

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Sciences de la Mer

Option : Environnement marin et côtier

Thème :

Etude d'impact environnemental d'un puits de forage d'exploration offshore dans le périmètre marin de Skikda- Annaba

Présenté par :

NOUAR ANIA
BOUKKEROUCHE LOUBNA

Soutenu le 02/07/2025, devant le jury composé de :

Mr BOUICHA F.	MAA-ENSSMAL	Président
Mme GHAZI M.	MCA- ENSSMAL	Promotrice
Mr KADA M.	Chef département HSE/SONATRACH	Co-promoteur
Mme MEHDID S.	MAA-ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements :

Nous souhaitons tout d'abord adresser nos plus sincères remerciements à Madame Malika Ghazi, notre encadrante, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de superviser ce travail. Grâce à sa grande expérience, à son expertise reconnue et à sa disponibilité constante, elle nous a apporté un encadrement de grande qualité, alliant rigueur scientifique, exigence méthodologique et bienveillance. Tout au long de ce projet, ses conseils avisés, son sens du détail et son engagement personnel nous ont guidés et ont enrichi notre réflexion. Nous lui sommes profondément reconnaissantes pour la confiance qu'elle nous a accordée et pour l'opportunité qu'elle nous a offerte de progresser à travers ce mémoire.

Nos plus vifs remerciements vont également à Monsieur Mounir Kada, Chef du Département HSE au sein de la division Exploration de Sonatrach, pour avoir accepté d'assurer le co-encadrement de ce travail. Nous avons beaucoup apprécié la pertinence de ses remarques, la richesse de ses échanges et la qualité de son accompagnement. Sa disponibilité, son implication et sa vision professionnelle ont été pour nous des atouts majeurs durant l'ensemble de notre démarche. Nous tenons également à remercier chaleureusement l'ensemble de ses collègues et collaborateurs, au sein de département, pour leur accueil chaleureux, leur esprit de collaboration et leur soutien constant. Leur disponibilité et leur bienveillance ont contribué à créer un environnement de travail des plus agréables et motivants.

Nous exprimons aussi toute notre gratitude à Monsieur SADEK.B Chef du Département Offshore a la Division Exploration de Sonatrach, pour son accueil chaleureux, sa disponibilité et le soutien qu'il nous a apporté tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury, Madame MAHDID.S et Monsieur BOUAICHA.F, pour avoir accepté d'examiner et de présider ce travail. Leurs observations et leurs conseils avisés contribueront à enrichir et à améliorer la qualité de ce mémoire

Nous n'oublions pas d'adresser nos plus profonds remerciements à nos chers parents, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements tout au long de notre parcours universitaire. Par leurs sacrifices et leur générosité, ils ont rendu possible la réalisation de ce mémoire et nous ont permis d'arriver jusqu'à ce jour avec confiance et détermination.

Nous tenons également à remercier notre école l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), pour la qualité remarquable de l'enseignement qui nous y a été dispensé. Nous avons eu le privilège d'évoluer dans un cadre pédagogique stimulant, où le professionnalisme et la bienveillance de l'ensemble des enseignants et du personnel nous ont accompagnés tout au long de notre formation. C'est grâce à cet environnement d'excellence que nous avons pu acquérir les connaissances, les savoir-faire et l'ouverture d'esprit nécessaires à la conduite de ce travail. Nous mesurons pleinement l'apport de cette formation dans notre parcours, et nous en garderons un souvenir des plus précieux.

Enfin, nous souhaitons nous adresser un remerciement mutuel, en tant que binôme, pour le sérieux, la motivation et la bonne entente que nous avons su cultiver tout au long de ce projet. Cette expérience de travail en commun restera un moment marquant de notre parcours, et c'est grâce à cette collaboration que nous avons pu mener ce mémoire à son terme dans les meilleures conditions.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.

À L'ÊTRE LE PLUS CHER DE MA VIE, MA MÈRE

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma reconnaissance pour les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et mon bien-être.

Merci pour le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance.

Que ce travail soit l'écho de tes vœux tant formulés, le fruit de ton courage et de ton infinie patience.

Puisse Dieu te préserver et t'accorder bonheur, santé et longue vie.

À MON TRÈS CHER PÈRE

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduise ma gratitude et mon affection.

À MON BINÔME, NINA

À toi, qui as été bien plus qu'un simple binôme de travail.

Merci d'avoir été là, dans les bons comme dans les mauvais moments, pour ton écoute, ta patience, ta force, et ton engagement sans faille.

Sans toi, ce mémoire n'aurait jamais pu être mené jusqu'au bout.

Nous avons construit ce travail ensemble, pas à pas, main dans la main.

Et je ne l'oublierai jamais.

À MA PETITE FAMILLE

À mes grands-parents,

À mes tendres grand-mère, Sarhouda et Yamina qui m'ont élevée avec amour et patience ,que

Dieu vous protège.

et à mes grand-père Hafnaoui et Chabane, qui m'ont soutenue depuis ma toute petite enfance que

Dieu ait vos âmes.

À mes tantes maternelles, Mima, Samano et Mira, qui sont bien plus que des tantes : de véritables sœurs de cœur et de vie.

À mes oncles maternels, Kamel, Fowaz, Djamel, Ahmed, Mustapha, Abderrahmen et Achour, Merci pour votre soutien, vos prières, et l'affection que vous m'avez toujours offerte, chacun à sa manière.

LOUBNA

Dédicace

À ceux qui ont bâti les fondations invisibles de ce parcours, à ceux qui ont cru en moi parfois plus que moi-même.

À ma mère, pilier de toute une vie. À travers ses sacrifices, ses silences pleins de courage, ses nuits sans sommeil et ses jours sans repos, elle m'a appris l'endurance, la dignité et l'amour pur. Maman, si ce mémoire existe aujourd'hui, c'est parce que tu m'as portée bien au-delà des mots.

Rien n'aurait été possible sans ta force.

À mon père, dont les efforts, souvent discrets, toujours constants, m'ont offert le luxe d'apprendre, de rêver, de me construire. Merci pour ces choix difficiles que tu as faits pour moi, pour chaque renoncement que je n'oublierai jamais. C'est aussi ta réussite.

À mes grandes sœurs, mes mamans de cœur, mes repères dans la vie. Vous avez été mes premières confidentes, mes conseillères, mes refuges. Par votre amour, votre exigence bienveillante et votre exemple, vous avez guidé mes pas, éclairé mes choix. Sans vous, je ne serais ni la personne, ni l'ingénieure que je suis devenue. Merci d'avoir été là, toujours.

À Nesrine, mon amie précieuse, avec qui tout a commencé sur les bancs de la fac. Si nos chemins académiques ont fini par se séparer, nos liens, eux, ne se sont jamais défaits. On s'est vues grandir, changer, tomber parfois — et se relever toujours. Merci pour cette fidélité rare, pour tous ces souvenirs partagés, et pour l'évidence que notre amitié est faite pour durer.

Et à ma binôme, Noubna — comme j'aime t'appeler affectueusement. Merci pour ton aide précieuse, ta patience sans faille, ton humour tendre et ta présence apaisante. Tu as été bien plus qu'une partenaire de travail : un véritable soutien dans les moments de doute, une épaule, une alliée, et une belle âme avec qui j'ai eu la chance d'avancer, pendant ce projet et bien au-delà.

ANIA

Sommaire

Remerciements :	2
Sommaire	5
Liste Des Figures.....	9
Liste Des Tableaux	11
Liste des Abréviations :.....	12
INTRODUCTION.....	14
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER	17
I.1 Processus de formation des gisements d'hydrocarbures en mer.....	18
I.1.1 Cycle de la matière organique dans l'environnement :.....	18
I.1.2 Accumulation et formation des sédiments riches en matière organique :.....	18
I.1.3 Enfouissement et genèse du kérogène :	19
I.1.4 Transformation du kérogène en hydrocarbures.....	19
I.1.5 Migration et piégeage des hydrocarbures	20
I.2 L'activité mondiale du forage pétrolier et gazier offshore.....	21
1.2.1 Evolution globale du forage pétrolier et gazier offshore.....	21
I.2.2 Le forage offshore en Méditerranée.....	25
I.2.3 Le programme algérien du forage gazier offshore.....	26
I.2.3.1 Historique des travaux de prospection et d'exploration	27
I.2.3.2 Enjeux de l'exploration de l'offshore algérien	28
I.2.3.3 Potentiel pétrolier de l'offshore algérien	30
I.3 Les conditions réglementaires du forage offshore	32
I.3.1 Conventions et réglementations internationales sur le forage offshore	32
I.3.2 La réglementation algérienne.....	35
I.4 Les caractéristiques du forage pétrolier et gazier offshore	39
I.4.1 L'étape exploratoire du gisement.....	39
I.4.1.1 La prospection géophysique et sismique	39
I.4.1.2 L'exploration du gisement par forage	39
I.4.2 L'étape d'exploitation du gisement.....	40
I.4.3 Les types de plateformes pétrolières offshore.....	40
I.5 Les risques accidentels liés au forage offshore	45
I.5.1 Historique des risques accidentels de l'activité pétrolière offshore.....	45

I.5.2 Les accidents liés aux défaillances structurelles	46
I.5.3 Les accidents liés aux conditions météorologiques extrêmes	46
I.5.4 Les accidents liés aux défaillances opérationnelles et erreurs humaines	47
I.6 Les impacts environnementaux du forage pétrolier offshore.....	47
I.6.1 Les impacts liés aux rejets de forage en milieu marin	48
I.6.1.1 Le comportement des rejets des fluides de forage	49
I.6.1.2 Les cibles exposées en milieu marin.....	50
I.6.2 Les impacts liés à la gestion des rejets de forage.....	51
I.6.3 Les impacts liés à la consommation d'énergie et des ressources.....	51
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	52
II.1 Présentation de la zone étude.....	53
II.1.1 Localisation géographique et administrative	53
II.1.2 Le périmètre d'exploration offshore de Skikda-Annaba	53
II.2. Description de l'environnement du site.....	55
II.2.1 Le contexte géologique de la région Skikda-Annaba :	55
II.2.1.1. Aspect stratigraphique	56
II.2.2. Le climat	57
II.2.3 L'hydrodynamisme marin et côtier.....	58
II.2.3.1. La Bathymétrie de la zone	58
II.2.3.2. Circulation océanographique dans la zone d'étude	59
II.2.3.3- les vents dans la région de Skikda :.....	61
II.2.3.4 les houles dans la région de Skikda :	63
II.2.3.5. Détermination de la période propice au forage offshore dans la région.....	65
II.2.4. Les risques sismiques et climatiques	66
II.2.5. Les écosystèmes marins et côtiers	67
II.2.5.1. Biodiversité globale de la côte algérienne	67
II.2.5.2 La flore marine	68
II.2.5.3. La faune marine	69
II.2.5.4 Les espèces marines protégées	72
II.2.5.5 Les zones humides protégées	75
II.2.6. Les paramètres physiques et biogéochimiques des eaux marines	77
II.3. Caractéristiques techniques et physico-chimiques du forage offshore.....	80
II.3.1. Description de la plateforme de forage adaptée à l'exploration offshore.....	80
II.3.2. Déroulement chronologique des opérations de forage	81

II.3.3. Composition des fluides de forage à base d'eau (WB) et à base d'huile (OB)	82
II.3.4. Propriétés physico-chimiques des systèmes de fluides de forage	84
CHAPITRE III : ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	87
III.1. Identification et évaluation des impacts environnementaux	88
III.1.1. Méthodologie d'identification des impacts	88
III.1.2. Identification des impacts environnementaux.....	88
III.1.3. DESCRIPTION DES IMPACTES	95
III.1.3.1 Impacts sur milieu biologique :.....	95
III.1.3.2 Impacts sur milieu physique.....	95
III.1.3.3 Impacts sur milieu socio-économique :.....	97
III.1.3.4 Déversement accidentel d'hydrocarbures	99
III.1.4. Évaluation des impacts environnementaux	99
III.1.4.1 Méthodologie d'Évaluation des impacts	99
III.1.4.2 Résultats de l'évaluation des impacts environnementaux.....	101
III.1.5 Les Mesures d'atténuation	107
III.1.5.1 Mesures d'atténuation environnementale intégrées aux opérations du projet	107
III.1.5.2 Mesures d'Atténuation du Bruit Sous-Marin.....	107
III.1.5.3 Mesures d'atténuation du bruit des hélicoptères sur la faune marine	108
III.1.5.4 Mesures d'atténuation et de gestion des émissions atmosphériques	108
III.1.5.5 Mesures d'Atténuation pour l'Eclairage Artificiel	109
III.1.5.6 Mesures d'Atténuation pour la Pollution Marine par les Rejets Courants.....	109
III.1.5.7 Mesures d'atténuation pour la pollution marine par les rejets accidentels	110
III.1.5.8 Mesures d'atténuation pour les impacts économiques.....	111
III.1.5.9 Mesures d'atténuation des impacts potentiels des déversements ou fuites accidentelles	111
III.2. Analyse des impacts environnementaux dans le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)	112
III.2.1. Méthodologie d'analyse des impacts environnementaux selon l'ACV	112
III.2.2. Inventaire des flux entrants et sortants du forage du puits.....	114
III.2.3. Scores d'impact des pertes de circulation du puits	117
III.2.3.1. Scores d'Ecotoxicité du sous-sol marin.....	117
III.2.3.2. Scores de Toxicité humaine :.....	118
III.2.3.3. Scores d'Ecotoxicité des eaux marines :.....	120
III.2.3.4. Scores d'Ecotoxicité des sédiments marins :.....	122

III.2.3.5. Conclusion générale sur les contributions écotoxicologiques des pertes de fluide de forage	123
III.2.4. Scores d'impacts environnementaux des scénarios de gestion des boues de forage : .	124
III.2.4.1. Scores d'impacts environnementaux des rejets de forage en mer :	124
III.2.4.2. Scores d'impacts environnementaux de l'enfouissement terrestre des rejets de forage.....	126
III.2.4.3. Scores d'impacts environnementaux de la solidification-stabilisation des rejets de forage.....	127
III.2.4.4. Scores d'impacts environnementaux de la désorption thermique des rejets de forage.....	128
III.2.5. Analyse comparative des scénarios de quatre puits pétroliers offshore	129
CONCLUSION	132
Références bibliographiques	134
ANNEXES	140

Liste Des Figures

Figure 1: Evolution du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement	20
Figure 2: Migrations primaire et secondaire du pétrole conduisant à la formation d'un gisement	21
Figure 3: Réserves et productions annuelles offshore en pétrole et gaz en Gbep, de 1950-2010 .	22
Figure 4: Nombre de forages terrestres et offshore de 2012-2020	22
Figure 5: Pourcentage de forages offshore par profondeur	23
Figure 6: Évolution depuis 1940 de la profondeur d'eau des forages d'exploration et de développement	24
Figure 7: Nombre de plateformes en mer dans le monde 2018	25
Figure 8: Le domaine offshore algérien.	27
Figure 9: plan de base sismique et forage en Algérie.....	28
Figure 10: Présence d'événements tectoniques infra-salifères.	29
Figure 11: Evènements tectoniques infra-salifères complexes	29
Figure 12: Bathymétrie et morphologie du fond marin dans l'offshore algérien.....	30
Figure 13: Carte structurale du socle acoustique	31
Figure 14: Carte des prospects pour les objectifs pré-messinien	32
Figure 15: Levés géophysiques offshore	39
Figure 16: Structure générale d'une plateforme pétrolière offshore	41
Figure 17: Type d'appareil et de structure	41
Figure 18: schema de l'architecture dun puits	43
Figure 19: Répartition des accidents enregistrés dans la base WOAD en fonction des types d'opération	45
Figure 20: Pourcentage d'occurrence des différents types d'événements en chaîne dans les accidents offshore enregistrés dans la base WOAD	46
Figure 21: Source de substances libérées au cours de la production pétrolière.	48
Figure 22: Schéma illustrant le devenir des hydrocarbures en milieu marin	50
Figure 23: Circuit de la boue dans le forage	51
Figure 24: Représentation géographique de la baie de Skikda et le golfe d'Annaba	53
Figure 25: La localisation cartographique du puits SKD-1 par rapport à la côte algérienne.....	54
Figure 26: Stratigraphie et Systèmes pétroliers du Bassin offshore algérien	57
Figure 27: Carte bathymétrique du périmètre de prospection offshore entre Skikda et Annaba (Zone Est – OAZE) (incluant les zones de sismique 2D, sismique 3D et les prospects identifiés)	59
Figure 28: La circulation en Méditerranée des : (A) Eaux de surface, (B) Eaux intermédiaires et (C) Eaux profondes. Les traits noirs représentent les isobathes de 1000 m et 2000 m	60
Figure 29: Roses des vents saisonnière et annuelle au large de la baie de Skikda (1992-2022) ...	62
Figure 30: Roses des houles saisonnières au large de la baie de Skikda (1992-2022)	64
Figure 31: Organigramme montrant les contraintes et la fenêtre idéale pour effectuer un forage dans la région de Skikda-Annaba (Organigramme réalisé à titre illustratif sur la base d'une analyse personnelle des contraintes identifiées dans la zone d'étude.).....	66
Figure 32: Carte de la sismicité du nord de l'Algérie.....	67

Figure 33: Observations de mammifères marins dans la zone d'étude dans la période (1990-2013).....	71
Figure 34: Observations des tortues Marines caouannes dans la zone d'etude entre 2003-2018.	72
Figure 35: Le complexe de Guerbes-Sanhadja	76
Figure 36: La Situation géographique du lac Fetzara	77
Figure 37: Profils de température et salinité moyens dans la zone d'étude	78
Figure 38: Cycle annuel des températures et salinités entre 0 et 150 m dans la zone d'études ..	79
Figure 39: Cycle annuel d'oxygène entre 0 et 2000m (à gauche) et profils moyens d'oxygène dissous en Février et Août (à droite)	79
Figure 40: Navire de forage ultra-profond Saipem 12000	81
Figure 41: Scores d'Ecotoxicité du sous-sol marin liés au forage des phases du puits pétrolier offshore.....	117
Figure 42: Scores de Toxicité humaine liés au forage des phases du puits pétrolier offshore	118
Figure 43: Scores d'Ecotoxicité des eaux marines liés au forage des phases du puits pétrolier offshore	120
Figure 44: Scores d'Ecotoxicité des sédiments marins liés au forage des phases du puits	122
Figure 45: Scores d'impacts environnementaux des rejets de forage en mer.....	124
Figure 46: Scores d'impacts environnementaux de l'enfouissement terrestre des rejets de forage	126
Figure 47: Scores d'impacts environnementaux de la solidification-stabilisation des rejets de forage.....	127
Figure 48: Scores d'impacts environnementaux de la désorption thermique des rejets de forage	128
Figure 49: Analyse comparative des scénarios de quatre puits pétroliers offshore.....	130

Liste Des Tableaux

Tableau 1: Conventions Environnementales Internationales en vigueur en Algérie	33
Tableau 2: Exigences réglementaires pour le projet d'exploration	36
Tableau 3: La Législation Algérienne pour la Protection de l'Environnement liée aux Activités d'exploration en offshore	37
Tableau 4: Types de plateformes de forage offshore.....	42
Tableau 5:Familles chimiques et fonctions des composants des fluides de forage.....	44
Tableau 6:Listes de l'Annexe II des espèces identifiées dans ou à proximité de la zone d'étude .	73
Tableau 7: Liste des espèces dont l'exploitation est réglementée par le décret n ° 06-405.....	75
Tableau 8: Composantes des boues à base d'huile et des boues à base d'eau	83
Tableau 9: Propriétés des boues de forage dans chaque section	85
Tableau 10: Matrice d'identification des impacts	94
Tableau 11: Critères d'évaluation qualitative d'impact	100
Tableau 12: Scores de l'impact	101
Tableau 13: Matrice d'évaluations de impactes	102
Tableau 14: Flux entrants et sortants du forage du puits.....	114
Tableau 15: Flux entrants et sortants des scénarios de gestion des rejets de forage	115

Liste des Abréviation :

ACV : Analyse du cycle de vie

DALY: Disability-Adjusted Life Year

PDF.m2. year: Potentially Disappeared Fraction of species

EIE : études d'impact environnemental

ESD: Engineering Study Document

JHA: **J**ob Hazard Analysis

HSE : Hygiène, Sécurité, Environnement

PMD : Plan de management de déchets

PMS :Plan de Maintenance Planifiée

MARPOL :Marine Pollution (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships).

ACCOBAMS : Agreement on the Conservation of Cetaceans of the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area(Accord sur la conservation des cétacés de la mer Noire, de la Méditerranée et de la zone Atlantique adjacente)

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

ICCAT: International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas

OSPAR : La Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est

COLREGS : International Regulations for Preventing Collisions at Sea

CRAAG :Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique

OSPAR : La Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est.

OBIS-SEAMAP :Ocean Biogeographic Information System - Spatial Ecological Analysis of Megavertebrate Populations.

DHI :Direct Hydrocarbon Indicators

ARH :Autorité de Régulation des Hydrocarbures

ANRH :Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

BGP :Bureau of Geophysical Prospecting

FPSO :Floating Production Storage and Offloading

SOPEP :Shipboard Oil Pollution Emergency Plan

DSDP :Deep Sea Drilling Program

BOP : bloc d'obturation de puits

ROV : Remotely Operated Vehicle

MMO: Marine Mammal Observer

PAM: Passive Acoustic Monitoring

HPHT: haute pression et haute température

FIT : Formation Integrity Test

Hi-vis :viscosité élevée

WBM :Water-Based Mud

OBM : Oil-Based Mud

ALAP :As Low As Possible

ALAS :As Low As Safely

AW :Atlantic Water

LIW :Levantine Intermediate Water

MAW : Modified Atlantic Water (eaux atlantiques modifiées)

WMDW : West Mediterranean Deep Water (eaux profondes ouest-méditerranéenne)

EMDW: East Mediterranean Deep Water (eau profonde est-méditerranéenne)

EWT : Extended Well Test

HEC :hydroxyéthylcellulose

KCl :chlorure de potassium

NO_x :oxydes d'azote

SO_x :oxydes de soufre

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La mer Méditerranée, berceau de civilisations millénaires, est aujourd'hui confrontée à des enjeux de développement industriel, énergétique et environnemental d'une ampleur inédite. Dans ce contexte, l'exploitation des ressources en hydrocarbures en zone offshore représente à la fois une opportunité stratégique pour les pays riverains et une source de pressions multiples sur les écosystèmes marins. L'Algérie, dotée d'un vaste domaine marin s'étendant sur plus de 2 148 km de littoral selon une récente réévaluation officielle, s'inscrit progressivement dans cette dynamique par le biais de campagnes de prospection et de forage menées notamment dans la zone côtière de Skikda à Annaba.

L'intérêt croissant pour l'offshore algérien repose sur des données géophysiques prometteuses, obtenues à la suite de plusieurs décennies de campagnes sismiques en 2D et 3D, et sur l'identification de structures géologiques complexes mais potentiellement riches en hydrocarbures. La zone de Skikda–Annaba en particulier présente des formations évaporitiques messéniennes, un plateau continental étroit et un bassin profond, réunissant les caractéristiques typiques des environnements offshore à fort potentiel énergétique. Parmi les programmes scientifiques récents ayant contribué à cette connaissance figure le projet SPIRAL (Sismique Profonde et Investigations Régionales en Algérie), qui vise à étudier la structure profonde de la marge nord-algérienne et du bassin algérien à travers des méthodes sismiques de grande pénétration. Ce programme s'inscrit dans la continuité des campagnes MARADJA 1 et 2 et PRISME, et associe plusieurs institutions telles que le CRAAG, l'IUEM, l'Ifremer et la société Sonatrach. Toutefois, cette richesse s'accompagne de défis majeurs, notamment en matière d'accessibilité, de conditions de forage extrêmes, et surtout de gestion des impacts environnementaux associés aux activités pétrolières.

Le forage en mer, bien qu'essentiel à la production énergétique, engendre inévitablement des rejets de substances chimiques, des perturbations physiques du milieu et des risques accidentels. Les boues de forage, les déblais, les émissions atmosphériques et les nuisances sonores constituent autant de sources de pressions susceptibles d'altérer la qualité des eaux, la biodiversité marine et les fonctions écologiques des habitats côtiers et benthiques. Dans une zone aussi sensible que le littoral algérien, où se mêlent écosystèmes riches, activités de pêche artisanale et pressions anthropiques multiples, la compréhension et la maîtrise de ces impacts revêtent un caractère stratégique.

Conformément aux exigences nationales et aux engagements internationaux de l'Algérie (Convention de Barcelone, ratifiée en 1984 ; MARPOL, ratifiée en 2005 ; ACCOBAMS, ratifiée en 2004), tout projet d'exploration offshore doit faire l'objet d'une étude d'impact environnemental (EIE) rigoureuse. Cette EIE vise non seulement à identifier les risques, mais également à proposer des mesures d'atténuation appropriées, afin de concilier développement énergétique et protection des ressources marines.

L'objectif principal de ce travail est de réaliser une étude d'impact environnemental détaillée d'un puits de forage d'exploration offshore dans la zone Skikda–Annaba, en intégrant une analyse approfondie des rejets et des impacts associés, et en évaluant différentes options de gestion des boues de forage à travers une approche d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'objectif est d'identifier les pratiques de gestion permettant de minimiser les impacts environnementaux et de formuler des recommandations pour une exploration offshore plus durable.

