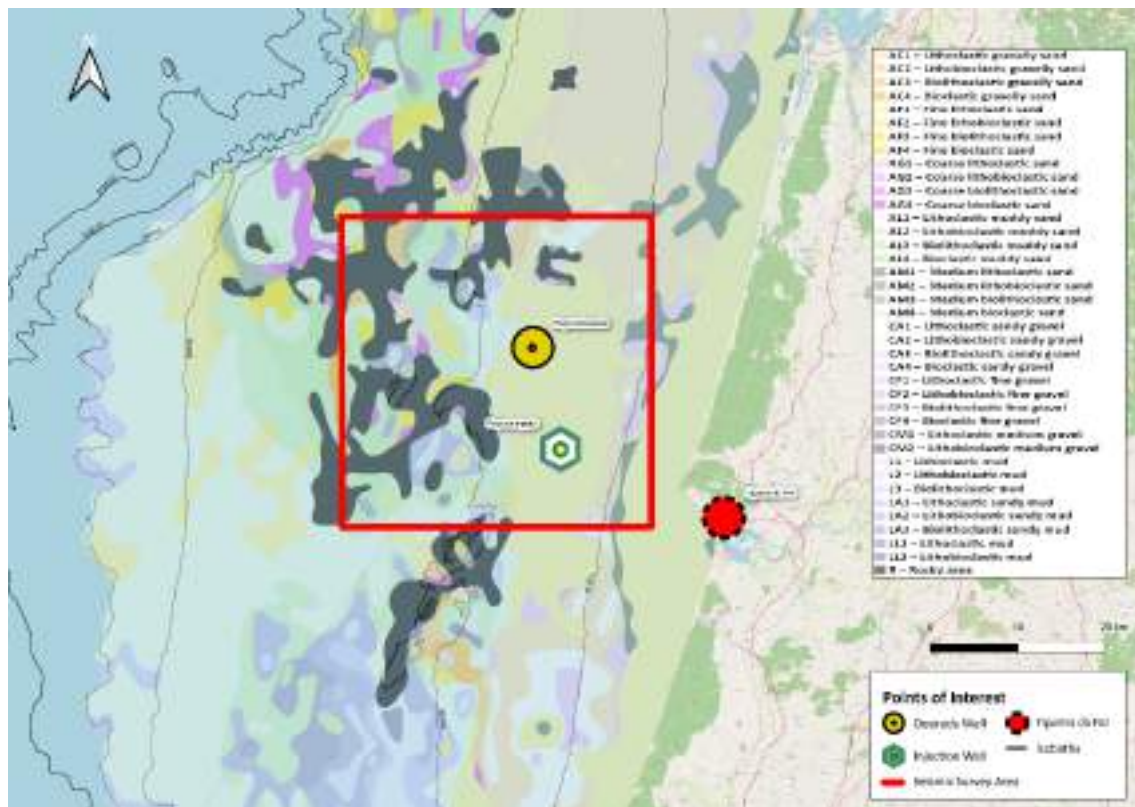


Figure 18 - Distribution of the different sediment types across the continental shelf and the study area.

3.3.3 Environment and ecology

3.3.3.1 Phytoplankton

Given the limited availability of specific and systematic studies addressing phytoplankton communities in the area directly offshore of Figueira da Foz, the present characterisation is based on the available regional and general scientific literature for the Western Iberian Coast (WIC) and, whenever possible, more specifically on studies referring to the northwestern and western Portuguese coast. Although this approach is necessarily generalised, it provides a robust framework to describe the structure, dynamics and variability of the phytoplankton communities expected in the study area, which is located within one of the most productive coastal systems of the Northeast Atlantic (Moita, 2001; Ferreira et al., 2021; Favareto et al., 2023).

Phytoplankton forms the base of the marine food web and plays a central role in oceanic primary production, nutrient cycling and the biological sequestration of carbon. These microscopic photosynthetic organisms are responsible for a substantial fraction of global carbon fixation and directly or indirectly sustain all higher trophic levels in marine ecosystems (Brotas et al., 2019; Moita, 2001). Their distribution and abundance are governed by physical, chemical and biological factors, particularly nutrient availability, vertical mixing intensity, water column stratification, solar radiation and ocean circulation patterns.

In general, marine phytoplankton communities are dominated by three major taxonomic groups: diatoms, dinoflagellates and coccolithophores. Diatoms are typically associated with nutrient-rich and highly mixed environments, showing high growth rates and playing a key role in the export of organic carbon to deeper waters. Common genera include *Chaetoceros*, *Pseudo-nitzschia*, *Leptocylindrus*, *Thalassiosira*, *Skeletonema* and *Rhizosolenia* (Moita, 2001; Favareto et al., 2023). Dinoflagellates, such as *Ceratium*, *Dinophysis*, *Gymnodinium* and *Prorocentrum*, tend to dominate under more stable and stratified conditions and are often characteristic of later bloom stages or of periods of upwelling relaxation. Coccolithophores, particularly *Emiliania huxleyi* (Lohmann) W.W.Hay & H.Mohler 1967, *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner 1943 and *Coccolithus pelagicus* (Wallich) J.Schiller 1930, are commonly found in more oceanic, relatively nutrient-poor waters and are associated with prolonged stratification and high-water transparency.

The Western and Northwestern coast of Portugal is part of the Iberian Margin Upwelling System, one of the most productive regions of the Northeast Atlantic. This system is characterised by predominant northerly winds during spring and summer, which induce Ekman transport and promote the upwelling of cold, nutrient-rich waters to the surface. These processes trigger strong increases in phytoplankton biomass, reflected in high chlorophyll *a* concentrations and intense blooms dominated by diatoms (Moita, 2001; Favareto et al., 2023).

The phytoplankton response to coastal upwelling has been thoroughly described by Favareto et al. (2023), who showed that both the intensity and duration of upwelling events strongly control community structure. During active upwelling, fast-growing diatoms such as *Chaetoceros* and *Pseudo-nitzschia* dominate, whereas periods of relaxation favour an increase in dinoflagellates and coccolithophores (Figure 19). This reflects a classical ecological succession driven by nutrient availability and the degree of stability of the water column. In situ observations by Moita (2001) had previously demonstrated that waters off the Portuguese coast show a clear seasonal succession of phytoplankton communities: dominance of diatoms during spring and summer in association with upwelling, increasing relative importance of dinoflagellates during periods of water column stratification and relaxation of upwelling, and greater abundance of coccolithophores in more oceanic environments or in late bloom stages. These patterns are consistent with satellite-derived chlorophyll *a* distributions, which show strong coast-to-offshore gradients and high interannual variability (Ferreira et al., 2021; Favareto et al., 2023).

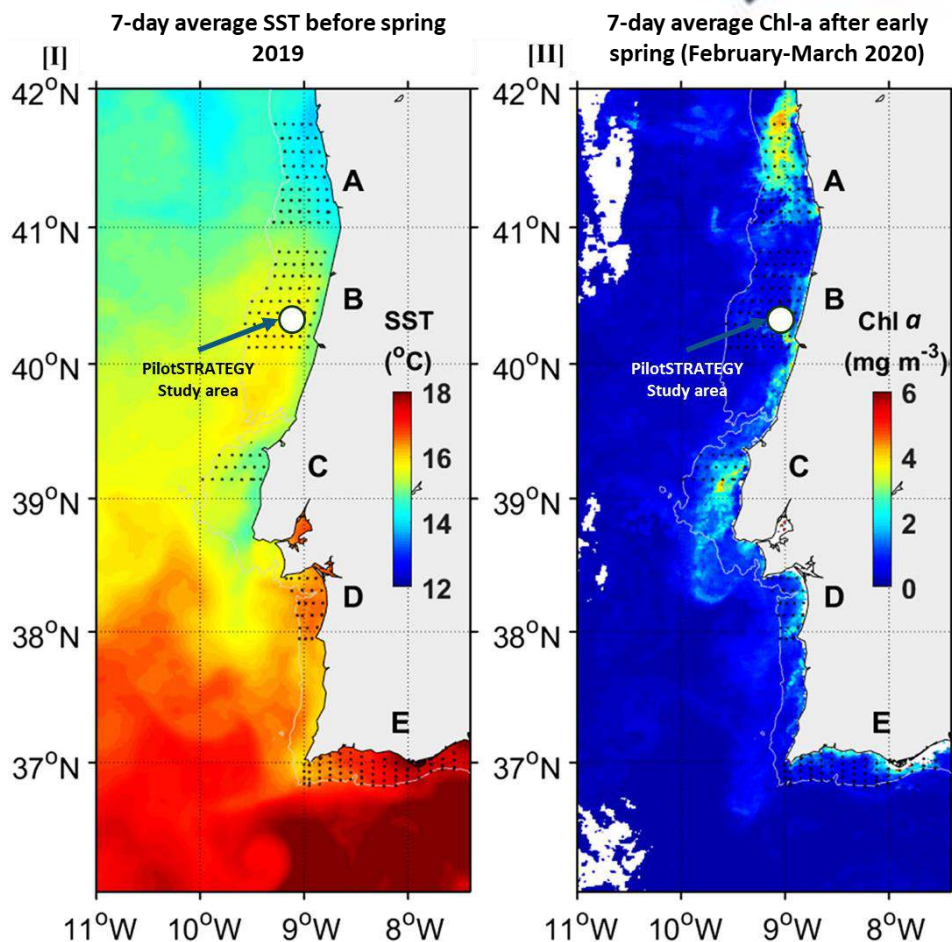


Figure 19 - Satellite images exemplify the water conditions with a seven-day average of the [I] SST ($^{\circ}\text{C}$, NASA/JPL, 2015) before spring 2019 and [II] the Chl a concentration (mg m^{-3} , EU-CMEMS, 2022) after early spring in area A. The images exemplify the response of phytoplankton community structure to coastal upwelling and relaxation phases, with the dominance of diatoms during active upwelling and the increase of dinoflagellates and coccolithophores under more stratified conditions. Source: Favareto et al. (2023).

The results obtained by Moita (2001), Mendes (1997; 1999) and Cruz et al. (2022) are consistent with the coastal upwelling phenomena that prevail between June and September along the Portuguese coast. These processes are particularly intense along the northwestern and northern coasts of the Iberian Peninsula, where surface waters are colder and richer in nutrients. Throughout the coastal zone, enhanced vertical mixing of the water column is usually associated with storm events and/or strong upwelling conditions and is characterised by the presence of communities dominated by species that are mostly benthic in origin, such as *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve 1873, *Thalassiothrix* spp., *Thalassiosira eccentrica* (Ehrenberg) Cleve 1904, *Navicula* spp., *Odontella mobiliensis* (Bailey) Grunow 1884, *Pleurosigma* spp., *Diploneis* spp., and *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschkowsky 1902. Associated with these communities, coccolithophores such as *Emiliania huxleyi* (Lohmann) W.W. Hay & H. Mohler 1967 and *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner 1943 may also be found, although these taxa generally occur under conditions of lower turbulence and at greater distances from the coast. During summer, and as indicators of water column stratification, dinoflagellates such as *Ceratium* spp., *Dinophysis* spp., *Prorocentrum* spp., *Gymnodinium* spp., and *Gyrodinium* spp. are commonly observed, together with the diatom *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström 1986. The intensification of surface water circulation with the onset of the autumn period appears to be responsible for the transport of species such as *Hemiaulus chinensis* Greville 1865, *Helicosphaera carteri* (Wallich) Kamptner 1954, and *Syracosphaera*

pulchra Lohmann 1902, which show a stronger affinity during summer. In association with these species, the dinoflagellates *Gymnodinium catenatum* H.W. Graham 1943 and *Alexandrium affine* (H. Inoue & Y. Fukuyo) Balech 1995 characterise chain-forming dinoflagellate blooms that typically occur in autumn, with higher concentrations in convergence zones along the north-western Portuguese continental shelf.

The analysis of phytoplankton bloom phenology by Ferreira et al. (2021), based on a 22-year daily time series of satellite-derived chlorophyll-a data, identified five major phenoregions along the Western Iberian Coast (Figure 20). Of particular relevance to the present study area are the Continental Margin (CoMa) and the Coastal Upwelling (CoUp) phenoregions. The CoMa region represents a transition zone between oceanic and coastal domains, with blooms typically occurring in spring, starting in February, peaking in March and ending in May. Phytoplankton biomass is moderate, reflecting the combined influence of coastal circulation, mixed layer depth and intermediate nutrient availability. In contrast, the CoUp phenoregion is characterised by very high productivity and strong temporal variability. Blooms are short-lived, intense and often directly linked to episodic upwelling events. On average, the main bloom occurs in late summer and early autumn (August to October), although multiple blooms may develop throughout the year in response to the pulsed nature of coastal upwelling (Ferreira et al., 2021).

In the area offshore from Figueira da Foz, phytoplankton communities are therefore expected to reflect a combination of these two main regimes: the direct influence of coastal upwelling typical of the CoUp phenoregion and the transitional characteristics of the CoMa phenoregion. In addition, local river discharge from the Mondego River may contribute to nutrient enrichment and the formation of coastal fronts, potentially enhancing local primary productivity and temporarily altering community composition.

Consequently, the phytoplankton communities most likely to occur in the study area are expected to be dominated by diatoms such as *Chaetoceros*, *Pseudo-nitzschia*, *Thalassiosira*, *Leptocylindrus* and *Skeletonema* during active upwelling periods; dinoflagellates such as *Ceratium*, *Dinophysis*, *Gymnodinium* and *Prorocentrum* during stratified conditions, and coccolithophores, especially *E. huxleyi*, in oceanic waters further away from the coastline and during late bloom phases.

Despite the fundamental ecological importance of phytoplankton as the basis of marine productivity, a regulator of biogeochemical cycles and the primary support of zooplankton and higher trophic levels, these communities are not expected to be among the most sensitive biological compartments to the activities of the PilotSTRATEGY project. The project activities tend to primarily affect the deep benthic habitats. Phytoplankton dynamics, on the other hand, are mainly controlled by surface processes such as coastal upwelling, water column stratification, solar radiation and nutrient availability within the euphotic zone. Therefore, any direct impacts on phytoplankton communities are considered unlikely, spatially and temporally limited, and largely masked by the very high natural variability that characterises this biological group along the western Portuguese coast.

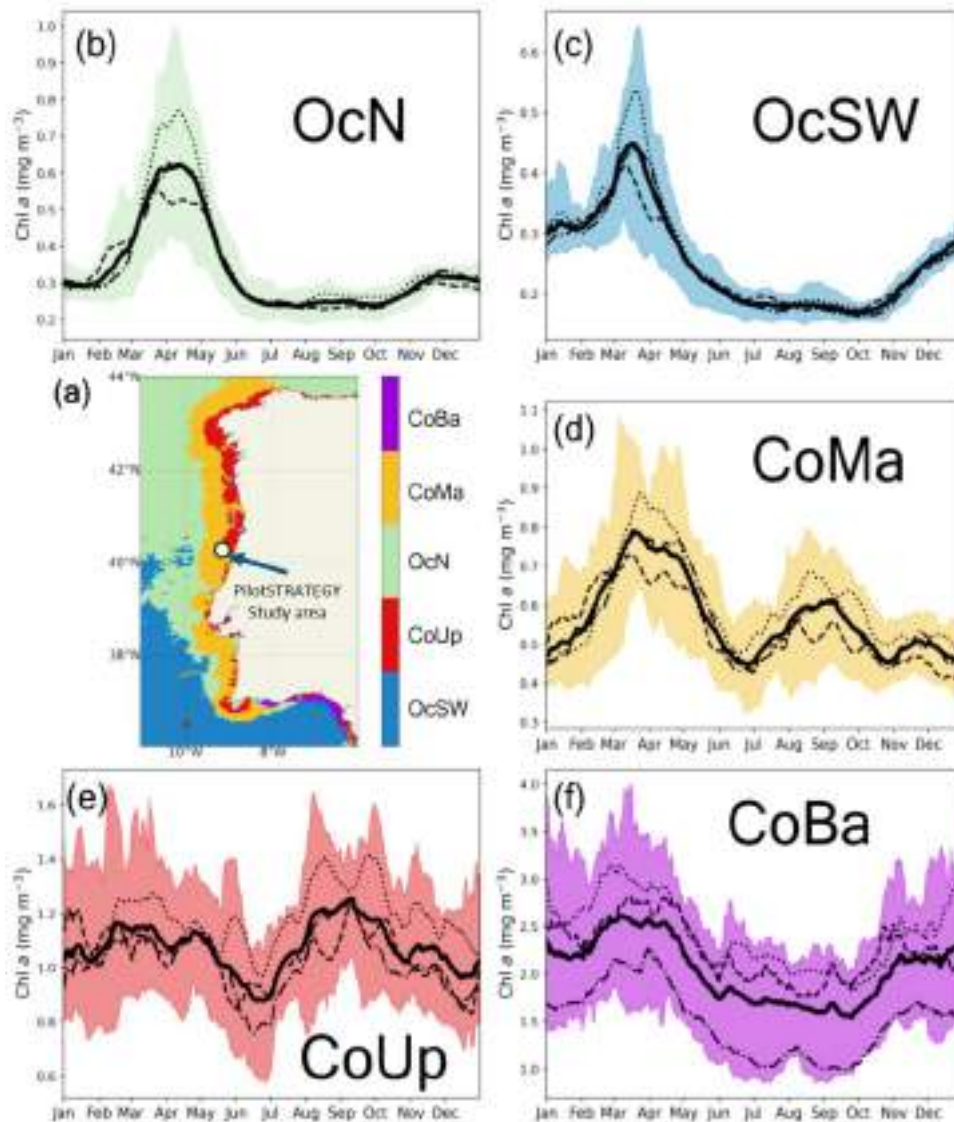


Figure 20 - Phenoregions of the Western Iberian Coast identified by Ferreira et al. (2021) based on a 22-year time series of satellite-derived chlorophyll-a data, highlighting the Continental Margin (CoMa) and Coastal Upwelling (CoUp) regions relevant to the study area. Source: Adapted from Ferreira et al. (2021).

3.3.3.2 Zooplankton

Due to the absence of directed studies on zooplankton communities, specifically in the study area, the characterisation presented in this report is based on the available literature for the Portuguese coast and the western Iberian coast in general, assuming that it provides a representative framework of the ecological functioning of the study area. This approach is commonly adopted in baseline studies when site-specific time series or targeted surveys are not available, allowing for a reliable characterisation of communities and of the dominant processes that control their dynamics (Pardal & Azeiteiro, 2001; Cunha, 1993a, b; MAMAOT, 2012).

Zooplankton comprises a wide range of organisms belonging to almost all major animal phyla and plays a central role in the structure and functioning of marine ecosystems. These communities constitute the main link between primary production by phytoplankton and higher trophic levels, ensuring the transfer of energy and matter to fish, seabirds, and marine mammals. Two major functional components are usually distinguished: holoplankton, consisting

of organisms that spend their entire life cycle in the water column, and meroplankton, which includes larval stages of benthic or nektonic species that temporarily inhabit the pelagic environment during their reproductive phase (Cunha, 1993a; Pardal & Azeiteiro, 2001).

From a taxonomic point of view, zooplankton shows a high structural and functional diversity (Figure 21). Cnidarians are mainly represented by hydromedusae and scyphomedusae, as well as by colonial organisms such as siphonophores, which can locally assume great importance in terms of biomass and predation on other planktonic components (Figure 21A-B). Molluscs contribute mostly through the production of eggs and larval forms, such as trochophore and veliger larvae (Figure 21C-D), which are key stages for dispersal and recruitment of benthic populations. Polychaete annelids are predominantly benthic organisms, but they appear in the zooplankton either as meroplanktonic larvae or, in some genera, as holoplanktonic carnivorous forms (Figure 21E). Crustaceans constitute the dominant group of marine zooplankton, occupying the second trophic level of the marine food web. Within this group, copepods are generally the most abundant and ecologically relevant organisms, often accompanied by cladocerans, ostracods, amphipods, euphausiids, mysids, and larval forms of decapods, such as zoeae and mysis of the class Malacostraca and zoeae and megalopae of the infraorder Brachyura (Figure 21F-K) (Cunha, 1993a; Pardal & Azeiteiro, 2001). Bryozoan larvae are also part of the zooplankton, being characterized by the presence of a ciliated band that allows active swimming and later settlement on the substrate, where metamorphosis occurs (Figure 21L). Chaetognaths, with their fusiform body shape and transparent appearance, are efficient predators of copepods and represent an important component of carnivorous zooplankton (Figure 21M). In addition, larvae of echinoderms, such as the equinopluteus and ophiopluteus stages, are common in productive coastal areas (Figure 21N). The phylum Chordata is represented in the zooplankton by three main groups: salps, appendicularians, and fish eggs and larvae (ichthyoplankton). Pelagic fish eggs are usually small (around 1 mm), transparent, and mostly spherical, although several morphological variations exist, such as ellipsoidal shapes in the genus *Engraulis* or ovoid forms in families such as Gobiidae and Ophidiidae (Morgado et al., 2014). These early life stages are fundamental to the population dynamics of fish resources and constitute an important fraction of the meroplankton (Figure 21O-P).

Along the Portuguese coast, the annual cycle of zooplankton production is strongly seasonal. Production is generally high from spring to autumn and decreases during winter, with holoplankton dominating throughout most of the year (Cunha, 1993a, b; Pardal & Azeiteiro, 2001). Zooplankton biomass typically reaches its maximum values in summer, reflecting increased food availability associated with enhanced primary production, whereas taxonomic richness tends to be higher in winter, particularly between November and January, when the community becomes more diverse but less abundant (MAMAOT, 2012). This decoupling between biomass and diversity is characteristic of temperate coastal systems and reflects the alternation between periods dominated by a few highly abundant groups and phases of higher taxonomic heterogeneity.



Figure 21 - Examples of organisms constituting the zooplankton of the Portuguese coastal zone: Cnidaria – A, *Podocorine carnea*; B, *Diphyes dispar*; Mollusca – C, Gastropoda; D, Bivalvia; Annelida – E, *Autolytus* sp. (Polychaeta); Crustacea – F, *Evadne nordmanni* (Cladocera); G, zoea larva of *Pachygrapsus marmoratus* (Decapoda); H, Mysidaceae; I, *Acartia tonsa* (Copepoda); J, Cirripedia; K, praniza stage of *Paragnathia formica* (Isopoda); Bryozoa – L, bryozoan larva; Chaetognatha – M, *Chaetognatha*; Echinodermata – N, ophiopluteus larva of *Ophiotrix fragilis*; Chordata – O, fish eggs; P, fish larvae.

Meroplanktonic components are particularly important in coastal zones, where decapod larvae (e.g., brachyuran crabs and shrimps) can represent a significant fraction of total abundance, especially in spring and summer, coinciding with the reproductive periods of benthic species (Monteiro et al., 2024). Recent studies further indicate that zooplankton structure and abundance along the Portuguese coast respond sensitively to climatic variability, particularly to changes in sea surface temperature and to atmospheric indices such as the North Atlantic Oscillation (NAO), which influence phenology, taxonomic composition, and overall productivity of these communities (Monteiro et al., 2024).

For the western and northwestern coast of Portugal, several studies indicate that zooplankton communities are strongly influenced by coastal hydrodynamics, thermal variability, and productivity processes associated with coastal upwelling and seasonal circulation. Zooplankton is generally dominated by copepods, with common genera including *Calanus*,

Acartia, Paracalanus, and Temora, often accompanied by cladocerans such as Evadne and Podon, appendicularians of the genus Oikopleura, and chaetognaths of the genus Sagitta (Cunha, 1993a; Pardal & Azeiteiro, 2001).

In general terms, the typical zooplankton composition of the W-NW Portuguese coast includes strong dominance of copepods within the holoplankton, regular presence of cladocerans, chaetognaths, and appendicularians, seasonal importance of crustaceans decapod and fish larvae within the meroplankton, and episodic occurrence of gelatinous organisms, such as medusae and siphonophores, which may locally exert significant impacts on trophic dynamics.

Despite the high ecological importance of zooplankton as a central link in marine food webs and as a regulator of energy transfer between primary producers and higher trophic levels, these communities are not considered particularly vulnerable to the activities foreseen within the PilotSTRATEGY project. Project-related operations will mainly take place in mesophotic benthic region and are not expected to directly interfere with the surface water column where most zooplankton production and feeding activity occur. It is nevertheless important to acknowledge that a large proportion of zooplankton performs diel vertical migrations, moving from intermediate depths layers during daylight hours to surface waters at night to feed. This vertical connectivity between surface and sub-surface water masses represents an intrinsic ecological feature of zooplankton dynamics. However, these migrations are typically confined to the upper part of the water column and are driven by natural environmental gradients such as light, predation pressure and food availability. They do not imply prolonged residence in the benthic environments where the project activities will take place. Therefore, potential impacts would be indirect, highly localized, and of low magnitude, and are unlikely to produce measurable changes in the structure, abundance or functioning of zooplankton communities at the regional scale considered in this study.

3.3.3.3 *Continental Shelf Benthic Ecosystems - Benthic Communities in Environmental Assessment*

Continental shelf benthic ecosystems play an important role in maintaining marine biodiversity and ensuring coastal systems functioning. Composed of soft bottoms and rocky substrates in certain areas, they provide a wide diversity of habitats that support many marine species and complex food webs (Schratzberger & Ingels, 2018; Min et al., 2023). Moreover, continental shelves have important economic value, being platforms of natural resources extraction and strategic areas for subsea infrastructure, including cables and pipelines (Gasparatos et al., 2017). The increasing intensity of these activities together with fishing, dredging, and coastal development has placed cumulative pressure on shelf environments, threatening their biodiversity, integrity, and long-term sustainability (Li et al., 2023). This underscores the urgent need for more effective and sensitive tools capable to detect accurately environmental disturbances at early stages. Traditional monitoring approaches have limited spatial resolution or response time, which makes it difficult to identify and mitigate the impacts before ecosystem degradation. Benthic communities, due to their affinity with sediment biogeochemistry and the rapid response to environmental changes, provide an efficient and ecologically robust knowledge for environmental monitoring (Vieira et al., 2023, 2025a, 2025b). Analysing the structure and function of these communities allows researchers to establish baseline conditions to evaluate the impact of human activities such as 3D seismic surveys, drilling and trawling. Integrating such analyses into environmental impact assessments (EIA) and long-term monitoring programs is therefore essential for sustainable management of continental shelf ecosystems.

Benthic communities include a wide range of organisms that live on or within seabed sediments. They include microorganisms, meiofauna, and macrofauna, which establish complex ecological interactions to regulate the biogeochemical processes, nutrient cycling, energy transfer, and sediment stability (Bonaglia et al., 2020; Schratzberger & Ingels, 2018).

Microorganisms (bacteria and archaea) are responsible for organic matter decomposition and nutrient regeneration, directly influencing sediment chemistry and oxygen availability (Wang et al., 2020). The metabolic activities are highly sensitive to environmental changes, making them valuable indicators of local and global pressures (Jokanovic et al., 2021; Jones et al., 2021; Vieira et al., 2025a).

Meiofauna are small-sized benthic metazoans (<63µm or 38 µm) that inhabit sediment interstices. They are abundant across a variety of marine habitats, from estuaries and continental shelves to the deep sea, exhibiting high habitat specificity (Panieri et al., 2023; Vanreusel et al., 2010; Zeppilli et al., 2018). Due to their small size, high abundance, rapid generation time, and lack of pelagic larval stages, meiofauna respond quickly to environmental disturbances, making them cost-efficient and reliable bioindicators (Kennedy & Jacoby, 1999; Ridall & Ingels, 2021). Among meiofaunal organisms, nematodes are the most diverse and abundant group in marine sediments, being equally dominant in the continental shelf or in disturbed habitats (Sroczyńska et al., 2021; Min et al., 2023). Their resilience and ubiquity make them excellent indicators of sediment ecological condition (Ridall & Ingels, 2021). Nematode community composition and spatial distribution are closely linked to sediment physicochemical characteristics. Even slight differences in organic matter content, oxygen concentration, grain size or depth can lead to substantial shifts in community structure (Gallucci et al., 2008; Adão, 2022; Min et al., 2023). Moreover, nematodes exhibit significant variability in their biological traits such as body length, biomass, and life-history strategies, reflecting local environmental conditions (Patrício et al., 2012; Sroczyńska et al., 2021).

Macrofauna (>500 µm) play an essential role in sediment reworking and biogeochemical cycling through bioturbation and bioirrigation. These processes enhance oxygen penetration, alter sediment permeability, and stimulate microbial activity, thus maintaining sediment stability (Kristensen et al., 2012; Bonaglia & Nascimento, 2023). The distribution patterns of benthic communities are modelled by environmental variables such as sediment type, water depth and food resources proxies (e.g., organic matter, chlorophyll *a* and phaeopigments) that are typically used as predictors (Gallucci et al., 2023; Charrier et al., 2023; Min et al., 2023). The functional diversity of benthic communities is also important to understand the energy transfer across trophic levels and the efficiency of biogeochemical processes (Hiscock et al., 2004, Bonaglia & Nascimento, 2023). Nematodes link microbial and macrobenthic components by grazing on bacteria, protozoa, and detritus, while serving as prey for macrobenthic organisms (Vafeiadou et al., 2013). Interactions between nematodes and bacteria are particularly relevant for sediment metabolism (Vieira et al., 2025b). Nematode grazing can stimulate bacterial biomass and enhance organic matter mineralization and denitrification, whereas bacterial communities' abundance and diversity directly affect nematode assemblages' dynamics (Zimmermann et al., 2016). These reciprocal relationships emphasize the importance of nematodes and bacteria as ecological predictors of the shelf bottoms (McMahon et al., 2021).

Combining all benthic communities provides a comprehensive understanding of sediment ecological conditions. Each group responds to environmental changes at different spatial and temporal scales, offering complementary information on stressor impacts. Incorporating benthic communities into environmental monitoring and impact assessment frameworks can significantly enhance the ability to detect and interpret human-induced

changes. These biological indicators provide a cost-effective, accurate and robust basis for evaluating sediment disturbances, supporting the development of more responsive management strategies for continental shelf ecosystems. Marine infrastructures significantly impact benthic ecosystems through various environmental mechanisms (Gasparatos et al., 2017). During the construction of structures like offshore wind farms and oil rigs, the substrate is altered and several habitats can be destructed (Currie et al., 2005). The habitat change due to the alteration of hydrodynamic and sedimentation processes is another critical disturbance, affecting the distribution patterns of the communities. Marine infrastructure can disrupt species interactions, changing community-relative trophic composition and the energy flow throughout the local food webs (Coolen et al., 2022; Chen et al., 2024). Together, these impacts underscore the need of incorporating these factors into environmental impact assessments for marine infrastructure projects.

3.3.3.3.1 Main benthic structures expected on the continental shelf off Figueira da Foz

The ecological characterisation of the benthic communities within the PilotSTRATEGY study area is based on the integration of existing bibliographic datasets and spatial information. The probability of occurrence maps, EUNIS habitat maps, and community distribution models (CDM) available in Mamede (2018) will serve as baseline layers, enabling direct comparison with the local predictions produced for the project study area. This procedure will support the preliminary assignment of dominant benthic community types, characteristic and exclusive species of macrofauna and assess potential biodiversity “hotspots” and areas of ecological sensitivity.

3.3.3.3.2 Oceanographic and Physical Setting of the Study Area

The pilot project designed in PilotSTRATEGY will take place in Portuguese continental shelf, in a confluence zone influenced by the cold waters of the North Atlantic and by the warm waters from northern Africa and the Mediterranean Sea (Mamede, 2018). It is also located in proximity to the Nazaré Submarine Canyon, one of the most significant geomorphological features on the Portuguese margin (Dias and Nittrouer, 1984). The Mondego River is the allochthonous source of sediment inputs to the local coastal and shelf system. Several studies indicate that the occurrence of benthic communities typically associated with muddy sediments on the continental shelf adjacent to the Mondego estuary mouth is the result of a clear influence of estuarine sediment dynamics and freshwater discharge on the structure of the regional benthic habitat (Mamede, 2018; Martins et al., 2012, 2013, 2014).

3.3.3.3.3 Benthic communities’ spatial distribution patterns in the study area

Studies have identified distinct communities based on depth, organic matter availability, and hydrodynamic conditions (Vanaverbeke et al., 2011; Martins et al., 2013). Benthic communities are influenced by high organic matter flux and physical disturbances like sediment resuspension, creating a complex environment with varying community structures. These structures can support high benthic biomass due to nutrients mobilization, although in some areas with high current and mechanical disturbances communities can experience stress, leading to lower diversity and resilience (Ramalho et al., 2014; Min et al., 2023; Chen 2023). Surface shelf sediments are controlled by a wide variety of factors: lithology of mainland, fluvial input, hydrodynamism, physiography of the shelf (slope, morphological barriers), biological activity, paleoclimatic changes and anthropogenic contamination.

According to Mamede (2018), local macrofauna community abundance and diversity decrease with increasing distance from the coast and depth. The highest values are found in the shallowest areas up to a depth of around 50 m, decreasing in deeper bottoms. This tendency near the 50 – 60 m was also

coincident with the presence of coarser sediments (Vanaverbeke et al., 2011; Martins et al., 2013). These patterns related to depth in continental shelf environments along the deep basin are similar to those observed in meiobenthic communities (Min et al., 2024), showing that it is equally important to incorporate these communities in environmental assessments and in monitoring plans.

In Mamede (2018), macrofauna communities were categorised by the sediment characteristics, hydrodynamic regime and biological composition. The groups A3, A2, B1, C1 and C2 are the ecological communities that overlap with the PilotSTRATEGY project study area (Figure 22). This classification was based on the EUNIS habitat typology (hierarchical system for classifying European habitats), Marine Life Information Network (MarLIN) (Hiscock et al., 2004) and regional adaptations for the Portuguese continental shelf. The classification integrates: sediment grain size (proportion of fines, sand and gravel); hydrodynamic exposure (tidal forcing, currents, turbulence); taxonomic composition (dominant macrobenthic communities) and functional traits (feeding modes, mobility, sensitivity to disturbance). Each group represents a benthic habitat type with distinct ecological functions, sensitivity levels, and responses to anthropogenic pressure, which are essential for risk assessment and monitoring programs.

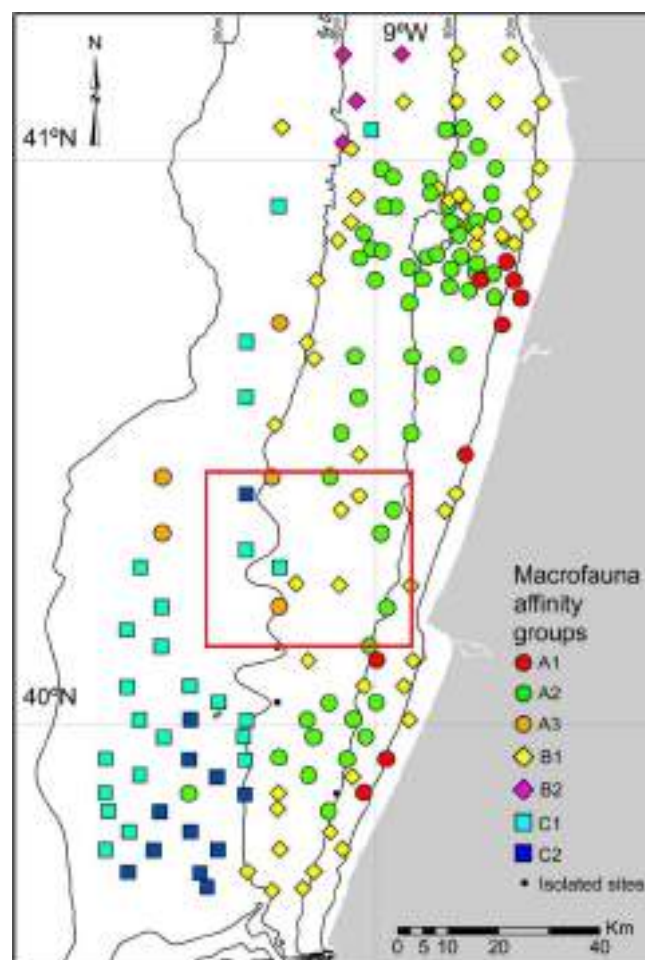


Figure 22 - Spatial distribution of the benthic macrofauna affinity groups in the study area (adapted from Mamede, 2018).

The continental shelf within the Pilot project study area comprises a range of geomorphological structures that modulate hydrodynamics and sediment sorting that directly influence the distribution of communities A2, A3, B1, C1 and C2 (Martins et al., 2012). The study

area extends a sediment gradient from coastal sand and gravel to offshore mixed and muddy substrates, corresponding to a mosaic of benthic communities with varying ecological sensitivity (Table 9 and Table 10).

Table 9 - Spatial, bathymetric and sedimentary characteristics of macrobenthic communities A2, A3, B1, C1 and C2 defined in Mamede (2018).

Community	Depth Range	Dominant Substrate Type	Hydrodynamic Regime (Sediment Stability)
A2 – coarse sands & fine gravel	≈30–80 m (mean 57.1 m)	Very coarse sand and fine gravel	Moderate to high energy (well-sorted coarse sediment, strong bottom currents)
A3 – Deep coarse sands	≈100–140 m (mean 120.5 m)	Coarse sand	Low energy but stable (coarse sands in deeper, low-mobility environment)
B1 – Fine sands	≈20–100 m (mean 56.5 m; widest depth range)	Fine sand (with low fines content (≈6%))	Moderate (mobile fine sands, influenced by waves and tidal currents)
C1 – Deep very fine sands	≈100–140 m (mean 126.8 m)	Very fine sand	Low–moderate (fine sediment accumulation in deeper, calmer sector)
C2 – Deep muddy sands / sandy mud	≈100–160 m (mean 122 m)	Muddy or sandy mud, very low gravel (0.04%)	Low energy (sediment retention, reduced mobility, organic-rich)

Based on the bibliographic dataset available and aligned with regional benthic studies (Martins et al., 2012a, 2013, 2014; Mamede, 2018), each community contains relevant traits that can be used for ecological assessment, sensitivity analysis and biomonitoring during the Pilot project (Table 10). The identified species are based on the typical composition of Portuguese continental shelf benthos and align with the expected community structures found in Mamede (2018) and similar studies for the Western Iberian Margin (Martins et al., 2012, 2013, 2014).

Table 10 - Ecological assemblages A3, A2, B1, C1 and C3 described by “characteristic species”, “exclusive species”, “sensitive level” * and ecological relevance according to Mamede (2018).

Community	Characteristic Species	Exclusive Species	Sensitivity Level*	Ecological Relevance
A2 – coarse sands & fine gravel	<i>Gyptis propinqua</i> , <i>Malmgrenia ljunmani</i> ; the cephalochordate <i>Branchiostoma lanceolatum</i>	<i>Guernea</i> (<i>Guernea</i>) <i>coalita</i> ; <i>Eurysyllis tuberculata</i> ; <i>Megamphopus cornutus</i> (and others; 147 total)	Moderate	Indicative of well-oxygenated, high-energy coarse sediments; interstitial fauna sensitive to sediment fining. Moderate resilience to disturbance.
A3 – Deep coarse sands	<i>Scalibregma celticum</i> ; <i>Urothoe marina</i>	5 exclusive species	Moderate – High	Species typical of stable coarse sands at depth. Sensitive to hydrodynamic change and sediment instability; not opportunistic and not eutrophication indicators.

Community	Characteristic Species	Exclusive Species	Sensitivity Level*	Ecological Relevance
B1 – Fine sands	<i>Urothoe pulchella</i> ; <i>Glycera tridactyla</i>	<i>Bathyporeia tenuipes</i> ; <i>Westwoodilla caecula</i> ; <i>Lysippe labiata</i> (82 exclusive species total)	Moderate – High	Fine-sand assemblage with very high β -diversity and many exclusive species. Sensitive to sediment burial, dredging and physical disturbance.
C1 – Deep very fine sands	<i>Auchenoplax worsfoldi</i> ; <i>Terebellides stroemii</i>	<i>Euclymene</i> sp. A; <i>Galathowenia oculata</i> ; <i>Callianassa subterranea</i> (53 exclusive species)	High	Biodiversity-rich deep-sand community; tube-building and deposit-feeding taxa. High sensitivity to turbidity and organic enrichment; slow recovery.
C2 – Deep muddy sands / sandy mud	<i>Paradiopatra bihanica</i> ; <i>Nephtys incisa</i>	2 exclusive species (without references)	Very High	Structurally fragile muddy habitat with low resilience. Dominated by bioturbators tolerant to low O ₂ . Priority for monitoring and protection.

*The sensitivity level is based on a combination of ecological criteria, including species traits (feeding mode, Life-history traits, species mobility), sediment dynamics (stability), hydrodynamic exposure and recovery potential, as established in Mamede (2018) and widely used in benthic impact assessment frameworks for offshore activities.

3.3.3.3.4 Detailed characterisation of each community (A2, A3, B1, C1 and C2) and their structuring factors (abiotic/biotic factors)

Community A2 – Very Coarse Sands and Fine Gravel

Community A2 is distributed extensively across the central and northern shelf, occurring at depths ranging from approximately 30 to 80 m. This community comprises a total of 59 sites, but only five sites overlap the study area of Pilot project. It is characterised by very coarse sands and fine gravel, often associated with moderate to high hydrodynamic energy. According to Mamede (2018), the “group A2” recorded the highest average α diversity, total species richness and exclusive species (147 species), as well as the second highest average abundance, β diversity and Shannon-Wiener index. The characteristic species of these communities are the polychaetes *Gyptis propinqua* Marion & Bobretzky, 1875 and *Malmgrenia ljunmani* (Malmgren, 1867), and the cephalochordate *Branchiostoma lanceolatum* (Pallas, 1774). *G. propinqua* is an interstitial polychaete typical of high-energy coarse-sand environments. It is a mobile detritivore that sustains various aquatic life forms, including fish and invertebrates. Its presence reflects clean, well-oxygenated, high-energy substrates, making it a useful indicator of habitat stability and sediment quality. Because *G. propinqua* responds sensitively to changes in sediment composition and hydrodynamic conditions, it can be employed as an early indicator of environmental shifts or disturbance within coarse-sand benthic ecosystems (Pérez-Espinoza et al., 2025). *M. ljunmani*, an amphipod, is a mobile predator associated with stable coarse sediments. Its monitoring value is underscored by its function as an indicator species, reflecting the health of benthic environments (Ritter & Bourne, 2024). The cephalochordate *B. lanceolatum* is a filter-feeder, indicator of clean, well-oxygenated coarse sand.

Community A3 – Deep Coarse Sands

This overall community comprises 5 deep sites, but only two sites overlap the study area. These sites are characterised by deep coarse sandy substrates on the outer shelf, with a

mean depth of ≈ 120 m. These sediments are well-sorted, with low mud content, that reproduce low energy but stable depositional settings on the outer shelf. In contrast to A2 assemblages, A3 exhibits the lowest β -diversity, comprising solely five exclusive species, predominantly comprising specialised coarse-sand taxa associated with stable, oxygenated deep habitats. The characteristic species are the polychaete *Scalibregma celticum* Mackie, 1991 which is considered a deep burrower; typical of stable coarse sands, and the *Urothoe marina* (Spence Bate, 1857), a mobile amphipod which contributes to bioturbation. The community shows moderate sensitivity to seabed disturbance because its key species depend on sediment stability and low siltation.

Community B1 – Fine Sands (wide depth range)

This overall community comprises 53 sites, but only five sites overlap the study area. They represent the widest depth range (from the shallowest sampled sites to ≈ 100 m) and are mainly composed of fine sands with low fines ($\approx 5.9\%$). It is distributed across the entire north-south extension of the study area. The “group” is composed of a high number of exclusive species (82 species) and registered the highest β -diversity. The most characteristic species are the amphipod *Urothoe pulchella* (A. Costa, 1853), a mobile detritivore typical of fine mobile sands, and the polychaeta *Glycera tridactyla* Schmarda, 1861, an active predator and indicator of sediment stability and organic turnover. Community B1 is a fine-sand, high-turnover, mixed-functional community with moderate sensitivity to sediment burial and physical disturbance.

Community C1 – Deep Very Fine Sands

These sediments are characterized by very fine sands (with some mud) located mainly in the southwestern sector, with a mean depth of ≈ 127 m, and it describes two sites of the study area. The high α -diversity was observed in communities, comprising 53 exclusive species, dominated by tube-building and deposit-feeding polychaetes. The most characteristic species are the polychaetes *Auchenoplax worsfoldi* Jirkov & Leontovich, 2013, a tube-building stabiliser of fine sediments, and *Terebellides stroemii* Sars, 1835, a sensitive deposit-feeder indicator of stable deep sands. C1 is one of the most diverse communities and is sensitive to sediment burial, turbidity increase, and organic loading.

Community C2 – Deep Muddy / Sandy-Mud Sediments

This community occurs in deep muddy or sandy-mud sediments with the highest fines content (mean fines 55-79%) and extremely low gravel (0.04%). It is located in the southern margin, mostly off Mondego. The sites are located in deep bottoms (mean depth ≈ 122 m), where hydrodynamics is very low, being a sediment accumulation zone. Only one site is represented in the study area. They recorded the lowest abundance and α -diversity, characterizing a reduced, fine, organic-rich habitat. Both most characteristic and abundant species are the polychaetes *Paradiopatra bihanica* (Intes & Le Loeuff, 1975), a strong bioturbator and tolerant of low oxygen, and *Nephtys incisa* Malmgren, 1865, a carnivore common in muddy stable sediments. C2 is the least resilient community, being highly sensitive to disturbance, siltation, and organic enrichment.

Final remarks

The benthic community structure within the Pilot project study area reflects a strong interplay between sediment grain size, depth gradients, hydrodynamic energy, and organic matter contents, consistent with the patterns described in Mamede (2018) for the adjacent continental shelf. Five well-

defined benthic communities A2, A3, B1, C1 and C2, occupy distinct environmental niches across the polygon and provide a robust ecological framework for baseline assessment, impact prediction, and monitoring planning.

Communities A2 (very coarse sand and fine gravel) and A3 (deep coarse sands) represent the coarse-sediment assemblages, with high-energy to deep stable sands. A2 occurs primarily on the mid-shelf in well-oxygenated, high-energy environments, while A3 inhabits deeper, more stable coarse-sand bottoms. Their characteristic taxa – *G. propinqua*, *M. ljunghmani*, the cephalochordate *B. lanceolatum* in A2, and *S. celticum* and *U. marina* in A3 are related to permeable sediments with high hydrodynamic flushing. Although coarse-sand communities can exhibit a degree of resilience, they remain highly sensitive to sediment burial, substrate fining, and depositional processes that modify interstitial space or oxygen penetration. These communities can be used as reliable indicators of sediment stability and hydrodynamic regime and should be preserved as reference conditions within the disturbance assessment context.

Communities B1 extends over a wide depth gradient (from shallow nearshore to ≈ 100 m) and is characterised by fine sands with low silt content, supporting a functionally diverse assemblage dominated by mobile detritivores (e.g., *U. pulchella*) and predators (e.g., *G. tridactyla*). B1 exhibits the highest β -diversity in the region and contains numerous exclusive species, making it particularly informative for detecting localised disturbance gradients along the shelf. Its functional traits indicate moderate to high sensitivity to sediment deposition, increased turbidity, and physical disturbance, particularly from activities that modify near-bed flows or increase fine-sediment loads. B1 should be prioritised for spatially clear monitoring, including the use of sentinel taxa and trait-based indicators.

Communities C1 (deep very fine sands) and C2 (mud to sandy mud) dominate the deeper southwestern and southern portions of the study area. They are considered as deep fine-sediment assemblages, highly diverse with low resilience. C1 shows high α -diversity, with key species such as the polychaetes *A. worsfoldi* and *T. stroemii*, reflecting stable, low-energy depositional environments with moderate organic matter. This assemblage is sensitive to prolonged turbidity, organic enrichment, and sediment disturbance. C2, by contrast, occupies fine, organic-rich, low-energy muds, and contains the lowest diversity and resilience of all communities. Its characteristic species (*P. bihanica*, *N. incisa*) indicate tolerance to low oxygen but vulnerability to physical disruption. C2 should be treated as a high-risk receptor in any predictive modelling or impact assessment.

In summary, benthic communities exhibit predictable functional responses to pressure gradients: Coarse communities (A2, A3) are sensitive to sediment burial, changes in flow velocity, and sediment fining. Fine-sand community (B1) is a transitional and diagnostic assemblage, reacting quickly to increases in turbidity and depositional flux. Deep fine-sediment communities (C1) are diverse although fragile, with slow recovery trajectories. Muddy communities (C2) are highly vulnerable to physical disturbances, with low resilience and strong functional dependence on bioturbating taxa. These characteristics provide clear guidance for impact modelling (e.g., plume dispersion, sedimentation thresholds, near-bed shear stress changes) and for defining ecological thresholds for the PilotSTRATEGY interventions.

3.3.3.4 Fish

The characterisation of the fish communities in the study area was based on information from the demersal surveys (2005-2023) carried out by the Portuguese Institute for the Sea and the Atmosphere (IPMA). The surveys follow a standardised methodology and consist of bottom trawl operations conducted at fixed and random stations distributed along the Portuguese

continental shelf, covering different geographical sectors and depth strata. Each trawl haul has a standardised duration and uses a demersal trawl net suitable for sampling species associated with the seabed and benthic-pelagic environments. In each operation, the species composition of the catches and the total number of individuals per species are recorded, allowing the estimation of abundance indices through CPUE (Catch Per Unit Effort), expressed as the number of individuals caught per hour of trawling (ind h^{-1}). This indicator was used in the present study to characterise the occurrence and relative frequency of fish species.

For this study, data corresponding to the stations located within the study area and a surrounding buffer area were considered (Figure 23). The conservation status of the fish species was assessed based on the International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List for Europe (www.iucnredlist.org), since the national assessment is currently under revision and has not yet been officially published. This methodological option ensures the use of an internationally recognised and up-to-date reference framework. Also, the economic value was determined based on official fish market landing statistics and daily first-sale prices, allowing each species to be classified according to its relative commercial importance (Table 11).