INTRODUCTION

Le présent mémoire s'inscrit dans cette logique. Il propose une analyse approfondie des impacts environnementaux potentiels liés au forage exploratoire, à partir d'une approche pluridisciplinaire combinant géologie, océanographie, réglementation, évaluation quantitative des impacts, modélisation des scénarios de gestion des rejets et analyse comparative de différents traitements.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le Chapitre I constitue une synthèse bibliographique détaillée sur le forage pétrolier et gazier en mer. Il décrit le processus de formation des gisements d'hydrocarbures, l'évolution du forage offshore à l'échelle mondiale et méditerranéenne, les spécificités de l'offshore algérien, ainsi que le cadre réglementaire international et national encadrant ces activités. Ce chapitre aborde également les risques accidentels et les impacts environnementaux connus du forage offshore.

Le Chapitre II présente les matériaux et méthodes utilisés. Il comprend une description complète de la zone d'étude (géologie, océanographie, climat, biodiversité), les caractéristiques techniques du puits étudié, la composition des fluides de forage, ainsi que la méthodologie d'évaluation des impacts, incluant les inventaires de flux, les paramètres physico-chimiques et les scénarios de gestion des rejets.

Le Chapitre III est consacré à l'évaluation des impacts environnementaux. Après une identification et une caractérisation des impacts potentiels, ce chapitre présente les résultats de l'évaluation qualitative et quantitative des impacts, ainsi qu'une analyse comparative basée sur l'ACV. Différents scénarios de gestion des boues de forage y sont comparés (rejet en mer, enfouissement terrestre, stabilisation-solidification, désorption thermique), en vue d'identifier les solutions les plus respectueuses de l'environnement.

Les résultats montrent clairement que la nature des fluides de forage utilisés, les modalités de gestion des déblais et le scénario de traitement choisi influencent fortement le niveau d'impact environnemental. Le scénario de rejet direct en mer, bien qu'encore pratiqué dans certaines régions, se révèle être le plus dommageable pour les compartiments marins. À l'inverse, les techniques de traitement comme la désorption thermique ou la stabilisation–solidification permettent de réduire considérablement les émissions de polluants, en transférant éventuellement une part des impacts vers le compartiment terrestre.

Par ailleurs, une analyse comparative de différents puits et configurations a permis de mettre en évidence les substances les plus problématiques — notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), le baryum, l'aluminium et certains métaux lourds — et de proposer des orientations en matière de gestion intégrée et de surveillance environnementale.

Ce travail dépasse le cadre d'une simple évaluation des impacts. Il s'inscrit dans une démarche globale visant à soutenir la mise en œuvre d'une exploration offshore respectueuse des principes de développement durable, en intégrant les enjeux environnementaux, les cadres réglementaires, les considérations techniques et les dimensions socio-économiques propres au contexte national. À travers cette étude, l'objectif est également de contribuer à une meilleure compréhension des risques environnementaux associés aux activités pétrolières en mer, et de promouvoir une culture renforcée de prévention, d'innovation et de responsabilité environnementale au sein du secteur des hydrocarbures.

**CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE
FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER**

I.1 Processus de formation des gisements d'hydrocarbures en mer

I.1.1 Cycle de la matière organique dans l'environnement :

La formation des hydrocarbures, qu'il s'agisse du pétrole ou du gaz naturel, repose sur l'accumulation et la transformation de matière organique dans des conditions particulières de pression et de température. Ce processus comprend plusieurs étapes, allant de l'accumulation initiale de matière organique jusqu'à la migration et l'emprisonnement des hydrocarbures dans des réservoirs exploitables.

Tout commence avec la matière organique provenant d'organismes marins et terrestres (plancton, algues, débris végétaux). Cependant, seule une infime fraction de cette biomasse (environ 0,1 %) échappe à la dégradation naturelle et se transforme, au fil du temps, en kérogène, le principal précurseur des hydrocarbures.

Lorsqu'un organisme meurt, sa matière organique est en grande partie recyclée par deux mécanismes biogéochimiques dominants :

- **L'assimilation par d'autres organismes vivants :** La matière organique sert de nourriture aux bactéries et aux animaux, participant ainsi aux chaînes alimentaires.
- **L'oxydation et la minéralisation :** En présence d'oxygène (conditions aérobies), les atomes de carbone, d'hydrogène, d'azote, de soufre et de phosphore de la matière organique se combinent avec l'oxygène du milieu pour former des molécules simples comme l'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), les nitrates, les sulfates et les phosphates. Ces molécules sont ensuite intégrées dans les grands cycles biogéochimiques de la biosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère, assurant ainsi l'équilibre des échanges naturels entre l'air, la mer, le sol et les plantes.

I.1.2 Accumulation et formation des sédiments riches en matière organique :

Une petite fraction de la matière organique échappe à ces cycles naturels et s'accumule dans des environnements aquatiques à faible teneur en oxygène, comme les fonds marins, les lacs profonds et les lagunes.

Lors de ce processus :

- La matière organique est transportée par les cours d'eau et se mélange à des particules minérales fines (argile, sable).
- Le plancton marin mort s'ajoute à ces sédiments, enrichissant le mélange en matière organique.
- Sous l'action des bactéries anaérobies, cette matière se transforme progressivement en boues noires riches en composés organiques, qui s'accumulent et se compactent au fil du temps.

Lorsque ces boues atteignent une concentration minimale de 1 à 2 % de matière organique, elles peuvent évoluer en roche mère, qui constituera plus tard une source potentielle d'hydrocarbures.

I.1.3 Enfouissement et genèse du kérogène :

Avec le temps, les sédiments s'accumulent en couches successives, exerçant une pression croissante sur les dépôts sous-jacents. Ce processus, appelé subsidence, entraîne un enfoncement lent de la roche mère, formant un bassin sédimentaire.

Sous l'effet de l'augmentation progressive de la pression (environ 25 bars tous les 100 mètres) et de la température, la matière organique enfermée dans la roche mère subit une transformation chimique. À des températures comprises entre 50 et 150°C, elle évolue en kérogène, une substance intermédiaire riche en carbone et en hydrogène, qui constitue la base de la formation du pétrole et du gaz.

I.1.4 Transformation du kérogène en hydrocarbures

Le kérogène évolue en hydrocarbures sous l'effet de la température et de la pression croissantes au cours de son enfouissement. Cette transformation se déroule en trois étapes principales :

- **Diagenèse (moins de 50°C) :**

La diagenèse est la première phase du processus de transformation de la matière organique en hydrocarbures. Elle se déroule à des températures inférieures à 50°C et à des profondeurs relativement faibles. À ce stade, la matière organique accumulée dans les sédiments subit une déshydratation progressive sous l'effet de la pression croissante exercée par les couches supérieures. Cette compression entraîne la transformation de la matière organique en kérogène, un précurseur des hydrocarbures. Toutefois, aucune production significative de pétrole ou de gaz n'a encore lieu à ce stade.

- **Catagenèse (50 à 150°C) :**

La catagenèse est la phase intermédiaire du processus de formation des hydrocarbures. Elle se produit entre 50 et 150°C, généralement à des profondeurs comprises entre 1 500 et 3 800 mètres. Sous l'effet de la pression et de la température croissante, le kérogène subit une transformation chimique appelée pyrolyse ou craquage thermique. Ce phénomène entraîne la libération des premiers hydrocarbures sous forme liquide et gazeuse. Cette étape correspond à la "fenêtre à huile", qui constitue la zone optimale pour la formation du pétrole brut.

- **Métagenèse (au-delà de 3 800 mètres) :**

La métagenèse est la dernière phase du processus de maturation des hydrocarbures. Elle se déroule à des profondeurs supérieures à 3 800 mètres, où la température dépasse les 120°C. Sous ces conditions extrêmes, les hydrocarbures liquides continuent à évoluer et se transforment en gaz naturel, principalement du méthane (CH₄). Cette zone est connue sous le nom de "fenêtre à gaz", où le gaz naturel devient la forme dominante des hydrocarbures.

Si l'enfouissement de la roche mère est insuffisant, la pyrolyse ne se complète pas et le kérogène reste sous forme de schiste bitumineux, une ressource fossile intermédiaire difficile à exploiter.

Cette longue maturation du kérogène le long de la profondeur d'enfouissement aboutit donc à différents types d'hydrocarbures selon trois étapes successives qui sont la diagenèse, la catagenèse et la métagenèse (Fig.1)

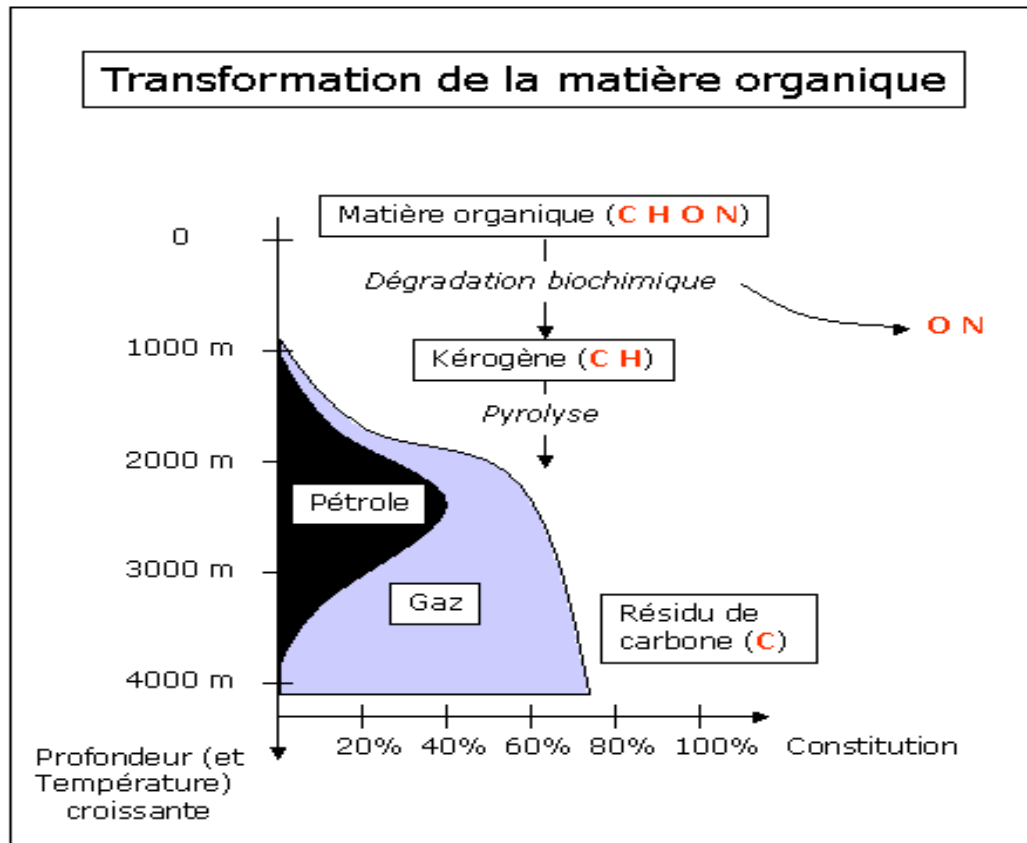


Figure 1: Evolution du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement (Site Comité MEAC)

I.1.5 Migration et piégeage des hydrocarbures

Après leur formation au sein d'une roche-mère compacte, les hydrocarbures peuvent entamer une lente remontée appelée migration primaire. Ce processus permet leur déplacement hors de la roche-mère, vers une roche-réservoir, où ils peuvent s'accumuler et constituer un gisement, à condition d'être retenus par une roche imperméable agissant comme barrière.

Lors de la migration secondaire, le pétrole expulsé, accompagné d'eau et de gaz dissous, tend à remonter vers la surface terrestre. Cette ascension se fait très lentement à travers les couches sédimentaires perméables adjacentes à la roche-mère. Une fois parvenu dans les couches superficielles du sol, il est soumis à l'action de bactéries qui dégradent les hydrocarbures, entraînant leur transformation en produits dits « lourds » ou « extra-lourds », ainsi qu'en sables bitumineux.

Lorsque la migration vers la surface est bloquée par une formation géologique imperméable, telle qu'une couche de sel, les hydrocarbures s'accumulent dans une roche-réservoir située en dessous de la roche-couverture. Dans ce type de réservoir poreux, les fluides se répartissent selon leur densité : le gaz occupe la partie supérieure, suivi du pétrole brut, puis de l'eau en partie inférieure (figure 2).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER

La fraction du pétrole brut la plus aisément exploitable est celle accumulée dans les roches-réservoirs. En revanche, une proportion significative des hydrocarbures, estimée entre 10 et 40 %, reste piégée de manière disséminée dans la roche-mère. Ce pétrole, qualifié « huile de schiste » ou de « pétrole de schiste », est plus difficile à extraire et nécessite des techniques d'exploitation spécifiques, telles que la fracturation hydraulique.

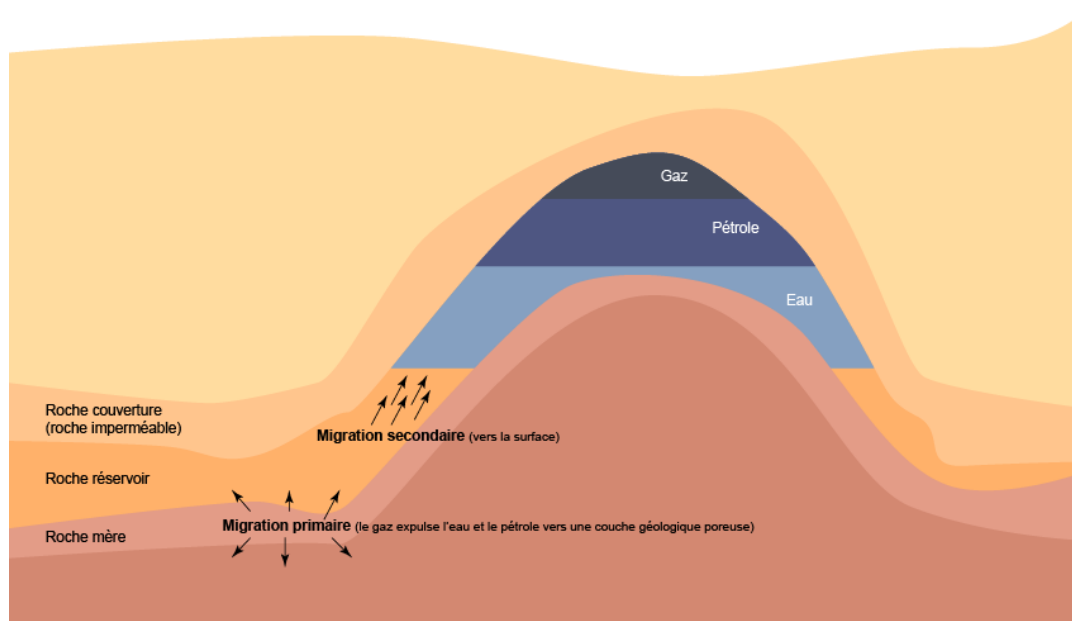


Figure 2: Migrations primaire et secondaire du pétrole conduisant à la formation d'un gisement (site connaissance des énergies)

I.2 L'activité mondiale du forage pétrolier et gazier offshore

1.2.1 Evolution globale du forage pétrolier et gazier offshore

L'offshore en eaux peu profondes a été pratiqué dès la fin du XIXe siècle, notamment au large des côtes californiennes. Les premières plateformes en bois ont été construites en 1887 à partir d'une jetée sur la côte californienne, dans la région de Summerland, près de Santa Barbara. La première plateforme offshore véritablement indépendante, nommée « Ferry Lake No.1 », a été installée en 1911 par la J. M. Guffey Petroleum Company (aujourd'hui Chevron) sur le lac Caddo en Louisiane. Cette installation, perforant jusqu'à 666 mètres de profondeur, produisait environ 450 barils de pétrole par jour (IFM, 2012).

L'essor de l'exploitation des hydrocarbures offshore s'est intensifié à partir des années 1950, sous l'effet de la croissance de la demande énergétique. Le choc pétrolier de 1973 a ensuite accentué cette dynamique, poussant les pays occidentaux à réduire leur dépendance énergétique vis-à-vis du Moyen-Orient.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER

L'exploitation offshore mondiale a connu une progression marquante, représentant désormais 30 % de la production pétrolière et 27 % de la production gazière à l'échelle mondiale. L'extraction pétrolière en milieu marin a ainsi considérablement évolué, passant d'une part de 10 % de la production mondiale en 1960 à 30 % en 2008 (Figure 3). Tandis que l'évolution comparée du forage onshore et offshore au niveau mondial de 2012 à 2020 est illustrée par (la figure 4).

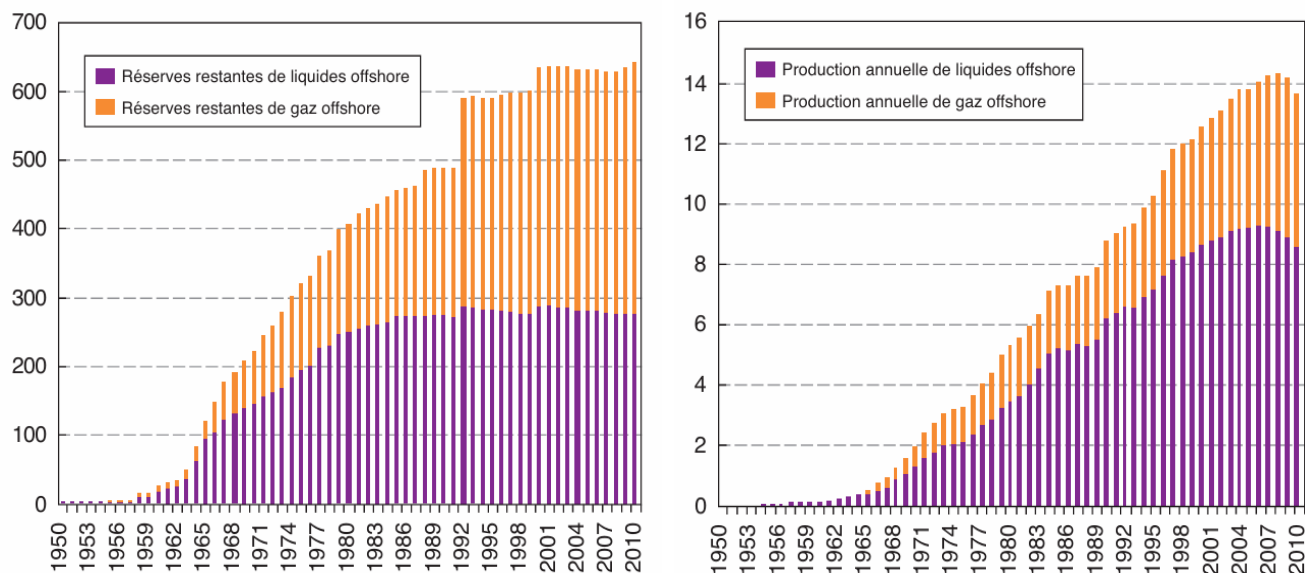


Figure 3: Réserves et productions annuelles offshore en pétrole et gaz en Gbep, de 1950-2010 (Serbutoviez, 2011)

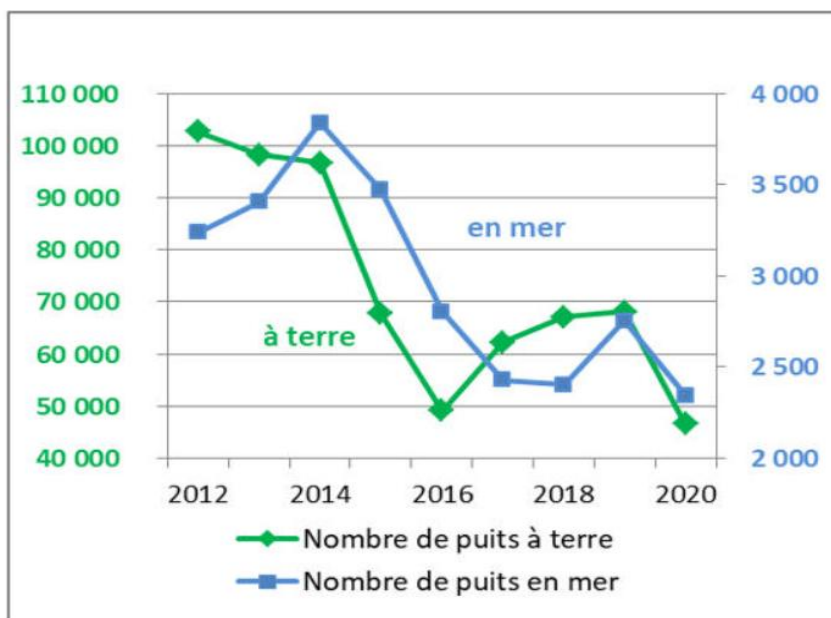


Figure 4: Nombre de forages terrestres et offshore de 2012-2020 (IFP Énergies nouvelles, 2021)

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

L'exploitation pétrolière offshore s'étend à plusieurs régions du globe, notamment :

- Mer du Nord, réparties en Grande Bretagne, Norvège, Pays-Bas, Danemark (plus de 450 plateformes) ;
- Golfe Persique ;
- Golfe de Guinée notamment au Gabon, en Angola et au Nigéria ;
- Mer de Chine dans les eaux territoriales du Vietnam, de la Malaisie et de la Chine ;
- Mer Méditerranée, principalement au large des côtes d'Afrique du Nord (au nombre de 16)
- Mer Caspienne ;
- Côtes du Brésil dont l'immense gisement de Tupi découvert en 2007 ;
- Golfe du Mexique, le long des côtes américaines et en baie de Campêche (Mexique) ;
- Côtes nord-ouest et sud-est de l'Australie ;
- Côtes de la Malaisie, Brunei et certaines parties de l'archipel indonésien ;
- Littoral atlantique canadien, au large de Terre-Neuve (Hibernia, White Rose).

Deux régions concentrent à elles seules plus de 20 % de la production mondiale de pétrole offshore : le Moyen-Orient (22 %), dont l'extraction s'effectue principalement à faible profondeur (moins de 200 mètres), et l'Afrique de l'Ouest (20 %), portée notamment par le Nigeria, l'Angola et, plus récemment, le Ghana. L'Europe, avec la mer du Nord et ses gisements matures, représente encore 17 % de la production offshore mondiale. Quant à l'Amérique du Sud, elle en assure 16 %, et cette part devrait fortement progresser dans les années à venir grâce aux investissements majeurs engagés pour développer les immenses champs sub-salifères brésiliens, comme Lula (Fig. 5).

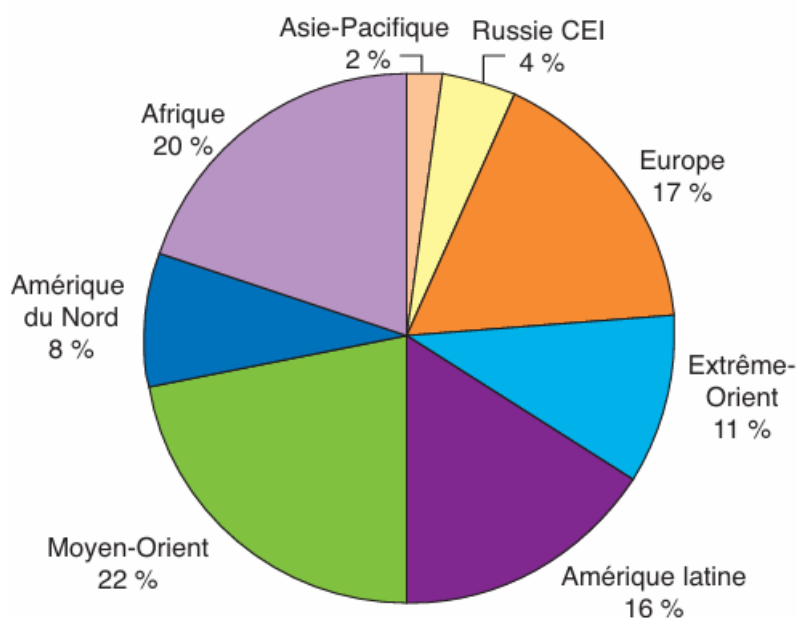


Figure 5: Pourcentage de forages offshore par profondeur (Serbutoviez, 2011)

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER

L'offshore constitue donc un enjeu stratégique majeur pour les compagnies pétrolières, mais soulève également de nombreux défis technologiques, notamment en raison des grandes profondeurs d'eau et des fortes pressions rencontrées. Les avancées technologiques menées par des acteurs majeurs ont joué un rôle déterminant dans le développement de l'exploration sous-marine. L'exploration en offshore profond a vu le jour à la fin des années 1970, tandis que l'ultra-profond a émergé en 2004 (CESE, 2012).

Ainsi, les avancées dans les techniques d'exploration, notamment en matière d'imagerie sous des formations souvent imperméables comme les couches de sel ou de basalte, ont permis de révéler de nouvelles réserves offshore. Cependant, ces découvertes sont généralement de moindre ampleur et situées à des profondeurs de plus en plus importantes. Leur mise en valeur constitue à la fois un défi technique et économique. D'un point de vue technologique, il est aujourd'hui possible d'atteindre des profondeurs de forage allant à plus de 3 000 mètres (Fig. 6).