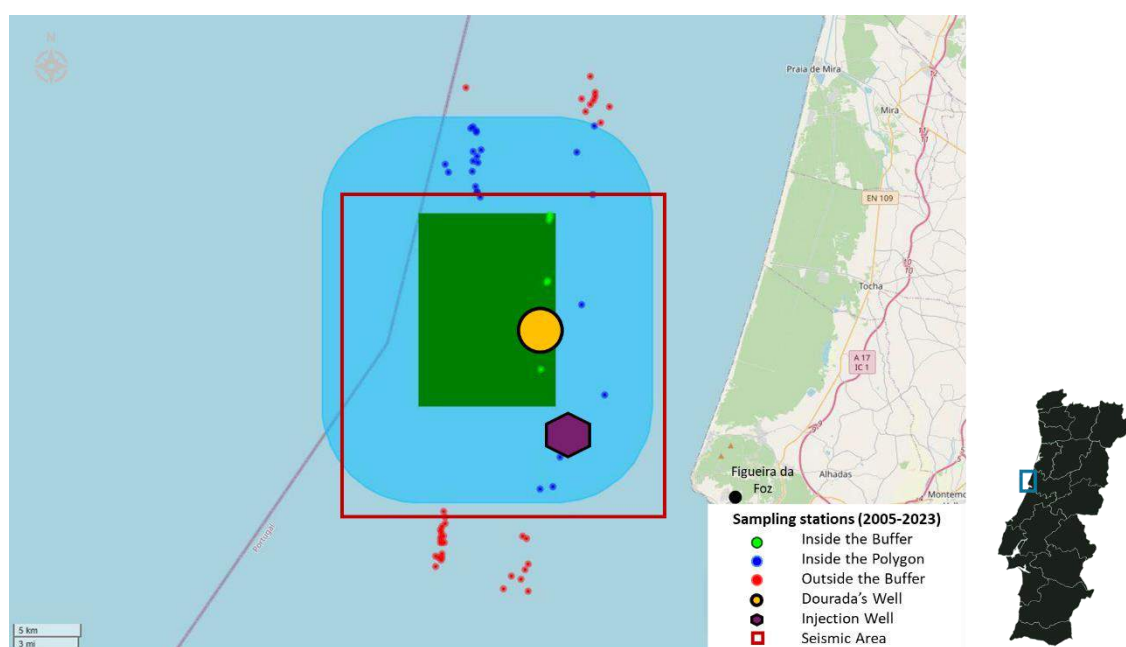


Figure 23 - Mapping of the fishing stations surveyed during the IPMA demersal bottom trawl campaigns between 2005 and 2023. The red polygon represents the study area, as defined by the area to be covered by the 3D seismic survey; the green polygon represents the area under assessment; the blue area corresponds to a 5 nautical mile buffer zone.

The fish community identified within the study area, considering jointly the area under assessment and the surrounding buffer area, comprises a total of 48 species belonging to 27 families, reflecting a high taxonomic diversity and a community structure typical of coastal and continental shelf ecosystems of the Northeast Atlantic. This assemblage integrates species with pelagic, benthic-pelagic and demersal affinities, highlighting the ecological heterogeneity of the area and the influence of regional oceanographic processes, particularly the high productivity associated with coastal dynamics along the Portuguese margin.

In terms of taxonomic representativeness, the family Sparidae is the most diverse, being represented by five species: Bogue *Boops boops* (Linnaeus, 1758), Common two-banded seabream *Diplodus vulgaris* (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817), Axillary seabream *Pagellus acarne* (Risso, 1827), Red porgy *Pagrus*

pagrus (Linnaeus, 1758) and Black seabream *Spondyliosoma cantharus* (Linnaeus, 1758). This family is followed by Triglidae, with four species: Red gurnard *Chelidonichthys cuculus* (Linnaeus, 1758), Tub gurnard *Chelidonichthys lucerna* (Linnaeus, 1758), Longfin gurnard *Chelidonichthys obscurus* (Walbaum, 1792) and Grey gurnard *Eutrigla gurnardus* (Linnaeus, 1758) (Table 11). Families such as Bothidae, Callionymidae, Soleidae and Gadidae are each represented by three species, while Carangidae, Scombridae, Gobiidae and Scopthalmidae include two species each. A large number of families were monospecific in the dataset, including Alosidae, Engraulidae, Merlucciidae, Mugilidae, Trachinidae, Zeidae, Molidae, Scyliorhinidae and Congridae, among others (Table 11). This structure reveals a community characterised by a small number of highly diverse families coexisting with a large group of families represented by a single species. When analysed separately, the two spatial units show clear differences in richness. Within the area under assessment, 23 species belonging to 17 families were recorded, whereas in the surrounding buffer area all 48 species and the total of 27 families were captured (Table 11). This indicates that the surrounding buffer area encompasses the full diversity observed in the region, while the area under assessment represents a subset of this diversity, mainly composed of the most abundant and ecologically dominant species.

The analysis of CPUE values reveals that the fish community is strongly dominated by small and medium-sized pelagic and benthopelagic species, typical of highly productive coastal ecosystems. In the area under assessment, a particularly marked dominance is observed for Blue jack mackerel *Trachurus picturatus* (Bowdich, 1825), which shows an extremely high CPUE (20,380.8 ind h^{-1}), clearly standing out as the most abundant species in the area. Other highly abundant species in this area include Atlantic mackerel *Scomber scombrus* (Linnaeus, 1758) (CPUE=1,123.4 ind h^{-1}), European pilchard *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792) (CPUE=32.6 ind h^{-1}), Atlantic chub mackerel *Scomber colias* Gmelin, 1789 (CPUE=216.6 ind h^{-1}), and Atlantic horse mackerel *Trachurus trachurus* (Linnaeus, 1758) (CPUE=184.8 ind h^{-1}). These species confirm the ecological importance of the families Carangidae, Scombridae and Clupeidae in structuring the pelagic fish assemblage. Other species with relevant CPUE values in the area under assessment include Argentine *Argentina sphyraena* Linnaeus, 1758, European hake *Merluccius merluccius* (Linnaeus, 1758), Pouting *Trisopterus luscus* (Linnaeus, 1758), European anchovy *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) and Lesser weever *Echiichthys vipera* (Cuvier, 1829), indicating the coexistence of pelagic and demersal species within the community.

In the surrounding buffer area, dominance is again associated with small pelagic species and gadids, although abundance is more evenly distributed among species. The European pilchard *S. pilchardus* presents the highest CPUE (1,826.7 ind h^{-1}), followed by Blue whiting *Micromesistius poutassou* (Risso, 1827) with 1,427.1 ind h^{-1} , Atlantic mackerel *S. scombrus* with 1,156.7 ind h^{-1} , European anchovy *E. encrasicolus* with 846.6 ind h^{-1} , and Atlantic horse mackerel *T. trachurus* with 781.5 ind h^{-1} . Other species also show high CPUE values in the surrounding buffer area, namely Blue jack mackerel *T. picturatus*, Atlantic chub mackerel *S. colias*, European hake *M. merluccius* (Linnaeus, 1758) and Pouting *T. luscus*. These patterns reinforce the role of pelagic and benthopelagic species as the structural backbone of the regional fish community, while demersal species contribute mainly to taxonomic diversity rather than to overall abundance.

Overall, the comparison between the area under assessment and the surrounding buffer area indicates that although the first one supports a smaller number of species and families, it effectively captures the core of the community in terms of dominant species and ecological functioning. The surrounding buffer area, in contrast, reflects the full taxonomic spectrum of the regional fish assemblage and provides a more complete picture of its biodiversity and ecological complexity. The frequency patterns derived from the heatmap further support the

interpretation based on CPUE values, showing that species with higher abundances are also those exhibiting higher frequencies of occurrence in both areas. In the area under assessment, Blue jack mackerel *T. picturatus*, Atlantic mackerel *S. scombrus*, European pilchard *S. pilchardus*, Atlantic chub mackerel *S. colias*, and Atlantic horse mackerel *T. trachurus* are consistently classified as “Very frequent”, reflecting their strong dominance and regular presence within the study area (Table 11). In the surrounding buffer area, these species remain highly frequent, together with Blue whiting *M. poutassou* and European anchovy *E. encrasicolus*, which also show very high CPUE values. These species form the core assemblage structuring the regional fish community and represent the main contributors to overall abundance and biomass in the area.

In contrast, a large number of species exhibit low CPUE values and are classified as “Rare”, in both areas. These include, among others, Undulate skate *Raja undulata* Lacepède, 1802, Spotted skate *Raja montagui* Fowler, 1910, Turbot *Scophthalmus maximus* (Linnaeus, 1758), Ocean sunfish *Mola mola* (Linnaeus, 1758), Small sandeel *Ammodytes tobianus* Linnaeus, 1758, Sanzo’s goby *Lesueurigobius sanzi* (de Buen, 1918), and several flatfish species such as Spotted flounder *Citharus linguatula* (Linnaeus, 1758) and Wedge sole *Dicologlossa cuneata* (Moreau, 1881). These species are typically associated with sporadic occurrences or naturally low population densities in the area, contributing mainly to the overall biodiversity rather than to community dominance.

Regarding conservation status, most of the species recorded are classified as LC (Least Concern), indicating that they are widely distributed and that their populations are currently considered stable on a European scale (Table 11). However, the presence of species with higher conservation concern is ecologically relevant. Turbot *S. maximus* is classified as VU (Vulnerable), representing the species of greatest conservation concern within the assemblage. Three species are classified as NT (Near Threatened): Thinlip grey mullet *Chelon ramada* (Risso, 1827), Undulate skate *R. undulata*, and European pilchard *S. pilchardus*. In Portugal, however, the Thinlip grey mullet does not have a specific conservation status or special protection measures and is therefore not considered of particular conservation concern at the national level. In contrast, the Undulate skate is subject to capture restrictions under Portuguese legislation (Portaria no. 96/2016, 19 April), reflecting its higher vulnerability and conservation priority in national waters. The European pilchard *S. pilchardus* is of particular importance because it combines high ecological relevance and very high abundance with a conservation status that indicates increasing vulnerability. In addition, several species are classified with DD (Data Deficient), namely Small sandeel *A. tobianus*, Ocean sunfish *M. mola* (Linnaeus, 1758) and John dory *Zeus faber* Linnaeus, 1758. The occurrence of these species introduces an additional level of uncertainty, as their population status remains insufficiently known, justifying a precautionary approach in environmental assessments.

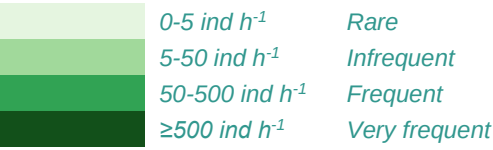
The analysis of economic value shows that most species present in the study area have low commercial value (Table 11), reflecting the fact that the assemblage is largely dominated by species that are either not directly targeted by fisheries or have limited market demand. Nevertheless, a small number of species present high economic value, namely Striped red mullet *Mullus surmuletus* Linnaeus, 1758, Red porgy *P. pagrus*, and Turbot *S. maximus*. These species are of considerable commercial importance and are highly valued in fish markets.

A second group of species presents medium commercial value, including Conger eel *Conger conger* (Linnaeus, 1758), Four-spot megrim *Lepidorhombus boscii* (Risso, 1810), European hake *M. merluccius*, Thickback sole *Microchirus variegatus* (Donovan, 1808), and Dover sole *S. solea*. Among these, European hake is particularly relevant because it combines high CPUE values,

especially in the surrounding buffer area, with a medium-to-high commercial value, making it one of the most socioeconomically important species in the area.

When abundance, frequency, conservation status and economic value are considered together, the fish community of the study area emerges as both ecologically and socioeconomically significant. The assemblage is dominated by highly abundant small pelagic species that play a fundamental role in trophic dynamics and energy transfer within marine ecosystems, while also supporting important commercial fisheries. At the same time, the occurrence of species classified as Vulnerable (VU) and Near Threatened (NT), as well as species listed with no conservation status data available, highlights that the study area can be regarded as having high commercial and conservation relevance. Consequently, the fish community represents a key biological component to be considered in the assessment of potential environmental impacts associated with the pilot CO₂ storage project, and its structure, abundance patterns and conservation-sensitive elements should be carefully evaluated when analysing and mitigating project-related pressures.

Table 11 - Frequency of occurrence based on the catch per unit effort (CPUE ind h⁻¹) of the fish community from the Pilot project study area recorded during IPMA sampling surveys (2005-2023). Colours represent the frequency of occurrence of each fish species in each area, namely the area under assessment and the surrounding buffer area (see Figure 23). Species are listed according to their taxonomic classification Search FishBase, and include both elasmobranchs and teleosts, with corresponding IUCN conservation statuses according to the IUCN Red List of Threatened Species. The data provide an overview of the spatial distribution patterns and community structure of pelagic, benthic-pelagic and demersal affinities fish species in relation to the area under assessment and the surrounding buffer area. IUCN – Conservation status according to the IUCN Red List of Threatened Species: NE – Not Evaluated, DD – Data Deficient, LC – Least Concern, NT – Near Threatened, VU – Vulnerable, EN – Endangered, CR – Critically Endangered, EW – Extinct in the Wild, EX – Extinct; CV – Comercial value (€ - low; €€ - medium; €€€ - high).



SPECIES	COMMON NAME	IUCN	EV	Frequency	
				AREA UNDER ASSESSMENT	BUFFER AREA
CLASS ELASMOBRANCHII					
Order Carcharhiniformes					
Family Scyliorhinidae					
Scyliorhinus canicula (Linnaeus, 1758)	Smallspotted Catshark	LC	€		
Order Rajiformes					
Family Rajidae					
Raja montagui Fowler, 1910	Spotted Skate	LC	€		
Raja undulata Lacepède, 1802	Undulate Skate	NT	€		
CLASS TELEOSTEI					
Order Acanthuriformes					
Family Caproidae					
Capros aper (Linnaeus, 1758)	Boarfish	LC	€		
Order Anguilliformes					
Family Congridae					
Conger conger (Linnaeus, 1758)	Conger Eel	LC	€€		
Order Argentiniformes					
Family Argentinidae					
Argentina sphyraena Linnaeus, 1758	Argentine	LC	€		
Order Blenniiformes					
Family Blenniidae					
Blennius ocellaris Linnaeus, 1758	Butterfly Blenny	LC	€		
Order Callionymiformes					
Family Callionymidae					
Callionymus lyra Linnaeus, 1758	Spotted Dragonet	LC	€		
Callionymus maculatus Rafinesque, 1810	Reticulated Dragonet	LC	€		
Callionymus reticulatus Valenciennes, 1837	Boarfish	LC	€		
Order Carangiformes					
Family Carangidae					
Trachurus picturatus (Bowdich, 1825)	Blue Jack Mackerel	LC	€		
Trachurus trachurus (Linnaeus, 1758)	Atlantic Horse Mackerel	LC	€		
Order Clupeiformes					
Family Alosidae					
Sardina pilchardus (Walbaum, 1792)	European Pilchard	NT	€		
Family Engraulidae					
Engraulis encrasicolus (Linnaeus, 1758)	European Anchovy	LC	€		
Order Eupercaria incertae sedis					
Family Cepolidae					
Cepola macrophthalmia (Linnaeus, 1758)	Red Bandfish	LC	€		
Family Sparidae					
Boops boops (Linnaeus, 1758)	Bogue	LC	€		
Diplodus vulgaris (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817)	Common Two-banded Seabream	LC	€		
Pagellus acarne (Risso, 1827)	Axillary Seabream	LC	€		
Pagrus pagrus (Linnaeus, 1758)	Red Porgy	LC	€€€		
SpondylIOSoma cantharus (Linnaeus, 1758)	Black Seabream	LC	€		
Order Gadiformes					
Family Gadidae					
Micromesistius poutassou (Risso, 1827)	Blue Whiting	LC	€		
Trisopterus luscus (Linnaeus, 1758)	Pouting	LC	€		
Trisopterus minutus (Linnaeus, 1758)	Poor Cod	LC	€		
Family Merlucciidae					
Merluccius merluccius (Linnaeus, 1758)	European Hake	LC	€€		
Order Gobiiformes					
Family Gobiidae					
Lesueurigobius sanzi (de Buen, 1918)	Sanzo's Goby	LC	€		
Pomatoschistus minutus (Pallas, 1770)	Sand Goby	LC	€		
Order Mugiliformes					
Family Mugilidae					
Chelon ramada (Risso, 1827)	Thinlip Grey Mullet	NT	€		
Order Muliiformes					
Family Muliidae					
Mullus surmuletus Linnaeus, 1758	Striped Red Mullet	LC	€€€		



SPECIES	COMMON NAME	IUCN	EV	Frequency	
				AREA UNDER ASSESSMENT	BUFFER AREA
Order Perciformes					
Family Ammodytidae					
<i>Ammodytes tobianus</i> Linnaeus, 1758	Small Sandeel	DD	€		
<i>Hyperoplus lanceolatus</i> (Le Sauvage, 1824)	Great Sandeel	LC	€		
Family Trachinidae					
<i>Echiichthys vipera</i> (Cuvier, 1829)	Lesser Weever	LC	€		
Family Triglidae					
<i>Chelidonichthys cuculus</i> (Linnaeus, 1758)	Red Gurnard	LC	€		
<i>Chelidonichthys lucerna</i> (Linnaeus, 1758)	Tub Gurnard	LC	€		
<i>Chelidonichthys obscurus</i> (Walbaum, 1792)	Longfin Gurnard	LC	€		
<i>Eutrigla gurnardus</i> (Linnaeus, 1758)	Grey Gurnard	LC	€		
Order Pleuronectiformes					
Family Bothidae					
<i>Arnoglossus imperialis</i> (Rafinesque, 1810)	Imperial Scaldfish	LC	€		
<i>Arnoglossus laterna</i> (Walbaum, 1792)	Mediterranean Scaldfish	LC	€		
<i>Arnoglossus thori</i> Kyle, 1913	Thor's Scaldfish	LC	€		
Family Citharidae					
<i>Citharus linguatula</i> (Linnaeus, 1758)	Spotted Flounder	LC	€		
Family Scopthalmidae					
<i>Lepidorhombus boscii</i> (Risso, 1810)	Four-spot Megrim	LC	€€		
<i>Scophthalmus maximus</i> (Linnaeus, 1758)	Turbot	VU	€€€		
Family Soleidae					
<i>Dicologlossa cuneata</i> (Moreau, 1881)	Wedge Sole	LC	€		
<i>Microchirus variegatus</i> (Donovan, 1808)	Thickback Sole	LC	€€		
<i>Solea solea</i> (Linnaeus, 1758)	Dover Sole	LC	€€		
Order Scombriformes					
Family Scombridae					
<i>Scomber colias</i> Gmelin, 1789	Atlantic Chub Mackerel	LC	€		
<i>Scomber scombrus</i> Linnaeus, 1758	Atlantic Mackerel	LC	€		
Order Tetraodontiformes					
Family Molidae					
<i>Mola mola</i> (Linnaeus, 1758)	Ocean Sunfish	DD	€		
Order Zeiformes					
Family Zeidae					
<i>Zeus faber</i> Linnaeus, 1758	Atlantic John Dory	DD	€		



3.3.3.5 Seabirds

The characterisation of the marine avifauna was based on the compilation and integration of information available in the Atlas of Marine Birds (<https://atlasavesmarinhas.pt/>), regarding species with records of probability of occurrence within the Pilot project study area for the different seasons of the year.

Using this database, the probability of occurrence of each species in the study area was determined for each season, adopting a conservative approach by selecting the highest probability value whenever more than one estimate was available. Subsequently, the probability of spatial occupation was calculated as the percentage of the study area that could potentially be used by each species in each season, considering the spatial boundaries of the project area. This probability of occupation was classified according to the following scale: 0-10% (rare), 10-20% (very infrequent), 20-40% (infrequent), 40-60% (frequent), and 60-100% (very frequent). Thus, for each species and season, the area of probable occupation was expressed as a percentage of the total study area, allowing a spatially explicit assessment of species presence within the area limits. Finally, a seasonal vulnerability metric was estimated for each species by combining the probability of occurrence and the percentage of area occupied. Vulnerability was interpreted as the greater or lesser likelihood of species being affected by the activities associated with the project and was classified according to the following scale: 0-25% (very low probability), 25-50% (low probability), 50-75% (considerable probability), and 75-100% (high probability). This integrated approach enables the identification of species and seasons potentially more sensitive to project-related activities, considering both the likelihood of species occurrence in the study area and the spatial extent of their potential occupation. Common name, phenology and conservation status according to the IUCN Red List of Threatened Species and the Red Book of Vertebrates of Portugal (Cabral et al., 2005) are presented (Table 12). Although this latter dates from 2005, and no updated version has yet been published at the time of preparation of the present study, the information contained therein was adopted as the reference source, as it remains the most comprehensive and authoritative dataset currently available for the purpose.

Overall, a total of 41 marine bird species were identified for the study area, belonging to 12 families, irrespective of their seasonal probability of occurrence (Table 12). These species represent a broad spectrum of ecological groups, including sea ducks, auks, gulls and terns, phalaropes, skuas, divers, tropicbirds, storm-petrels, shearwaters and petrels, cormorants and gannets. This taxonomic diversity reflects the ecological importance of the western Portuguese coast as a migratory corridor, wintering area and, for some species, a breeding or post-breeding foraging zone.

The family Laridae is the most representative, both in terms of species richness and seasonal presence, including several gulls and terns such as Mediterranean Gull *Larus melanocephalus* Temminck, 1820, Lesser Black-backed Gull *Larus fuscus* Linnaeus, 1758, Yellow-legged Gull *Larus michahellis* Naumann, 1840, Black-legged Kittiwake *Rissa tridactyla* (Linnaeus, 1758), Common Tern *Sterna hirundo* Linnaeus, 1758, Arctic Tern *Sterna paradisaea* Pontoppidan, 1763, Little Tern *Sternula albifrons* (Pallas, 1764), Sandwich Tern *Thalasseus sandvicensis* (Latham, 1787) and Sabine's Gull *Xema sabini* (Sabine, 1819) (Table 12). In contrast, several families are represented by a single species, such as Gaviidae [Common Loon *Gavia immer* (Brünnich, 1764)], Phaethontidae [Red-billed Tropicbird *Phaethon aethereus* Linnaeus, 1758], Oceanitidae [Wilson's Storm-petrel *Oceanites oceanicus* (Kuhl, 1820)] and Sulidae [Northern Gannet *Morus bassanus* (Linnaeus, 1758)], reflecting groups with more sporadic records or more specialised ecological requirements in the region.

Seasonally, the general pattern indicates that autumn and winter are the periods with the highest number of species likely to be present in the study area (Table 12). This results from the overlap between wintering species, migratory passage species and residents. Typical examples include Northern Gannet *M. bassanus*, Common Scoter *Melanitta nigra* (Linnaeus, 1758), Black-legged Kittiwake *R. tridactyla*, Razorbill *Alca torda* Linnaeus, 1758, Atlantic Puffin *Fratercula arctica* (Linnaeus, 1758) and Common Murre *Uria aalge* (Pontoppidan, 1763), all of which show higher probabilities of occurrence during the colder months. In addition, predatory species such as Great Skua *Catharacta skua* (Brünnich, 1764) and Arctic Jaeger *Stercorarius parasiticus* (Linnaeus, 1758) also present elevated probabilities in autumn and winter, consistent with their migratory and wintering behaviour.

In spring and summer, the assemblage shifts towards the dominance of species associated with the breeding season, particularly among Procellariiformes and Laridae. Cory's Shearwater *Calonectris borealis* (Cory, 1881) shows high probabilities of occurrence during summer, reflecting its breeding cycle in the northeast Atlantic. Similarly, several tern species such as Common Tern *S. hirundo* Linnaeus, 1758, Little Tern *S. albifrons* (Pallas, 1764) and Sandwich Tern *T. sandvicensis* (Latham, 1787) exhibit increased relevance during the warmer months, when they are actively breeding and using coastal and offshore areas for foraging (Table 12).

The analysis of spatial occupation indicates that certain species are likely to use a large proportion of the study area, especially in seasons when their probability of occurrence is high. Northern Gannet *M. bassanus* stands out as one of the species with the widest spatial occupation across several seasons, reflecting its extensive foraging range and pelagic habits. Similarly, Lesser Black-backed Gull *Larus fuscus* Linnaeus, 1758, shows high values of both probability of occurrence and area occupied, suggesting a strong and widespread presence in the region. Cory's Shearwater *Calonectris borealis* (Cory, 1881) also exhibits high spatial occupation during summer, when breeding-related foraging activity is most intense. In the colder seasons, alcids such as Razorbill *Alca torda* Linnaeus, 1758, Atlantic Puffin *F. arctica* and Common Murre *U. aalge* may occupy substantial portions of the area, in line with their wintering distributions in the northeastern Atlantic.

Vulnerability, derived from the combination of probability of occurrence and area occupied, highlights those species that may be more exposed to potential pressures in the study area (Table 12). The highest vulnerability values are associated with species that combine a high likelihood of presence with a wide spatial distribution. In this context, Northern Gannet *M. bassanus* and Lesser Black-backed Gull *L. fuscus* emerge as particularly relevant, given their consistently high values across several seasons. Cory's Shearwater *C. borealis* also presents elevated vulnerability during summer. In winter, alcids such as Razorbill *A. torda*, Atlantic Puffin *F. arctica* and Common Murre *U. aalge* show increased vulnerability associated with their high seasonal concentration and extensive use of the study area. Black-legged Kittiwake *R. tridactyla* also stands out in this context, combining high probability of occurrence and wide spatial occupation in the colder months.