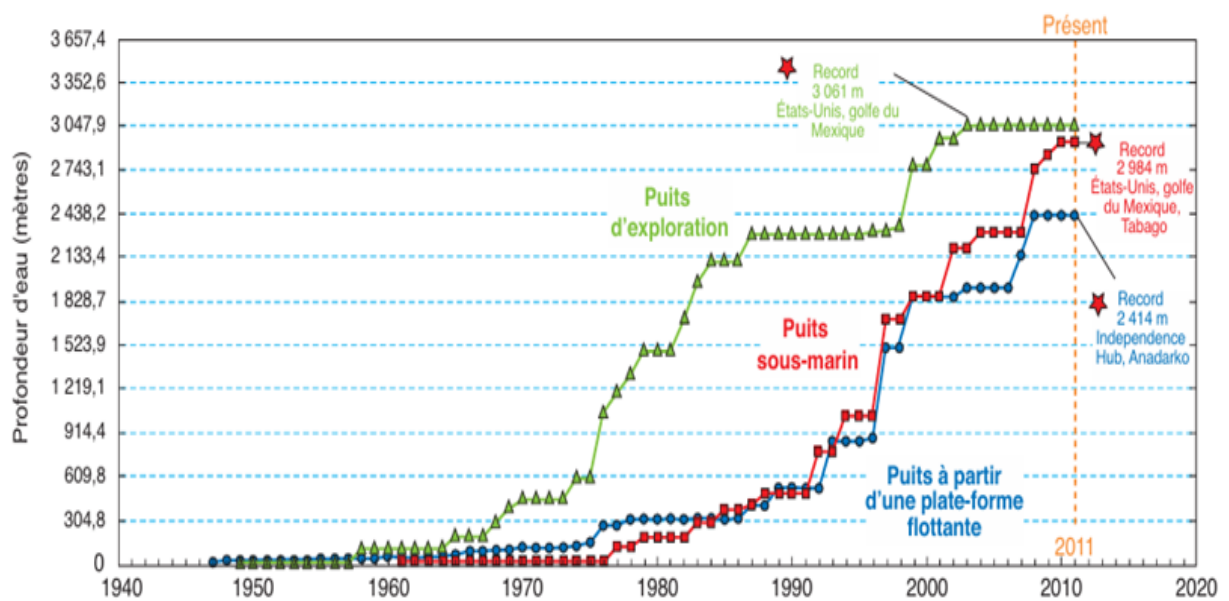


Figure 6: Évolution depuis 1940 de la profondeur d'eau des forages d'exploration et de développement (Serbutoviez, 2011)

En Europe, cette expansion s'est principalement concentrée sur le bassin sédimentaire de la mer du Nord. L'exploitation des ressources pétrolières et gazières de la mer du Nord est devenue un enjeu stratégique majeur, incitant le Royaume-Uni et la Norvège à développer des technologies de forage et de production adaptées aux conditions extrêmes de cette région. Grâce à des programmes de recherche menés par les compagnies pétrolières européennes en collaboration avec des ingénieries internationales, des avancées significatives ont été réalisées, notamment dans la conception de plateformes capables de résister aux tempêtes et aux vagues de grande hauteur. La sécurité des travailleurs et la maîtrise technique du forage en haute mer sont ainsi devenues des priorités. La (Figure 7) présente le nombre de plateformes en mer dans le monde en 2018 (Statista Research Department 2018).

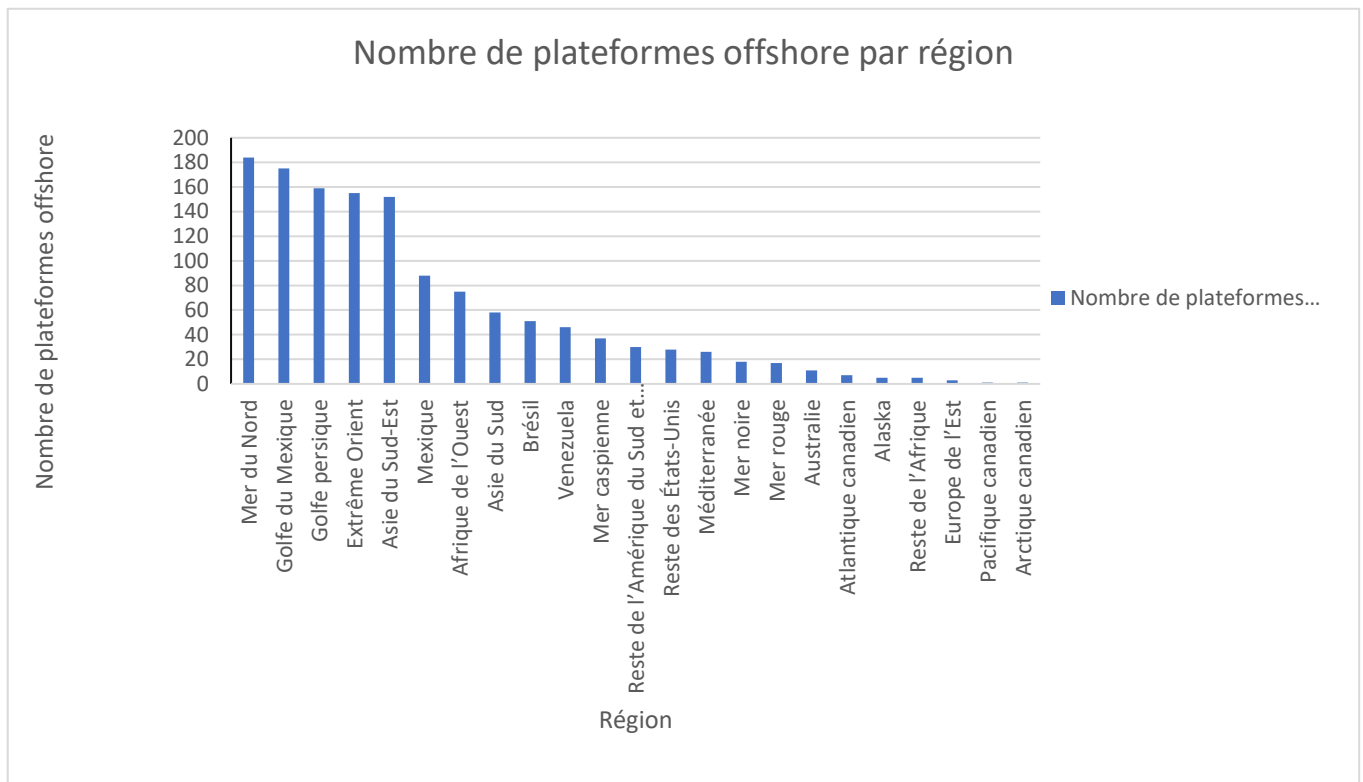


Figure 7: Nombre de plateformes en mer dans le monde 2018 (Statista, 2018)

I.2.2 Le forage offshore en Méditerranée

La mer Méditerranée compte environ 232 plateformes d'hydrocarbures, dont un tiers sont dédiées à l'exploitation pétrolière. Les activités d'extraction se concentrent principalement dans les parties orientale et occidentale du bassin méditerranéen (Court, 2011).

En Méditerranée orientale, d'importants gisements de gaz naturel ont été découverts en 2001 au sud de Chypre ainsi que dans les eaux territoriales palestiniennes et libanaises, avec des réserves estimées à 3 450 milliards de mètres cubes. Dans les eaux palestiniennes, l'exploitation de ses ressources, est effectuée par la société texane Noble Energy qui a entrepris des forages exploratoires. Les réserves dans ces champs gaziers sont respectivement estimées à 450 et 250 milliards de mètres cubes (IFM, 2012). Sur le plan environnemental, la situation est préoccupante, car plusieurs permis de forage chevauchent des aires marines protégées, dont la zone marine de Pelagos, située à une quarantaine de kilomètres de ces opérations. Des associations écologistes françaises et italiennes se mobilisent pour dénoncer les risques associés à ces exploitations, notamment en raison des limites technologiques actuelles du forage en grande profondeur et du fort niveau d'activité sismique dans cette région.

Au Liban, des études sismiques couvrant plus de 80 % de la zone économique exclusive (ZEE) suggèrent un potentiel intéressant, mais l'instabilité politique freine le développement du secteur. En Syrie, malgré un accord d'exploration signé avec la société russe Soyuz Nefte Gaz, le contexte de guerre rend l'exploitation des ressources quasiment impossible. La Turquie, quant à elle, a foré 13 puits entre 1966 et 2014 et intensifie aujourd'hui ses recherches en collectant des données sismiques, bien qu'aucun gisement exploitable n'ait encore été identifié (IFM, 2012).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

En Méditerranée occidentale, l'exploration se concentre principalement sur des zones de grande profondeur, notamment dans la baie de Lyon, où des forages entre 1 500 et 2 000 mètres ont été réalisés sur une superficie de 25 000 km², au sud de Marseille et Toulon. Les premières explorations ont été menées en 2001 par la société britannique TGS-Nopec, avant d'être reprises en 2006 par l'entreprise écossaise Melrose et prolongées jusqu'en 2010 (IFP, 2019).

Sur la rive sud de la Méditerranée, plusieurs pays d'Afrique du Nord ont intensifié leurs activités offshore, à l'exception du Maroc, où l'exploration pétrolière et gazière reste concentrée sur les régions d'Essaouira et du bassin de Gharb. En Égypte, la production de gaz naturel dans le delta du Nil a connu une croissance exponentielle, quadruplant entre 1995 et 2005. La découverte du gigantesque champ gazier de Zohr dans les grands fonds marins, mis en production en 2017, a renforcé la position du pays en tant qu'exportateur de gaz, notamment vers la Jordanie (IFP, 2019).

En Tunisie, plusieurs petits gisements offshore sont exploités dans le golfe de Gabès. Bien que la production de pétrole et de gaz y reste modeste, l'exploration demeure dynamique (IFP, 2019). En Libye, les réserves en mer, notamment dans le bassin de Syrte, sont jugées prometteuses, ce qui attire l'intérêt des compagnies pétrolières, malgré le climat d'instabilité qui règne dans le pays.

En Algérie, un vaste programme d'exploration sismique offshore a été lancé en 2011, couvrant la zone côtière entre Mostaganem et Annaba. D'après les récentes annonces de Sonatrach relayées par plusieurs médias nationaux (Sonatrach, 2017), deux campagnes de forage exploratoire sont prévues : l'une sur la côte est, entre Skikda et Annaba, après l'acquisition de données sismiques 2D et 3D au premier semestre 2019, et l'autre sur la côte ouest, entre Mostaganem et Oran. Les premières estimations basées sur l'analyse des données sismiques indiquent un volume de gaz naturel avoisinant les 30 000 milliards de mètres cubes, suggérant des réserves comparables à celles du champ géant Zohr en Égypte. Par ailleurs, le premier puits foré au large de la côte ouest pourrait contenir plusieurs milliards de mètres cubes de biogaz, ainsi que du pétrole, dont la production est évaluée à plusieurs millions de barils. Ces explorations sont menées par Sonatrach en partenariat avec les compagnies française Total et italienne ENI (Forum algéro-américain sur l'énergie).

1.2.3 Le programme algérien du forage gazier offshore

Le domaine offshore algérien s'étend sur la bordure sud de la Méditerranée occidentale, couvrant environ 1 200 kilomètres d'Est en Ouest pour une superficie totale d'environ 131 000 km² (figure 8) Il est délimité à l'Ouest par le bassin d'Alboran et au Nord par le bassin Liguro-Provençal. Sur le plan géologique, il est bordé au Nord par les chaînes bétiques, prolongées à l'Est par les structures baléares, et au Sud par les chaînes maghrébines.

La zone s'étend depuis un plateau continental peu développé jusqu'à un bassin profond, avec des profondeurs d'eau pouvant atteindre 2 800 mètres. L'exploration de cette région présente de nombreux défis, en raison d'une tectonique marquée et de structures géologiques complexes. On y retrouve également une couche de sel d'âge Messinien, caractérisée par des épaisseurs variables et des phénomènes de fluage importants.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER

Le potentiel pétrolier de ce bassin reste prometteur, notamment grâce à la présence de réservoirs gréseux et carbonatés. Certains indices géophysiques tels que les "flat spots", "bright spots" ou encore les cheminées de gaz renforcent cet intérêt. Les importantes découvertes de gaz biogénique dans les formations miocènes en Méditerranée orientale, notamment au large de l'Égypte et de Chypre, ravivent également l'intérêt pour l'offshore algérien. Toutefois, en raison du faible nombre de forages réalisés dans cette région et d'un système pétrolier encore non confirmé, il demeure aujourd'hui un domaine sous-exploré.

I.2.3.1 Historique des travaux de prospection et d'exploration

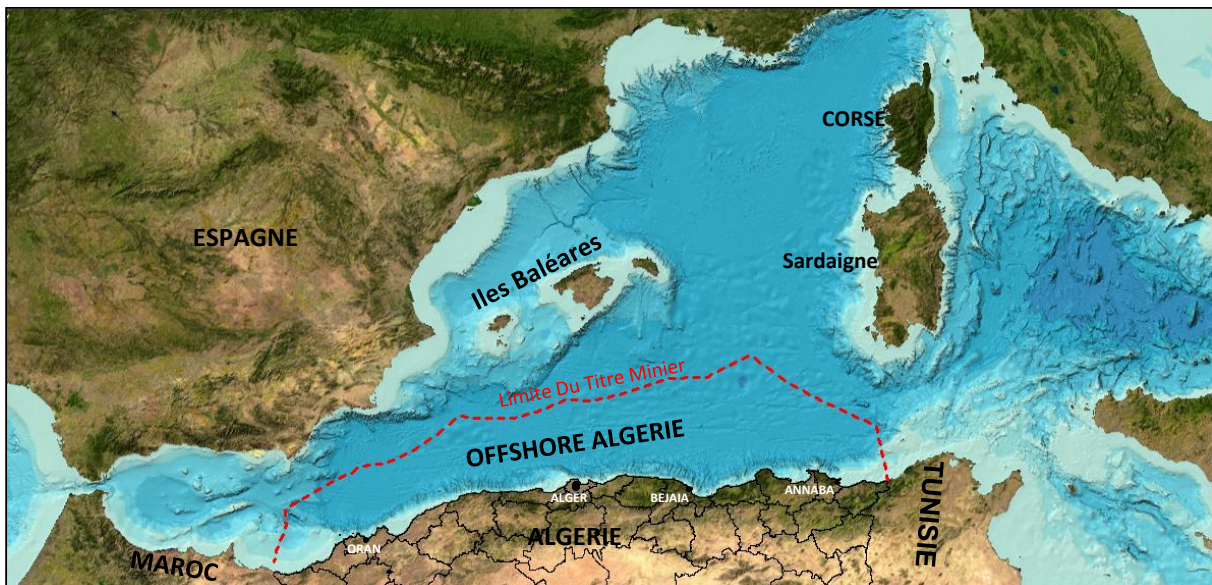


Figure 8: Le domaine offshore algérien (Document interne).

L'exploration pétrolière en offshore algérien a été marquée par plusieurs campagnes d'acquisition sismique réalisées à différentes périodes (figure 9). La première phase de prospection s'est déroulée entre 1968 et 1970, couvrant les baies d'Alger, Skikda, Béjaïa, Annaba et Arzew. Par la suite, en 1973, une campagne d'envergure a été menée, s'étendant sur l'ensemble des bassins profonds de l'offshore algérien, constituant ainsi l'un des projets d'exploration les plus vastes de cette époque.

L'année 1976 a vu le lancement d'une acquisition sismique de semi-détail dans la région du bassin d'Alboran Sud-Oriental, suivie en 1977 par une nouvelle acquisition de reconnaissance dans la partie orientale de l'offshore algérien, de la baie d'Alger jusqu'à la frontière tunisienne. Ces deux campagnes ont été conduites par la société Western, spécialisée dans les services géophysiques

Après une période d'interruption, l'exploration offshore a repris au début des années 2000, avec une acquisition de 9003 km de sismique 2D réalisée en 2002 par la société Western Geco. Cette étude a couvert l'ensemble de l'offshore algérien, de l'extrême Est à l'extrême Ouest. Cependant, la densité du maillage sismique étant insuffisante, une nouvelle campagne a été nécessaire en 2011. Celle-ci a été effectuée par la société chinoise BGP, avec l'acquisition de 5000 km supplémentaires de sismique 2D, répartis entre 3000 km entre Béjaïa et Annaba et 2000 km entre Mostaganem et Ténès. Ces deux séries d'acquisitions, menées respectivement par Western Geco et BGP, restent à ce jour parmi les meilleures en termes de qualité sismique réalisées en offshore algérien.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Suite à l'interprétation des données sismiques et l'élaboration de cartes structurales, plusieurs prospects et leads ont été identifiés. Afin de les confirmer et d'affiner leur caractérisation, la première campagne de sismique 3D en offshore algérien a été initiée en 2013, couvrant une superficie totale de 5022 km² dont 4077 km² au large de Béjaïa et 945 km² au large d'Oran.

L'exploration a ensuite progressé avec la réalisation d'un forage profond (HBB-1) sur le plateau marginal du bassin de Habibas, ainsi que deux forages carottés (ARZ-1 & ALG-1), situés respectivement sur le plateau continental du bassin algéro-provençal. Ces forages ont permis de mieux comprendre la géologie sous-marine et d'affiner l'évaluation du potentiel pétrolier et gazier de l'offshore algérien.

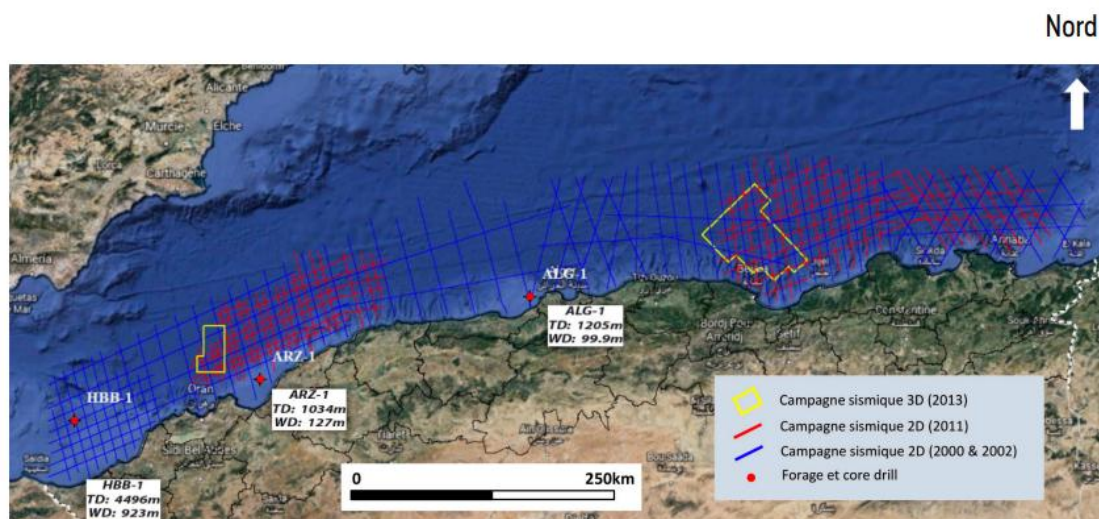


Figure 9: plan de base sismique et forage en Algérie (Document interne).

I.2.3.2 Enjeux de l'exploration de l'offshore algérien

L'exploration de l'offshore algérien profond est confrontée à plusieurs défis géologiques et techniques qui rendent les opérations particulièrement complexes.

- **Complexité des formations évaporitiques du Messinien**

Les formations évaporitiques du Messinien, constituées de dépôts de sel et d'anhydrite, présentent une épaisseur et une composition très variables selon les régions. Ces formations sont souvent associées à une tectonique complexe, caractérisée par des failles et des déformations importantes. Cela peut poser des difficultés en matière d'imagerie sismique et de stabilité des forages,

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

nécessitant l'utilisation de technologies avancées pour améliorer la précision des interprétations géologiques.

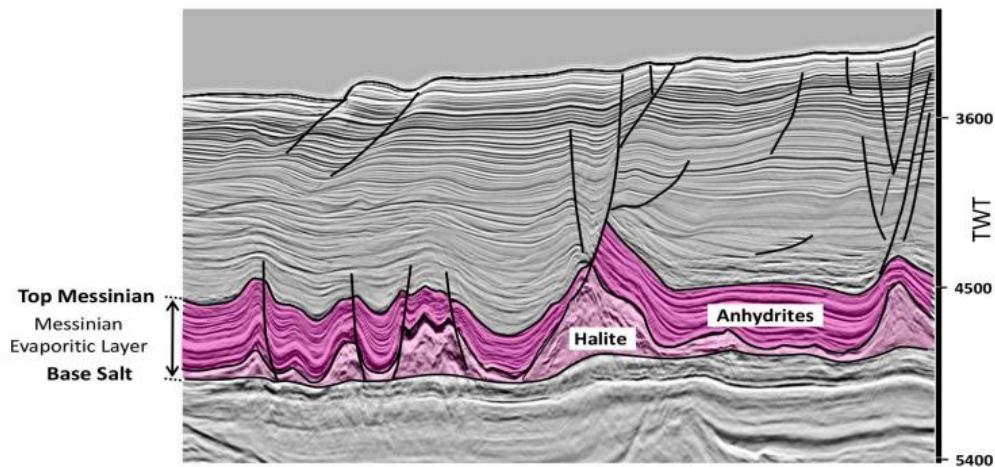


Figure 10: Présence d'événements tectoniques infra-salifères (Document interne).

Les formations situées sous les couches évaporitiques présentent des structures géologiques complexes, comprenant des blocs faillés, des plissements et des couches fortement inclinées (Khennaf et al., 2013). Ces déformations infra-salifères compliquent la localisation et l'évaluation des réservoirs d'hydrocarbures, rendant l'exploration plus incertaine et plus coûteuse (figure 11)

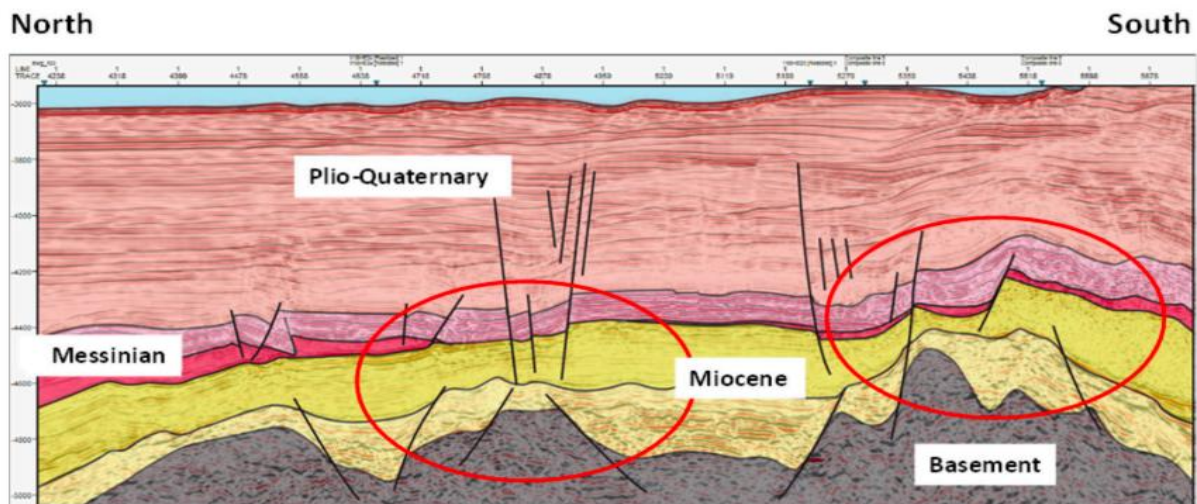


Figure 11: Evènements tectoniques infra-salifères complexes (Document interne).

- **Un plateau continental étroit et un bassin profond difficile d'accès**

Contrairement à d'autres régions offshore dans le monde, l'Algérie possède un plateau continental réduit, dont la largeur varie entre 15 et 35 km, avant de plonger abruptement vers des bassins profonds. Ces bassins peuvent atteindre des profondeurs d'eau de 2800 m, ce qui rend le forage plus coûteux et techniquement exigeant. De plus, la présence de canyons sous-marins perturbe la stabilité des infrastructures sous-marines et complique l'installation des pipelines et des plateformes de production (Figure 12).

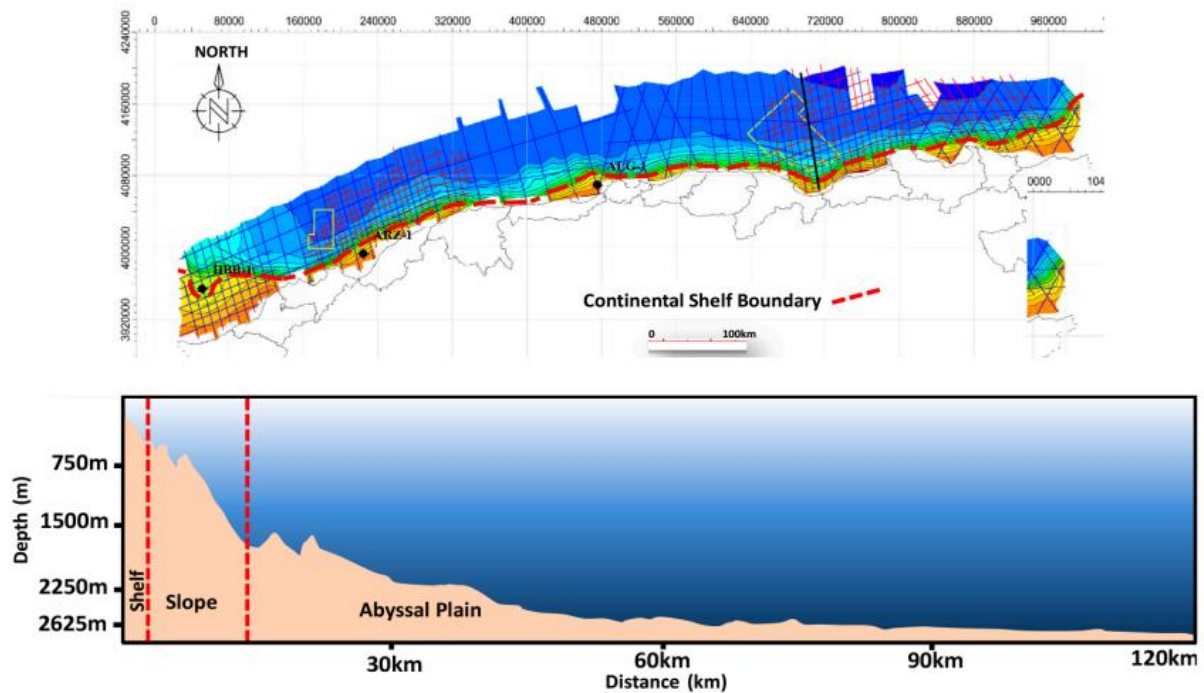


Figure 12: Bathymétrie et morphologie du fond marin dans l'offshore algérien (Document interne).