Regarding conservation status, most species are classified as LC (Least Concern) according to the IUCN Red List [IUCN Red List of Threatened Species](#) (Table 12). However, several species of higher conservation concern are present or potentially present in the study area. These include species listed as VU (Vulnerable), such as Velvet Scoter *Melanitta fusca* (Linnaeus, 1758) and Black-legged Kittiwake *R. tridactyla*; NT (Near Threatened) species such as Sooty Shearwater *Ardenna grisea* (J.F. Gmelin, 1789) and Swinhoe's Storm-petrel *Hydrobates monorhis* (Swinhoe, 1867); EN (Endangered) species such as Atlantic Puffin *F. arctica*; and CR (Critically Endangered) species

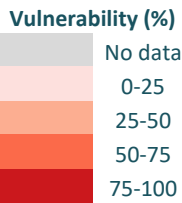
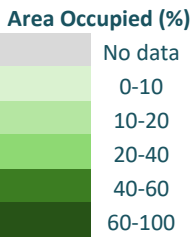
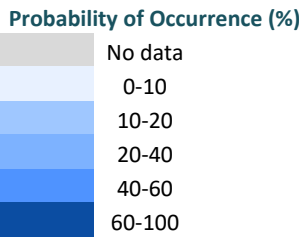
such as Balearic Shearwater *Puffinus mauretanicus* Lowe, 1921. The presence of these species reinforces the conservation relevance of the broader region and highlights the importance of adopting a precautionary approach when interpreting potential interactions with human activities.

According to the conservation status in the Portuguese Red Book of Vertebrates (Cabral et al., 2005) (Table 12), only part of the species listed in the table has been assessed at the national level. In total, 17 species present an assigned conservation status, distributed among different categories. Two species are classified as Critically Endangered (CR), namely the Whiskered Tern *Chlidonias hybrida* (Pallas, 1811) and the Balearic Shearwater *P. mauretanicus*, representing the highest level of threat and indicating a high sensitivity to environmental disturbance. Three species are classified as Endangered (EN): Common Scoter *M. nigra*, Common Gull-billed Tern *Gelochelidon nilotica* (Gmelin, 1789) and Common Tern *S. hirundo*, reflecting a high risk of population decline in the short to medium term. Three species are included in the Vulnerable (VU) category: Little Tern *S. albifrons*, Band-rumped Storm-petrel *Hydrobates castro* (Harcourt, 1851) and European Shag *Phalacrocorax aristotelis* (Linnaeus, 1761). The majority of the assessed species, a total of seven, are classified as Least Concern (LC), namely Razorbill *A. torda*, Atlantic Puffin *F. arctica*, Mediterranean Gull *L. melanocephalus*, Black-legged Kittiwake *R. tridactyla*, Great Skua *C. skua*, Great Cormorant *Phalacrocorax carbo* (Linnaeus, 1758) and Northern Gannet *M. bassanus*. In addition, two species present mixed or differentiated classifications (*Uria aalge*, with status CR/NT, and *Larus fuscus*, with status LC/VU), reflecting uncertainties or regional variations in their conservation status.

Finally, it should be emphasised that, although marine birds constitute an ecologically and conservationist important group of the marine ecosystem, they are organisms that spend most of their time in the air and in the uppermost layers of the ocean and are characterised by very high mobility. Consequently, considering the activities of the CO₂ storage Pilot project, associated with sub-surface and benthic domains, no significant direct impacts on marine birds are expected. Any potential effects are likely to be indirect, localised and of low magnitude, such as temporary disturbance related to vessel presence or operational noise and are not expected to cause relevant changes in the structure, distribution or conservation status of the marine avifauna at the regional scale considered.

Table 12 - The table summarises the marine avifauna recorded or potentially occurring in the Pilot project study area, organised by taxonomic order and family, and include information on common name, phenology, IUCN conservation status, probability of occurrence, area occupied, and vulnerability for each season (winter, spring, summer and autumn). Cells shaded in grey indicate absence of data or records considered occasional or very occasional. The probability of occurrence (%) is represented by a blue colour gradient, where 0-10% to very low probability, 10-20% to low probability, 20-40% to moderate probability, 40-60% to high probability, and 60-100% to very high probability, with darker blue tones indicating higher probabilities of occurrence. The area occupied (%) is represented by a green colour gradient and corresponds to the percentage of the study area potentially occupied by each species in each season, where 0-10% corresponds to rare, 10-20% to very infrequent, 20-40% to infrequent, 40-60% to frequent, and 60-100% to very frequent, with darker green tones indicating a larger proportion of the study area potentially occupied. Vulnerability (%) is represented by a red colour gradient and expresses the potential susceptibility of each species to project-related activities, calculated by combining probability of occurrence and area occupied, where 0-25% corresponds to very low vulnerability, 25-50% to low vulnerability, 50-75% to considerable vulnerability, and 75-100% to high vulnerability, with darker red tones indicating higher potential vulnerability. The IUCN conservation status IUCN Red List of Threatened Species follows the categories NE – Not Evaluated, DD – Data Deficient, LC – Least Concern, NT – Near Threatened, VU – Vulnerable, EN – Endangered, CR – Critically Endangered, EW – Extinct in the Wild, EX – Extinct. PT – Species conservation status for Portugal following the IUCN categories according to Cabral et al. (2005). This integrated colour-coded approach allows a rapid visual assessment of seasonal patterns of occurrence, spatial use of the study area, and relative vulnerability of each species, highlighting periods and species that may be potentially more sensitive to the activities associated with the Pilot project.

SPECIES	COMMON NAME	PHENOLOGY	IUCN	PT	PROBABILITY OF OCCURRENCE				AREA OCCUPIED				VULNERABILITY			
					Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn
Order Anseriformes																
Family Anatidae																
Melanitta fusca (Linnaeus, 1758)	Velvet Scoter	Accidental	VU	-												
Melanitta nigra (Linnaeus, 1758)	Common Scoter	Passage migrant and wintering	LC	EN												
Order Charadriiformes																
Family Alcidae																
Alca torda Linnaeus, 1758	Razorbill	Passage migrant and wintering	LC	LC												
Fratercula arctica (Linnaeus, 1758)	Atlantic Puffin	Passage migrant and wintering	EN	LC												
Uria aalge (Pontoppidan, 1763)	Common Murre	Breeder and wintering	LC	CR/NT												
Family Laridae																
Chlidonias hybrida (Pallas, 1811)	Whiskered Tern	Summer breeder	LC	CR												
Gelochelidon nilotica (Gmelin, 1789)	Common Gull-billed Tern	Summer breeder and passage migrant	LC	EN												
Hydrocoloeus minutus (Pallas, 1776)	Little Gull	Passage migrant and wintering	LC	-												
Hydroprogne caspia (Pallas, 1770)	Caspian Tern	Passage migrant and wintering	LC	-												
Larus canus Linnaeus, 1758	Mew Gull	Wintering	LC	-												
Larus delawarensis Ord, 1815	Ring-billed Gull	Wintering	LC	-												
Larus fuscus Linnaeus, 1758	Lesser Black-backed Gull	Wintering, passage migrant and breeder	LC	LC/VU												
Larus genei Brehm, 1839	Slender-billed Gull	Passage migrant	VU	-												
Larus marinus Linnaeus, 1758	Great Black-backed Gull	Wintering	LC	-												
Larus melanocephalus Temminck, 1820	Mediterranean Gull	Passage migrant and wintering	LC	LC												
Larus michahellis Naumann, 1840	Yellow-legged Gull	Resident	LC	-												
Rissa tridactyla (Linnaeus, 1758)	Black-legged Kittiwake	Wintering	VU	LC												
Sterna hirundo Linnaeus, 1758	Common Tern	Summer breeder and passage migrant	LC	EN												
Sterna paradisaea Pontoppidan, 1763	Arctic Tern	Passage migrant	LC	-												
Sternula albifrons (Pallas, 1764)	Little Tern	Summer breeder and passage migrant	LC	VU												
Thalasseus sandvicensis (Latham, 1787)	Sandwich Tern	Passage migrant and wintering	LC	-												
Xema sabini (Sabine, 1819)	Sabine's Gull	Passage migrant	LC	-												
Family Scolopaciidae																
Phalaropus fulicarius (Linnaeus, 1758)	Red Phalarope	Passage migrant and wintering	LC	-												
Family Stercorariidae																
Catharacta skua (Brünnich, 1764)	Great Skua	Passage migrant and wintering	LC	LC												
Stercorarius parasiticus (Linnaeus, 1758)	Arctic Jaeger	Passage migrant and wintering	EN	-												
Stercorarius pomarinus (Temminck, 1815)	Pomarine Jaeger	Passage migrant	LC	-												
Order Gaviiformes																
Family Gaviidae																
Gavia immer (Brünnich, 1764)	Common Loon	Wintering	LC	-												
Order Phaethontiformes																
Family Phaethontidae																
Phaethon aethereus Linnaeus, 1758	Red-billed Tropicbird	Accidental	LC	-												
Order Procellariiformes																
Family Hydrobatidae																
Hydrobates castro (Harcourt, 1851)	Band-rumped Storm-petrel	Winter breeder	LC	VU												
Hydrobates monorhis (Swinhoe, 1867)	Swinhoe's Storm-petrel	Accidental	NT	-												
Hydrobates pelagicus (Linnaeus, 1758)	European Storm-petrel	Passage migrant	LC	-												
Family Oceanitidae																
Oceanites oceanicus (Kuhl, 1820)	Wilson's Storm-petrel	Passage migrant	LC	-												
Family Procellariidae																
Ardenna gravis (O'Reilly, 1818)	Great Shearwater	Passage migrant	LC	-												
Ardenna grisea (J.F. Gmelin, 1789)	Sooty Shearwater	Passage migrant	NT	-												
Bulweria bulwerii (Jardine & Selby, 1828)	Bulwer's Petrel	Passage migrant	LC	-												
Calonectris borealis (Cory, 1881)	Cory's shearwater	Summer breeder	LC	-												
Puffinus mauretanicus Lowe, 1921	Balearic Shearwater	Summer, passage migrant and wintering	CR	CR												
Puffinus puffinus (Brünnich, 1764)	Manx Shearwater	Passage migrant	LC	-												
Order Suliformes																
Family Phalacrocoracidae																
Phalacrocorax aristotelis (Linnaeus, 1761)	European Shag	Resident and wintering	LC	VU												
Phalacrocorax carbo (Linnaeus, 1758)	Great Cormorant	Resident and wintering	LC	LC												
Family Sulidae																
Morus bassanus (Linnaeus, 1758)	Northern Gannet	Passage migrant and wintering	LC	LC												



3.3.3.6 Marine Mammals

The characterisation of marine mammal communities for the PilotSTRATEGY project was developed based on the available bibliography, which, although generalised, represents the best existing information for the Portuguese coast. Although this information is necessarily generalised and not specifically tailored to the offshore area of Figueira da Foz, it represents the baseline currently available for the assessment. Targeted information and datasets concerning marine mammal communities in the specific study area were formally requested from the Portuguese Institute for Sea and Atmosphere (IPMA); however, this information was not received within the timeframe required for integration into the present study.

Of the approximately 90 cetacean species recognised worldwide, 28 occur in Portuguese waters, including 21 species of toothed cetaceans (superfamily Odontoceti) and 7 species of baleen whales (superfamily Mysticeti). Portuguese waters therefore support a diverse assemblage of marine mammals that exploit a wide range of habitats, from shallow coastal areas and the continental shelf to the shelf break, slope and adjacent oceanic waters. This diversity reflects the strong oceanographic gradients of the Iberian margin, including the broad continental shelf in the central and northern sectors, the presence of productive upwelling systems, and the proximity of deep-water habitats. Within this context, several species are considered native and resident, while others occur regularly or occasionally, and for many species the pattern of occurrence remains poorly known. The species considered in this assessment and illustrated in Figure 24, include one baleen whale and several odontocete species, representing predominantly shelf-associated, shelf-break and oceanic ecological guilds.

Among baleen whales, the Minke whale *Balaenoptera acutorostrata* Lacépède, 1804 (Figure 24, Table 13) is regularly observed in Portuguese waters throughout the year. It is primarily associated with the continental shelf, generally occurring in waters shallower than 200m. The distribution pattern shown in Figure 24A indicates a continuous and marked presence along the Portuguese shelf, including the central sector where the Pilot project is located. Consequently, the Minke whale is considered one of the species with a high probability of occurrence in the broader vicinity of the project area, particularly in periods of increased prey availability over the shelf (mainly during spring and summer, and probably early autumn).

Among odontocetes, the Short-beaked common dolphin *Delphinus delphis* Linnaeus, 1758 (Figure 24, Table 13) is the most abundant cetacean species along the Portuguese coast. It is widely distributed from north to south and is frequently recorded both in coastal waters and in deep offshore environments. Figure 24B shows a continuous belt of high densities along the west coast, including the central sector surrounding the study area. This makes the Short-beaked common dolphin the species with the highest likelihood of regular presence in the proximity of the Pilot site, and one of the most ecologically relevant species in the impact assessment.

The Bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) (Figure 24, Table 13) is another species with a high probability of occurrence in the study area. This species occupies a wide range of habitats, from coastal and estuarine systems to deep offshore waters. In Portugal, it is known to form a resident population in the Sado estuary and is frequently observed around the Berlenga's archipelago and the Nazaré Canyon. Figure 24C shows a clear distribution along the west coast, including the central region, indicating that Bottlenose dolphins are likely to occur regularly in the broader area influenced by the project, particularly in association with shelf and shelf-break habitats.

The Harbour porpoise *Phocoena phocoena* (Linnaeus, 1758) (Figure 24, Table 13) is a coastal species inhabiting subpolar and temperate waters of the Northern Hemisphere, typically

in waters shallower than 200 m, estuaries and bays. In Portugal, it is distributed along the entire coast, although it is more frequent in the northern sector, particularly between Porto and Nazaré. Figure 24D shows a predominantly coastal distribution, suggesting that this species may occur in the broader region of the study area, particularly in nearshore shelf waters, although its abundance in the central-west sector may be lower and more variable than that of the Short-beaked common dolphin or the Bottlenose dolphin.

The Striped dolphin *Stenella coeruleoalba* (Meyen, 1833) is a cosmopolitan species with predominantly oceanic habits, showing a preference for deep waters. In Portuguese waters, it is mainly distributed near the continental shelf break or in areas close to depths of 1,000 m. Its known bathymetric preferences indicate that its occurrence near the Pilot project study area will probably be very low. Risso's dolphin *Grampus griseus* (G. Cuvier, 1812) occurs along the entire Portuguese continental shelf and can be observed both in relatively shallow waters and closer to the coast, especially where the shelf is narrow and deep waters are nearby. Its known ecological preferences suggest that it may occur intermittently in the broader study area, particularly in association with shelf-edge and slope-influenced habitats.

Pilot whales *Globicephala* sp. (Figure 24, Table 13), including *Globicephala macrorhynchus* (Gray, 1846) and *G. melas* (Traill, 1809), are represented in the lower panels of Figure 24 by discrete presence records along the west coast, including records relatively close to the study area. These species are typically associated with offshore and slope habitats and their occurrence near the study area is therefore expected to be intermittent and linked to prey distribution and oceanographic conditions. The Atlantic spotted dolphin *Stenella frontalis* (G. Cuvier, 1829) (Figure 24, Table 12) is also represented by presence records in the central-west Portuguese coast, including one close to the study area. This indicates that the species may occur locally, although probably with lower regularity than *D. delphis* or *T. truncatus*.

Finally, Cuvier's beaked whale *Ziphius cavirostris* G. Cuvier, 1823 (Figure 24, Table 13) is represented by discrete presence records. This species is strongly associated with deep waters, submarine canyons and slope systems, and is known for its deep-diving behaviour. Its presence near the study area is therefore expected to be occasional.

Although all species listed are currently classified as Least Concern (LC) for Europe in the IUCN Red List, the Minke whale *B. acutorostrata* has a conservation status of Vulnerable (VU) according to the Portuguese Red Book of Vertebrates (Cabral et al., 2005). Cetaceans are long-lived, slow-reproducing organisms that rely heavily on sound for navigation, communication and foraging, and are therefore particularly sensitive to anthropogenic underwater noise and disturbance. From an ecological and management perspective, the species of greatest relevance for the study area are those with both high probability of occurrence and strong shelf association, notably the Short-beaked common dolphin *D. delphis*, the Bottlenose dolphin *T. truncatus*, and, depending on local bathymetry, the Minke whale *B. acutorostrata* and the Harbour porpoise *P. phocoena*.

In summary, the available information indicates that the Pilot project study area lies within a region of potential high relevance for several cetacean species, particularly shelf-associated delphinids and, potentially, Minke whales. Their ecological sensitivity, especially to underwater noise and vibrations, means that marine mammals constitute a priority group for impact assessment, mitigation planning and environmental monitoring, ensuring that project activities are conducted in a manner that minimises disturbance and preserves the ecological integrity of local marine mammal populations.

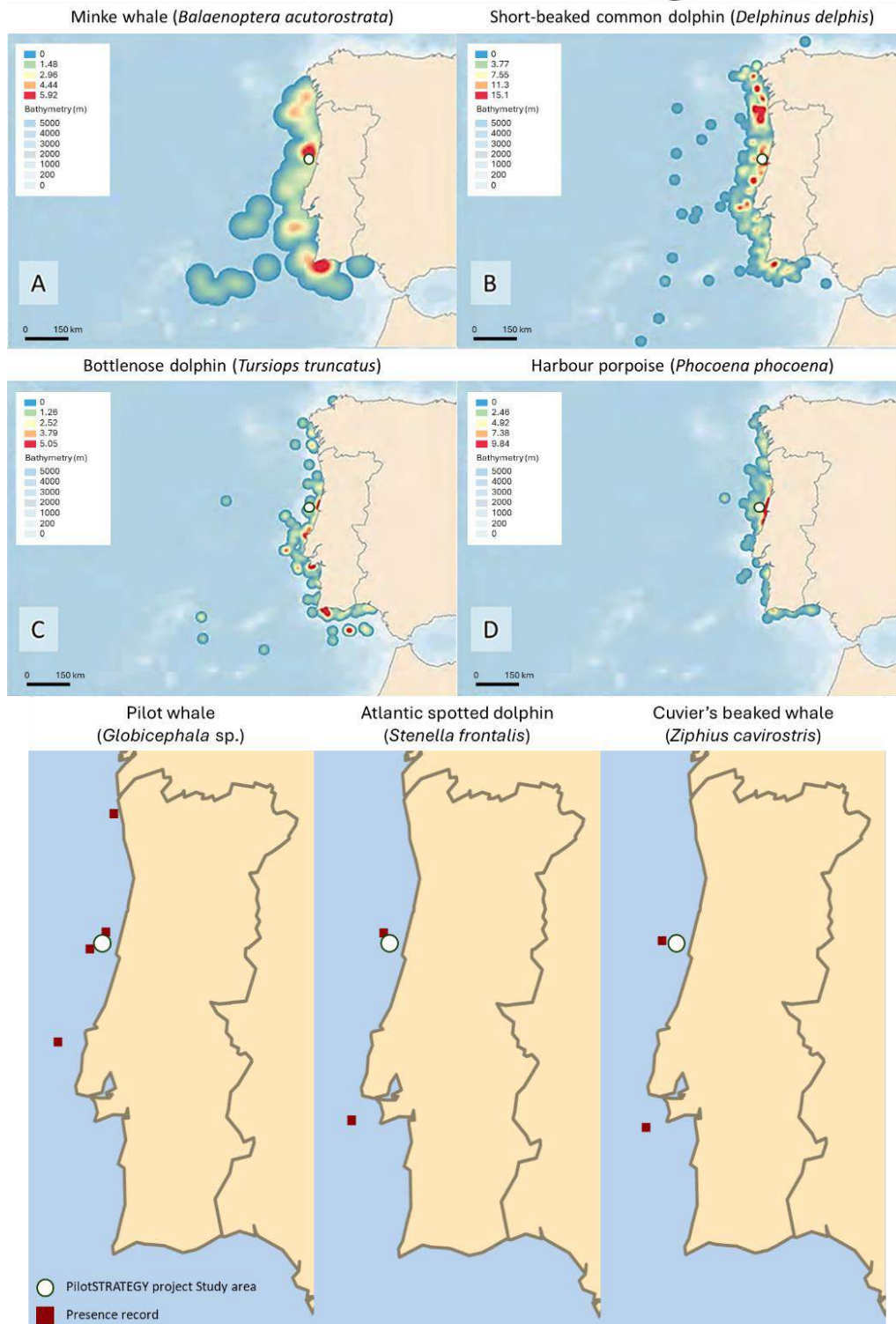


Figure 24 - Spatial distribution and occurrence records of the main cetacean species along the Portuguese coast, with indication of the project study area (white circle). (A) Minke whale *Balaenoptera acutorostrata*; (B) Short-beaked common dolphin *Delphinus delphis*; (C) Bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*; (D) Harbour porpoise *Phocoena phocoena*. Maps A-D show the relative density of sighting records, expressed through a colour gradient, overlaid on bathymetry. The lower maps present point presence records for (E) Pilot whales *Globicephala* sp.; (F) Atlantic spotted dolphin *Stenella frontalis*; and (G) Cuvier's beaked whale *Ziphius cavirostris*. Red squares indicate known presence records.

Table 13 - List of marine mammals recorded or potentially occurring in the vicinity of the project study area, organised by taxonomic order and family. For each species, the scientific name with author, common name, origin of occurrence (Native/Resident or Regular/Occasional), and conservation status according to the IUCN are presented. The IUCN conservation status IUCN Red List of Threatened Species follows the categories NE – Not Evaluated, DD – Data Deficient, LC – Least Concern, NT – Near Threatened, VU – Vulnerable, EN – Endangered, CR – Critically Endangered, EW – Extinct in the Wild, EX – Extinct. PT – Species conservation status for Portugal following the IUCN categories according to Cabral et al. (2005).

SPECIES	COMMON NAME	ORIGIN	IUCN	PT
Order Cetartiodactyla				
Family Balaenopteridae				
<i>Balaenoptera acutorostrata</i> Lacépède, 1804	Minke whale	Native/Resident	LC	VU
Family Delphinidae				
<i>Delphinus delphis</i> Linnaeus, 1758	Short-beaked common dolphin	Native/Resident	LC	-
<i>Globicephala</i> sp. (<i>Globicephala macrorhynchus</i> (Gray, 1846) e <i>G. melas</i> (Traill, 1809)	Pilot whale	Regular/Occasional	LC	-
<i>Grampus griseus</i> (G. Cuvier, 1812)	Risso's dolphin	Regular/Occasional	LC	-
<i>Stenella coeruleoalba</i> (Meyen, 1833)	Striped dolphin	Native/Resident	LC	-
<i>Stenella frontalis</i> (G Cuvier, 1829)	Atlantic spotted dolphin	Native/Resident	LC	-
<i>Tursiops truncatus</i> (Montagu, 1821)	Bottlenose dolphin	Native/Resident	LC	-
Family Phocoenidae				
<i>Phocoena phocoena</i> (Linnaeus, 1758)	Harbour porpoise	Native/Resident	LC	-
Family Ziphiidae				
<i>Ziphius cavirostris</i> G Cuvier, 1823	Cuvier's beaked whale	Regular/Occasional	LC	-



3.3.4 Socio-economy

For the integration of the available data and information related with the socio-economic activities, a significant source of information was found in the Situation Plan related with Maritime Spatial Planning and accessible from the geoportal of the of the Directorate-General for Mineral Resources, Safety and Maritime Services (*Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos*, DGRM) (https://www.psoem.pt/geoportal_psoem/). The Maritime Spatial Planning covers the entire national maritime space and, as can be read in the DGRM website (www.dgrm.pt/en/web/guest/as-pem-ordenamento), it “aims to manage the human activities that occur in the Portuguese sea, both in spatial and temporal terms, with a view to minimizing conflicts, compatibility between activities and uses, and sustainable use marine resources and services”.

The following sections characterizes the socio-economic status of the study area, including the situation regarding submarine cables, marine traffic, fishing areas, processing industry, coastal tourism and archaeological areas.

3.3.4.1 Submarine cables

The geographical location of the submarine cables along the West Iberian margin is represented in Figure 25. As can be seen, the mapped submarine cables do not cross the study area and the location of the future CO₂ injection well.

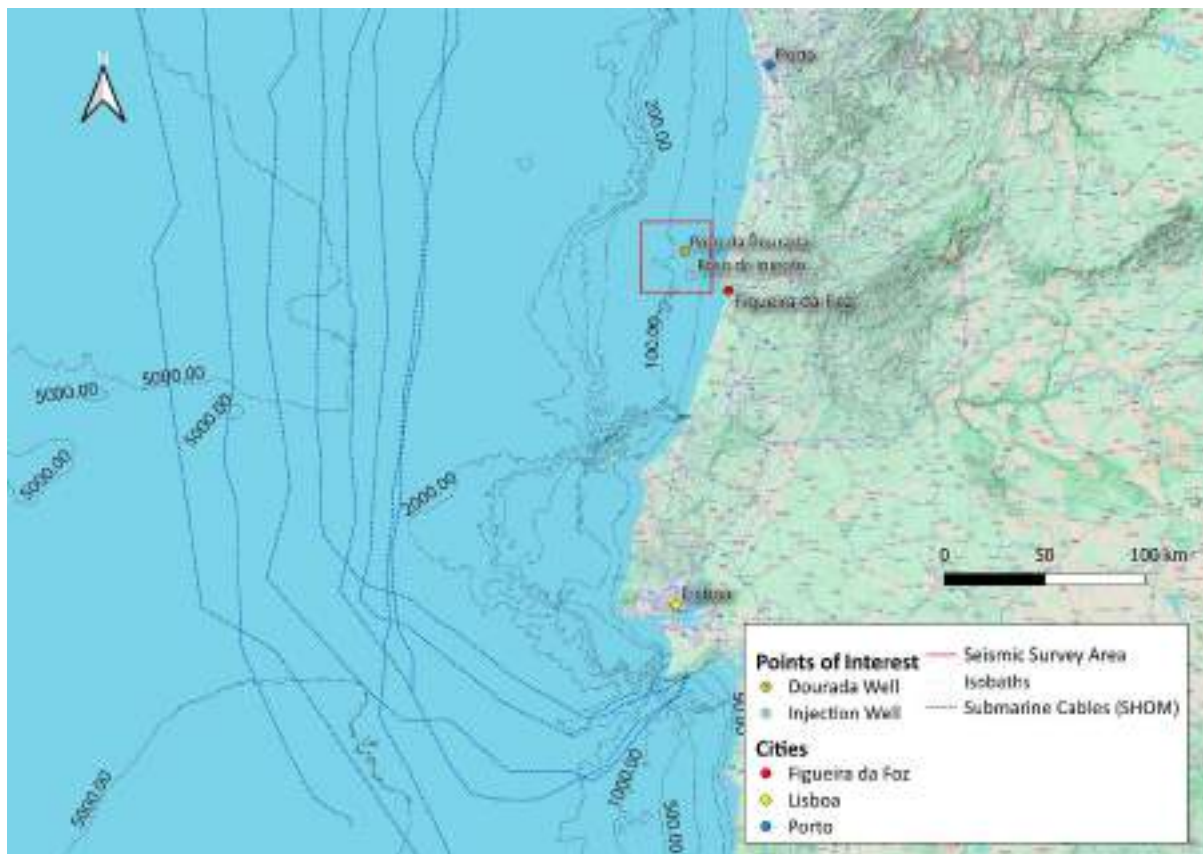


Figure 25 - Geographical location of the submarine cables along the West Iberian Margin.

3.3.4.2 Marine traffic

Given the proximity to the port of Figueira da Foz, heavy marine traffic is expected; Figure 26 illustrates the maritime traffic density along the Portuguese Atlantic coast, specifically highlighting the corridors connecting the ports of Lisbon, Figueira da Foz, and Porto. As denoted by the red navigation paths, a high-volume north-south thoroughfare runs offshore, with secondary routes diverging

towards the mainland. In more detail, the high-density red zones correspond to the major Atlantic North-South shipping corridor, utilized primarily by large-tonnage commercial vessels, contrasting with the more diffuse coastal traffic patterns typical of fishing fleets and local logistics.

While the map indicates that certain coastal shipping lanes intersect with the designated seismic survey area for the Pilot project (outlined in green), no significant disruption to commercial maritime logistics is anticipated. Furthermore, the map highlights the proximity of the proposed injection well (“Poço de Injeção”) to the port of Figueira da Foz. This location is strategically advantageous, reducing CO₂ transport distances from the region's industrial hinterland while maintaining a safety buffer from legacy wells such as “Poço da Dourada” (Do-1c) to ensure long-term storage containment.

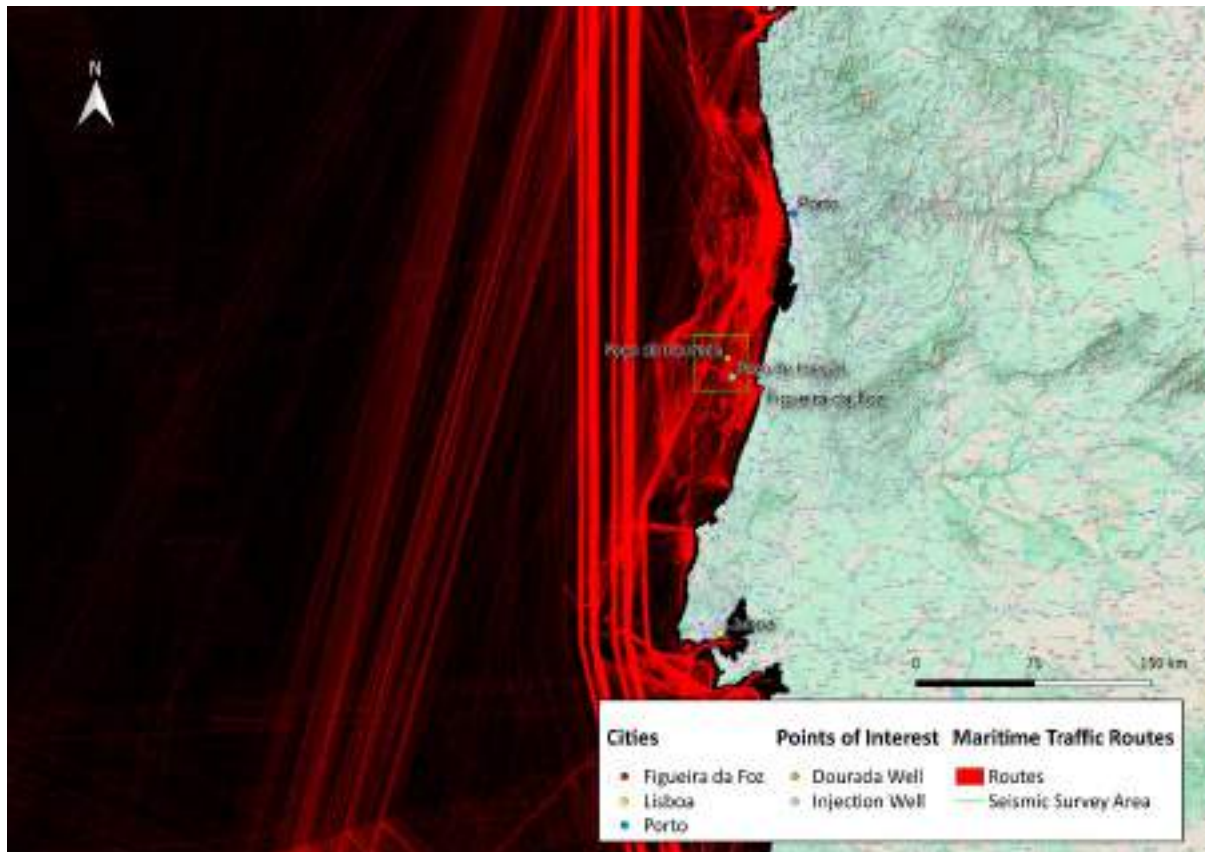


Figure 26 - Main maritime routes from and to the existing ports along the West Iberian margin.

2.3.1.1. Fishing areas

Figueira da Foz has a significant fishing activity. Hence, as mentioned before, it is important to understand how the project activities might affect and which areas. Figure 27 delineates the region's principal fishing grounds, represented by the orange polygon, which includes the entirety of the proposed seismic survey area and explicitly surrounds the strategic Injection Well (“Poço de Injeção”). As evidenced, the distribution of fishing effort within this zone is heterogeneous; the heatmap (Figure 27) reveals specific clusters of high-intensity activity within the project boundary, which may require more attention.

This activity is categorised by distinct gear methodologies, specifically identified in the data as gillnets (“Redes de emalhar”) and trawling operations (“Arrasto”). However, in the study region, there is only evidence of the first. Furthermore, Figure 29 illustrates the regulatory framework for maritime

operations, demonstrating that the seismic area transects multiple legal operating zones. This spatial analysis indicates that the project will coincide with waters authorized for diverse vessel classes and fishing techniques, implying the need for coordinated management strategies.

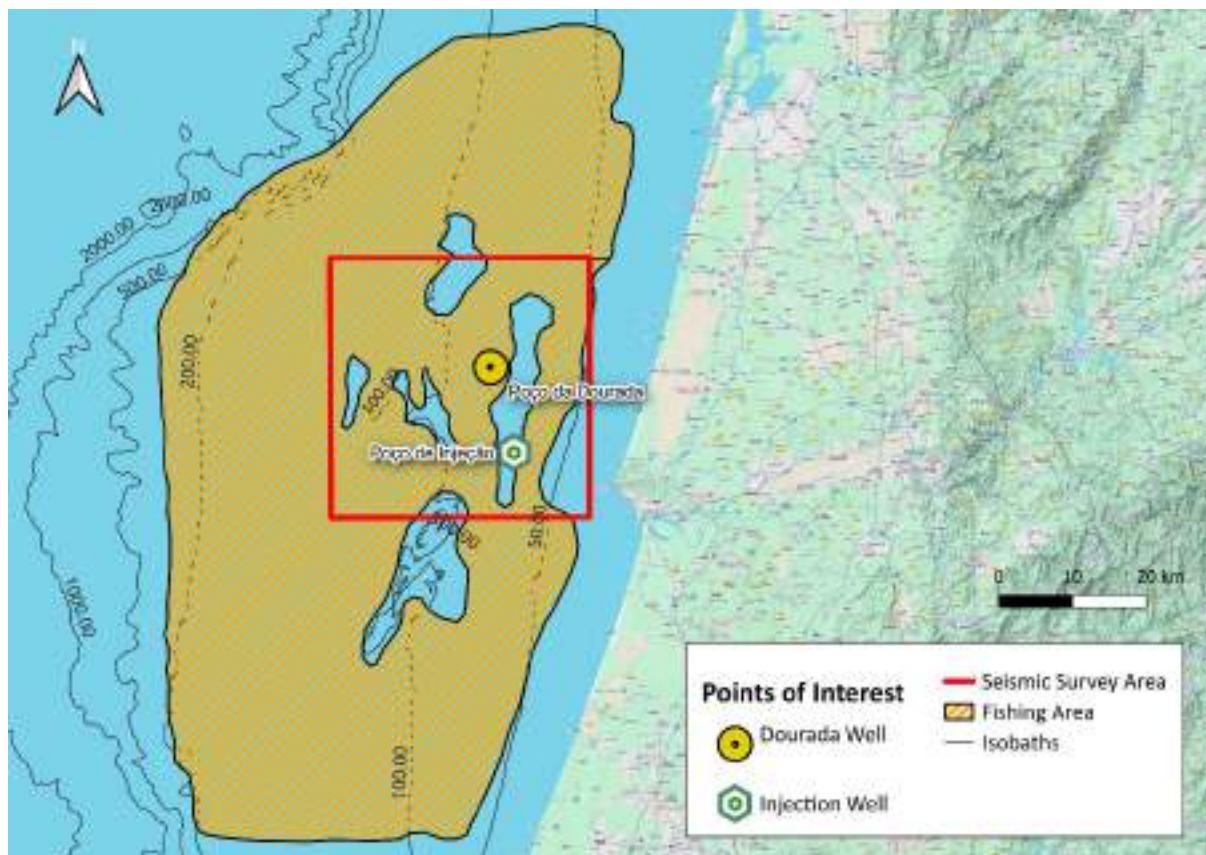


Figure 27 - Delimitation of the principal fishing grounds relative to the project infrastructure.

Fishing Intensity Heatmap

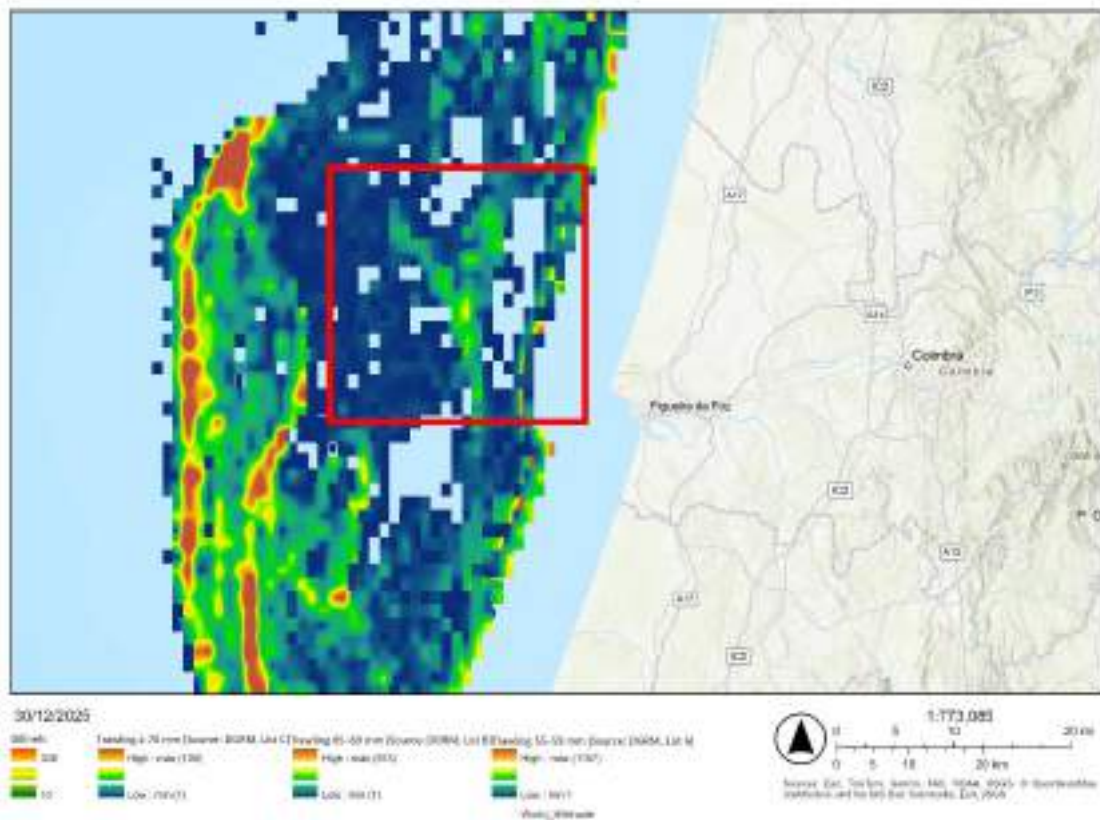


Figure 28 - Spatial distribution of fishing intensity off the coast of Figueira da Foz.

Legal Operating Zones by Fishing Gear

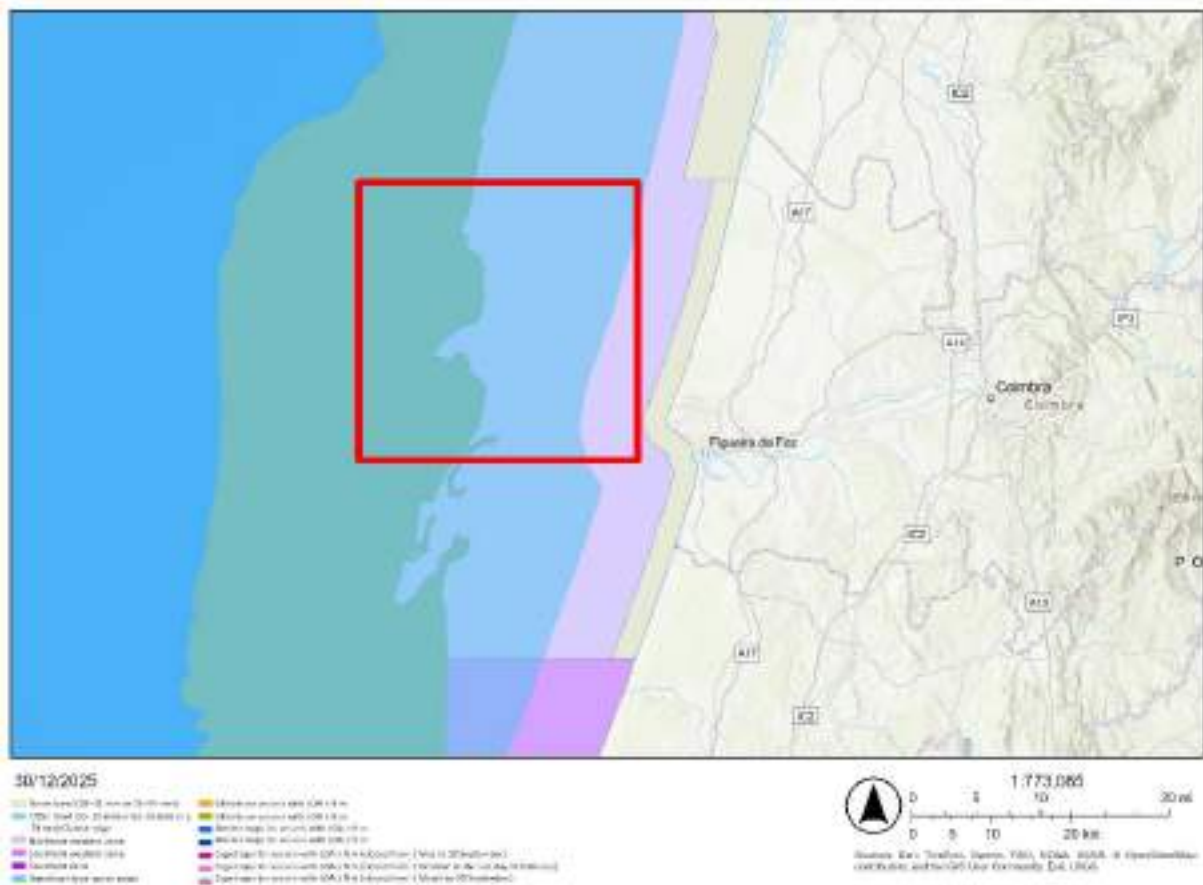


Figure 29 - Designation of statutory maritime operating zones according to fishing gear type.

3.3.4.2.1 Fisheries

The maritime jurisdiction of the “Centro” region is shared by the ports of Figueira da Foz and Aveiro. At the regional level, fishing activity shows a heterogeneous spatial distribution: the Ria de Aveiro concentrates a significant effort and a dense processing industry, while the Mondego estuary and the area adjacent to Figueira da Foz record a relatively smaller presence of fleets and fish-processing units. The maritime sector in the region includes multiple facets, vessel fisheries (local, coastal and deep-sea), shore-based fishing, the fish processing industry (canning, salting and drying, freezing), aquaculture, salt production and recreational activities linked to the sea.

3.3.4.2.2 Fishing infrastructure

Concerning fleet infrastructure, 2024 data indicate that, across the country, 6 811 fishing vessels (with and without engines) were registered, of which 943 were based in the Centro region (ports of Aveiro and Figueira da Foz), representing about 14% of the national total; the port of Figueira da Foz registered 159 vessels (INE, 2025). From the licensing perspective, around 3 614 vessels were authorised to carry out fishing activity, approximately 53% of the registered fleet, with 553 licences issued in the Centro region and 79 in the port of Figueira da Foz. The decennial trend shows a reduction in the national fleet, a tendency that is also reflected locally: Figueira da Foz lost 17 vessels between 2014 and 2024 (INE, 2025). Table 14 distinguishes the registered and licensed vessels, as well as if they are engine moved or not.

Table 14 - Fishing vessels at Figueira da Foz.

	Licensed	Registered
With engine	79	150
Without engine	0	9

3.3.4.2.3 Employment

Employment indicators and the occupational profile reinforce the vulnerable character of the labour fabric linked to fisheries. According to the 2021 Census (INE, 2022), the Centro region had 2 562 people employed in fishing and aquaculture activities, out of a national total of 10 834, which represents a decline of about 20% compared to 2011. In 2023, the primary sector (that includes both agriculture and fishing) represented only 2% of the employed population in Figueira da Foz (INE, 2023).

The prevailing educational attainment is basic level (around 75% of the total) and the average age is 47.1 years, figures that point to a relatively ageing profile and a low average formal qualification. Perhaps for this reason the “MAR 2030” programme lists incentives for the start-up of activity by young fishers among its priorities (MAR 2030, 2022).

According to the INE Fishing Statistics (2023), there were 1 293 registered fishers in the Centro region, corresponding to about 9% of the national total. According to the same source, since 2022 the number of fishers (3 466) suffered a sharp decline in the order of 62%.

3.3.4.2.4 Catches

With respect to catches and economic value, the Centro region represented about 13% of national transactions in 2024, with approximately 18 305 tonnes landed and an estimated turnover of €44.5 million. The port of Figueira da Foz accounted for about 32% of the regional value, showcased in Table 15.

Fish landings in Figueira da Foz over the last decade have shown slight variations in both directions, remaining at a relatively stable level. Between 2023 and 2024, they registered an increase of 6.7%, rising from 7,654.7 tonnes to 8,168 tonnes (INE, 2024; INE, 2025).

Despite the increase in the average price per kilogram observed over the last decade, the average price per kilogram in Figueira da Foz in 2024 remained significantly below that observed in Aveiro (1.69 €/kg *versus* 2.94 €/kg). This difference may be related to the mix of predominant species, sardine and horse mackerel among fishes and European flying squid among molluscs, species that, in domestic markets, tend to have lower unit prices.

Table 15 - Fishing catches at the port of Figueira da Foz.

	Brackish and freshwater fish	Marine fish	Shellfish	Molluscs	Total
Nominal fish catches (t)	24	7770	12	382	8186
Nominal fish catches (€)	188	12123	86	1824	14221
Average value of fish landed (€/kg)	7.76	1.54	7.32	4.65	1.69

According to the ARTFISH research project, run by UC Mar (University of Coimbra) in 2020-2021, on local fishing (small boats, up to 9 metres, using gillnets and trammel nets), the fishing season in Figueira da Foz runs between March/April and September/October, with more catches in April and September (Guerreiro et al. 2021). The number of fishing and seafood species caught at Figueira da Foz are 44, with predominance of white seabream and *Salema porgy*.

Fishing in Figueira da Foz is available year-round, weather permitting. Nevertheless, there are zones closed to fishing, such as spawning or breeding areas and shelters, and there are also prohibitions on fishing certain species at particular times of the year, closed seasons, with the aim of protecting their biological cycle and ensuring resource renewal; these are defined by the Directorate-General for Natural Resources, Safety and Maritime Services (DGRM).

In 2025 improvement works began on access and infrastructure at the Port of Figueira da Foz with the declared purpose of addressing concerns of fishers and representative associations, namely the insecurity of the harbour bar resulting from sedimentation caused by erosive phenomena on the coast north of the city (Porto da Figueira da Foz, 2025). Sediment deposition in the bar has been reducing the usable depth and conditioning navigability in adverse weather conditions, resulting in temporary bar closures and, consequently, days without fishing activity for the local community.

Interviews with fishermen associations conducted for PilotSTRATEGY (Task 6.2, WP6) indicate that the location of the well will not affect artisanal fishing, since smaller boats operate at less than 20 km from the coast and may even preclude other types of fishing (with larger boats, trawling) and preserve fishing stock. But fishermen expressed concern with the impact of 3D seismic acquisition on fish species, particularly the smaller pens that are the lower end of the food chain, based on their experience with previous projects of oil exploration. They requested that the 3D seismic survey was not done in more intensive fishing periods (summer) nor in the spawning season (spring).

It should also be noted that fishermen operate not only in their own port but also in the vicinity, so this project impacts not only fishermen from Figueira da Foz but also from Peniche and Aveiro. The fishermen also drew attention to the whole economic sector and jobs that depend on fishing, in particular the canning industry and retail (markets). Representatives from the fishing association also warned that the sea in this area is often quite rough and tornados are becoming more frequent due to climate change.

3.3.4.3 Processing industry, salt production and aquaculture

The processing industry and canneries, the latter with a strong tradition in Figueira da Foz, constitute a relevant segment of the local economy, generating employment dependent on local landings. Together with salt production and aquaculture, these activities have been supported by funding programmes — notably MAR 2030 — which encourage projects in areas of production, digitalisation, energy efficiency and internationalisation (MAR 2030, 2022).

National aquaculture, which in 2023 produced about 18 040 tonnes of fish, molluscs and algae with sales around €205.9 million (one-third for export), shows significant production in the Centro region: 4,583 tonnes (almost a quarter of national production) and sales of around €49.7 million, a value that corresponds to an increase of about 30% compared to 2022.

3.3.4.4 Coastal tourism

According to the POOC Ovar-Marinha Grande (Coastal Zone Management Plan), this area contains one Level I tourist centre (Buarcos/Figueira da Foz) and one Level III tourist centre (Quiaios Beach). The Environmental Impact Study for this instrument states “Figueira da Foz has long been the main summer resort on the central coast and is the main tourist hub on the coastline between Ovar and Marinha Grande, supported by a variety of tourist attractions that make up several products in high demand, the main one being ‘sun and sea’ tourism.”

The natural conditions of Figueira da Foz, notably the sea and the beachfront, enhance the offer for leisure and nautical sports. Turismo do Centro promotes Figueira da Foz as a preferred destination for active, sports and sea tourism. Table 16 shows the number of tourist accommodation facilities and the number of guests in 2024.

Table 16 - Tourist accommodation at Figueira da Foz, 2024. Source: INE, Survey on the length of stay of guests in hotels and other accommodation

	Hotels	Local accommodation	Rural tourism	Other
Number of facilities	17	33	1	
Number of guests	154,079			29,254

The numbers support the seasonality of demand concentrated in the summer months, preferred as a holiday destination (Figure 30).

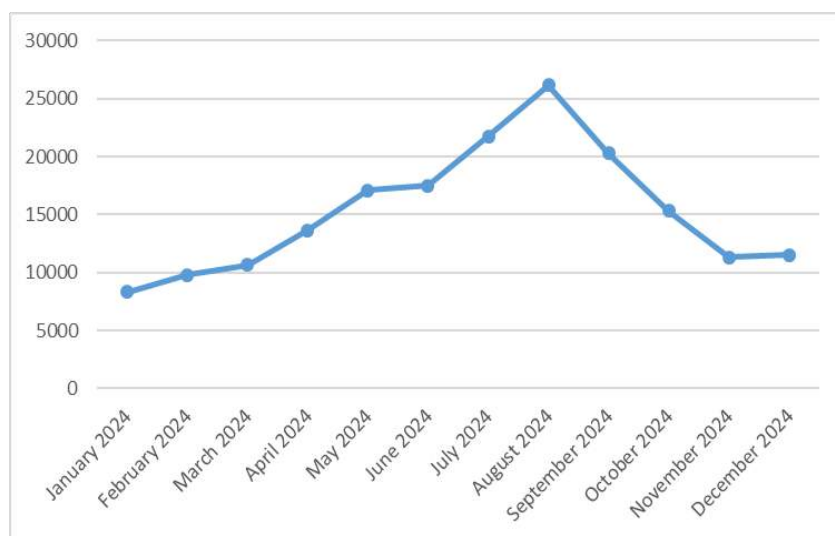


Figure 30 - Number of guests at tourist accommodations in Figueira da Foz by month, 2024. Source: INE, Survey on the length of stay of guests in hotels and other accommodation

According to INE tourism statistics (INE, 2024; INE, 2025), the number of overnight stays in tourist accommodation establishments in Figueira da Foz increased slightly from 2023 to 2024, around 2%, accompanied by the total revenue generated in those establishments, which also rose from 19,147 to 20,738 €, around 8%. The growth trend has, moreover, been constant since 2017, except for 2020 during the COVID-19 health crisis. Thus, the tourism sector represents an area of close interaction with maritime activities.