- **Contraintes techniques et les technologies nécessaires au forage offshore en Algérie :**

L'exploitation des gisements en offshore profond exige l'utilisation de plateformes spécialisées, telles que les FPSO (Floating Production Storage and Offloading), ainsi que des forages sous haute pression et haute température (HPHT). Ces technologies impliquent des coûts d'investissement élevés et nécessitent une expertise pointue.

I.2.3.3 Potentiel pétrolier de l'offshore algérien

L'analyse des données sismiques acquises entre 2000 et 2013 a permis de mieux comprendre le potentiel pétrolier des séries anté-Messiniennes dans l'offshore algérien. Ces interprétations ont mis en évidence des structures géologiques favorables à l'accumulation d'hydrocarbures, bien que la qualité des images sismiques varie de moyenne à bonne, avec une dégradation notable dans les zones où la tectonique salifère messinienne est particulièrement intense. La profondeur maximale du socle acoustique observée atteint 8500 m, incluant la tranche d'eau, au niveau du sous-bassin de Béjaïa-Bougaroune.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

L'analyse des cartes en isopaques des séries sédimentaires Oligo-Mio-Pliocène confirme l'existence des quatre sous-bassins (Béjaïa-Bougaroune, Alger, Mostaganem-Ténès, Habibas) (figure 13). Ces derniers présentent des conditions favorables pour la maturation des roches mères et l'accumulation d'hydrocarbures (Khennaf et al., 2005). Parmi eux, le bassin de Béjaïa-Bougaroune se distingue par une épaisseur sédimentaire exceptionnelle, atteignant plus de 6000 m. Cette importante colonne sédimentaire suggère des conditions thermiques adéquates pour la génération d'hydrocarbures, à condition que des systèmes de piégeage et de migration efficaces soient présents.

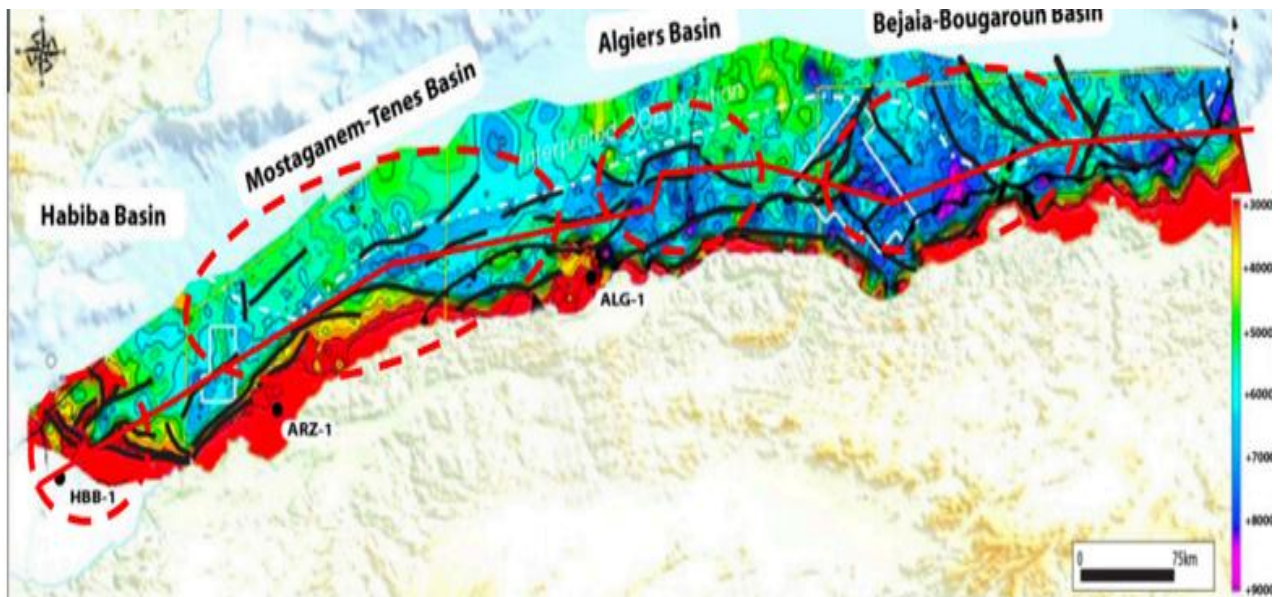


Figure 13: Carte structurale du socle acoustique (Document interne).

Les travaux de cartographie ont permis d'identifier un nombre significatif de prospects et leads pour les objectifs pré-Messiniens (Figure 14). Les zones les plus prometteuses sont situées dans les bassins profonds, où la bathymétrie dépasse 1500 m (Abderrahim et al., 2005). Ces structures sont essentielles pour le piégeage des hydrocarbures, conditionnant ainsi leur exploitation future.

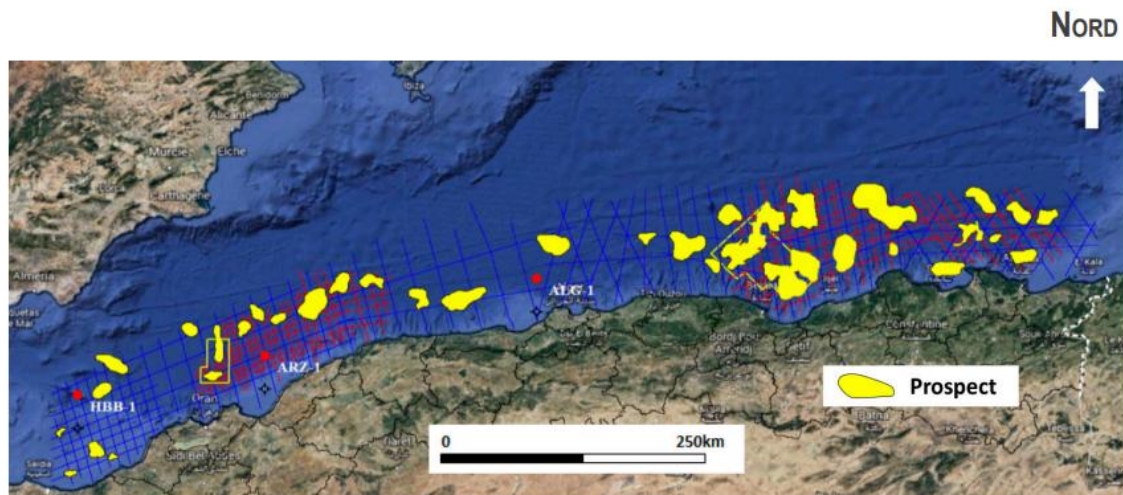


Figure 14: Carte des prospects pour les objectifs pré-messinien (Document interne).

D'un autre côté, l'existence d'un système pétrolier actif est soutenue par la présence d'indices directs d'hydrocarbures (DHI – Direct Hydrocarbon Indicators). Parmi ces indices, plusieurs cheminées de gaz ainsi que des anomalies sismiques caractéristiques telles que les flat spots et bright spots ont été identifiées. Ces anomalies, similaires à celles observées dans le bassin du Levant (offshore Chypre) où un potentiel pétrolier a été confirmé, renforcent l'intérêt pour l'exploration de l'offshore algérien (Khennaf et al., 2013)

I.3 Les conditions réglementaires du forage offshore

Le développement des activités pétrolières en mer implique le respect d'un ensemble de règles visant à limiter les impacts sur l'environnement marin. En Algérie, ce secteur est encadré par une combinaison de dispositifs juridiques nationaux et d'accords internationaux. Plusieurs institutions assurent le suivi réglementaire des opérations, depuis l'octroi des autorisations jusqu'au contrôle des normes environnementales appliquées sur le terrain.

Cette réglementation repose également sur des conventions internationales ratifiées par l'Algérie, qui renforcent les exigences en matière de sécurité, de prévention des pollutions et de gestion durable des ressources marines. Ces engagements internationaux s'intègrent dans une législation nationale structurée, couvrant l'ensemble des étapes du forage offshore, des études préalables aux obligations environnementales post-opérationnelles

I.3.1 Conventions et réglementations internationales sur le forage offshore

L'Algérie est signataire de plusieurs conventions internationales sur l'environnement, accords de coopération et obligations légales (Tableau 1)

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Tableau 1: Conventions Environnementales Internationales en vigueur en Algérie (document interne)

POLLUTION DE LA MER		
Conventions et protocoles internationaux	<i>Convention internationale pour la prévention de la pollution de la mer par les hydrocarbures</i>	1963
	<i>Convention internationale sur l'intervention en haute mer en cas d'accident entraînant ou pouvant entraîner pollution par les hydrocarbures</i>	1969
	<i>Convention Internationale sur la Responsabilité (Organisation maritime internationale ou OMI)</i>	1972
	<i>Protocole de 1973 sur la réponse en haute mer à la pollution par des substances autres que les hydrocarbures</i>	1973
	<i>Protocole de Barcelone : Protocole relatif aux aires spécialement protégées et la diversité biologique en Méditerranée. Protocole relatif à la coopération dans la prévention de la pollution par les navires, etc.</i>	1980
	<i>MARPOL PROT 1978 : Protocole de 1978 relatif à la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires, 1973</i>	1982
	<i>Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires, 1973</i>	1988
	<i>OPRC 90 : Convention internationale sur la préparation, l'intervention et la coopération de Londres le 30 Novembre 1990</i>	1990
	<i>Convention des Nations Unies du 10 Décembre 1982 sur le droit de la mer, Montego Bay.</i>	1994
	<i>Convention Internationale relative à la création d'un fond international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures. Bruxelles 1971</i>	2000
	<i>Convention internationale sur l'immatriculation des navires, adoptée à Genève le 12 mars 1999.</i>	2003
	<i>Coopération dans la prévention de la pollution par les navires et en cas de situation critique, la lutte contre la pollution de la mer Méditerranée, à La Valette (Malte) le 25 Janvier 2002</i>	2005
	<i>OPRC 90 : Convention internationale sur la préparation, l'intervention et la coopération de Londres le 30 Novembre 1990</i>	1990
	<i>Convention des Nations Unies du 10 Décembre 1982 sur le droit de la mer, Montego Bay.</i>	1994
	<i>Convention Internationale relative à la création d'un fond international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures. Bruxelles 1971</i>	2000
	<i>Convention internationale sur l'immatriculation des navires, adoptée à Genève le 12 mars 1999.</i>	2003
<i>Coopération dans la prévention de la pollution par les navires et en cas de situation critique, la lutte contre la pollution de la mer Méditerranée, à La Valette (Malte) le 25 janvier 2002</i>	2005	

BIODIVERSITE		
Conventions et	<i>Convention du 2 Février 1971 relative aux zones humides d'importance internationale comme habitat faunique, RAMSAR.</i>	1984
	<i>Convention sur la diversité biologique signée à Rio de Janeiro le 05 Juin 1992</i>	1995
	<i>Décret ratifiant la Convention sur la diversité biologique signée à Rio de Janeiro le 05 Juin 1992</i>	1995

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

<i>Ratification du Protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques à la Convention sur la diversité biologique</i>	2004
<i>L'Accord sur la conservation des oiseaux d'eau migrateurs d'Afrique-Eurasie, ou Accord sur les oiseaux d'Afrique-Eurasie (AEWA)</i>	2006
<i>ACCOBAMS, l'Accord sur la conservation des cétacés de la mer Noire, de la Méditerranée et la zone atlantique adjacente</i>	2007
<i>Convention sur la protection du patrimoine culturel subaquatique. Paris, le 2 novembre 2001.</i>	2015
PROTECTION DES RESSOURCES NATURELLES	
<i>La ratification de la Convention africaine sur les ressources naturelles et de protection de la nature</i>	1982
<i>La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (UNCLOS), appelée aussi le droit de la Convention sur la mer ou la loi du traité mer</i>	1996
SAUVEGARDE DU PATRIMOINE NATUREL	
<i>Déclaration de Tunis sur l'environnement : La sauvegarde du patrimoine naturel, la conservation de la nature et la diversité des espèces dans le contexte du développement durable</i>	1991
<i>Convention du patrimoine mondial 16 Novembre 1972 sur la protection du patrimoine naturel et culturel, Paris</i>	1975
CHANGEMENT CLIMATIQUE	
<i>La ratification de la Convention sur les changements climatiques adoptée par l'Assemblée générale des Nations Unies le 9 mai 1992</i>	1993
<i>La ratification du Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Kyoto, 11 Décembre 1997</i>	2004
<i>La ratification de l'Accord de Paris sur les Changements Climatiques, New York, 22 Avril 2016</i>	2016
PROTECTION DE LA COUCHE D'OZONE	
<i>Adhésion de l'Algérie à la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone, signée à Vienne le 22 Mars 1985</i>	1992
<i>Adhésion de l'Algérie au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, signé à Montréal le 16 Septembre 1987 et ses amendements</i>	1993

L'Algérie, en tant que pays riverain de la Méditerranée, s'implique activement dans plusieurs conventions internationales et initiatives régionales dédiées à la protection de l'environnement marin. Elle est notamment membre actif de l'ACCOBAMS (Accord sur la conservation des cétacés de la mer Noire, de la Méditerranée et de la zone Atlantique adjacente), et a accueilli la quatrième réunion biennale de cette organisation. Cette participation témoigne de son engagement en faveur de la préservation de la biodiversité marine et du renforcement de la coopération régionale.

L'Algérie co-préside également l'initiative WestMed, lancée par l'Union européenne, qui vise à promouvoir une économie bleue durable en Méditerranée occidentale. Cette région présente un grand potentiel dans des secteurs comme le transport maritime, le tourisme côtier ou encore la biodiversité marine. Toutefois, elle fait face à de multiples pressions : urbanisation rapide,

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

pollution, surexploitation des ressources halieutiques, érosion côtière, etc., le tout accentué par le changement climatique.

Dans le cadre de WestMed, dix pays de la région collaborent autour de trois axes prioritaires : renforcer la sécurité maritime, stimuler une croissance bleue durable et préserver les écosystèmes. Cette coopération s'aligne sur les objectifs de plusieurs autres programmes tels que BLUEMED (recherche et innovation en Méditerranée), PANORAMED (surveillance et tourisme maritime), ainsi que les travaux de planification maritime menés sous l'égide de la COI-UNESCO, auxquels l'Algérie participe également.

L'intégration de ces engagements internationaux dans la réglementation nationale renforce les exigences en matière de gestion durable des zones marines et constitue un cadre de référence essentiel pour toute activité offshore, notamment en matière d'évaluation d'impact environnemental.

I.3.2 La réglementation algérienne

En Algérie, plusieurs institutions interviennent dans l'encadrement réglementaire des projets offshore. À l'échelle locale, les walis de Skikda et d'Annaba, en tant que représentants de l'État, assurent la coordination administrative. Les Directions de la Wilaya – Hydraulique, Énergie, Santé, Aménagement du territoire, Agriculture et Urbanisme – sont sollicitées lors des études environnementales, conformément à la réglementation en vigueur

Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables

- Élaboration des lois et normes encadrant la protection de l'environnement marin et côtier.
- Supervision des études d'impact environnemental (EIE) liées aux projets offshore.
- Coordination entre les parties prenantes pour garantir la conformité environnementale.

Ministère de l'Industrie et des Mines

- Encadrement technique des projets industriels offshore à forte composante énergétique.
- Suivi de la conformité des installations aux normes de sécurité et d'innovation technologique.
- Appui au développement industriel dans le respect des exigences réglementaires.

Ministère de l'Énergie

- Définition de la politique énergétique nationale et attribution des permis d'exploration.
- Régulation des activités pétrolières, notamment en matière de sécurité et d'efficacité énergétique.
- Suivi du respect des cadres légaux dans les opérations en mer.

Autorité de Régulation des Hydrocarbures (ARH)

- Délivrance des autorisations techniques et validation des études EIE et ESD.
- Contrôle du respect des normes HSE dans toutes les étapes des projets offshore.
- Régulation des opérations d'exploitation, de transport et de distribution des hydrocarbures.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Ministère des Ressources Hydriques

- Gestion et protection des ressources en eau utilisées dans les activités offshore.
- Encadrement du traitement des rejets liquides industriels.
- Coordination des infrastructures hydrauliques nécessaires au bon déroulement des projets.

Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)

- Surveillance et évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau.
- Appui technique aux études environnementales via la mise à disposition de données hydrologiques.
- Prévention des risques de pollution ou de dégradation des ressources naturelles.

Ministère des Pêches et des Ressources Halieutiques

- Garantie de la compatibilité entre les activités pétrolières et la pêche artisanale/industrielle.
- Protection des écosystèmes halieutiques sensibles situés à proximité des zones d'exploitation.
- Suivi de l'impact des projets offshore sur les stocks et habitats marins.

Ministère des Finances

- Évaluation des aspects fiscaux, douaniers et budgétaires des projets offshore.
- Supervision des flux financiers liés aux investissements dans le secteur pétrolier.
- Définition des politiques incitatives et du cadre fiscal applicable aux opérateurs.

Dans le cadre de la réalisation d'un projet de forage d'exploration offshore, il est essentiel de prendre en compte les exigences légales et réglementaires nationales. Les tableaux ci-après présentent, d'une part, les dispositions réglementaires spécifiques encadrant les activités d'exploration des hydrocarbures (tableau 2), et d'autre part, les principaux textes législatifs en vigueur relatifs à la protection de l'environnement en Algérie (tableau 3).

Tableau 2: Exigences réglementaires pour le projet d'exploration (document interne)

	Texte législatif	Objet
Réglementation technique et environnementale	<i>Décret exécutif n° 94-43 du 30 janvier 1994</i>	<i>Règles de conservation des gisements d'hydrocarbures et de protection des aquifères associés</i>
Cadre juridique général des hydrocarbures	<i>Loi n° 05-07 du 28 avril 2005</i>	<i>Régime juridique des activités liées aux hydrocarbures : recherche, exploitation, transport, etc.</i>
	<i>Loi n° 13-01 du 20 février 2013</i>	<i>Coordination des études d'impact environnemental et respect des obligations en matière d'exploration</i>

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Souveraineté maritime	<i>Décret présidentiel n° 18-96 du 20 mars 2018</i>	<i>Institution d'une zone économique exclusive au large des côtes algériennes</i>
------------------------------	---	---

Tableau 3: La Législation Algérienne pour la Protection de l'Environnement liée aux Activités d'exploration en offshore (document interne)

	Texte législatif	Objet
Procédures administratives environnementales	<i>Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003</i>	<i>Protection de l'environnement dans le cadre du développement durable</i>
	<i>Décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006</i>	<i>Règles applicables aux établissements classés pour la protection de l'environnement</i>
	<i>Loi n° 11-02 du 17 février 2011</i>	<i>Aires protégées dans le cadre du développement durable</i>
Pollution de l'air	<i>Décret exécutif n° 03-410 du 5 novembre 2003</i>	<i>Seuils limites pour les émissions de bruit et de gaz toxiques par les véhicules à moteur</i>
	<i>Décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006</i>	<i>Valeurs limites, seuils d'alerte et objectifs de qualité de l'air</i>
	<i>Décret exécutif n° 06-138 du 15 avril 2006</i>	<i>Réglementation des émissions dans l'atmosphère (gaz, vapeurs, particules solides)</i>
Bruit	<i>Arrêté du 25 février 1964</i>	<i>Lutte contre le bruit excessif</i>
	<i>Décret exécutif n° 93-184 du 27 juillet 1993</i>	<i>Réglementation de l'émission de bruit</i>
	<i>Décret exécutif n° 03-410 du 5 novembre 2003</i>	<i>Valeurs limites pour les émissions sonores des véhicules à moteur</i>
Pollution marine	<i>Décret exécutif n° 14-264 du 22 septembre 2014</i>	<i>Organisation de la lutte contre les pollutions marines et institution des plans d'urgence</i>

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Faune protégée	<i>Décret exécutif n° 83-509 du 20 août 1983</i>	<i>Protection des espèces animales non domestiques</i>
	<i>Ordonnance n° 06-05 du 15 juillet 2006</i>	<i>Protection des espèces animales menacées d'extinction</i>
	<i>Décret exécutif n° 08-412 du 24 décembre 2008</i>	<i>Protection des espèces animales et de leurs habitats</i>
	<i>Décret exécutif n° 12-235 du 24 mai 2012</i>	<i>Liste des espèces animales non domestiques protégées</i>
	<i>Décret exécutif n° 08-414 du 24 décembre 2008</i>	<i>Modalités de capture des espèces menacées</i>
	<i>Décret n° 87-144 du 16 juin 1987</i>	<i>Procédures pour la création et l'exploitation des réserves naturelles</i>
Flore protégée	<i>Décret exécutif n° 12-03 du 4 janvier 2012</i>	<i>Liste des espèces végétales non cultivées protégées</i>
	<i>Décrets n° 93-285 et 95-252 du 23 novembre 1993</i>	<i>Végétation non cultivée protégée et supplément à la liste</i>
	<i>Décret exécutif n° 98-216 du 24 juin 1998</i>	<i>Statut standard des parcs nationaux</i>
	<i>Décret n° 87-144 du 16 juin 1987</i>	<i>Création et fonctionnement des réserves naturelles</i>
Gestion et élimination des déchets	<i>Décret présidentiel n° 84-378 du 15 décembre 1984</i>	<i>Conditions de nettoyage, d'élimination et de traitement des déchets solides urbains</i>
	<i>Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001</i>	<i>Gestion, contrôle et élimination des déchets</i>

I.4 Les caractéristiques du forage pétrolier et gazier offshore

I.4.1 L'étape exploratoire du gisement

I.4.1.1 La prospection géophysique et sismique

La collecte de données géophysiques et sismiques est primordiale pour la prospection des gisements d'hydrocarbures. Cette exploration repose sur la technique de « sismique réflexion » qui est effectuée depuis un navire. Celui-ci émet de l'énergie à l'aide de canons à air comprimé tout en avançant et en remorquant une ligne de capteurs appelée « streamer » (figure 15). La technique initiale, réalisée en deux dimensions (2D) dans un plan vertical, présentait un taux de succès de 30 à 40 %. L'adoption de la technique tridimensionnelle (3D), en quadrillant la zone avec plusieurs ensembles émetteurs-récepteurs, a permis d'atteindre un taux de succès de 70 %. Cette méthode est de plus en plus utilisée en raison de la qualité des résultats obtenus. En intégrant le facteur temps, l'évolution des gisements pendant l'exploitation peut être analysée grâce à la sismique en quatre dimensions (4D) (AECOM, 2010).

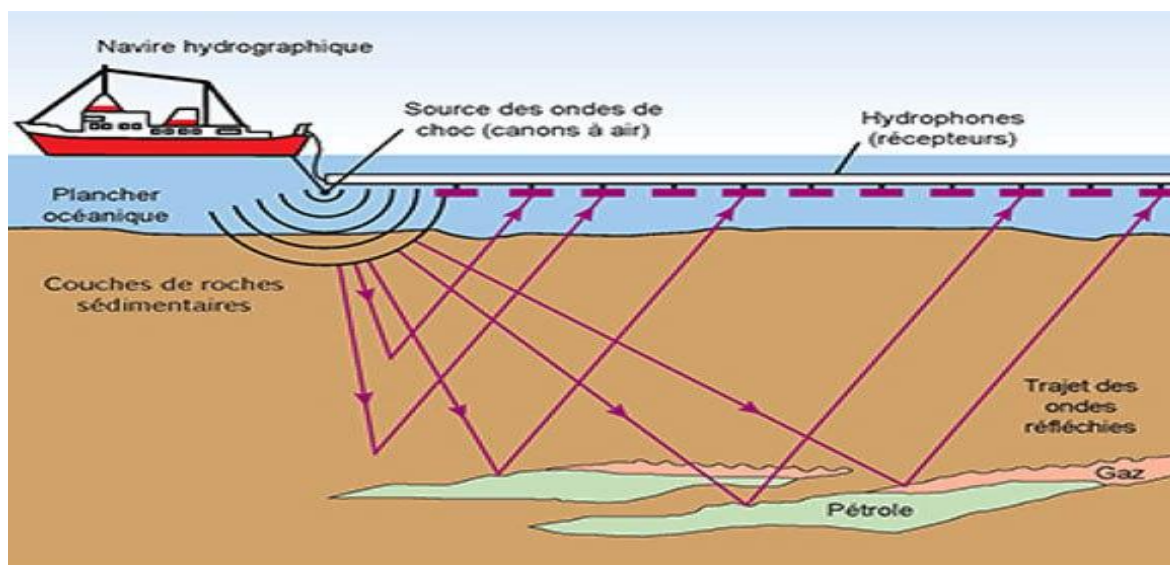


Figure 15: Levés géophysiques offshore (REC, 2022)

I.4.1.2 L'exploration du gisement par forage

Après la phase de prospection géophysique et sismique, le forage d'exploration vise à vérifier les volumes d'hydrocarbures estimés et à valider la décision de développer le gisement par forage. Il s'agit du seul moyen permettant de confirmer la présence d'hydrocarbures et de définir : la qualité de l'effluent du puits (huile saturée en gaz ou en eau), la perméabilité du réservoir, ainsi que le potentiel de production et les quantités d'hydrocarbures exploitables. Lorsqu'un gisement est identifié grâce aux données sismiques collectées précédemment, une plateforme adaptée est installée. Cette plateforme assure de nombreuses fonctions lors du forage du puits, telles que le tubage, le cimentation et l'injection. D'autres services spécifiques liés aux conditions météorologiques et aux interventions de plongeurs sont également fournis, en plus des

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER

équipements tels que les générateurs électriques, les logements pour le personnel, ainsi que les systèmes de sécurité incendie et de détection de gaz destinés à prévenir les risques d'explosion (GENIVAR, 2013).

Le forage du puits est réalisé à l'aide d'équipements puissants comprenant le derrick et le trépan, qui permettent de percer le plancher marin et de fracturer les formations géologiques traversées. Ce dispositif permet également d'injecter des fluides pendant le forage des différentes sections du puits afin de contrôler la pression, refroidir le trépan et remonter les déblais vers la surface (Bonton, 2014).

I.4.2 L'étape d'exploitation du gisement

L'entrée en phase de production optimale du gisement est validée à l'issue de l'étude géophysique et de la modélisation numérique de l'étape précédente. Un plan de développement est alors établi, précisant : (i) le nombre de puits à forer pour optimiser l'exploitation du champ découvert ; (ii) le type de plateforme de production à utiliser ainsi que le coût des équipements spécifiques en fonction des conditions de l'environnement marin ; (iii) la méthode de gestion optimale des rejets solides et liquides issus du forage, afin de préserver l'environnement et de réduire les coûts de dépollution.

Tout au long de la durée de vie du forage offshore, l'installation d'équipements spécifiques est indispensable. La première étape consiste à poser les tubes ou flexibles permettant la remontée des hydrocarbures, dont les débits sont régulés par une série de vannes et dont la pression est mesurée à l'aide de manomètres. La diminution de la pression constitue un indicateur de l'âge avancé du puits après plusieurs années d'exploitation.

La durée de vie d'une opération pétrolière ou gazière dépend des caractéristiques du gisement marin. Elle est en moyenne de 15 à 30 ans, mais peut dépasser 50 ans dans le cas des champs géants. La fin de l'exploitation d'un champ offshore est marquée par une dernière étape : le démantèlement de la plateforme et l'acheminement de ses structures vers la terre pour un éventuel réemploi, un recyclage ou une mise au rebut des parties non réutilisables (Bonton, 2014).

I.4.3 Les types de plateformes pétrolières offshore

Dans le monde entier, les structures offshore sont construites à de nombreuses fins différentes. Ces structures sont coûteuses à construire, mais offrent la possibilité de réaliser des bénéfices économiques importants. La plateforme est équipée d'installations de stockage où le pétrole peut être stocké avant son transport vers la raffinerie. Plusieurs personnes travaillent sur la plateforme et ont généralement leurs zones d'hébergement. Le processus de construction nécessite une expertise considérable du concepteur, car la réglementation maritime établit des normes élevées pour le processus de construction. En général, deux parties principales composent une plateforme (figure 16) : (i) la partie utile au-dessus de la surface qui est constituée de modules préfabriqués appelés « Topsides » ; (ii) la partie en-dessous de la surface ou « structure porteuse », assurant le maintien de la partie au-dessus et qui est composée de plusieurs modules mécaniques nécessaires à l'opération complexe du forage.

Différentes structures offshore sont conçues pour être utilisées dans différentes profondeurs d'eau (Figure 17, Tableau 4).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

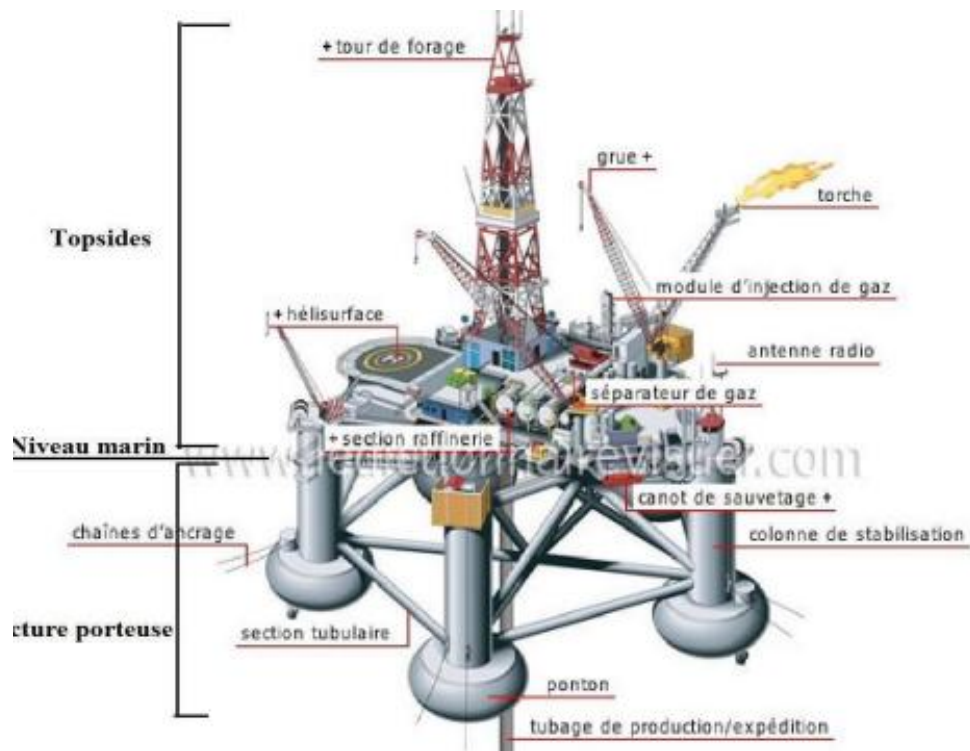


Figure 16: Structure générale d'une plateforme pétrolière offshore (Mekhennene, 2016)

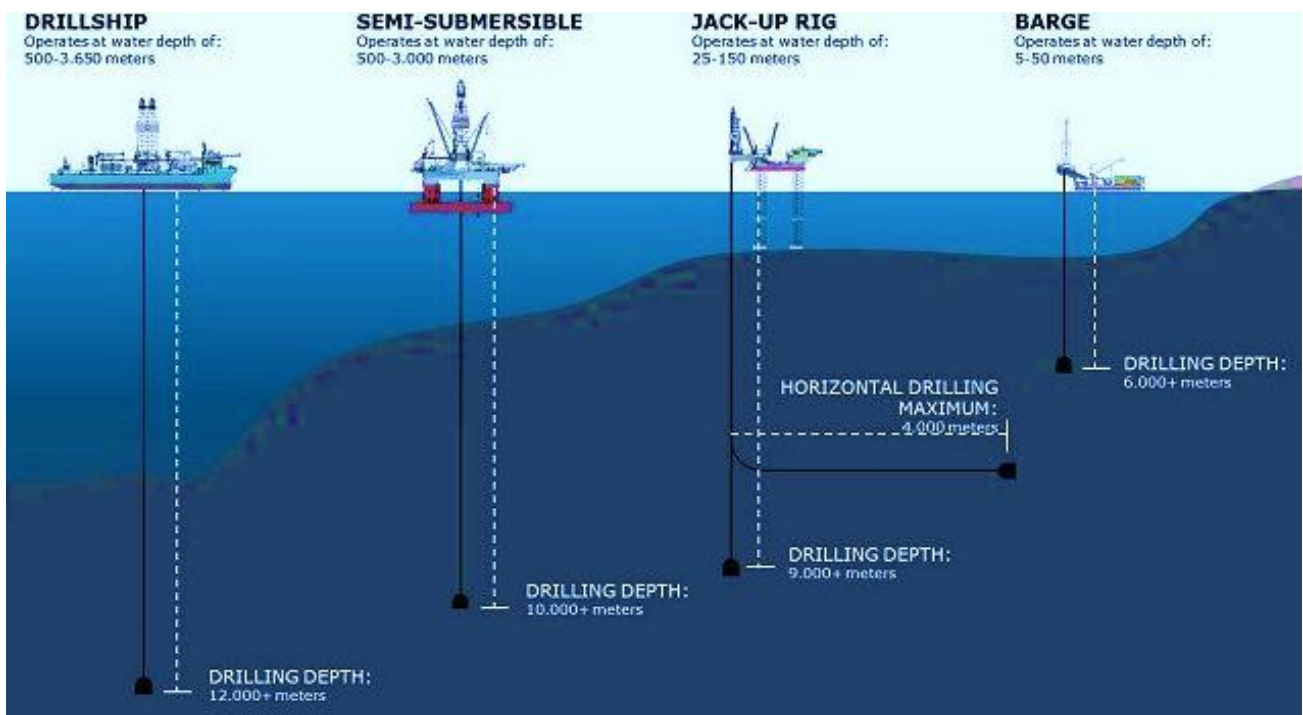


Figure 17: Type d'appareil et de structure (Tudorache, 2020)

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Tableau 4: Types de plateformes de forage offshore

		Types de plateformes de forage			
		Drilling barge (Barge de forage)	Jack-up	Semi-submersible	Navire
Profondeur	Eau	5-50 m (Forage peu profond en zones pas strictement marines)	25-150m (Forage en eaux peu profondes et forage horizontale)	500-3000 m	500-3 650 m
	Totale	6000 m	4000-9000 m	+10000 m	+12000 m
Structure		Barge flottante équipée du matériel nécessaire au forage. Elles sont remorquées jusqu'au site par un navire, puis maintenues en position grâce à des ancres.	- Modèles à jambes indépendantes, (3 jambes en treillis) Modèles à mât (les jambes sont reliées à une large structure verticale reposant sur le	-Structures flottantes composées de pontons et de colonnes - Leur stabilité est assurée soit par un important système	- Forme similaire à celle d'un bateau, et équipés de matériel de forage - Stabilité en mer assurée par un système de positionnement dynamique, ce qui
				par un dispositif de positionnement dynamique.	changer rapidement de site d'opération
Propriétés		Adaptées aux environnements très calmes et peu profonds.	Stabilité et quasiment fixe une fois installée avec démarrage rapide et efficace des opérations de forage	Capacité à être déplacées facilement d'un site à un autre	Grande mobilité mais généralement plus coûteux à construire que les plateformes semi-submersibles

1.4.4 Les phases du puits et les fluides de forage

Le forage est réalisé conformément à un programme technique défini et à une application réglementaire stricte. Le puits est foré à l'aide d'un trépan et d'un derrick, avec injection à haute pression de fluides de forage dont la composition chimique varie en fonction de la profondeur atteinte et de la nature des formations géologiques traversées. Les sections du puits voient leur diamètre diminuer progressivement au fur et à mesure de l'avancement du forage en profondeur. Dans la première section du puits, un tubage métallique traverse la colonne d'eau jusqu'à une profondeur moyenne de 500 mètres, avec un diamètre qui passe de 36" à 26" (DrillingForGas, 2024). Le tubage se poursuit ensuite vers la roche-mère, où des tubes en acier de diamètres décroissants sont cimentés au fur et à mesure afin de stabiliser les parois du puits et d'éviter les risques de fuites de fluides, appelées pertes de formation.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PÉTROLIER ET GAZIER EN MER

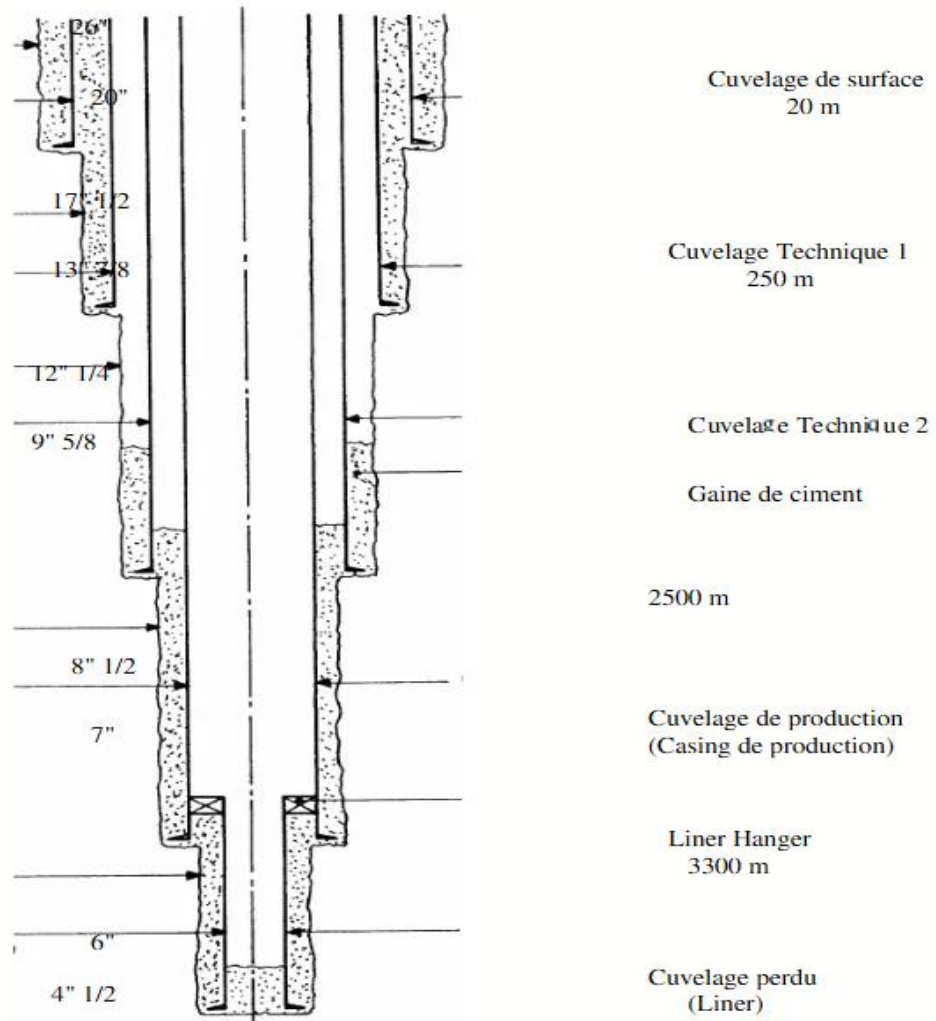


Figure 18: schéma de l'architecture d'un puits (IAP,2007)

Les fluides de forage, également appelés boues, remplissent plusieurs fonctions, les plus courantes étant le forage du puits (par effet d'injection à haute pression), le transport des débris de roche forés à la surface, et le refroidissement des outils de forage. Leur composition varie en fonction de la profondeur et de la nature des formations traversées. Elle comprend une section continue ou émulsifiée, qui peut être à base d'eau ou de diesel, en plus d'un grand nombre d'additifs chimiques et d'auxiliaires ayant des rôles spécifiques et des actions multiples. En général, la première section du puits est forée avec une boue à base d'eau ou Water-Based Mud (WBM), qui est composée de plus de 95 % d'eau, à laquelle s'ajoutent du bentonite ou d'autres argiles ainsi que des additifs chimiques en faible pourcentage. Les boues de forage utilisées plus profondément dans les autres sections du puits sont à base d'huile, d'où leur appellation OBM ou Oil-Based Mud. Elles sont composées jusqu'à 94 % de diesel (par exemple dans la section de 6") en plus de nombreux additifs et réactifs chimiques. Dans le (tableau 4), les composantes des boues de forage sont classées par famille.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

Tableau 5: Familles chimiques et fonctions des composants des fluides de forage (Ghazi 2010)

Familles d'additifs	Rôles	Exemples
- Viscosifiants	Augmenter et contrôler la viscosité de la boue	- Argiles naturelles (bentonites, attapulgites) - Argiles traitées (bentonites organophiles) - Polymères (PAC, HEC) - Biopolymères (Xanthane, Guar)
- Agents alourdissant	Augmentation de la densité de la boue et équilibrage de la pression entre le puits et la formation	- Sulfate de baryum - Hématite (Fe ₂ O ₃)
- Inhibiteurs de corrosion	Protection des parties métalliques du puits contre les composés acides	- Oxyde de fer - Bisulfate d'aluminium - Carbonate de zinc - Chromate de zinc
- Dispersants	Désintégration des morceaux de roche en plus petite taille	- Lignosulfates de fer
- Floculants	Suspension des cuttings pour faciliter leur transport vers le haut du puits	- Polymères acryliques
- Agents tensioactifs	Emulsion de la boue	- Acides gras - Savons
- Réducteurs de pertes	Limitation des pertes aux formations sous pressurées ou de haute perméabilité	- Amidons - Polymères organiques : - (CMC, Résines)
- Biocides	Destruction des bactéries Réduction de l'acidité	- Acides aminés organiques - Chlorophénols - Formaldéhydes

1.4.5 Les rejets de forage et la gestion des boues

Les déchets solides et liquides générés lors des phases d'exploration, d'exploitation et d'abandon varient en volume et en nature selon le type de plateforme pétrolière ou gazière et selon la technique de forage utilisée (Patin, 1999). La gestion de ces déchets doit être réalisée conformément aux législations locales et internationales, afin de réduire les risques et les impacts environnementaux sur le milieu marin, la faune maritime et la santé humaine.

Le risque de pollution associé aux différentes activités de forage offshore, ainsi que les impacts environnementaux potentiels, est important. Toutefois, il dépend largement du mode de gestion de cette pollution sur la plateforme (Neff, 2005). Cette gestion doit être adaptée au type de pollution rencontré et au comportement spécifique des polluants. En cas de pollution accidentelle, une réponse rapide est nécessaire, notamment lors de déversements liés à une perte de contrôle d'opérations sur les boues, en surface ou en profondeur.

Le risque existe également en cas de rejet incontrôlé de déchets de forage en mer ou durant leur transport vers la terre. Au cours du forage du puits, des volumes importants de déblais contaminés par des hydrocarbures, ainsi que des fluides contenant des substances toxiques, sont générés.

Pour limiter ces rejets, un système de contrôle des solides est installé en surface, permettant le déshuilage des déblais après leur passage à travers des tamis vibrants et des centrifugeuses.

À la fin du forage, les déchets peuvent être traités sur place ou envoyés dans des unités de traitement à terre. Les procédés utilisés sont généralement la stabilisation-solidification ou la désorption thermique, également appliqués pour les forages terrestres.

I.5 Les risques accidentels liés au forage offshore

I.5.1 Historique des risques accidentels de l'activité pétrolière offshore

L'exploration et l'exploitation des hydrocarbures en mer exposent les travailleurs à divers dangers les opérations offshore présentent un niveau de sécurité globalement équivalent aux autres secteurs industriels. Cependant, certaines spécificités augmentent le risque d'accidents graves.

- 20 % des accidents offshore sont liés à des incidents sur puits, principalement lors des phases de forage.
- La majorité des accidents sont causés par des fuites sur les installations de surface, des problèmes de stabilité des plateformes ou des collisions en mer.
- Les éruptions de puits constituent les scénarios les plus extrêmes, ayant le plus fort impact environnemental.

La répartition globale des pourcentages d'accidents dans cette industrie est illustrée dans la figure 19. Les pourcentages d'occurrence des différents types d'événements en chaîne dans les accidents offshore enregistrés dans la base WOAD (INERIS,2015) montrent des taux plus élevés pour cause de fuites d'installation

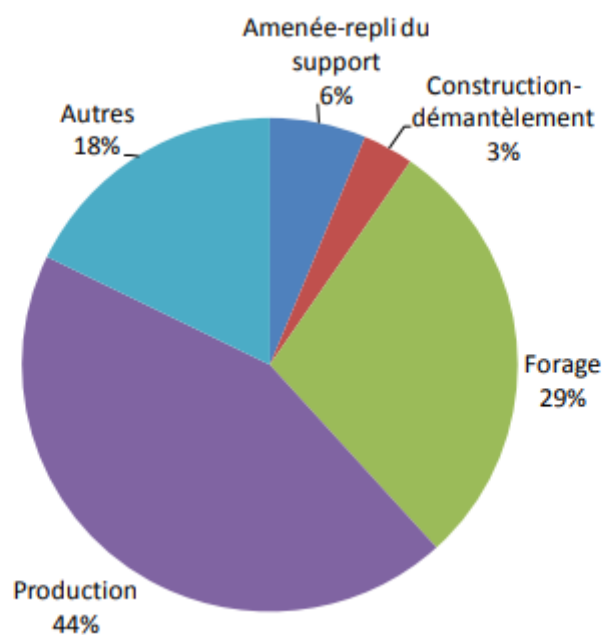


Figure 19: Répartition des accidents enregistrés dans la base WOAD en fonction des types d'opération (INERIS (2015))

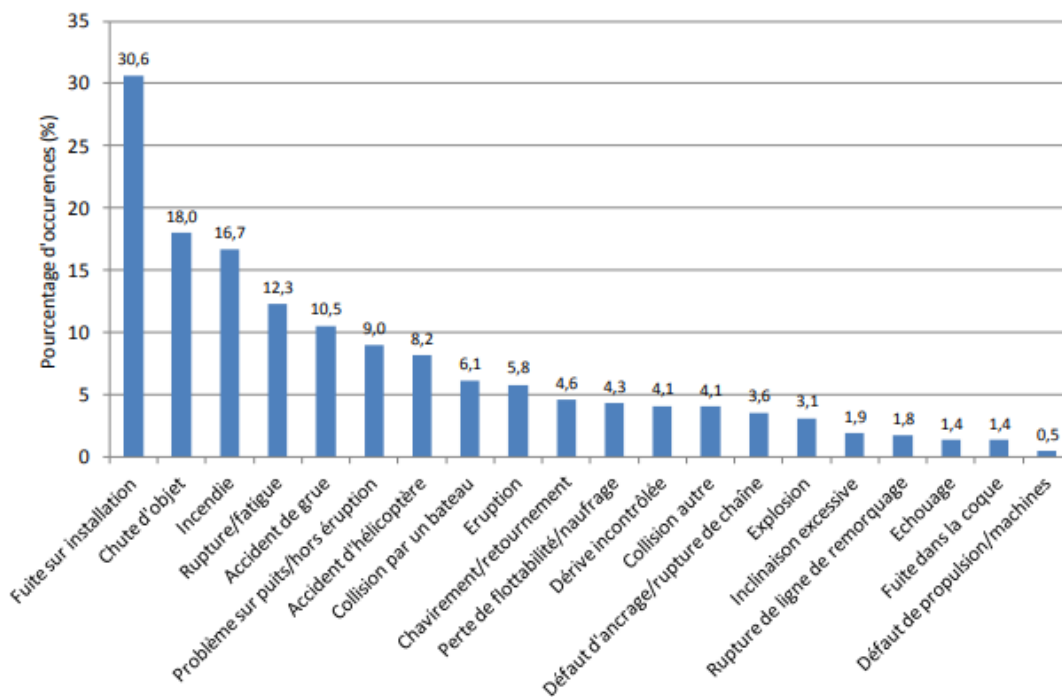


Figure 20: Pourcentage d'occurrence des différents types d'événements en chaîne dans les accidents offshore enregistrés dans la base WOAD (INERIS 2015)

I.5.2 Les accidents liés aux défaillances structurelles

• Alexander L. Kielland (1980) – 123 morts

La plateforme semi-submersible Alexander L. Kielland s'est renversée au large de la Norvège en raison de la rupture d'une soudure défectueuse sur l'une de ses jambes de soutien. L'absence d'un plan d'évacuation efficace a aggravé le bilan humain, entraînant la perte de 123 travailleurs sur 212.

• Piper Alpha (1988) – 167 morts

Cette plateforme de production britannique a été détruite par une série d'explosions causées par une fuite de gaz due à une soupape de sécurité mal installée. L'absence de mesures de confinement et la communication inefficace entre les équipes ont contribué à l'ampleur du désastre.

• Deepwater Horizon (2010) – 11 morts

L'explosion de la plateforme Deepwater Horizon dans le golfe du Mexique a été déclenchée par un défaut du dispositif anti-éruption (BOP) et par une mauvaise gestion des signaux d'alarme. L'accident a causé la plus grande marée noire de l'histoire des États-Unis, libérant près de 5 millions de barils de pétrole dans l'océan.

I.5.3 Les accidents liés aux conditions météorologiques extrêmes

• Ocean Ranger (1982) – 84 morts

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

La plateforme mobile Ocean Ranger a coulé au large du Canada après avoir été frappée par une vague scélérate de 20 mètres qui a brisé un hublot et inondé la salle de contrôle du ballast, entraînant sa perte de stabilité.

- **Seacrest (1989) – 91 morts**

Le navire de forage Seacrest a chaviré dans le golfe de Thaïlande sous l'effet du typhon Gay. L'absence de soutien logistique et de communication a retardé les secours, entraînant la disparition de 91 membres d'équipage.

- **Glomar Java Sea (1983) – 81 morts**

Pris dans le typhon Lex, le navire de forage Glomar Java Sea a chaviré en mer de Chine méridionale. L'analyse post-accident a révélé un manque de protocoles de navigation adaptés aux conditions extrêmes.

I.5.4 Les accidents liés aux défaillances opérationnelles et erreurs humaines

- **Mumbai High North (2005) – 22 morts**

Une collision entre un navire de soutien et la plateforme Mumbai High North a déclenché une fuite de gaz suivie d'une explosion majeure. La proximité des infrastructures et l'absence de mesures de prévention des collisions ont été mises en cause.

- **Usumacinta (2007) – 22 morts**

En raison d'une tempête, la plateforme autoélevatrice Usumacinta est entrée en collision avec l'arbre de production d'une autre plateforme, provoquant une fuite massive d'hydrocarbures et un incendie. L'échec de l'évacuation et des moyens de sauvetage a entraîné un lourd bilan humain.