The existence of port infrastructures such as the marina, with berthing space and support services, enhances the attraction of tourists and the generation of local revenue. Additionally, the city is being promoted as a “destination of excellence to receive small-sized cruise ships” (Porto da Figueira da Foz, 2025) which emphasises the impact of planned port projects to accommodate larger vessels. The projection of these investments highlights their importance for the municipality’s economic development, particularly sea and beach related tourism and the port’s role as a relevant logistics platform for enhancing the Centro region.

3.3.4.5 Archaeological areas

Figure 31 illustrates the distribution of potential underwater cultural heritage (“Património cultural subaquático”) identified within the area of interest. Although comprehensive archaeological

data for this specific sector of the seabed remains scarce, the available records indicate the presence of distinct submerged occurrences within the boundaries of 3D seismic acquisition area.

Qualitative analysis of the dataset suggests these features predominantly consist of unclassified occurrences (labelled in Figure 31 as “Ocorrências Externas”), including potential shipwrecks and undetermined seabed anomalies. Furthermore, the mapping explicitly identifies the presence of a submerged airplane remains located within the survey zone. The spatial arrangement of these findings, including a notable concentration in the vicinity of the legacy “Poço da Dourada” infrastructure, underscores the necessity for careful remote sensing verification to differentiate between modern debris and genuine heritage assets.

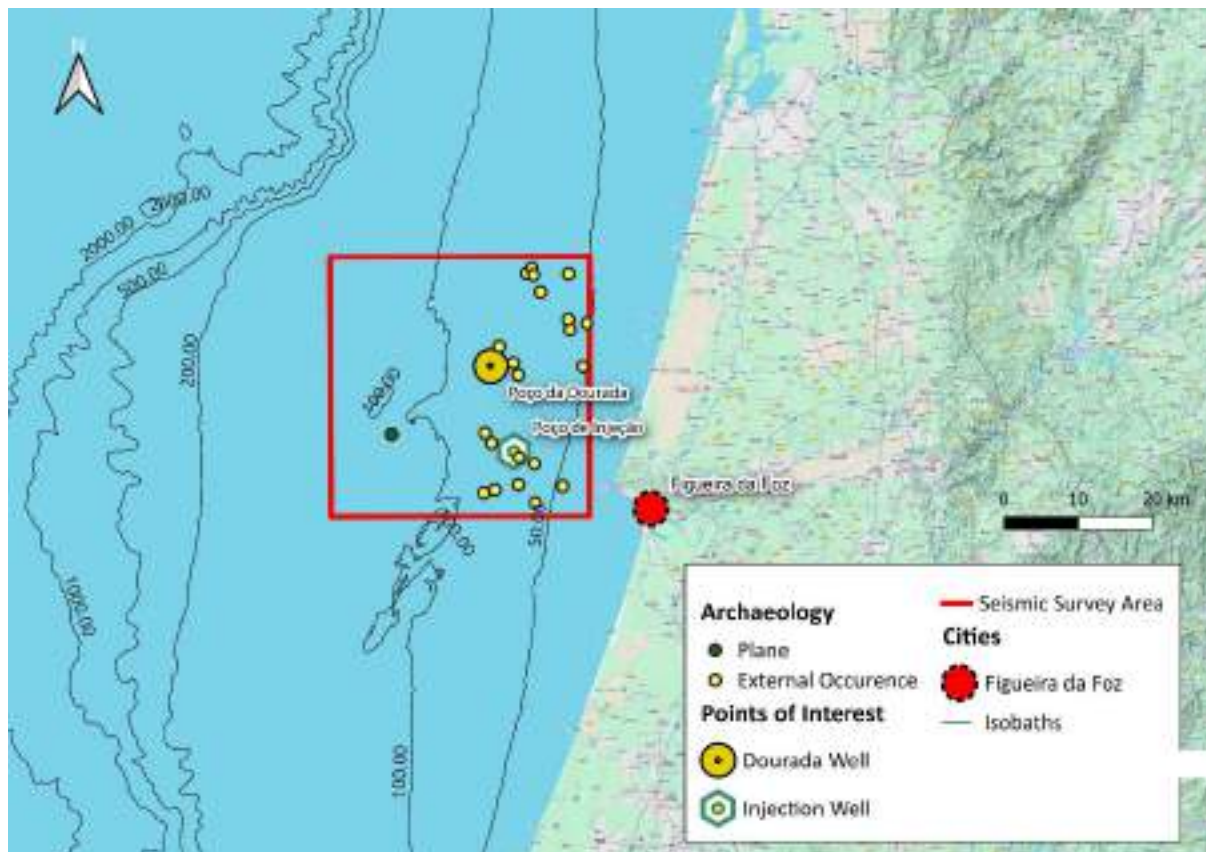


Figure 31 - Indicative mapping of underwater archaeological potential.

4. Identification of Potentially Affected Classified Areas

Under the Habitats Directive and NATURA 2000, the areas that could be influenced by the Pilot project planned activities, are the special Areas of Conservation Dunas de Mira, Gândara e Gafanhas (ZEC — PTCON0055) and Maceda/Praia da Vieira ZEC — PTCON0063 and the Special Protect Area Aveiro/Nazaré (ZPE — PTZPE0060). Although only Maceda/Praia da Vieira (ZEC) and Aveiro/Nazaré (ZPE) overlap the project polygon, as observable in Figure 32, there are direct and indirect risks mediated by acoustic propagation, trophic connectivity, and larval transport.

The ZEC Dunas de Mira, Gândara e Gafanhas encompasses extensive coastal dune systems, pine forests and wetlands that extend along the Mira–Gândara–Gafanhas corridor. Although the area is terrestrial, it interfaces closely with coastal processes and hosts lagoons, humid depressions and transitional ecosystems that support amphibians, insects and species that depend on the dunes.

Protected habitats include fixed and mobile dunes, humid dune slacks and coastal pinewoods, which are important for native and endemic plant species, dune-associated invertebrates and some bat species. The dune system plays a role in protecting the coast by regulating the exchange of sediments with the marine environment. The study area lies offshore and does not interact spatially with the ZEC (Figure 32). However, the ZEC is located within the coastal sedimentary basin that faces the seismic acquisition zone. The risks from exploration activities for the Pilot project activities are low, with the only potential indirect risk being the cumulative underwater noise influencing nearshore fish schools or crustaceans that interact with surf-zone ecosystems linked to the dune wetlands. No drilling related sediment impacts are expected to extend shoreward.

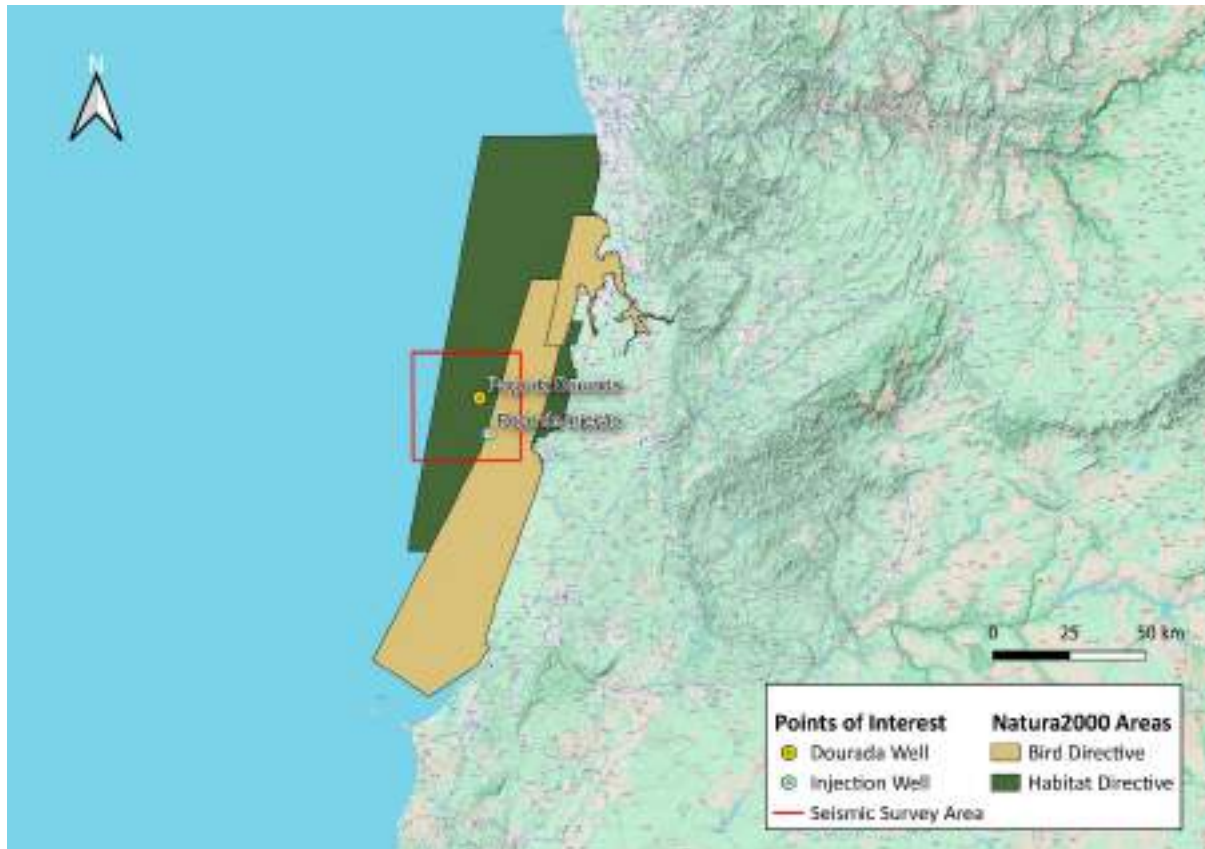


Figure 32 - Natura2000 areas and the overlapping directives.

The ZEC Maceda – Praia da Vieira is a coastal Natura 2000 site located along the central-northern Portuguese coast, encompassing coastal dune systems, sandy beaches, pine forests (Mata Nacional de Maceda), wetlands, and nearshore marine influence zones. The site includes protected habitats listed under Annex I of the Habitats Directive, notably mobile and fixed dunes with herbaceous vegetation, humid dune slacks, and associated transitional coastal ecosystems. Although primarily terrestrial and coastal in nature, the ZEC is ecologically connected to the adjacent marine environment through sediment dynamics, surf-zone productivity, and larval exchange between nearshore waters and coastal wetlands. The ZEC Maceda – Praia da Vieira could be affected by the 3D seismic and drilling operations due to the offshore location of the project. The ecological risks are direct and short-term, associated with acoustic disturbance of pelagic communities, mortality of zooplankton and possible effects on larval supply to coastal ecosystems. The risks for benthic communities are moderate, repeated impulsive noise may induce stress and altered behaviour in bivalves and crustaceans and impaired immune function and reduced feeding activity.

Aveiro–Nazaré ZPE (Special Protection Area – Birds) is a large marine ZPE covering coastal waters between Aveiro and Nazaré, designated primarily for its importance to seabirds such as *Calonectris borealis* (Cory's shearwater); *Puffinus puffinus* and *P. mauretanicus* (Manx and Balearic shearwaters); *Hydrobates pelagicus* (European storm petrel) and *Larus michahellis* and *L. fuscus* (yellow-legged and lesser black-backed gulls). The ZPE encompasses feeding areas associated with upwelling zones, frontal systems, and high zooplankton concentrations and supports offshore feeding and resting areas for migratory and breeding seabirds. The ZPE overlaps the study area, placing seismic acquisition and drilling activities within a designated seabird foraging area. The study area falls inside the known feeding range of several Annex I seabird species. During seismic acquisition the airgun noise may impact on forage fish (sardines, anchovies) and zooplankton, which could reduce short-term prey availability for seabirds. Temporary displacement of seabirds from feeding hotspots due to vessel presence and noise is also likely to occur.

Based on available data, no Natura 2000 protected habitats (reefs or protected sandbanks) are present inside the polygon defined for the 3D seismics. The area that could be important to account for are the soft-sediment benthic habitats, which are biologically productive and ecologically connected to ZEC/ZPE areas. These soft sediments support benthic invertebrates such as bivalves (e.g. *Spisula*, *Tellina*, *Chamelea*), polychaetes, amphipods and burrowing crustaceans and demersal fish (e.g., *Solea*, *Merluccius*). The main risks relate to acoustic disturbance to benthic fauna, zooplankton mortality, and short-term disruption of pelagic food webs.

5. Preliminary risk and impact identification

5.1 Risks and impacts associated with the 3D seismics acquisition

Activities on the continental shelf are expected to generate continuous noise pollution across multiple depth zones, posing potential risks to marine biodiversity. Many marine taxa, including invertebrates, fish, and mammals, rely on sound for communication, navigation, and predator detection (e.g. soniferous fish) (Williams et al., 2025). In recent years, there has been growing scientific concern regarding the effects of ocean noise on marine wildlife, especially the impact of low-frequency, high-intensity sounds produced during marine seismic surveys.

Marine seismic surveys are essential tools for geological research and offshore oil and gas exploration. However, they generate high-intensity, low-frequency impulsive sounds, mostly between 10 and 300 Hz (Carroll et al., 2017), making them a significant source of underwater noise pollution. Several studies suggest that seismic surveys may negatively affect cetaceans, fish, and invertebrates, although the extent of these impacts remains uncertain [Day et al., 2017; Elliott et al., 2019]. While offshore seismic activities have long been considered disruptive to fisheries, few ecological studies have specifically targeted commercially important species, particularly invertebrates (Hynes et al., 2025).

Several studies conclude that both fish and invertebrates exhibit behavioural and physiological responses to seismic activities, disrupting natural behaviours and triggering stress-related mechanisms (Murchy et al., 2019; Williams et al., 2025). In continental shelf benthic ecosystems, invertebrates such as bivalves show increased mortality and altered behaviour, including distinct “flinch” responses following seismic signals. Physiological assessments also reveal compromised homeostasis and reduced immune function in scallops (Day et al., 2017), highlighting the need for monitoring and management of seismic activities to protect bivalve populations. However, some findings indicate that while shipping noise also negatively affects invertebrates, seismic surveys could yield a positive effect size, suggesting a more complex relationship that requires further investigation

(Murchy et al., 2019). The scarcity of studies focusing on invertebrate responses underscores a significant knowledge gap in understanding their reactions to seismic disturbances (Affatati & Camerlenghi, 2023). Therefore, it is important to incorporate benthic communities into environmental monitoring and impact assessment frameworks. Communities of bacteria, meiofauna and macrofauna provide a comprehensive understanding of the ecological conditions of sediments. These groups respond to environmental changes at different spatial and temporal scales, providing complementary information on the impact of stressors.

The immediate physiological impacts of marine seismic surveys are not limited to fish and macroinvertebrates. Evidence also points to significant mortality and decreased abundance in zooplankton populations, raising broader concerns for ecosystem functioning and productivity. McCauley et al. (2017) observed a substantial decline in zooplankton abundance following exposure to air gun signals, with sonar measurements showing a ~3–4 dB drop within 15–30 minutes, and net tows indicating a median 64% decrease within 1 hour, alongside a two to threefold increase in dead adult and larval individuals. Effects were detected up to 1.2 km from the source, more than two orders of magnitude beyond the previously assumed impact range of 10 meters. These findings may guide future research to focus on the long-term ecological consequences of seismic activities on marine food webs. Conversely, Fields et al., [2019] demonstrated that seismic airgun blasts had minimal effects on the copepod *Calanus finmarchicus* beyond 10 meters from the source, suggesting that surveys may not significantly affect this key prey species for commercially important fish.

In addition to seismic surveys, shipping noise represents a major source of anthropogenic disturbance to marine invertebrates, affecting their behaviour, physiology, and ecological interactions. Exposure to vessel noise can induce stress responses, metabolic alterations, and changes in behavioural interactions, with potential cascading effects across marine ecosystems. For example, shore crabs exposed to shipping noise showed a 66% likelihood of movement during predator simulations, compared to 32% in control groups (Birch et al., 2025). Moreover, Hudson et al. (2022) reported altered competitive behaviour in juvenile blue crabs and American lobsters within 24 hours of exposure to vessel noise, indicating rapid behavioural disruption. Similarly, blue mussels (*Mytilus edulis*) exposed to shipping noise exhibited inflammation and metabolic imbalances, affecting energy pathways crucial for development [Veillard et al., 2025].

In alignment with European and international environmental standards, the assessment and management of underwater noise within the Pilot project designed by PilotSTRATEGY must consider current regulatory frameworks and guidelines established by the European Union (EU), OSPAR Commission, and the International Council for the Exploration of the Sea (ICES). The Marine Strategy Framework Directive (MSFD; Directive 2008/56/EC) identifies underwater noise as a key pressure on marine ecosystems and mandates Member States to achieve Good Environmental Status (GES). Specifically, Descriptor 11 (D11) of the MSFD focuses on energy, including noise, introducing criteria for monitoring continuous low-frequency sound and impulsive noise sources, such as seismic surveys and pile driving. Under OSPAR (particularly OSPAR Agreement 2014-08), impulsive noise events must be recorded in noise registries, and activities acoustic risks, such as seismic surveys, should follow a risk-based approach. Meanwhile, ICES provides scientific advice on cumulative ecological effects of anthropogenic sound, emphasizing that management should consider spatial and temporal sensitivities of taxa, especially during reproductive or migratory periods. Concerning the CO₂ storage Pilot study area, which includes ecologically sensitive benthic habitats and potential nursery or spawning grounds, compliance with these frameworks will be crucial for licensing and operational approval.

During the proposed 3D seismic survey, the impulsive underwater noise (airguns) represents the main environmental pressure, with the potential to induce physiological stress and behavioural changes in benthic macrofauna (e.g. bivalves, crustaceans and polychaetes), particularly within B1, C1

and C2 communities, which exhibit higher sensitivity to disturbance. Negative behavioural effects include reduced feeding activity, disruption of bioturbation processes and loss of immune responses in benthic organisms. It could also occur, indirect food-web effects, with short-term zooplankton mortality and altered prey availability, potentially propagating to benthic trophic levels. Limited physical disturbance is expected, as the use of mini-streamer technology minimises direct seabed contact; therefore, physical impacts are considered low, localised and temporary. Biological periods (e.g. spawning, breeding, nursery and migration phases) that should be avoided: Spring–early summer (March–June) should be avoided where possible for high-intensity activities (e.g. peak seismic acquisition), as this period coincides with spawning and recruitment phases of several characteristic macrofaunal species. For example, polychaetes such as *Terebellides stroemii* (C1 community) and *Scalibregma celticum* (A3 community) exhibit reproductive activity and larval release during late winter to spring, making early life stages particularly vulnerable to increased turbidity, sediment disturbance and acoustic stress. Late spring–summer (April–August) represents a nursery and growth period for mobile benthic and epi-benthic species typical of fine and mixed sands (community B1), including amphipods such as *Urothoe pulchella* and *Bathyporeia tenuipes*. During this period, juvenile stages inhabit shallow sediment layers and are highly sensitive to physical disturbance and sediment resuspension. In muddy and organic-rich habitats (community C2), dominated by species such as *Sarsonuphis bihanica* and *Nephtys incisa*, recovery rates are slow and reproductive output is typically seasonal. Disturbance during peak reproductive periods (spring–early summer) could lead to prolonged reductions in abundance; therefore, activities affecting the seabed should be minimised during these months.

5.2 Drilling generated impacts

Drilling activities significantly impact benthic communities through the physical smothering of habitats by drill cuttings, chemical stress from drilling fluids. Discharged drilling waste, particularly from oil and gas platforms, leads to sediment contamination, affecting benthic organisms up to 20 km from the discharge site (Ellis et al., 2012). High levels of several chemical pollutants can be released such as barium and hydrocarbons in sediments decreasing benthic macro-invertebrate abundance and diversity, particularly near drilling centers. Paine et al., (2014) that described the effects of drilling with water and synthetic-based drilling muds on benthic macro-invertebrates over 10 years at the Terra Nova offshore oil, observed that community structures are also affected. Shifts in community composition were observed with the decline of sensitive taxa such as certain polychaetes and an increase in more tolerant taxa like *Phyllodoctidae*. These long-term studies indicate that chronic exposure to drilling discharges can lead to lagged responses in community dynamics, affecting species richness and biomass over time. Currie et al., (2005) study the impact of exploratory offshore drilling on benthic communities in the Minerva gas field, detected significant decline in the most abundant phyla (Crustaceans and Polychaetes) of 45–73% within a 100 m radius of the well-head following drilling. In most cases these changes became undetectable four months after drilling. The smothering and burial of benthic habitats by drill cuttings can lead to reduced oxygen production and light attenuation, impacting calcareous algae and other benthic flora (Tâmega et al., 2015; Reynier et al., 2015). Recovery rates vary but can be slow, as legacy effects can persist long after drilling has stopped.

During proposed well drilling, there will be restrictions on suffocation and burial due to the deposition of drilling debris and fine particles, with more severe effects on fine-grained sediments rich in organic matter, especially in the C2 community, classified as having very high sensitivity. Changes in community structure, including declines in sensitive taxa and increases in tolerant or opportunistic species, especially polychaetes. Local chemical contamination from drilling discharges (e.g. barite and mud additives during water-based mud phases), generally restricted to the vicinity of the wellhead.

Moreover, continuous low-frequency noise generated by jack-up rig operations, potentially causing chronic stress in benthic and epibenthic organisms.

The overall predicted impacts are mostly temporary, localised and reversible, although their magnitude varies among the type of benthic community. Fine and muddy sediment communities (C1 and C2) represent the most vulnerable ecological communities and should therefore be prioritised in monitoring and mitigation strategies.

5.3 Biological Impacts

The assessment of potential environmental impacts associated with the CO₂ storage Pilot project was developed based on the technical description of the activities planned, namely seismic acquisition and exploratory drilling, as well as on the baseline characterisation of the biological communities present in the study area, including phytoplankton, zooplankton, benthic macrofauna, fish, marine avifauna and marine mammals.

In the assessment process, the identified and analysed impacts were classified, whenever possible, according to:

- Their nature (positive or negative);
- Their significance (very significant, significant or of low significance);
- Their magnitude (high, medium or low);
- Their probability of occurrence (certain, probable or unlikely);
- Their duration (temporary or permanent);
- Their onset or the moment when the impact occurs (immediate, medium term or long term);
- Their reversibility (reversible or irreversible);
- Their incidence (direct or indirect);
- Their spatial scale (local, regional or national).

In the assessment:

- The magnitude of the impact reflects the degree/intensity of the potential effect on a given resource, namely through the extent of the affected area, that is, the spatial expression of the impact;
- The significance of the impact reflects the local, regional, national or international importance of the affected resource, as well as its sensitivity/vulnerability in relation to the type of actions foreseen in the project under assessment.

Table 17 presents the criteria used in the classification of the parameters for the characterisation of impacts on the Aquatic Communities factor.

Table 17 - Criteria used in the classification of the parameters for the characterisation of impacts on the Aquatic Communities.

PARAMETER	IMPACT CLASSIFICATION	EXPLANATION / THRESHOLDS DEFINING THE IMPACT CLASSES
Nature	Positive (+)	An impact is considered positive when, at a minimum, it does not affect aquatic communities, their respective habitats and biotopes, keeping them practically unchanged, and/or promotes an increase in the specific richness of native species, contributes to an increase in the degree of habitat conservation, and to the improvement or containment of regression processes and/or degradation of the conservation status of the aquatic ecosystem.
	Negative (-)	An impact is considered negative when it affects aquatic communities through a reduction in the number of species and their abundance, decreases the degree of conservation of their respective habitats and biotopes, and contributes to regression processes and/or degradation of the conservation status of the aquatic ecosystem.
Significance	High significant	Impacts are considered very significant when aquatic communities show high sensitivity or vulnerability to project actions, causing considerable and irreversible damage (e.g., high mortality rates, significant changes in community composition and structure, ecosystem imbalance), and when their probability of occurrence is considered certain or probable.
	Significant	Impacts are considered significant when aquatic communities show medium to high sensitivity or vulnerability to project actions, causing considerable damage (e.g., high mortality rates, significant changes in community composition and structure), and when their probability of occurrence is considered certain or probable. In this case, impacts are reversible.
	Low significance	Impacts are considered of low significance when aquatic communities show low sensitivity or vulnerability to project actions, and only minor changes at community level may occur, not compromising its structure or ecosystem balance.
Magnitude	High	The magnitude of the impact is high when the number of species, populations and/or habitats affected is high and the affected area is extensive.
	Medium	The magnitude of the impact is medium when the number of species, populations and/or habitats affected is high and the affected area is limited, or when the number of species, populations and/or habitats affected is low and the affected area is extensive.
	Low	The magnitude of the impact is low when both the number of species, populations and/or habitats affected, and the affected area are limited.