- **Enchova Central (1984) – 42 morts**

Une explosion sur la plateforme Enchova, exploitée par Petrobras, a entraîné une évacuation chaotique. L'une des principales causes des décès fut l'échec du mécanisme de descente des canots de sauvetage

I.6 Les impacts environnementaux du forage pétrolier offshore

Le forage pétrolier en milieu marin, bien qu'indispensable pour satisfaire la demande énergétique mondiale et soutenir l'économie, soulève depuis longtemps des préoccupations environnementales majeures. Cette activité expose les écosystèmes marins à de multiples risques qui menacent à la fois la biodiversité et l'équilibre des milieux aquatiques.

Au cours du cycle de vie des projets offshore, de l'exploration à la production, puis au démantèlement des infrastructures, des impacts environnementaux significatifs peuvent se manifester. Ils résultent notamment du rejet d'eaux de production, d'hydrocarbures, de produits chimiques, de boues de forage et de déblais, mais aussi des perturbations physiques liées à l'installation de plateformes et de pipelines. À cela s'ajoutent les nuisances sonores générées par les activités sismiques et les opérations de forage, la pollution lumineuse des installations ainsi que les émissions atmosphériques.

Le forage offshore, par la diversité et l'intensité de ses opérations, représente donc un risque considérable pour le milieu marin. Toutefois, l'ampleur des impacts environnementaux potentiels

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORAGE PETROLIER ET GAZIER EN MER

dépend fortement de la qualité du système de gestion environnementale mis en place sur la plateforme (OGP, 2012).

I.6.1 Les impacts liés aux rejets de forage en milieu marin

Les opérations de forage libèrent dans l'environnement marin des boues de forage, des fluides contenant des hydrocarbures, des métaux lourds ainsi que divers additifs chimiques. Ces rejets peuvent provoquer une toxicité aiguë, notamment pour le phytoplancton et les invertébrés benthiques, perturbant ainsi les premiers niveaux de la chaîne alimentaire marine.

Par ailleurs, les bruits générés par les activités telles que les tirs sismiques et le fonctionnement des équipements de forage peuvent affecter la faune marine sensible, en particulier les cétacés, en altérant leurs comportements de communication, d'orientation et de reproduction.

En situation de pollution accidentelle, comme la perte de contrôle des boues en surface ou en profondeur, ou lors de décharges incontrôlées en mer ou pendant le transport vers la terre, une réponse rapide est indispensable pour limiter les effets sur l'environnement. Même en conditions normales, malgré les efforts réalisés pour réduire les volumes de rejets et améliorer la composition des fluides de forage, un risque persistant demeure, nécessitant une vigilance continue (Commission OSPAR, 2010).

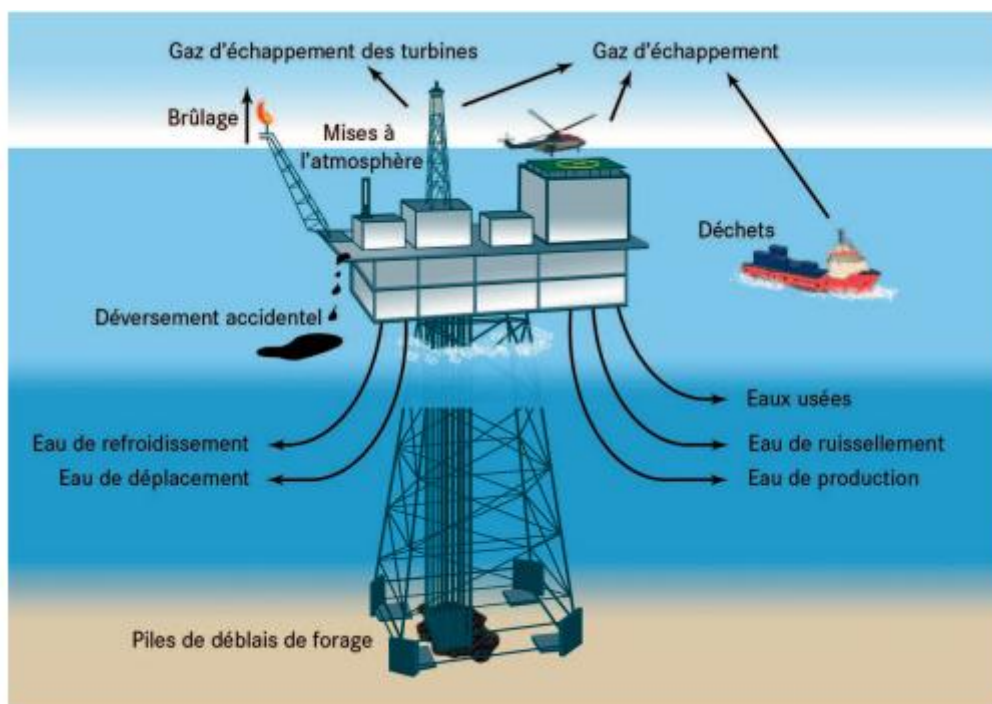


Figure 21: Source de substances libérées au cours de la production pétrolière. (OSPAR 2010)

I.6.1.1 Le comportement des rejets des fluides de forage

Les polluants les plus généralement identifiés par les auteurs et les différents rapports des agences environnementales et organismes internationaux sont les hydrocarbures, en particulier les fractions aromatiques, les sels et les métaux lourds (Ghazi et al.2008).

Les fluides de forage, en particulier ceux à base d'huile (OBM), contiennent des hydrocarbures qui suivent un processus de dégradation chimique complexe, fortement influencé par les conditions physico-chimiques et bathymétriques du milieu marin. L'évaporation des fractions légères d'hydrocarbures en surface, leur dispersion dans la colonne d'eau, et la persistance des émulsions dans l'eau de mer sont des phénomènes clés qui définissent leur devenir environnemental. Ces hydrocarbures peuvent se transformer en polymères difficiles à dégrader, créant ainsi des contaminants persistants dans l'écosystème marin. En outre, l'interaction entre ces polluants et les conditions marines, comme la température et les courants, modifie leur distribution et leur biodisponibilité (Kanan, 2012).

Les métaux les plus incriminés sont l'arsenic, le zinc, le baryum, le cadmium, le chrome, le plomb et le mercure (Ghazi M 2010). Parfois, le même polluant métallique peut provenir à la fois des roches forées et des gîtifs. A titre d'exemple, le baryum peut provenir localement des formations géologiques mais aussi des agents alourdissant de la baryte, qui est un minéral utilisé pour le contrôle de la densité. Le comportement des métaux émis dans le milieu marin est également influencé par les conditions locales comme l'oxydoréduction, les courants marins et la nature des sédiments. Ces facteurs influencent la mobilité, la spéciation chimique, la toxicité, ainsi que la biodisponibilité des métaux traces et majeurs. Des études ont montré que certains métaux lourds, lorsqu'ils se retrouvent en concentrations élevées, peuvent provoquer des effets toxiques aigus sur les espèces marines sensibles. À long terme, ces éléments peuvent s'accumuler dans les organismes marins et se bio amplifier à travers la chaîne alimentaire, impactant ainsi l'homme, en particulier à travers la consommation de fruits de mer contaminés (BRGM, 2013).\

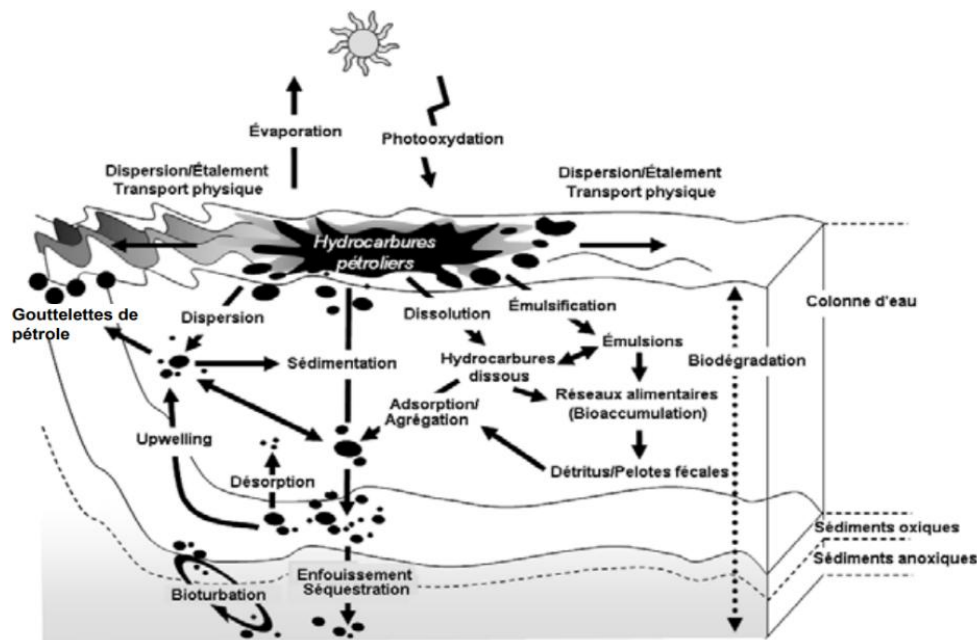


Figure 22: Schéma illustrant le devenir des hydrocarbures en milieu marin (Mirales, 2007).

I.6.1.2 Les cibles exposées en milieu marin

L'exposition à la pollution marine associée aux activités de forage offshore touche une variété d'organismes, en fonction des polluants présents et de leur comportement dans l'environnement. Les cibles de cette pollution incluent non seulement les espèces aquatiques vivant à différentes profondeurs de la colonne d'eau, mais également celles proches des sédiments marins ou dans les eaux interstitielles, ainsi que les humains via la consommation de produits marins contaminés (BRGM, 2013). En effet, les polluants peuvent se retrouver dans les différentes couches de l'écosystème marin, de la surface à la profondeur, affectant divers types d'organismes selon leur habitat et leur mode de vie.

Le processus de bioaccumulation et de bioamplification des polluants dans les chaînes alimentaires marines est un mécanisme clé qui lie l'écotoxicité aux risques pour la santé humaine. À mesure que ces métaux et hydrocarbures se déplacent dans les niveaux trophiques de l'écosystème marin, ils peuvent avoir des effets à long terme sur la biodiversité marine, en plus des impacts directs et immédiats sur la faune marine (Kanan, 2012). Ces effets sont particulièrement préoccupants pour les espèces sensibles et les communautés humaines dépendantes de la pêche, car ils introduisent des contaminants dans la chaîne alimentaire.

I.6.2 Les impacts liés à la gestion des rejets de forage

La gestion des déchets issus des opérations de forage, comme les boues et les cuttings, est un aspect crucial pour limiter les impacts environnementaux. Des techniques telles que la stabilisation et la solidification sont utilisées pour rendre ces déchets moins polluants et prévenir leur lixiviation dans l'environnement marin. Cependant, l'utilisation de liants chimiques dans ce processus peut entraîner des émissions supplémentaires de dioxyde de carbone (CO_2). Une autre méthode consiste à réinjecter les fluides de forage dans des formations géologiques profondes pour limiter les rejets directs en mer, bien que cette approche nécessite une surveillance constante pour éviter les fuites potentielles. (Lebedev et al, 2024).

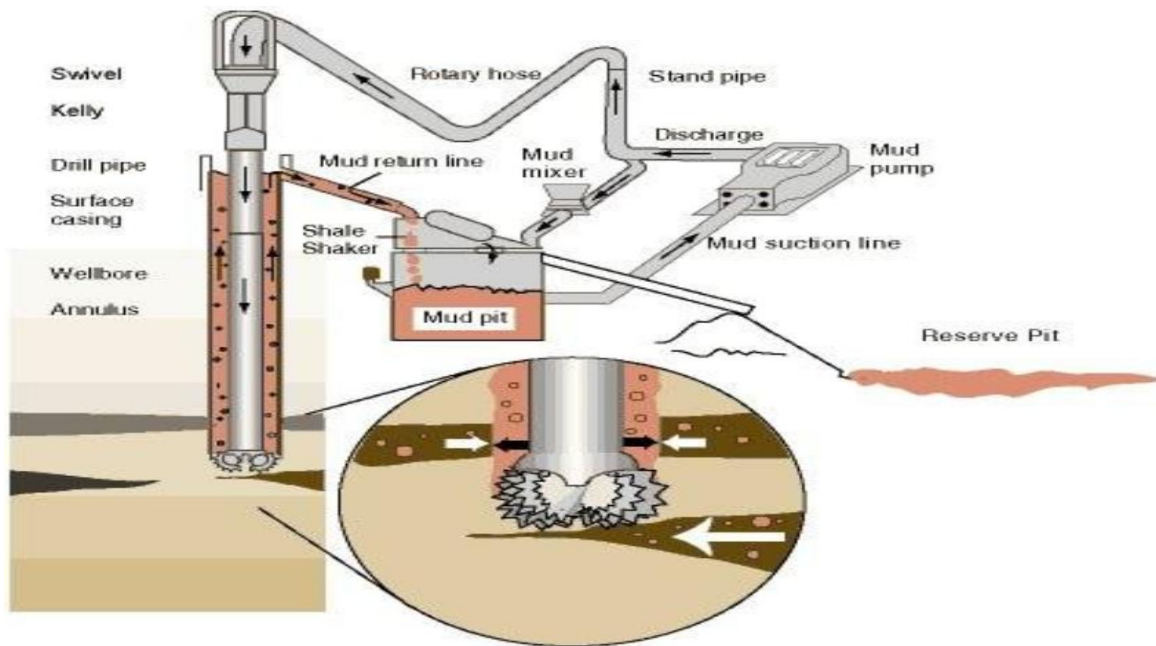


Figure 23: Circuit de la boue dans le forage (Bouselsal, 2017)

I.6.3 Les impacts liés à la consommation d'énergie et des ressources

Les opérations de forage offshore sont énergétiquement très exigeantes, nécessitant une grande quantité de carburant pour faire fonctionner les équipements et les navires de soutien. Cette consommation importante de carburant génère des émissions substantielles de gaz à effet de serre, notamment du dioxyde de carbone (CO_2), des oxydes d'azote (NO_x) et des oxydes de soufre (SO_x). Ces gaz ont un impact direct sur l'atmosphère en contribuant au réchauffement climatique, et leur présence dans l'air peut nuire à la qualité de l'air, particulièrement dans les zones côtières densément industrialisées. Ces émissions de CO_2 , NO_x et SO_x constituent une menace pour la qualité de l'air dans les régions côtières et augmentent le risque de maladies respiratoires. (SBM Offshore, 2019).

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II.1 Présentation de la zone étude

II.1.1 Localisation géographique et administrative

La zone d'étude couvre les golfes de Skikda et d'Annaba, situés dans la partie nord-est de l'Algérie, le long du littoral méditerranéen. Le golfe de Skikda, également connu sous le nom de « Stora », s'étend sur plus de 200 kilomètres de côte (Leclaire, 1972). Il est délimité au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la wilaya d'Annaba, à l'ouest par la wilaya de Jijel, et au sud par les wilayas de Constantine et Guelma. Cette région couvre une superficie estimée à 4118 km², avec un linéaire côtier d'environ 160 kilomètres, représentant près de 12 % du littoral algérien. Situé à environ 470 kilomètres à l'est d'Alger, le golfe est encadré par deux caps rocheux majeurs (voir Figure) : le cap Bougaroun à l'ouest (6°28' Est, 37°05' Nord) et le cap de Fer à l'est (6°10' Est, 37°04' Nord). Dans son prolongement oriental, le golfe d'Annaba, également désigné sous le nom de « Golfe de Bône », s'étend sur une longueur approximative de 120 kilomètres (Leclaire, 1972). Il est bordé à l'ouest par le cap de Garde (36°58'02"N, 7°47'49"E) et à l'est par le cap Rosa (36°57'03"N, 8°14'35"E). Ce golfe constitue l'extrémité orientale du littoral algérien, à environ 670 kilomètres d'Alger, et forme un arc côtier ouvert vers le nord. Il est limité au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la frontière tunisienne, à l'ouest par la wilaya de Skikda, et au sud par la wilaya d'El Tarf.

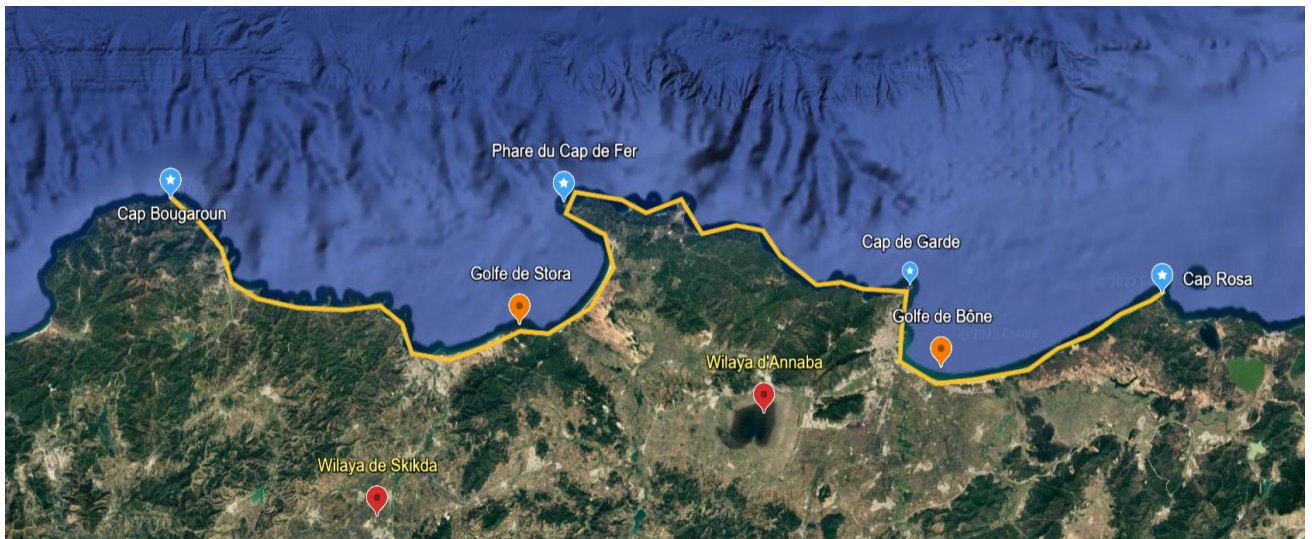


Figure 24: Représentation géographique de la baie de Skikda et le golfe d'Annaba (Google Earth)

II.1.2 Le périmètre d'exploration offshore de Skikda-Annaba

Le périmètre de forage pétrolier offshore se trouve dans la partie sud du bassin algéro-provençal. Il est situé dans l'ouest de la Méditerranée. D'Est en Ouest, cette zone s'étend de la Wilaya de Skikda à la Wilaya d'Annaba (voir la figure ci-dessous), s'étend en moyenne jusqu'à 20 km de la côte. La région se caractérise par une activité urbaine, industrielle et portuaire significative, influençant ainsi son environnement maritime.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Le puits d'exploration étudié dans le cadre de cette évaluation environnementale est désigné sous le nom de SKD-1. Il est situé en mer Méditerranée, au large de la côte nord-est de l'Algérie, plus précisément dans la zone marine au large de la wilaya de Skikda. Ce puits s'inscrit dans un programme de forage offshore initié dans le but d'explorer le potentiel en hydrocarbures dans la région orientale du pays. Les coordonnées géographiques précises du puits SKD-1 sont les suivantes :

- **Latitude** : 37°26'14.63" Nord
- **Longitude** : 7°14'18.39" Est

La distance séparant le site de forage du port de Skikda qui constitue le principal point d'appui logistique pour les opérations offshore dans la région est estimée à environ 68 kilomètres. Cette proximité relative permet d'assurer une liaison efficace entre la terre ferme et la plateforme de forage, notamment pour le ravitaillement en matériel, le transport du personnel, ainsi que pour la gestion des déchets et des produits chimiques nécessaires aux opérations. Toutefois, cette distance représente également un enjeu stratégique en matière de sécurité et d'intervention d'urgence, car elle conditionne les temps de réponse en cas d'incident en mer. Le port de Skikda, en tant qu'infrastructure industrielle majeure sur la façade maritime orientale de l'Algérie, joue donc un rôle clé dans le bon déroulement et la sécurité des opérations de forage au niveau du puits SKD-1.

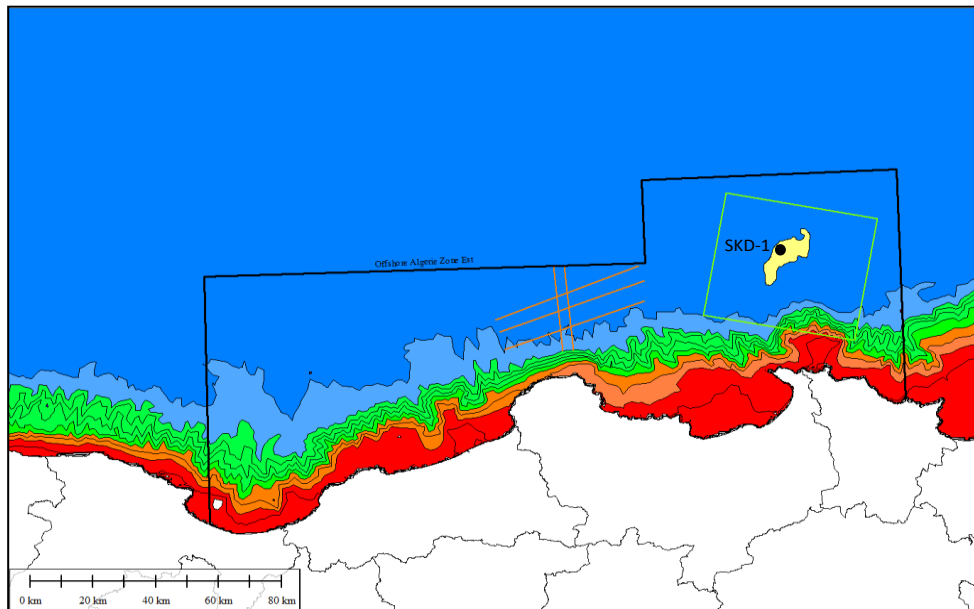


Figure 25: La localisation cartographique du puits SKD-1 par rapport à la côte algérienne

II.2. Description de l'environnement du site

II.2.1 Le contexte géologique de la région Skikda-Annaba :

La région offshore située entre Skikda et Annaba, sur la côte orientale algérienne, s'inscrit dans le bassin Algéro-provençal, lui-même sous-bassin de la Méditerranée occidentale. Cette zone est le produit d'une dynamique géotectonique complexe, liée à la convergence entre les plaques africaine et eurasiennne. Ce contexte compressif a engendré la formation des chaînes de montagnes maghrébines à terre, et, en mer, la structuration d'un bassin en arrière-arc, conférant à cette région une importance stratégique tant du point de vue géologique qu'énergétique, notamment pour l'exploration offshore d'hydrocarbures.

Le littoral y présente une morphologie contrastée, alternant falaises abruptes et plages sableuses. La géologie locale est dominée par des formations métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes), notamment visibles au niveau des falaises côtières, associées à des formations sédimentaires plus récentes, constituées de sables et d'argiles. Cette diversité résulte de l'érosion, des mouvements tectoniques actifs, et des variations eustatiques passées.

Le plateau continental, relativement étroit (10 à 15 km), s'élargit dans les baies de Skikda et Annaba, où il forme deux plates-formes bien développées. Entre ces dernières, la marge est fortement entaillée par des canyons sous-marins, véritables chenaux sédimentaires, contribuant au transfert des matériaux vers les zones profondes. Ce secteur est également marqué par la présence d'un dôme arrondi, en continuité avec le Cap de Fer, constitué d'une intrusion magmatique d'âge Miocène moyen.

La structure géomorphologique de la marge continentale révèle une pente de rupture régulière ($\sim 7^\circ$) au large d'Annaba, et plus accidentée vers Skikda. Plus en profondeur, la bathymétrie met en évidence des formes anticlinales marquées à une dizaine de kilomètres du pied de pente, ainsi qu'un bassin perché d'environ 12 km de large à 40 km de la côte. Au large de Skikda, on distingue deux ruptures de pente atteignant jusqu'à 200 m de dénivelé, et un bourrelet anticlinal visible à 40 km en mer. Ces structures pourraient témoigner d'une activité tectonique récente, que l'analyse sismique vise à confirmer.

Les faciès sédimentaires sont également très variés, reflétant la diversité des environnements hydrodynamiques :

- Fonds rocheux et caillouteux, situés près du littoral, principalement au niveau des caps et falaises, liés à l'érosion côtière et à l'énergie des vagues ;
- Dépôts sableux, riches en quartz et fragments rocheux, présents sur les plages et certaines baies, devenant progressivement plus fins vers le large ;
- Vases et sédiments fins, s'accumulant dans les zones profondes et calmes, riches en matière organique ;
- Fonds mixtes, formés de mélanges hétérogènes (sables, vases, fragments biologiques), influencés par les courants marins et les apports continentaux (Kherroubi et al., 2016).