PARAMETER	IMPACT CLASSIFICATION	EXPLANATION / THRESHOLDS DEFINING THE IMPACT CLASSES
Probability	Certain	Impacts are considered certain when their effect on aquatic communities, habitats and/or biotopes is unequivocal.
	Probable	Impacts are considered probable when the probability of occurrence is medium (e.g., 50%).
	Unlikely	Impacts are considered unlikely when the probability of occurrence is low.
Duration	Temporary	The impact is temporary when its effect on aquatic communities, habitats and/or biotopes ceases when the action that originated it also ceases.
	Permanent	The impact is permanent when its effects persist on aquatic communities, habitats and/or biotopes even after the cessation of the action that originated it.
Onset	Immediate	The impact is considered immediate when changes in the composition and structure of aquatic communities and/or habitats and/or biotopes occur immediately after the beginning of the action that originated it.
	Medium / Long term	The impact has a medium- or long-term onset when changes in the composition and structure of aquatic communities and/or habitats and/or biotopes occur after a shorter or longer time interval between the action and the impact.
Reversibility	Reversible	The impact is reversible if, after the cessation of the actions that induce it, its effects on aquatic communities and/or habitats and/or biotopes also cease.
	Irreversible	The impact is irreversible if its effects persist on aquatic communities and/or habitats and/or biotopes for an indefinite period.
Incidence	Direct	The impact is direct if it is caused directly by the construction or operation of the project.
	Indirect	The impact is indirect if it is induced by activities resulting from or associated with the project.
Spatial scale	Local	The impact is local if its effects on aquatic communities and/or habitats and/or biotopes are expressed at a local level.
	Regional	The impact is regional if its effects on aquatic communities and/or habitats and/or biotopes are expressed at a regional level.
	National	The impact is national if its effects on aquatic communities and/or habitats and/or biotopes are expressed at a national level.

In general terms, the potential impacts associated exploration stage of the CO₂ storage Pilot present distinct characteristics. Seismic acquisition is essentially a transient activity, whose main environmental pressure factor is underwater noise and associated vibrations and the temporary presence and movement of vessels, with potential effects being more pronounced in organisms that

rely on acoustic communication and in highly mobile species, for which sound plays a key role in orientation, social interaction and habitat use. Well drilling, although also temporary, involves the installation of a fixed structure (jack-up rig) and direct interaction with the seabed, and is therefore potentially more relevant for benthic receptors and for organisms sensitive to physical disturbance of habitats.

Below, the potential impacts identified within the scope of the exploration stage of the Pilot project on Aquatic Communities (AC) during the seismic acquisition (SAQ) and exploratory drilling (EXD) for the injection well are characterised and assessed.

5.3.1 Potential impacts associated with seismic acquisition (SAQ)

The 3D seismic acquisition will be conducted using mini-streamers and high-resolution acoustic sources over a relatively large area but for a limited period of time. This activity does not involve direct physical contact with the seabed; therefore, expected impacts are mainly acoustic and associated vibrations.

SAQ.AC.01 - For phytoplankton and zooplankton, potential impacts are essentially related to indirect disturbances arising from underwater noise and associated vibrations and vessel presence and movement, including different types of disturbance and contamination. These organisms, particularly phytoplankton, display high turnover rates and rapid recovery capacity and are not especially sensitive to acoustic or vibratory pressures or contamination. In the case of zooplankton, despite daily vertical migration of many species, population dynamics are fast and exposure to noise is temporary. Therefore, for these organisms, these types of impacts are considered negative but not significant, of low magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, indirect and local in spatial scale.

SAQ.AC.02 - Regarding benthic communities, no direct physical disturbance of the substrate is expected during seismic acquisition. Potential effects are limited to vibrations and acoustic disturbances that may be perceived by sensitive organisms but without structural alteration of the habitat, as well as to minor and localised disturbances and potential contamination associated with vessel traffic, such as accidental releases of pollutants, and increased turbidity in the water column. Thus, impacts are negative, not significant, of low magnitude, unlikely to probable, temporary, immediate, reversible, indirect and local in spatial extent.

SAQ.AC.03 - For fish, seismic acquisition may induce behavioural changes, including temporary displacement from the area, modifications in feeding or aggregation patterns and, in more sensitive species, physiological stress. Furthermore, depending strongly on sound intensity, distance to the source, and the species' biological and physiological characteristics, seismic acquisition may, at close range, cause physical injury, including damage to tissues and internal organs, particularly in species with gas-filled structures such as the swim bladder. In addition, fish may be affected by disturbances and potential contamination associated with vessel activity, such as increased turbidity, sediment resuspension and accidental releases of pollutants. These effects are considered negative, of low to moderate significance, low to medium magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, both direct (noise) and indirect (behavioural changes), and local in spatial scale.

SAQ.AC.04 - A temporary reduction in fish availability for fisheries may occur due to the short-term displacement of fish caused by underwater noise and vessel activity. This impact is negative, with low to moderate significance, low to medium magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, indirect, and local in spatial extent.

SAQ.AC.05 - In marine avifauna, potential impacts are mainly associated with disturbance caused by vessel presence, airborne noise and night-time lighting. In addition, activities related to vessel operations may lead to localised air and water pollution, through atmospheric emissions, fuel

combustion by-products and the potential release of hydrocarbons or other contaminants, which may indirectly affect birds by degrading environmental quality and food resources. These impacts are negative, not significant, of low magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, indirect and local in spatial extent. Given that these species mainly use the air-sea interface, no relevant direct impacts from the underwater acoustic component of seismic acquisition are anticipated.

SAQ.AC.06 - Marine mammals, some fish species and nekto-benthic invertebrates are highly sensitive to seismic acquisition due to their strong dependence on sound for communication, navigation and foraging. Noise produced by seismic sources may cause behavioural disturbance, temporary avoidance of the area, changes in diving patterns and physiological stress. These effects may be cumulative and potentially intensified by the presence and movement of vessels, which represent an additional source of acoustic disturbance and physical pressure in the marine environment. Therefore, impacts are negative, considered significant, of medium magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, direct and local to regional in spatial scale.

Overall, seismic acquisition impacts are dominated by acoustic pressure, with greatest relevance for marine mammals and, to a lesser extent, for fish, and are expected to be mostly temporary and reversible, while other biological groups are mainly affected indirectly, temporarily and with low magnitude.

5.3.2 Potential impacts associated with exploratory drilling (EXD) for the Injection well

The drilling phase involves the installation of a jack-up rig, drilling operations on the seabed and the use of drilling muds, implying direct interaction with the substrate and a significant increase in continuous underwater noise.

EXD.AC.01 - For phytoplankton and zooplankton, potential impacts are mainly related to local increases in turbidity and temporary changes in water quality associated with sediment resuspension and platform operations. These impacts are negative, not significant, of low magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, indirect and local in spatial scale.

EXD.AC.02 - Benthic communities are clearly the most affected group during this phase. The installation of the jack-up rig involves direct contact with the seabed, resulting in local habitat destruction and physical disturbance of sediments, and the direct mortality of benthic organisms within the footprint of the installation area. These impacts are negative, significant, of medium to high magnitude at the installation site, certain, temporary to potentially prolonged, immediate, generally reversible (with slow recovery), direct and local in spatial scale.

EXD.AC.03 - Sediment resuspension and deposition may cause burial of benthic organisms and changes in sediment physical and chemical characteristics. These impacts are negative, significant, of medium magnitude, probable, temporary to prolonged, immediate, reversible, both direct and indirect, and local in scale.

EXD.AC.04 - The discharge of water-based drilling muds in the upper sections of the borehole represents another relevant pressure factor mainly for benthic and nekto-benthic organisms, for demersal fish and planktonic communities. Although considered environmentally more benign than oil-based muds, they may still cause physical and chemical alterations to sediments. The impact is negative, significant, of medium magnitude, probable to certain, temporary to prolonged, immediate, reversible, direct and local in scale.

EXD.AC.05 - For benthic and nekto-benthic invertebrates and fish, the impact resulting from continuous noise generated by the rig and support vessels, may lead to temporary avoidance of the area, behavioural changes and interference with feeding patterns. This impact is negative, significant, of medium magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, direct and local in scale.

EXD.AC.06 - A temporary reduction in fish availability for fisheries may occur due to the continuous presence of infrastructure, vessel traffic and operational noise, which may lead to avoidance of the immediate area by fish. This impact is negative, with low to moderate significance, low to medium magnitude, probable, temporary, immediate to medium term, reversible, indirect, and spatially local.

EXD.AC.07 - Changes in fishing effort and operational patterns may arise if access to certain areas is restricted or if fishermen avoid operating close to drilling activities. This impact is negative for fishing activity and positive for the organisms, of low to moderate significance, low to medium magnitude, probable to certain, temporary, immediate to medium term, reversible, indirect, and local in scale.

EXD.AC.08 - Marine avifauna may be affected by increased human presence and noise, night-time lighting and higher vessel traffic, causing disturbance and changes in space use, particularly during feeding. Impacts are negative, low to moderate in significance, low to medium in magnitude, probable, temporary, immediate, reversible, indirect and local.

EXD.AC.09 - Marine mammals are again among the most sensitive groups, due to continuous and persistent noise associated with drilling. This noise may alter movement, feeding and communication patterns. Impacts are negative, significant to very significant, of medium magnitude (locally high), probable, temporary, immediate, reversible, direct and local to regional in spatial scale.

Exploratory drilling presents potentially more relevant impacts for benthic communities, due to direct physical disturbance and sediment and mud deposition, and for marine mammals due to continuous noise. In addition, other organisms that rely on sound for communication, orientation or prey detection, including certain fish species and nekto-benthic invertebrates, may also be significantly affected by acoustic emissions and vibrations, as well as by the sustained human presence and associated vessel activity in the area. In both cases, impacts are predominantly temporary and reversible, with mainly local spatial extent. However, the ecological sensitivity of certain receptors, particularly low-resilience benthic communities and marine mammals, confers a level of significance that justifies special attention to mitigation, scheduling of activities and environmental monitoring.

5.3.3 Cumulative Impacts

The potential cumulative impacts of a given project are those that (i) result from the accumulation of minor effects whose expression becomes noticeable beyond a certain threshold, or (ii) result from the accumulation of similar effects (impacts) within the project's area of intervention or area of influence, namely in its surrounding area. In the present project, cumulative impacts do not result from the overlap of different projects within the same area, but rather from the combination and temporal succession of the various phases and activities that compose it. As no other projects are yet known to be under development or planned in the vicinity of the CO₂ storage Pilot, cumulative impacts of an inter-project nature are not anticipated. However, the possibility of intra-project cumulative impacts, arising from the combination of the different activities foreseen within the scope of the project itself, is recognized. Accordingly, cumulative effects may be associated, in an initial phase, with the interaction between vessel presence and movement and seismic acquisition activities, and, in a subsequent phase, with the combination of maritime traffic and exploratory drilling operations. Although each of these activities, when considered individually, is expected to generate predominantly localised and temporary impacts, their sequential occurrence over time may lead to an accumulation of pressures on the marine environment, particularly in terms of underwater noise and vibrations, physical disturbance associated with vessel presence, and temporary changes in environmental quality. This accumulation may result in prolonged periods of disturbance for biological

communities, reducing recovery intervals between project phases and potentially enhancing cumulative effects over time within the study area.

Some cumulative impacts may result from relative proximity of the offshore renewable energy project, located some 20 km west from the CO₂ storage pilot project. The Allocation Plan for Offshore Renewable Energy (Resolução do Conselho de Ministros no. 19/2025, 7 February 2025), recognised that the projected offshore windfarms will have a significant impact on fishing activities: “Some fishing gear will be severely restricted, and, on the other hand, it will be impossible to fish in areas occupied by the wind turbines themselves”. The RCM 19/2025 recognises the danger that sitting wind farms may have in “pushing” trawl fishing to other nearby areas, generating overfishing and conflicts with other types of fishing: “The compatibility of wind farms with fishing activities must assume that fishing gear that is prevented from operating in wind farms, such as trawl gear or, possibly, purse seine fishing, may lead to the eventual cessation of fishing vessel activity. The cessation of fishing vessel activity appears essential to ensure that vessels prevented from fishing in wind farms do not move to other areas and create irreparable problems of overfishing and conflicts with other vessels not affected by renewable energy”. The possibility of this cumulative impact must be considered in the operational management of the exploratory phase of the Pilot project, particularly by taking into account the status of the development of the offshore renewable energy project.

6. Mitigation measures

Seasonal planning of operations needs to be adopted to avoid sensitive biological periods of key marine species, thereby reducing the risk of significant ecological disturbance. If it is not possible to avoid the disturbance, these species must be monitored. Autumn (September–October) may be preferable for short-duration seismic or drilling operations, as many benthic invertebrates have completed their main reproductive cycles, and communities are generally more resilient to temporary disturbance (Table 18).

Table 18 - Benthic communities that require more attention, the biological periods that should be avoided during seismic and drilling operations, and the recommended periods.

BENTHIC COMMUNITY (HABITAT TYPE)	MAIN SENSITIVE BIOLOGICAL PERIODS	RECOMMENDED SEASONAL PLANNING
B1 – Fine sands (moderate–high sensitivity; high β -diversity)	Spring–summer (Apr–Aug): juvenile growth / nursery phase in near-bed sediments	Prefer seismic activities outside Apr–Aug when feasible; best window Sep–Feb for high-intensity survey lines
C1 – Deep very fine sands (high sensitivity; high diversity)	Late winter–spring (Feb–May): spawning / larval release; settlement sensitive to turbidity	Avoid activities generating turbidity/plumes Feb–May . Schedule higher-risk operations for late summer–early autumn (Aug–Oct)
C2 – Deep muddy sands / sandy mud (very high sensitivity; low resilience)	Spring–early summer (Mar–Jun): higher recruitment / reproductive output; also sensitive to prolonged low-O ₂ periods	Avoid drilling / seabed discharges Mar–Jun. Prefer Sep–Oct for drilling and seabed-disturbing operations

A Drilling Waste Management Plan should be developed and implemented, ensuring the treatment and disposal of drilling fluids and cuttings. Preference should be given to water-based drilling muds where technically feasible, and associated wastes should be fully contained and recovered for onshore treatment and disposal by licensed operators.

Before, during and after the 3D seismic it is recommended to collect biologic samples (e.g. fishes, water and sediment) to analyse any physiologic changes in the pelagic and benthic organisms due to noise disturbance triggered by the seismic and drilling operations.

The work performed in PilotSTRATEGY Task 6.2 and Task 6.5 (Regional Stakeholder Committees) has shown the need to keep stakeholders and citizens informed and engaged, at all

stages of the project. Communication and engagement plans should be devised, with targeted and tailored actions to different types of stakeholders: national and local authorities, regulators, industry, fishermen, tourism industry, local associations, ENGO. This will require producing written information materials, some in plain language for non-experts, but also holding local face-to-face meetings and workshops where stakeholders can ask questions from promoters and share their concerns and feedback on the pilot.

6.1 Biological Mitigation Measures

Mitigation measures (MM) are established in relation to the expected impacts, whenever these are susceptible to being minimised or avoided. Accordingly, some specific mitigation measures are proposed for the Aquatic Communities (AC):

6.1.1 Mitigation measures for the seismic acquisition phase (SAQ)

Seismic acquisition impacts are mainly associated with underwater noise and vibrations. So, mitigation must therefore focus on reducing acoustic and vibratory exposure of marine organisms, especially marine mammals and fish, and minimising disturbance from vessel presence and movements.

MM.AC.SAQ.01 - Implementation of a marine mammal and avifauna observation programme with continuous coverage during operations to allow timely interventions if critical situations are identified.

MM.AC.SAQ.02 - Application of soft-start/ramp-up procedures, gradually increasing acoustic output.

MM.AC.SAQ.03 - Establishment of acoustic exclusion zones; operations must stop if marine mammals and relevant marine avifauna (see reference situation in section 3.3.3) are detected within them.

MM.AC.SAQ.04 - Minimisation of campaign duration through efficient operational planning; minimise the number of vessels involved in the operation, restricting their presence to those that are strictly necessary.

MM.AC.SAQ.05 - Implement strict operational and safety procedures to prevent accidental spills of oils, fuels and hydrocarbons, including proper maintenance of ships, equipment, secure storage of substances, and the availability of spill response kits on board.

MM.AC.SAQ.08 - If applicable, minimisation of night lighting to reduce attraction and collision risk of marine avifauna.

MM.AC.SAQ.09 – Schedule operations outside critical biological periods. Based on the reference situation (section 3.3.3), spring and summer (from March to September) correspond to the periods of highest ecological sensitivity, being associated with high planktonic productivity, benthic recruitment, fish reproduction and larval development, and intense activity of marine avifauna. Therefore, it is recommended that the activities with the greatest potential environmental impact should preferably be carried out between November and February, a period during which overall biological sensitivity is lower, thus contributing to the minimisation of impacts on the main ecological processes.

6.1.2 Mitigation measures for the exploratory drilling phase (EXD) of the injection well

Exploratory drilling involves more direct environmental impacts; mitigation should focus on limiting the affected area, controlling discharges and reducing noise.

MM.AC.ESD.01 – For phytoplankton and zooplankton, water turbidity should be monitored, and temporary suspension of operations should be considered in case of abnormal persistent turbidity.

MM.AC.ESD.02 – For benthic communities, sensitive habitats should be avoided whenever possible. Based on the characterisation of the benthic habitats (Reference Situation) the habitats C2 (deep muddy sands / sandy mud) and C1 (deep very fine sands) should be avoided, as they present the highest sensitivity and lowest resilience to physical disturbance, sediment deposition and increased turbidity. The B1 habitat (fine sands) should be treated with high caution due to its elevated ecological value and sensitivity to sediment burial. In contrast, the coarse-sediment habitats A2 and A3 show comparatively higher resilience and are therefore less critical from a conservation perspective.

MM.AC.ESD.03 – The jack-up rig seabed contact area should be minimised; the use of low-toxicity, water-based drilling muds should be preferable; control of mud and cuttings discharge should be strict; and limitation of operation duration at a single site.

MM.AC.ESD.04 – Noise should be reduced through proper ships and equipment maintenance and operational practices; operations should be scheduled avoiding critical biological periods (see MM.AC.SAQ.09), and temporary safety zones around the rig should be established (see MM.AC.ESD.02).

MM.AC.ESD.05 – Careful management of night light to reduce attraction of marine avifauna; installation of passive deterrent systems, if necessary.

MM.AC.ESD.06 – Implementation of the marine mammal and relevant marine avifauna observation programme, based on the criteria defined in the Reference Situation (Table 2), with continuous coverage during operations; use of PAM systems (Passive Acoustic Monitoring); and temporary suspension of operations if a high abundance of marine mammals or sensitive marine bird species is detected in the vicinity of the activity area.

Overall, mitigation measures are based on four main pillars:

- i) reduction of underwater noise, essential for protecting marine mammals and fish;
- ii) minimisation of physical disturbance of the seabed, crucial for benthic communities and fish with benthic and demersal affinities;
- iii) temporal planning of activities, avoiding biologically sensitive periods and benthic habitats, and
- iv) environmental monitoring, enabling early detection of unforeseen impacts and real-time operational adjustment.

The combined application of these measures will significantly reduce the magnitude, duration and spatial extent of the identified impacts, ensuring that the Pilot project is conducted in full compatibility with the ecological value of the study area.

7. Monitoring plan

7.1 Benthic Communities Monitoring Plan

The objective of this monitoring plan is to detect, quantify and manage potential impacts of the exploration phase (3D seismic acquisition and exploratory drilling) of the Pilot project on benthic and epibenthic communities, with particular emphasis on communities identified as sensitive or vulnerable. The plan aims to: Assess changes in community structure, diversity and function; Distinguish project-related effects from natural spatial and temporal variability; Support adaptive management and regulatory compliance.

7.1.1 Priority benthic communities

Based on the baseline characterisation and sensitivity analysis, the following communities are prioritised: C2 communities are characterised by the occurrence of deep muddy sands / sandy muds, and are classified as having very high sensitivity and low resilience. They are also considered as primary receptors of drilling-related impacts (smothering, organic enrichment, oxygen depletion). C1 communities are characterised by deep and very fine sands, and classified as having very high sensitivity and biodiversity. They are considered as vulnerable to increased turbidity, fine sediment deposition and prolonged disturbance. B1 communities, which are supported by the presence of fine sands (wide depth range), present moderate to high sensitivity, and high β -diversity. These communities are an effective sentinel community for detecting gradients of physical disturbance and sediment redistribution. A2 and A3 communities, which are located in coarse sand sediments, are evaluated with moderate sensitivity. They are mainly used as reference and control communities to detect sediment fining and hydrodynamic changes.

7.1.2 Monitoring design

Identify potential impact areas: 1) drilling impact zone: concentric distance classes around the wellhead (e.g. 50 m, 100 m, 250 m, 500 m, 1 km); 2) Seismic acquisition zone: stations distributed within the 3D seismic polygon, aligned with dominant benthic habitats.

Select control areas that could be ecologically comparable areas outside the influence of seismic and drilling activities, matched for depth, sediment type and hydrodynamic regime.

Implement BACI / Beyond-BACI approach (Before–After–Control–Impact) to ensure robust impact attribution. Collect samples of epi-benthic and benthic organisms, including macrofauna, meiofauna and microbiome. Collect sediment samples to analyse the biogeochemistry and measure other environmental parameters e.g. pH, temperature and chlorophyll *a*/ phaeopigments.

7.1.3 Temporal framework

Monitoring will be conducted in the following phases:

- Baseline (pre-operations): minimum of one full survey campaign to characterise natural variability.
- Operational phase:
 - i) During seismic acquisition (short-term response);
 - ii) During and immediately after drilling (high-risk period).
- Post-operation / recovery phase: Short-term:
 - i) 1–3 months after completion;
 - ii) Medium-term: 6–12 months after completion;
 - iii) Long-term (if required): ≥ 24 months for fine and muddy sediments (C1 and C2).

7.1.4 Environmental Monitoring Plan for the Exploratory Drilling Phase

A monitoring programme should be established encompassing both the biological elements and the environmental parameters that support their interpretation. The programme should be structured according to the ecological characteristics of each biological group and to the specific objectives of impact assessment and mitigation.

For benthic communities (benthic macrofauna and sedimentary habitats) and fish, monitoring should follow a before–after approach, enabling the establishment of baseline conditions prior to each activity (seismic acquisition and exploratory drilling) and a post-activity assessment to evaluate potential changes and identify project-related effects. A BACI (Before-After-Control-Impact) design is recommended, with the definition of Impact sites (I), located in the immediate area around the drilling platform/well and organised along radial or transect gradients, and Control sites (C), located in areas with similar environmental characteristics (e.g., bathymetry, sediment type and hydrodynamics) but outside the expected zone of influence of project activities. Temporal replication of surveys should be considered to ensure seasonal comparability whenever relevant. This approach will allow a robust assessment of potential alterations in community structure, abundance and habitat quality attributable to the project.

For marine mammals and marine avifauna, monitoring should be primarily conducted during project activities, as its main objective is operational mitigation rather than post-impact evaluation. Real-time monitoring allows the detection of sensitive species in the vicinity of the study area and supports the implementation of immediate management measures, such as the temporary suspension of operations whenever necessary. Marine mammals monitoring should be carried out through visual observations by Marine Mammal Observers (MMO), recording standardised information such as species (or group), number of individuals, distance/azimuth and behaviour (e.g., feeding, travelling, resting), complemented whenever technically feasible by Passive Acoustic Monitoring (PAM). PAM may include operational real-time systems, particularly useful under low-visibility conditions and during night-time operations, as well as autonomous systems (hydrophones/recorders) to support a broader temporal characterisation of presence and activity patterns.

In parallel, environmental quality parameters should be monitored to support the interpretation of biological responses, including water temperature, salinity, dissolved oxygen and turbidity. These variables are essential to characterise baseline conditions, detect project-induced changes in the physical environment and provide the necessary context for understanding potential effects on benthic communities, fish, marine mammals and marine avifauna.

8. Gap Analysis

8.1 Monitoring components and indicators

8.1.1 Biological indicators

Macrofauna: Species composition, abundance, biomass; Diversity indices (species richness, Shannon–Wiener, evenness); Indicator and sensitive taxa (e.g. *Terebellides stroemii*, *Auchenoplax worsfoldi*, *Urothoe pulchella*); Meiofauna (recommended for the communities C1 and C2): Nematode abundance, diversity and functional traits. Early-warning indicators of sediment stress (bacteria communities composition patterns); The use of diversity and functional indices that describe feeding guilds, mobility, bioturbation potential, life-history strategies, to evaluate the extension of the disturbance.

8.1.2 Sediment and geochemical indicators

Grain-size distribution and fine content; organic matter (TOC); chlorophyll *a* and phaeopigments; redox potential and oxygen penetration depth; contaminants related to drilling (e.g. barium as a tracer).

8.1.3 Physical disturbance indicators

Thickness and spatial extent of sediment redeposition; evidence of smothering or altered sediment structure and acoustic exposure metrics (from operational logs and modelling).

8.1.4 Adaptive management and reporting

- Results will be reviewed after each monitoring phase. If thresholds are exceeded, corrective measures may include:
- Adjustment of operational timing or intensity; Additional monitoring or targeted surveys;
- Revision of mitigation measures. Monitoring outcomes will be reported to regulatory authorities and stakeholders, ensuring transparency and compliance.

9. Conclusions

The CO₂ storage project conceived in PilotSTRATEGY is located offshore from Figueira da Foz and overlaps a heterogeneous continental shelf environment, where the available baseline information (Mamede, 2018) supports the identification of a mosaic of five benthic macrofauna affinity groups (A2, A3, B1, C1 and C2), shaped primarily by depth, hydrodynamic regime and sediment characteristics. This spatial heterogeneity is central to impact prediction, as each community presents distinct functional traits, sensitivity levels and recovery potential. Coarse sediment communities A2 and A3 (coarse sands/fine gravel and deep coarse sands) show moderate to moderate-high sensitivity and represent useful reference conditions for detecting hydrodynamic shifts. The B1 fine sand community, with high β -diversity and broad depth distribution, is classified as moderate-high sensitivity and contributes to detect physical disturbance gradients and sediment redistribution. In contrast, the deep fine sediment communities C1 (deep very fine sands) and especially C2 (deep muddy sands / sandy mud) exhibit high to very high sensitivity and should therefore be treated as important indicators under scenarios involving increased turbidity, deposition of fine particles, organic enrichment and smothering.

The preliminary impact selection indicates that, for the seismic survey, the dominant pressure is impulsive underwater noise, with the potential to induce behavioural and physiological effects in benthic macrofauna and epibenthic organisms (e.g. bivalves, crustaceans and polychaetes). These effects are expected to be more relevant in communities B1, C1 and C2, due to their ecological sensitivity and community structure. For exploratory drilling, the most significant pressures are linked to smothering and burial of seabed habitats due to drill cuttings deposition, potential localised contamination associated with drilling fluids/additives (e.g. barium as a tracer), and continuous operational noise. These impacts are likely to be more critical in fine and muddy sediment habitats, e.g. C2 communities, where recovery trajectories are expected to be slower and ecological resilience is limited.

To reduce the significant ecological disturbance, standard mitigation measures should be implemented, including operational procedures to minimise acoustic footprint, containing a Drilling Waste Management Plan, and the adoption of seasonal operational windows to avoid sensitive biological periods whenever feasible. In the proposed framework, it is advisable to avoid the most intensive operations during late winter to spring / early summer (approx. Feb–Jun), when spawning,

recruitment and juvenile development stages increase ecosystem vulnerability. Operational windows such as late summer to autumn (Aug–Oct), or more generally Sep–Feb, may be preferable depending on the activity type and the distribution of benthic communities.

A benthic monitoring programme should be implemented using a BACI / Beyond-BACI design, supported by ecologically comparable control areas and sampling stations stratified by dominant habitats. Monitoring should cover: (i) a concentric distance gradient around the drilling site (e.g. 50 m, 100 m, 250 m, 500 m, 1 km), and (ii) representative sampling locations across the seismic acquisition polygon. Important biological monitoring factors should be included such as macrofauna composition, abundance, biomass and diversity metrics, with the highly recommended addition of meiofauna and benthic microbial communities as rapid response “early warning” indicators. Sediment and geochemical monitoring should include grain size, fine content, TOC, pigments, redox/oxygen penetration depth, and drilling-related tracers/contaminants. The monitoring plan should include a pre-operational baseline survey, operational monitoring (seismic and drilling), and post-operation recovery assessment.

In conclusion, the available baseline information supports that the project interventions are environmentally feasible provided that implementation should: (1) prioritise the communities C1 and C2 as high-risk benthic indicators, (2) management of drilling wastes and fine-sediment deposition, (3) seasonal planning to reduce exposure during critical biological periods, and (4) a monitoring programme capable of detecting structural and functional changes in benthic communities and triggering corrective measures to implement.

This Preliminary Environmental Plan (PEP) does not replace or anticipate the need for a future Environmental Impact Assessment (EIA), should such a procedure be required under applicable legislation. The results presented are produced in the framework of a R&D project (PilotSTRATEGY, but can constitute the support for environmental screening, scoping and early regulatory decision-making for the exploration phase.

10. References

- Adão, H. (2022). Metazoan meiofauna: Benthic assemblages for sustainable marine and estuarine ecosystems. In W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia, & T. Wall (Eds.), *Life below water. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98536-7_41
- Affatati, A., & Camerlenghi, A. (2023). Effects of marine seismic surveys on free-ranging fauna: A systematic literature review. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1222523. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1222523>
- Bencatel, J., Sabino-Marques, H., Álvares, F., Moura, A.E. & Barbosa, A.M. (eds.) (2019). *Atlas de Mamíferos de Portugal*, 2ª edição. Universidade de Évora, Portugal. 271 pp.
- Birch, A., Cox, K. D., Murchy, K. A., Emry, S., & Harley, C. D. G. (2025). Shipping noise tolerance in invertebrates: A case study of the shore crab *Hemigrapsus oregonensis*. *PLOS ONE*, 20(8), e0329098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329098>
- Bonaglia, S., Hedberg, J., Marzocchi, U., Iburg, S., Glud, R. N., & Nascimento, F. J. A. (2020). Meiofauna improve oxygenation and accelerate sulfide removal in the seasonally hypoxic seabed. *Marine Environmental Research*, 159, 104968. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104968>
- Brotas, V., Brewin, R. J. W., Sá, C., Brito, A. C., Silva, T., Mendes, C. R., ... Groom, S. B. (2019). Deriving phytoplankton size classes from satellite ocean colour data in the Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 6, 44. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00044>

- Cabral, M.J. (coord.), Almeida, J., Almeida, P.R., Dellinger, T., Ferrand de Almeida, N., Oliveira, M.E., Palmeirim, J.M., Queiroz, A.I., Rogado, L., Santos-Reis, M. (eds.) (2005). Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal. Instituto da Conservação da Natureza. Lisboa.
- Carroll, A. G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., & Bruce, B. (2017). A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.038>
- Charrier, B. R., Ingels, J., Danielson, S. L., & Mincks, S. L. (2023). Infaunal community structure, diversity, and function in Pacific–Arctic shelf sediments: A comparison of meiofaunal- and macrofaunal-sized nematodes. *Marine Ecology Progress Series*, 720, 95–116. <https://doi.org/10.3354/meps14397>
- Chen, Z., Cameron, T. C., Couce, E., Garcia, C., Hicks, N., Thomas, G. E., Thompson, M. S. A., Whitby, C., & O’Gorman, E. J. (2024). Oil and gas platforms degrade benthic invertebrate diversity and food web structure. *Science of the Total Environment*, 929, 172536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172536>
- Coolen, J. W. P., Vanaverbeke, J., Dannheim, J., Garcia, C., Birchenough, S. N. R., Krone, R., & Beermann, J. (2022). Generalized changes of benthic communities after construction of wind farms in the southern North Sea. *Journal of Environmental Management*, 315, 115173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115173>
- Cruz, J., Mendes, C. R., Sá, C., Brito, A. C., & Brotas, V. (2022). Variabilidade espacial e temporal da clorofila-a na costa portuguesa. In: *Resumo Alargado – Jornadas de Oceanografia*. IPMA, Lisboa.
- Cunha, M.E. (1993a). Seasonal variation of the zooplankton biomass in relation to the hydrographic conditions of the Portuguese coast. *ICES, CM*. 1993/L:62.
- Cunha, M.E. (1993b). Spatial variation of the zooplankton biomass in relation to the hydrographic conditions of the Portuguese coast. *ICES, CM*. 1993/L:63.
- Currie, D. R., & Isaacs, L. R. (2005). Impact of exploratory offshore drilling on benthic communities in the Minerva gas field, Port Campbell, Australia. *Marine Environmental Research*, 59(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2004.05.001>
- Day, R. D., McCauley, R. D., Fitzgibbon, Q. P., Hartmann, K., & Semmens, J. M. (2017). Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(40), E8537–E8546. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700564114>
- Degraer, S., Carey, D. A., Coolen, J. W. P., Hutchison, Z. L., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, 33(4), 48–57. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>
- Dias, J. M. A., & Nittrouer, C. A. (1984). Continental shelf sediments of northern Portugal. *Continental Shelf Research*, 3, 147–165. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(84\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0278-4343(84)90004-9)
- Direção-Geral de Recursos Naturais, S. e. (2024). Plano de Situação do Ordenamento do Espaço Marítimo Nacional. Ordenamento do Mar Português (PSOEM), Accessible at https://www.uc.pt/site/assets/files/440050/resultados_artfish.pdf
- Elliott, B., Read, A. J., Godley, B. J., Nelms, S. E., & Nowacek, D. P. (2019). Critical information gaps remain in understanding impacts of industrial seismic surveys on marine vertebrates. *Endangered Species Research*, 39, 247–254. <https://doi.org/10.3354/esr00968>
- Ellis, J. I., Fraser, G., & Russell, J. (2012). Discharged drilling waste from oil and gas platforms and its effects on benthic communities. *Marine Ecology Progress Series*, 456, 285–302. <https://doi.org/10.3354/meps09622>
- European Union-Copernicus Marine Service (EU-CMEMS). (2022). North Atlantic Ocean colour plankton, reflectance, transparency and optics MY L3 daily observations. EUCMEMS. doi:10.48670/MOI-00286
- Favareto, L., Mendes, C. R., Sá, C., Brito, A. C., Silva, T., & Brotas, V. (2023). Response of phytoplankton to coastal upwelling: The importance of temporal and spatial scales. *Limnology and Oceanography*, 68(4), 1458–1475. <https://doi.org/10.1002/lno.12345>

- Ferreira, A., Sá, C., Brito, A. C., Silva, T., Mendes, C. R., & Brotas, V. (2021). Phytoplankton bloom phenology along the Western Iberian Coast. *Remote Sensing*, 13, 675. <https://doi.org/10.3390/rs13040675>
- Fields, D. M., Handegard, N. O., Dalen, J., Eichner, C., Malde, K., Karlsen, Ø., Skiftesvik, A. B., Durif, C. M. F., & Browman, H. I. (2019). Airgun blasts used in marine seismic surveys have limited effects on mortality, and no sublethal effects on behaviour or gene expression, in the copepod *Calanus finmarchicus*. *ICES Journal of Marine Science*, 76(7), 2033–2044. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz126>
- Gallucci, F., Fonseca, G., Vieira, D. C., Yaginuma, L. E., Gheller, P. F., Brito, S., & Corbisier, T. N. (2023). Predicting large-scale spatial patterns of marine meiofauna: Implications for environmental monitoring. *Ocean and Coastal Research*, 71. <https://doi.org/10.1590/2675-2824071.22070fg>
- Gallucci, F., Moens, T., Vanreusel, A., & Fonseca, G. (2008). Active colonisation of disturbed sediments by deep-sea nematodes: Evidence for the patch mosaic model. *Marine Ecology Progress Series*, 367, 173–183. <https://doi.org/10.3354/meps07537>
- Gasparatos, A., Doll, C. N. H., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a green economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 161–184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>
- Guerreiro, M., Martinho, F., Pardarl, M. (2021). A pesca local com redes de tresmalho
- Harris, P. T. (2014). Shelf and deep-sea sedimentary environments and physical benthic disturbance regimes: A review and synthesis. *Marine Geology*, 353, 169–184. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.023>
- Hiscock, K., Langmead, O., & Warwick, R. (2004). Identification of seabed indicator species from time-series and other studies to support implementation of the EU Habitats and Water Framework Directives (Report to the Joint Nature Conservation Committee and the Environment Agency; JNCC Contract F90-01-705). Marine Biological Association.
- Hynes, H. B. N., Nguyen, K., Geoffroy, M., Martin, B., & Morris, C. J. (2025). Subtle shift in depth distribution of fish within the impact range of seismic surveying along a continental slope. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2025-0027>
- INE. (2022). Recenseamento da população e habitação - Censos 2021. Obtido de INE: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_qa_populacao
- INE. (2024). Estatísticas de Pesca 2023. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/yw5nps5d>
- INE. (2024). Estatísticas do Turismo 2023. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/yd8km9tk>
- INE. (2025). Estatísticas da Pesca 2024. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/498dz65e>
- INE. (2025). Estatísticas do Turismo 2024. Obtido de INE: <https://tinyurl.com/339ecjxw>
- IPMA, 2025. Dados IPMA - campanhas demersais em zona offshore da Figueira da Foz. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. 8 pp.
- Jokanovic, S., Kajan, K., Perovic, S., Ivani, M., Maci, V., & Orlic, S. (2021). Anthropogenic influence on the environmental health along Montenegro coast based on the bacterial and chemical characterisation. *Environmental Pollution*, 271, 116383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116383>
- Jones, D. O. B., Simon-Lledó, E., Amon, D. J., Bett, B. J., Caille, C., Clément, L., & Wiklund, H. (2021). Environment, ecology, and potential effectiveness of an area protected from deep-sea mining (Clarion Clipperton Zone, abyssal Pacific). *Progress in Oceanography*, 197, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102653>
- Kennedy, A. D., & Jacoby, C. A. (1999). Biological indicators of marine environmental health: Meiofauna – A neglected benthic component? *Environmental Monitoring and Assessment*, 54, 47–68. <https://doi.org/10.1023/A:1005854731889>
- Kristensen, E., Penha-Lopes, G., Delefosse, M., Valdemarsen, T., Quintana, C. O., & Banta, G. T. (2012). What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences. *Marine Ecology Progress Series*, 446, 285–302. <https://doi.org/10.3354/meps09506>

- Lastras, R.G. Arzola, D.G. Masson, R.B. Wynn, V.A.I. Huvenne, V. Hühnerbach, M. Canals (2009). Geomorphology and sedimentary features in the Central Portuguese submarine canyons, Western Iberian margin. *Geomorphology*, Volume 103, Issue 3, Pages 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.06.013>.
- Li, C., Coolen, J. W. P., Scherer, L., Mogollón, J. M., Braeckman, U., Vanaverbeke, J., Tukker, A., & Steubing, B. (2023). Offshore wind energy and marine biodiversity in the North Sea: Life cycle impact assessment for benthic communities. *Environmental Science & Technology*, 57(16), 6455–6464. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07797>
- MAMAOT. (2012). *Estratégia Marinha Para a Subdivisão do Continente*. Diretiva Quadro Estratégia Marinha. 906 pp.
- Mamede, R., Sampaio, L., Ricardo, F., Magalhães, L., Lopes, M., Martins, R., Rodrigues, A. M., Freitas, R., & Quintino, V. (2022). Mapping the macrofauna communities of Portugal's continental shelf north of Nazaré Canyon using Community Distribution Modelling (CDM). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 270, 107849. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107849>
- Martins, R., Azevedo, M., Mamede, R., Sousa, B., Freitas, R., Rocha, F., Quintino, V., & Rodrigues, A. (2012). Sedimentary and geochemical characterisation and provenance of the Portuguese continental shelf soft-bottom sediments. *Journal of Marine Systems*, 91, 41–52.
- Martins, R., Quintino, V., & Rodrigues, A. M. (2013). Diversity and spatial distribution patterns of the soft-bottom macrofauna communities on the Portuguese continental shelf. *Journal of Sea Research*, 83, 173-186. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.03.001>
- Martins, R., Sampaio, L., Quintino, V., & Rodrigues, A. (2014). Diversity, distribution and ecology of benthic molluscan communities on the Portuguese continental shelf. *Journal of Sea Research*, 93, 75–89.
- McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R., & Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution*, 1(7), 0195. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0195>
- McMahon, R., Taveras, Z., Neubert, P. L., & Harvey, H. R. (2021). Organic biomarkers and meiofauna diversity reflect distinct carbon sources to sediments transecting the Mackenzie continental shelf. *Continental Shelf Research*, 220, 104406. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104406>
- Min, W. G., et al. (2023). Bathymetric trends of the deep-sea meiobenthos distributed on the continental slope of the Ulleung Basin and its adjacent area. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 200, 104136. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104136>
- Moita, M. T. (2001). *Estrutura, dinâmica e ecologia do fitoplâncton na costa portuguesa*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.
- Morgado, F., Vieira, L.R., Ré, P., Soares, A.M.V.M. (2014). *Atlas do Zooplâncton Marinho e Estuarino da Costa Atlântica*. Departamento de Biologia, Universidade de Aveiro, Series Biologicando. Edições Afrontamento. ISBN 978-972-36-1376-6.
- Murchy, K. A., Davies, H. L., Shafer, H., Cox, K., Nikolich, K., & Juanes, F. (2019). Impacts of noise on the behavior and physiology of marine invertebrates: A meta-analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 146(4), 040002. <https://doi.org/10.1121/2.0001217>
- NASA/JPL. 2015. GHRSSST level 4 MUR global Foundation Sea surface temperature analysis (v4.1). NASA/JPL. doi:10.5067/GHGM-4FJ04
- Paine, M. D., DeBlois, E. M., Kilgour, B. W., Tracy, E., Pocklington, P., Crowley, R. D., Williams, U. P., & Janes, G. G. (2014). Effects of the Terra Nova offshore oil development on benthic macro-invertebrates over 10 years of development drilling on the Grand Banks of Newfoundland, Canada. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 110, 38–64. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.10.015>
- Panieri, G., Argentino, C., Ramalho, P. S., Vulcano, F., Savini, A., Fallati, L., Brekke, T., Galimberti, G., Riva, F., Balsa, J., Eilertsen, H. M., Stokke, R., Steen, H. I., Sahy, D., Kalenitchenko, D., Büenz, S., Mattingsdal, R., & (2023).

An Arctic natural oil seep investigated from space to the seafloor. *Science of the Total Environment*, 907, 167788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167788>

Pardal, M., Azeiteiro, U.M. (2001). Zooplankton biomass, abundance and diversity in a shelf area of Portugal (the Berlenga Marine Natural Reserve). *Arquipélago. Life and Marine Sciences* 18A: 25-33. Ponta Delgada. ISSN 0873-4704.

Patrício, J., Adão, H., Neto, J. M., Alves, A. S., Traunspurger, W., & Marques, J. C. (2012). Do nematode and macrofauna assemblages provide similar ecological assessment information? *Ecological Indicators*, 14, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.027>

Pérez-Espinoza, S. A., Rivera-Vera, L. A., Neira, J. Y., Arumí, J. L., & Barra, R. O. (2025). Burrowing crayfish (Crustacea: Decapoda: Parastacidae) as a tool for biomonitoring groundwater quality in South America. *Environmental Reviews*, 33, 1–20. <https://doi.org/10.1139/er-2024-0057>

Pombo, J., Rodrigues, A., da Silva, P.F. (2025). Offshore Site Investigation of Sandy Sediments for Anchoring and Foundation Design of Renewable Energy Applications—NW Center of Portugal. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13, 1521. <https://doi.org/10.3390/jmse13081521>

Portaria n.º 96/2016, de 19 de abril. *Diário da República* n.º 76/2016, Série I de 2016-04-19, páginas 1342 – 1343.

Porto da Figueira da Foz. (12 de September de 2025). Porto da Figueira da Foz está na maior feira de cruzeiros da Europa. Obtido de Porto da Figueira da Foz: <https://portofigueiradafoz.pt/noticia/pt/422/>

Porto da Figueira da Foz. (28 de July de 2025). Arrancou a ampliação do Cais Comercial do Porto da Figueira da Foz: “uma obra que vai ficar para o futuro”. Obtido de Porto da Figueira da Foz: <https://portofigueiradafoz.pt/noticia/pt/418/>

Przeslawski, R., Brooke, B., Carroll, A. G., & Fellows, M. (2018). An integrated approach to assessing marine seismic impacts: Lessons learnt from the Gippsland Marine Environmental Monitoring (GMEM) project. *Ocean & Coastal Management*, 160, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.011>

Referencias dos bentonicos

Reuscher, M. G., Baguley, J. G., & Montagna, P. A. (2020). The expanded footprint of the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico deep-sea benthos. *PLOS ONE*, 15(6), e0235167. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235167>

Reynier, M. V., Tâmega, F. T. S., Daflon, S. D. A., Santos, M. A. B., Coutinho, R., & Figueiredo, M. A. O. (2015). Long- and short-term effects of smothering and burial by drill cuttings on calcareous algae in a static-renewal test. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(7), 1572–1577. <https://doi.org/10.1002/etc.2938>

Ridall, A., & Ingels, J. (2021). Suitability of free-living marine nematodes as bioindicators: Status and future considerations. *Frontiers in Marine Science*, 8, 685327. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.685327>

Ritter, C. J., & Bourne, D. G. (2024). Marine amphipods as integral members of global ocean ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 572, 151985. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2023.151985>

Schratzberger, M., & Ingels, J. (2018). Meiofauna matters: The roles of meiofauna in benthic ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 502, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.007>

Schratzberger, M., & Somerfield, P. J. (2020). Effects of widespread human disturbances in the marine environment suggest a new agenda for meiofauna research is needed. *Science of the Total Environment*, 728, 138435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138435>

Semprucci, F., & Balsamo, M. (2014). Free-living marine nematodes as bioindicators: Past, present and future perspectives. *Trends in Environmental Science*, 17–36.

Sroczyńska, K., Chainho, P., Vieira, S., & Adão, H. (2021). What makes a better indicator? Taxonomic vs functional response of nematodes to estuarine gradient. *Ecological Indicators*, 121, 107113. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107113>

Tillin, H. M. (2016). [*Echinocyamus pusillus*], [*Ophelia borealis*] and [*Abra prismatica*] in circalittoral fine sand. In H. Tyler-Walters & K. Hiscock (Eds.), *Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information*

Reviews [Online]. Marine Biological Association of the United Kingdom.
<https://doi.org/10.17031/marlinhab.1131.1>

Vafeiadou, A. M., Materatski, P., Adão, H., Troch, M., & Moens, T. (2013). Food sources of macrobenthos in an estuarine seagrass habitat (*Zostera noltii*) as revealed by dual stable isotope signatures. *Marine Biology*, 160, 2517–2523.

Vanaverbeke, J., Merckx, B., Degraer, S., & Vincx, M. (2011). Sediment-related distribution patterns of nematodes and macrofauna: Two sides of the benthic coin? *Marine Environmental Research*, 71, 31–40.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.09.006>

Vanreusel, A., Fonseca, G., Danovaro, R., da Silva, M. C., Esteves, A. M., Ferrero, T., Gad, G., Galtsova, V., Gambi, M. C., Fonseca-Genevois, V. G., et al. (2010). The contribution of deep-sea macrohabitat heterogeneity to global nematode diversity. *Marine Ecology*, 31, 6–20.

Veillard, D., Beauclercq, S., Palacios, E., Genard, B., Chauvaud, L., Olivier, F., Marcotte, I., & Tremblay, R. (2025). Metabolomic responses to shipping noise in early life stages of blue mussels, *Mytilus edulis*. *Journal of Experimental Biology*, 228(15). <https://doi.org/10.1242/jeb.250386>

Vieira, S., Adão, H., & Vicente, C. S. L. (2025a). Assessing spatial and temporal patterns of benthic bacterial communities in response to different sediment conditions. *Marine Environmental Research*, 204, 106963.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.106963>

Vieira, S., Pessoa, I., Ferreira, B., Vicente, C. S. L., & Adão, H. (2025b). Spatial and temporal distribution patterns of the estuarine nematode assemblages and their relationship with benthic bacteria communities. *Estuaries and Coasts*, 48, 144. <https://doi.org/10.1007/s12237-025-01578-1>

Vieira, S., Sroczyńska, K., Neves, J., Martins, M., Costa, M., Adão, H., & Vicente, C. (2023). Distribution patterns of benthic bacteria and nematode communities in estuarine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 108448. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108448>

Vingada, J.V., Eira, C. (2018). Conservação de Cetáceos e Aves Marinhas em Portugal Continental. O projeto LIFE+ MarPro. LIFE+ MarPro, Aveiro. 258 pp.

Wang, L., Wang, B., Cen, W., Xu, R., Huang, Y., Zhang, X., Han, Y., & Zhang, Y. (2023). Ecological impacts of the expansion of offshore wind farms on trophic level species of marine food chain. *Journal of Environmental Sciences*, 139, 226–244. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.05.002>

Wang, W., Tao, J., Liu, H., Li, P., Chen, S., Wang, P., & Zhang, C. (2020). Contrasting bacterial and archaeal distributions reflecting different geochemical processes in a sediment core from the Pearl River Estuary. *AMB Express*, 10, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-0950-y>

Williams, R., Cox, K. D., Amon, D., Ashe, E., Chapuis, L., Erbe, C., de Vos, A., Nielsen, K. A., Collins, M. S., Smith, C., Washburn, T., Young, K. F., & Clark, C. W. (2025). Noise from deep-sea mining in the Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean will impact a broad range of marine taxa. *Marine Pollution Bulletin*, 218, 118135.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118135>

Zeppilli, D., Leduc, D., Fontanier, C., Fontaneto, D., Fuchs, S., Gooday, A. J., Goineau, A., et al. (2018). Characteristics of meiofauna in extreme marine ecosystems: A review. *Marine Biodiversity*.
<https://doi.org/10.1007/s12526-017-0815-z>

Zimmermann, J., Wentrup, C., Sadowski, M., Blazejak, A., Gruber-Vodicka, H. R., Kleiner, M., Ott, J. A., Cronholm, B., De Wit, P., Erséus, C., & Dubilier, N. (2016). Closely coupled evolutionary history of ecto- and endosymbionts from two distantly related animal phyla. *Molecular Ecology*, 25, 3203–3223. <https://doi.org/10.1111/mec.13554>

<https://www.atlasavesmarinhas.pt/>

<https://www.iucnredlist.org>