II.2.1.1. Aspect stratigraphique

- **Aspect stratigraphique à terre**

Le nord-est algérien présente une structure géologique complexe, marquée par l'enchaînement de plusieurs unités stratigraphiques à la fois continentales et marines. Cette région se compose de zones internes, externes et de nappes de flysch, formant une transition naturelle vers le bassin offshore. La Petite Kabylie représente les zones internes avec des roches métamorphiques (schistes, gneiss), magmatiques (granitoïdes) et ultrabasiques (péridotites), souvent associées à des formations sédimentaires allant du Paléozoïque au Lias–Éocène. À l'est, le massif de l'Edough, culminant à environ 1000 mètres d'altitude, constitue un socle cristallophyllien composé de roches métamorphiques, de flyschs allochtones et de quelques affleurements de roches éruptives. Ce massif marque la transition vers le bassin néogène d'Annaba, caractérisé par des dépôts sédimentaires (argiles, sables, limons, galets), des nappes telliennes d'âge Crétacé–Éocène et d'épaisses séries de flyschs (jusqu'à 1,5 km), datées de l'Oligocène terminal au Miocène moyen, témoignant d'environnements turbiditiques de marge active. (données interne)

- **Aspect stratigraphique en mer**

la stratigraphie offshore du bassin algérien est bien documentée grâce aux données sismiques et aux forages scientifiques DSDP (Deep Sea Drilling Program). Les dépôts marins, principalement post-rift, révèlent trois grandes unités stratigraphiques : une unité supérieure Plio-Quaternaire composée de marnes et turbidites récentes, avec des réflecteurs sismiques continus et faibles, traduisant une sédimentation hémipélagique et turbiditique liée aux canyons sous-marins ; une unité médiane messinienne (Miocène supérieur), marquée par des dépôts évaporitiques (halite, anhydrite) liés à la crise de salinité messinienne (~5,6 Ma), qui constitue une discontinuité majeure dans la stratigraphie méditerranéenne ; et enfin une unité inférieure (Oligocène terminal – Miocène moyen/Tortonien), composée de turbidites, d'argiles, de grès et localement de carbonates, traduisant un environnement de dépôt profond associé aux marges actives en flexure. L'ensemble de cette séquence stratigraphique, de la zone littorale jusqu'aux grands fonds, a été synthétisé sous forme de colonne stratigraphique intégrant les données de puits, d'affleurements et d'analyses sismiques. Ce cadre est essentiel pour l'identification des réservoirs potentiels, des niveaux de couverture imperméables et des pièges géologiques stratégiques dans le cadre de l'exploration pétrolière offshore. (données interne)

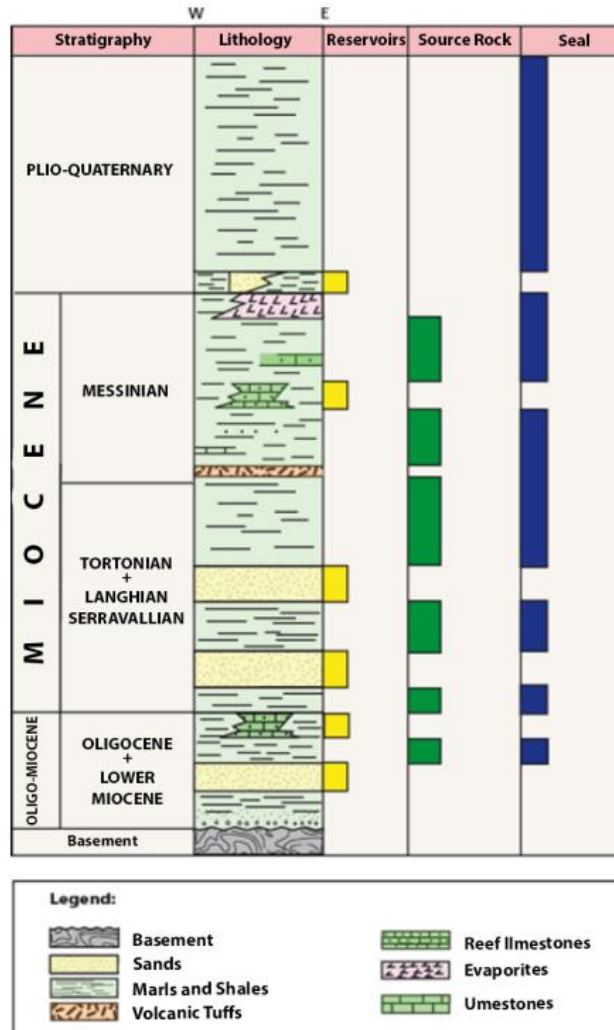


Figure 26: Stratigraphie et Systèmes pétroliers du Bassin offshore algérien (Document interne)

II.2.2. Le climat

Le périmètre d'étude couvrant les zones de Skikda et Annaba, situées sur la côte nord-est de l'Algérie, est soumis à un climat méditerranéen typique, fortement influencé par les conditions maritimes (Climats et Voyages, 2025a). Ce climat se caractérise par des étés chauds et secs, ainsi que des hivers doux et humides, avec des précipitations annuelles oscillant généralement entre 650 et 1 200 mm selon les localités (Climats et Voyages, 2025).

Durant l'été, notamment entre mi-juillet et mi-août, les températures maximales atteignent fréquemment 30 à 40 °C, avec une intensité marquée lors des épisodes de canicule. Les précipitations estivales sont extrêmement faibles, souvent inférieures à 5 mm, entraînant un assèchement progressif des sols et une évaporation accrue. À titre d'exemple, Annaba enregistre en moyenne 2 mm de précipitations en juillet

En hiver, la région bénéficie de températures relativement douces, avec des minimales moyennes de 7 à 9 °C. Les précipitations y sont plus abondantes, atteignant parfois 100 mm par mois entre

novembre et janvier Ces pluies, parfois intenses, peuvent alimenter efficacement le régime hydrologique côtier, notamment en période de crues.

La proximité immédiate de la mer Méditerranée joue un rôle régulateur, en atténuant les contrastes thermiques entre le jour et la nuit, et entre les saisons Toutefois, les vents marins — notamment le Chergui, vent chaud et sec venu du sud — peuvent influencer le/s conditions locales, en apportant chaleur, sécheresse et poussières sahariennes

II.2.3 L'hydrodynamisme marin et côtier

II.2.3.1. La Bathymétrie de la zone :

L'étude bathymétrique de la zone offshore Skikda-Annaba, réalisée à travers un levé sismique 3D couvrant environ 2 000 km², fournit des informations précieuses sur la topographie sous-marine et ses implications pour les activités offshore (document interne,2018) La majeure partie de la zone présente un fond marin relativement plat, avec des profondeurs dépassant 2 500 m. Toutefois, une variation marquée est observée au sud-est, où la profondeur passe brutalement de 400 m à 2 900 m, créant des pentes abruptes et de petits canyons sous-marins.

L'analyse détaillée des profondeurs révèle que la zone d'étude se compose de plusieurs secteurs distincts. Dans la zone principale du levé sismique, la profondeur minimale est d'environ 380 m et atteint un maximum de 2 890 m, tandis que dans la zone de manœuvre, les profondeurs varient entre 150 m et 2 900 m. La pente du fond marin est globalement inférieure à 5 %, sauf au niveau de la côte et du plateau continental, où elle peut atteindre jusqu'à 40 %. L'identification de ces pentes et de ces reliefs est essentielle pour comprendre la dynamique hydrodynamique de la région, notamment la circulation des courants et l'évolution des dépôts sédimentaires.

Un aspect clé de cette étude est la mise en évidence de plusieurs canyons sous-marins situés en face de la péninsule entre Annaba et Skikda. Ces formations jouent un rôle crucial dans le transport des sédiments et influencent directement la dynamique hydrologique locale. L'intégration de ces données bathymétriques permet ainsi d'optimiser l'implantation des infrastructures offshore, d'anticiper les contraintes liées à l'ancrage et à la stabilité des équipements sous-marins, et de mieux évaluer les risques environnementaux associés aux activités de forage.

Une modélisation 3D de la bathymétrie, avec une échelle verticale exagérée pour une meilleure visualisation, met en évidence ces reliefs sous-marins et offre une compréhension plus fine des contraintes géophysiques de la zone. Ces informations sont cruciales pour la planification et la gestion des opérations pétrolières en mer, en garantissant à la fois la sécurité des installations et la préservation de l'environnement marin (document interne,2018)

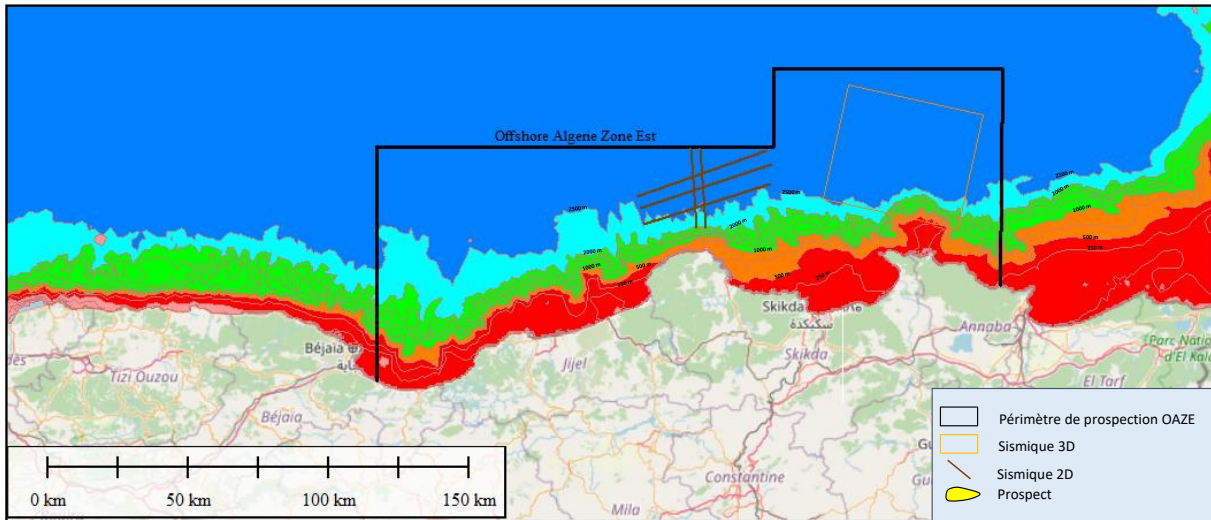


Figure 27: Carte bathymétrique du périmètre de prospection offshore entre Skikda et Annaba (Zone Est – OAZE) (incluant les zones de sismique 2D, sismique 3D et les prospects identifiés) (Benabdelmoumen.s, 2025, données interne)

II.2.3.2. Circulation océanographique dans la zone d'étude :

La circulation des masses d'eau en Méditerranée est largement influencée par l'entrée d'un flux d'eau atlantique (Atlantic Water, AW) via le détroit de Gibraltar, estimé entre 0,5 et 1 Sv. Cette eau, relativement fraîche (15 à 16°C) et peu saline (36 à 37 unités de salinité), circule principalement en surface entre 0 et 200 m de profondeur. En progressant d'ouest en est, ses caractéristiques évoluent sous l'influence des échanges avec l'atmosphère et des interactions avec les autres masses d'eau méditerranéennes, entraînant une augmentation progressive de sa salinité.

En longeant les côtes algériennes, l'AW se divise en deux branches : l'une se dirige vers le nord tandis que l'autre continue son parcours vers le bassin oriental. Cette circulation suit un schéma cyclonique dans les deux bassins méditerranéens. Plus à l'est, en mer Levantine, une partie de cette eau subit un processus de plongée entre 300 et 400 m de profondeur, formant ainsi l'eau levantine intermédiaire (Levantine Intermediate Water, LIW). Sous l'effet de la force de Coriolis, la LIW longe les pentes continentales nord avant de rejoindre le bassin occidental en passant par le détroit de Sicile. Une partie de cette masse d'eau est piégée par le courant algérien, tandis qu'une autre poursuit son chemin vers la mer Liguro-Provençale. Une fraction de la LIW retourne vers l'Atlantique par le détroit de Gibraltar, à environ 300 m de profondeur, avec un débit estimé à $0,88 \text{ Sv} \pm 0,06 \text{ Sv}$.

Durant l'hiver, des vents secs et froids soufflent sur le nord de la Méditerranée, provoquant un refroidissement intense et une forte évaporation de l'eau de surface. Ce phénomène entraîne la formation d'eaux denses qui plongent vers les profondeurs dans des zones spécifiques comme le gyre de Rhodes, le nord de la mer Égée, le sud de l'Adriatique et le nord du bassin occidental. Ces eaux profondes se déplacent sans véritable mélange entre les deux bassins méditerranéens, car la faible profondeur du détroit de Sicile limite les échanges. Ainsi, deux masses distinctes se

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

forment : l'eau profonde ouest-méditerranéenne (WMDW) et l'eau profonde est-méditerranéenne (EMDW).

Dans le bassin algérien, la circulation est dominée par le courant algérien, caractérisé par des instabilités baroclines qui engendrent la formation de tourbillons anticycloniques, pouvant atteindre une centaine de kilomètres de diamètre. Ces structures quasi-permanentes, bien visibles grâce aux observations satellitaires de température et de salinité, influencent fortement la dynamique des eaux de surface et leur mélange. Des études basées sur les trajectoires de profileurs ARGO ont révélé l'existence de deux gyres cycloniques dans le bassin algérien, à l'ouest et à l'est. Ces gyres piègent les eaux dans une circulation cyclonique, renforçant ainsi le transport des masses d'eau et leur interaction avec les tourbillons du courant algérien. (Document interne,2018)

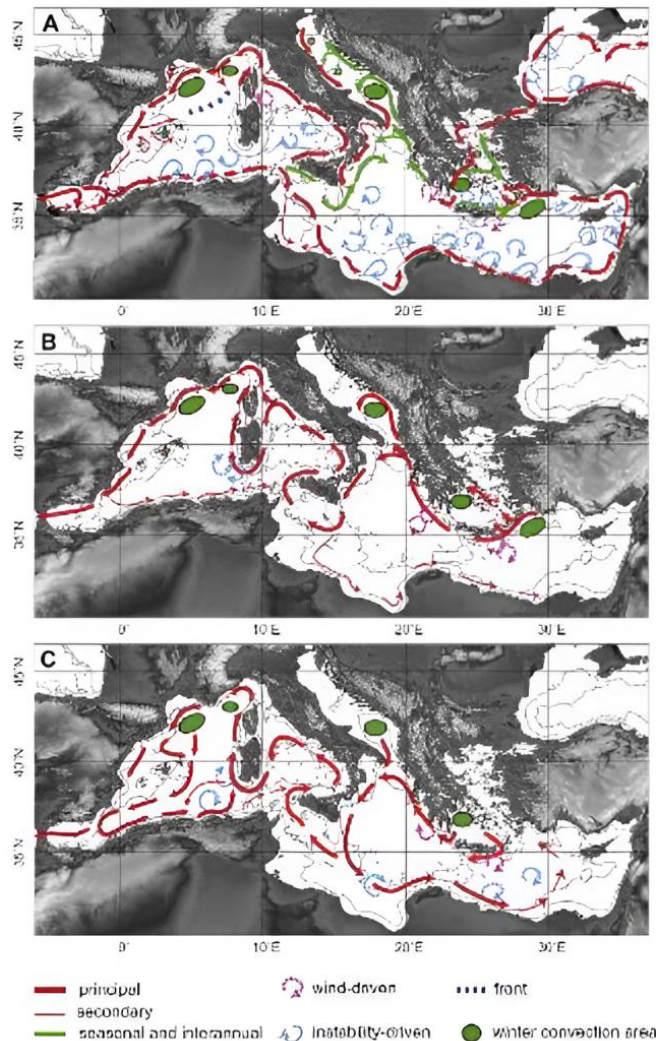


Figure 28: La circulation en Méditerranée des : (A) Eaux de surface, (B) Eaux intermédiaires et (C) Eaux profondes. Les traits noirs représentent les isobathes de 1000 m et 2000 m (MERMEX Group, 2011)

II.2.3.3- les vents dans la région de Skikda :

Les conditions de vent dans la région de Skikda ont été analysées à partir des données extraites de la base WaveClimate, couvrant la période 1992 à 2021, avec un pas de temps de 3 heures. Ces données ont permis de générer, à l'aide du logiciel MIKE 21, des roses des vents saisonnières et annuelles (Figure 29). A partir de ces figures, une analyse détaillée de ces roses des vents permet d'examiner les particularités des conditions de vent au cours des différentes saisons, notamment la direction dominante et les variations d'intensité mettant en évidence les directions dominantes et l'intensité des vents.

- **En Été** : Le vent souffle principalement du nord et nord-ouest, avec une intensité généralement faible à modérée (entre 1,3 et 7,1 m/s), comme l'indiquent les teintes bleu-violet sur le diagramme. Les vents forts sont rares et les conditions calmes représentent 2,77 % du temps, ce qui fait de l'été la saison la moins venteuse.

- **Automne** : La situation est similaire à celle de l'été, avec des vents dominants du nord/nord-ouest et une intensité principalement faible à modérée. Le taux de calme est de 4,28 %, légèrement supérieur à celui de l'été, mais toujours faible dans l'ensemble.

- **Hiver** : Il s'agit de la saison avec les vents les plus puissants, marquée par une direction prédominante nord-ouest. Les segments verts sur la rose des vents témoignent de vitesses atteignant 14 à 16 m/s. Le pourcentage de calme reste bas (3,37 %), malgré une activité éolienne plus marquée.

- **Printemps** : Les vents conservent leur orientation nord/nord-ouest, avec une intensité modérée, intermédiaire entre l'hiver et l'été. Le taux de calme est de 3,85 %, illustrant une transition progressive vers les régimes plus calmes de l'été.

Année complète : La rose des vents annuelle confirme les tendances saisonnières observées. Les vents dominants proviennent du nord-ouest et du nord-est, avec des vitesses pouvant atteindre jusqu'à 23,2 m/s, notamment dans le secteur nord-ouest. Les conditions calmes représentent 4,43 % du temps, ce qui témoigne d'un régime de vent actif et structuré tout au long de l'année.

En conclusion les vents les plus dominants dans la région de Skikda proviennent principalement du secteur nord à nord-ouest tout au long de l'année. L'hiver est marqué par des vents forts et bien orientés, tandis que l'été est la saison la plus calme, avec des vents plus faibles et peu d'événements intenses.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

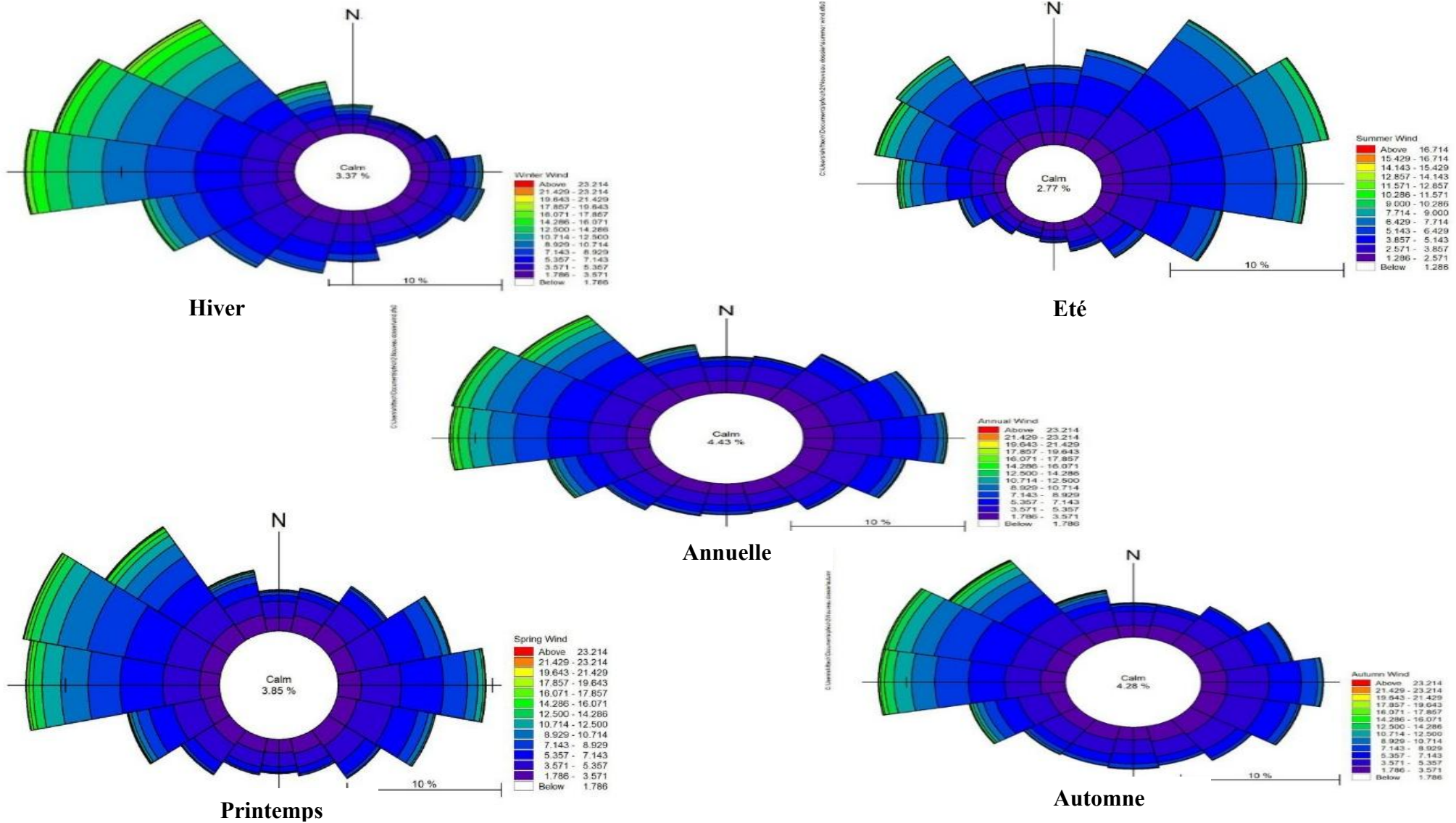


Figure 29: Roses des vents saisonnière et annuelle au large de la baie de Skikda (1992-2022) (MIKE21)

II.2.3.4 les houles dans la région de Skikda :

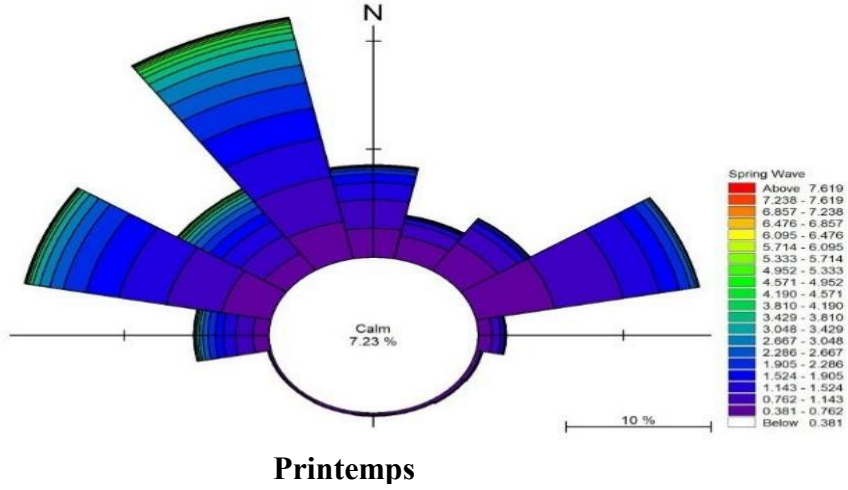
Les caractéristiques de la houle dans la région de Skikda ont été étudiées à partir des données climatiques issues de la base WaveClimate, couvrant la période de 1992 à 2022 avec un pas de temps de 3 heures. Ces données ont permis de générer des roses des houles ("wave roses") saisonnières à l'aide du logiciel MIKE 21, offrant une visualisation claire des directions dominantes et des hauteurs significatives des vagues selon les saisons.

L'analyse conjointe de ces roses de houle et des données statistiques disponibles permet de décrire de manière précise le régime de houle observé dans la région de Skikda selon une approche saisonnière,

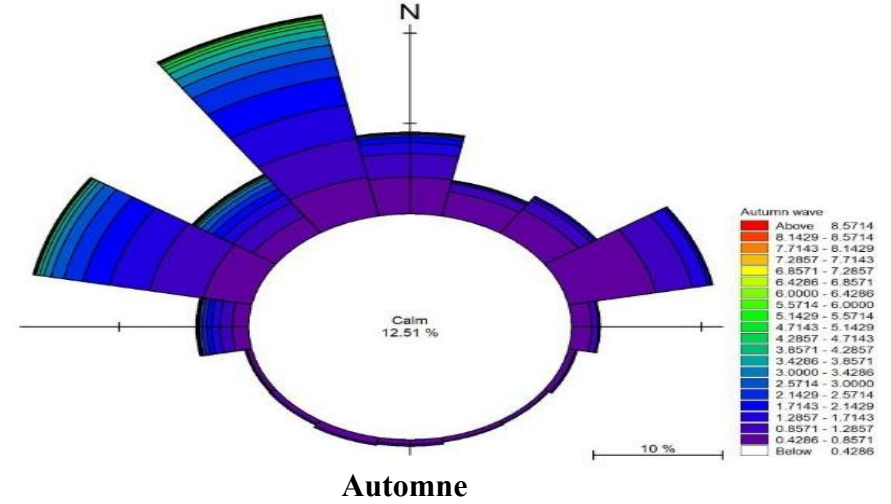
- Au **printemps**, les houles dominantes proviennent du nord et du nord-ouest, avec une hauteur maximale atteignant 7,6 mètres. Cette saison se distingue par des vagues relativement intenses et fréquentes, avec une proportion de 7,23 % du temps classée comme conditions calmes. Cela reflète une période intermédiaire où l'activité houleuse reste marquée par des hauteurs moyennes à élevées.
- Pendant l'été, la direction des houles reste similaire (nord/nord-ouest), mais leur intensité diminue notablement. La hauteur maximale des vagues atteint 3,75 mètres, ce qui en fait la saison la moins énergétique. Les conditions calmes ne représentent que 4,01 % du temps, ce qui indique une mer souvent agitée mais avec des vagues de faible puissance. L'été constitué donc une période de relative accalmie sur le plan hydrodynamique.
- En automne, on observe une intensification des houles, toujours orientées principalement vers le nord et le nord-ouest. Les vagues peuvent atteindre jusqu'à 8,57 mètres, avec 12,51 % du temps en conditions calmes. Cette saison marque une phase de transition vers des conditions plus sévères, annonçant les fortes perturbations hivernales à venir.
- Enfin, en hiver, les houles sont exclusivement orientées vers le nord et peuvent atteindre une hauteur maximale de 8,35 mètres. Malgré un pourcentage élevé de conditions calmes (19,24 %), les événements de houle observés durant cette saison sont parmi les plus intenses de l'année, avec une forte concentration directionnelle. L'hiver est donc marqué par une dynamique extrême et ponctuelle mais potentiellement très impactante.
- En conclusion L'analyse saisonnière du régime de houle à Skikda révèle une variabilité significative des conditions maritimes au cours de l'année. Les houles se montrent plus énergétiques durant les saisons d'automne et d'hiver, tandis qu'elles sont généralement plus modérées en été.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

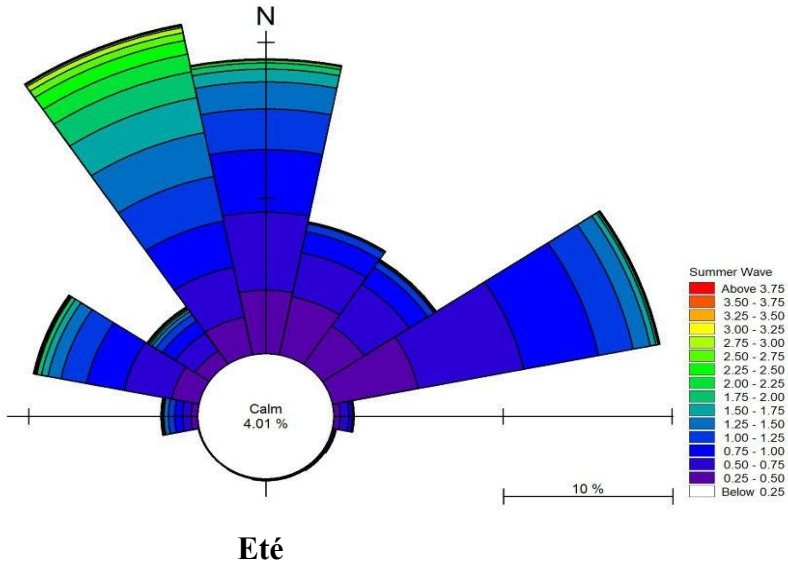
C:\Users\p\h\Documents\p\h\2\Nouveaux documents\spring wave.dwg



C:\Users\p\h\Documents\p\h\2\Nouveaux documents\autumn wave.dwg



C:\Users\p\h\Documents\p\h\2\Nouveaux documents\summer wave.dwg



C:\Users\p\h\Documents\p\h\2\Nouveaux documents\winter wave.dwg

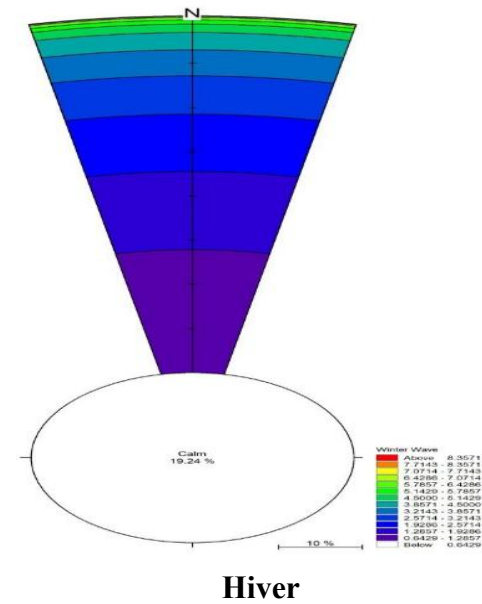


Figure 30: Roses des houles saisonnières au large de la baie de Skikda (1992-2022) (MIKE21)

II.2.3.5. Détermination de la période propice au forage offshore dans la région

L'analyse des données météorologiques et océaniques entre 1992 et 2021 montre que les conditions en mer varient fortement selon les saisons. L'été se caractérise par des vents modérés soufflant du nord à nord-ouest (1,3 à 7,1 m/s) et des houles peu énergétiques, avec des hauteurs de vagues n'excédant pas 3,75 m. En revanche, l'hiver présente les conditions les plus sévères : vents violents pouvant atteindre 23,2 m/s et houles dépassant parfois les 8 mètres, ce qui augmente considérablement les risques techniques en mer. Le printemps et l'automne constituent des périodes intermédiaires, mais l'automne marque déjà un retour de l'agitation, notamment en termes de houle.

À ces facteurs naturels s'ajoutent des contraintes socio-économiques. En effet, entre juin et août, l'activité de pêche est à son maximum, notamment pour les espèces comme les sardines et le thon. Cette période correspond aussi à un pic de fréquentation touristique dans les zones côtières comme Skikda, où le trafic maritime et les activités nautiques se multiplient. La présence d'espèces marines sensibles (reproduction et migration) de mai à juillet impose également des précautions écologiques supplémentaires.

Sur le plan technique, la fenêtre juillet-octobre offre des conditions nettement plus favorables pour les opérations en mer : la mer est plus stable, les houles plus faibles, et les interruptions dues au mauvais temps sont rares. Cela facilite la mobilisation logistique, les transferts maritimes, ainsi que l'installation et le déroulement des phases critiques du forage (BOP, colonne montante, cimentage...).

En croisant l'ensemble de ces éléments, on estime que la période idéale pour initier un forage offshore dans la région pourrait se situer entre la fin du mois d'août et la mi-octobre. Cette fenêtre temporelle permettrait d'éviter les pics de vent et de houle, de limiter les interférences avec les activités halieutiques et touristiques, et d'optimiser les conditions logistiques et opérationnelles en mer. La figure ci-dessous présente un organigramme synthétisant les principales contraintes naturelles, humaines et techniques, et venant justifier ce choix de période

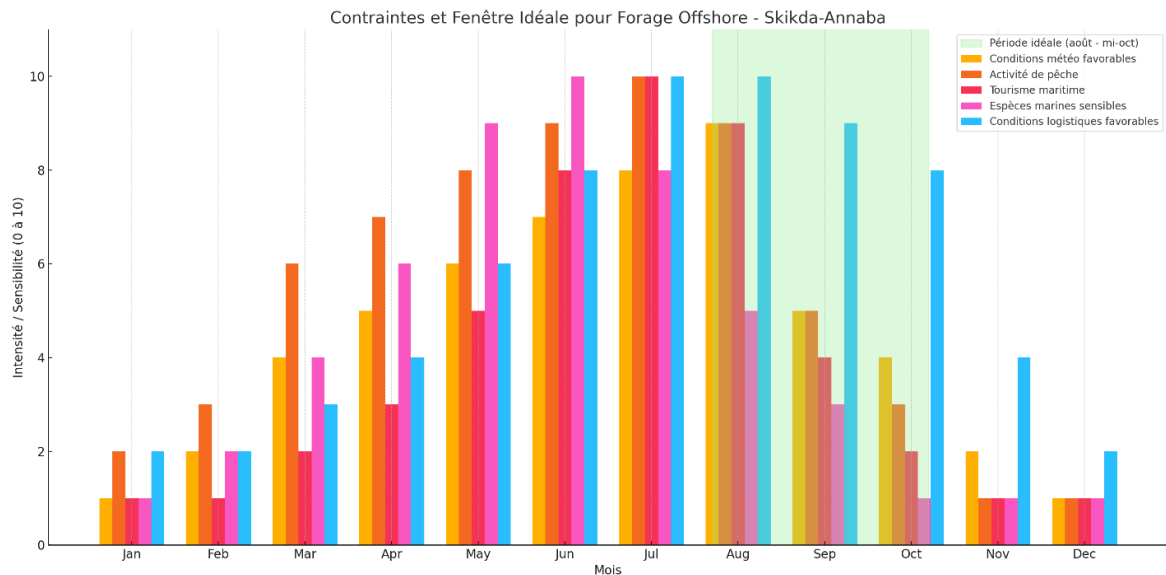


Figure 31: Organigramme montrant les contraintes et la fenêtre idéale pour effectuer un forage dans la région de Skikda-Annaba (Organigramme réalisé à titre illustratif sur la base d'une analyse personnelle des contraintes identifiées dans la zone d'étude.)

II.2.4. Les risques sismiques et climatiques

L'analyse des risques sismiques et climatiques dans le périmètre Skikda–Annaba repose sur les données internes fournies lors du stage (ENI Algeria Exploration BV, 2018)

La sismicité de la zone d'étude se concentre principalement le long de la limite entre les domaines externes et internes du noyau de Petite Kabylie. Deux zones majeures peuvent être distinguées : la région Nord-Constantine, caractérisée par l'activité de la faille Nord-Constantinoise (accident M'cid Aïcha–Debar), et la région d'Azzaba, dont la sismicité semble liée à l'activité des sources hydrothermales associées à la faille quaternaire de Djebel Safia (Abacha, 2015). Dans la partie offshore, il est important de noter l'occurrence du séisme historique du 22 août 1856 au large de Djidjelli, considéré comme l'un des événements sismiques les plus puissants enregistrés dans la région avant 1900. L'analyse de la distribution de Gutenberg-Richter révèle pour cette zone une valeur $b = 1$, ce qui traduit une activité sismique significative, contrairement aux valeurs plus faibles ($b = 0,5$) relevées par Pelaez et al. (2005) dans d'autres secteurs voisins. Cela indique que la région présente un risque non négligeable d'occurrence de séismes de forte magnitude, en particulier à l'interface entre la Petite Kabylie et le bassin Constantine-Mila, ainsi qu'entre la Petite Kabylie et le bassin d'Annaba.

Concernant le bassin d'Annaba, ce dernier est bordé par les failles du Djebel Safia à l'ouest et du Cap Rosa à l'est. Cette zone se distingue par une relative asismicité, hormis son extrémité occidentale affectée par la sismicité récente d'Azzaba. Le séisme du 2 décembre 1961, de magnitude 5,5 et d'intensité VI sur l'échelle MSK, est le principal événement notable enregistré dans le golfe d'Annaba (ENI Algeria Exploration BV, 2018). Des travaux de sismique haute résolution ont également mis en évidence des structures actives sous-marines témoignant d'une réactivation compressive récente, bien que l'absence d'enregistrements sismiques soit probablement due à une couverture instrumentale historiquement limitée (Abacha, 2015).

Sur le plan climatique, la région de Skikda–Annaba est soumise aux caractéristiques typiques du climat méditerranéen, avec des hivers doux et humides, et des étés chauds et secs (ONM, 2023). Toutefois, en milieu marin, ces conditions se traduisent par des risques accrus d'événements

extrêmes, tels que les tempêtes de mer et les fortes houles. Les analyses des roses de houle montrent que la région est majoritairement exposée à des houles venant du nord et du nord-ouest, avec des hauteurs maximales atteignant 8,5 mètres en automne et en hiver, et une intensité nettement plus faible durant l'été (ENI Algeria Exploration BV, 2018). Ces caractéristiques marines sont critiques pour la stabilité des infrastructures offshore, notamment lors des opérations de forage.

La combinaison de la sismicité potentielle, en particulier autour de failles actives, et des aléas climatiques liés aux conditions marines sévères, impose donc une vigilance accrue lors de la planification des opérations de forage exploratoire offshore. Une prise en compte rigoureuse de ces risques est indispensable pour assurer la sécurité des installations, limiter les impacts environnementaux en cas d'incident, et garantir la durabilité des projets développés dans cette zone stratégique du littoral algérien.

Cette carte (figure 32), issue du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG), présente la répartition des séismes enregistrés dans le nord de l'Algérie. On y observe une concentration notable d'événements sismiques dans la région de Skikda–Annaba, soulignant la vulnérabilité sismique de cette zone, notamment en raison de la présence de failles actives telles que la faille Nord-Constantinois et la faille de Djebel Safia.

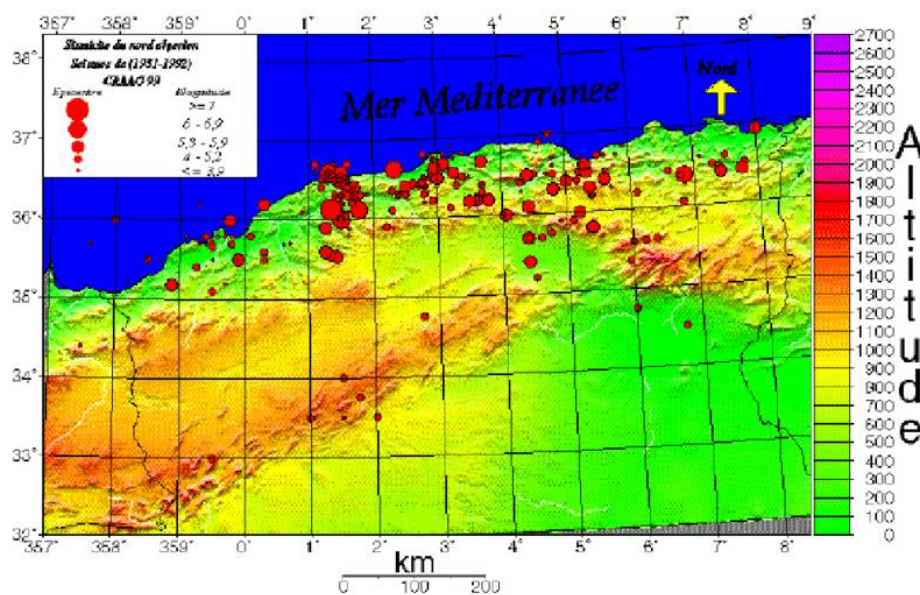


Figure 32: Carte de la sismicité du nord de l'Algérie (CRAAG, 1999)

II.2.5. Les écosystèmes marins et côtiers

La côte algérienne se distingue par une grande richesse biologique, aussi bien en termes de faune que de flore, lorsqu'on la compare aux autres secteurs de la Méditerranée. Cette biodiversité remarquable concerne tant les espèces que les habitats, et fait de la zone côtière algérienne un réservoir naturel d'importance régionale et internationale.

II.2.5.1. Biodiversité globale de la côte algérienne

La côte orientale algérienne, particulièrement entre Skikda et El Kala, présente des paysages remarquables, alternant côtes rocheuses et plages sableuses, et un plateau continental plus large au

niveau des baies de Béjaïa et de Jijel.(document interne). La diversité des habitats marins est exceptionnelle sur la côte algérienne, comprenant notamment les herbiers de *Posidonia oceanica*, les trottoirs à vermetes et les formations de coralligène (Dauvin J.-C., 2013). Il existe également 6488 espèces qui ont été recensées et réparties comme suit (Refes, 2011):

- 1297 espèces d'algues,
- 4 espèces de phanérogames marines,
- 4753 espèces d'invertébrés,
- 422 espèces de poissons,
- 3 espèces de tortues marines,
- 9 espèces de mammifères marins.

II.2.5.2 La flore marine

Le rapport final du projet MATE-PNUD-FEM sur la biodiversité et les changements climatiques (2015) fournit un inventaire précieux de la richesse floristique présente sur la côte algérienne. Selon ce rapport, cette bande côtière compte une flore marine diversifiée qui est constituée d'environ 802 espèces réparties ainsi:

- **Algues unicellulaires (303 espèces)**, qui constituent principalement le phytoplancton et jouent un rôle clé dans la production primaire marine en assurant la photosynthèse et en servant de base à la chaîne alimentaire.
- **Algues macrophytes (495 espèces)**, qui comprennent des organismes multicellulaires plus grands, visibles à l'œil nu, et qui forment souvent de véritables prairies sous-marines essentielles à l'équilibre écologique. Elles contribuent à l'oxygénation des eaux, offrent un abri à de nombreuses espèces marines, et participent au piégeage des sédiments.
- **Algues de spermatophytes (4 espèces)**, c'est-à-dire des plantes à graines adaptées au milieu marin, dont certaines participent à la formation d'herbiers côtiers. Ces plantes vasculaires jouent un rôle écologique majeur en stabilisant les fonds marins et en limitant l'érosion côtière.

Concernant le phytoplancton, les dinoflagellés représentent le groupe prédominant sur la côte algérienne (Chikr, 2014). Ces organismes microscopiques, souvent mobiles grâce à leurs flagelles, sont réputés pour leur capacité à produire des efflorescences algales, parfois toxiques. Ils sont suivis en importance par les diatomées, qui sont des algues unicellulaires recouvertes de frustules siliceux, et qui jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone marin. D'autres groupes, tels que les silicoflagellés, sont également présents, bien qu'en moindre abondance. Par ailleurs, des épisodes de blooms côtiers de coccolithophoridés ont été recensés, notamment en période estivale. Ces algues unicellulaires, recouvertes de plaques calcaires appelées coccolithes, contribuent au cycle du carbone en favorisant la sédimentation du carbone organique vers les fonds marins.

En ce qui concerne les herbiers marins, les zones littorales de l'Algérie se distinguent par la présence d'herbiers à *Posidonia oceanica* et à *Cymodocea nodosa*. *Posidonia oceanica* est une plante sous-marine endémique de la Méditerranée, reconnue pour former de vastes prairies sous-marines qui abritent une biodiversité exceptionnelle. Cette espèce est un indicateur clé de la qualité

environnementale des eaux côtières. *Cymodocea nodosa*, plus tolérante aux variations de salinité et de turbidité, colonise généralement des zones plus sableuses ou perturbées.

Par ailleurs, 263 espèces de macroalgues ont été recensées le long de la côte algérienne (Ould-Ahmed, 2015), Cette diversité se répartit comme suit

- **Les Rhodobiontes** ou algues rouges (150 espèces), caractérisées par leur grande variété morphologique et leur capacité à coloniser différentes profondeurs grâce à leur pigment phycoérythrine.
- **Les Chromobiontes** ou algues brunes (59 espèces), dominantes dans les zones tempérées et souvent associées à des structures algales robustes telles que les forêts de kelp dans d'autres régions.
- **Les Chlorobiontes** ou algues vertes (51 espèces), qui prospèrent généralement dans les eaux côtières bien éclairées et peuvent s'adapter à des variations de salinité.

Parmi les algues macrophytiques, les **Cystoseires** méritent une attention particulière. Ces algues brunes appartenant au genre *Cystoseira* forment des habitats structurants essentiels pour de nombreuses espèces marines. Leur présence est un indicateur de bonne santé écologique, car elles sont sensibles à la pollution et à l'eutrophisation

II.2.5.3. La faune marine

Le Poisson

L'inventaire ichthyologique du secteur oriental de la côte algérienne recense 303 espèces, comprenant 1 lamproie, 52 poissons cartilagineux et 250 poissons osseux. Parmi les espèces rares, on trouve la sole *Solea senegalensis*, les hippocampes (*Hippocampus ramulosus*) et plusieurs espèces de mérus (*Epinephelus caninus*, *Epinephelus costae*, *Epinephelus marginatus*, *Polyprion americanus*), qui sont considérées comme très menacées en raison de la pêche et de la dégradation de leurs habitats naturels (Refes, 2011). Les zones de capture de ces espèces se situent respectivement entre 100-200 m et 200-800 m de profondeur.

Les espèces les plus abondantes le long de la côte algérienne, et par ordre d'importance dans les pêcheries algériennes, comprennent :

- *Sardina pilchardus* (sardine)
- *Sardinella aurita* (allache)
- *Trachurus trachurus* (saurel)
- *Boops boops* (bogue)
- *Pagellus acarne* (mafroune)
- *Mullus barbatus* (rouget de vase)
- *Merluccius merluccius* (merlu)

Les crevettes rose (*Parapeneus longirostris*) et rouges (*Aristeus antennatus* et *Aristeomorpha foliacea*) sont également abondantes à des étages bathymétriques différents, respectivement entre 100-200 m et 200-800 m (Refes, 2011). La zone du projet présente une forte concentration de thon pendant la période de pêche autorisée par l'ICCAT, soit du 26 mai au 24 juin (Le Temps, 2018).

Le Benthos

En ce qui concerne le macrofaune benthique des substrats meubles, 209 espèces ont été recensées dans la zone de Annaba et 146 dans celle de Skikda (Dauvin J.-C., 2013). Ces espèces se répartissent en environ 50 % de polychètes, 30 % de crustacés et 20 % de mollusques. Parmi les mollusques, environ 45 % sont des amphipodes et des bivalves, tandis qu'environ 10 % sont des décapodes.

Les Mammifères marins

La côte algérienne abrite 9 espèces de mammifères marins, dont 8 sont encore observées aujourd'hui (IUCN, 2012). Ces espèces ont également été signalées dans la zone d'étude. On cite parmi elles :

- *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) : le grand dauphin
- *Stenella coeruleoalba* (Meyen, 1833) : le dauphin bleu et blanc
- *Globicephala melas* (Traill, 1809) : le dauphin pilote
- *Ziphius cavirostris* (G. Cuvier, 1823) : la baleine de Cuvier ou baleine à bec de Cuvier, ou baleine à bec d'oie
- *Balaenoptera physalus* (Linnaeus, 1758) : le rorqual commun
- *Grampus griseus* (G. Cuvier, 1812) : le Dauphin de Risso
- *Delphinus delphis* (Linnaeus, 1758) : le dauphin commun
- *Physeter macrocephalus* (Linnaeus, 1758) : le cachalot
- Le *Monachus monachus* (Hermann, 1779) : le phoque-moine, qui n'a plus été observé sur les côtes algériennes depuis plusieurs décennies, est protégé par la loi depuis 1983.

D'après les 21 observations enregistrées par la base de données OBIS Seamap (Halpin et al., 2009) entre 1990 et 2013, les espèces suivantes ont été confirmées dans la zone d'étude :

- *Delphinus delphis*
- *Grampus griseus*
- *Physeter macrocephalus*
- *Stenella coeruleoalba*
- *Ziphius cavirostris*

Lors d'une mission de pêche aux grands migrateurs à bord d'un navire japonais, il a été signalé des rencontres de dauphins par paire, et d'un cachalot, entre la baie de Jijel et d'Annaba, ainsi que des requins bleus, espèces très courantes dans la baie de Skikda (Sahi, 2003) (Figure 33).

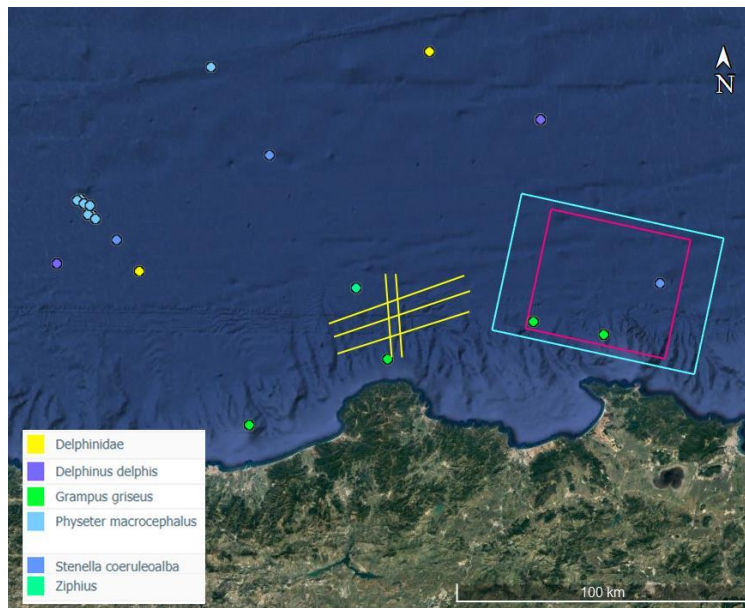


Figure 33: Observations de mammifères marins dans la zone d'étude dans la période (1990-2013) (OBIS Seamap)

Les Tortues marines :

La mer Méditerranée abrite des populations locales de deux espèces principales de tortues marines: la tortue caouanne (*Caretta caretta*) et la tortue verte (*Chelonia mydas*). Elle est également fréquentée par des tortues originaires des rookeries de l'Atlantique, notamment un grand nombre de tortues caouannes (Encalada et al. 1998, Carreras et al. 2011, Clusa et al. 2014) ainsi que des visiteurs moins fréquents, tels que la tortue luth (*Dermochelys coriacea*) (Casale et al. 2003), les olives vertes ridley (*Lepidochelys olivacea*) et les tortues ridley de Kemp (*L. kempii*) (Tomás & Raga 2008, Carreras et al. 2014, Revuelta et al. 2015) (Casale P., 2018).

Les trois principales espèces de tortues marines de la Méditerranée sont donc :

- la tortue caouanne (*Caretta caretta*) (résidente et visiteur),
- la tortue verte (*Chelonia mydas*) (résidente et visiteur),
- la tortue luth (*Dermochelys coriacea*) (visiteur).

La sous-population méditerranéenne de *Caretta caretta* est inscrite à la liste des espèces "moins préoccupantes", tandis que *Chelonia mydas* est classée en danger et *Dermochelys coriacea* comme vulnérable dans la Liste rouge des espèces menacées de l'UICN.

Dans la zone du projet, l'espèce dominante est la tortue caouanne (*Caretta caretta*), pour laquelle une analyse de la présence possible a été réalisée en s'appuyant sur des données littéraires. La tortue verte et la tortue luth sont considérées comme beaucoup moins fréquentes dans cette zone. De plus, les côtes algériennes ont récemment été identifiées comme une zone d'alimentation océanique potentielle pour *Caretta caretta* (Casale P., 2018). La présence de cette espèce dans la zone d'intérêt a également été confirmée par plusieurs observations réalisées au cours des seize dernières années, totalisant 1 359 observations d'une trentaine d'individus entre 2003 et 2018, lors

de campagnes de surveillance collectées par la base de données OBIS Seamap (Halpin et al., 2009) (Figure 34)

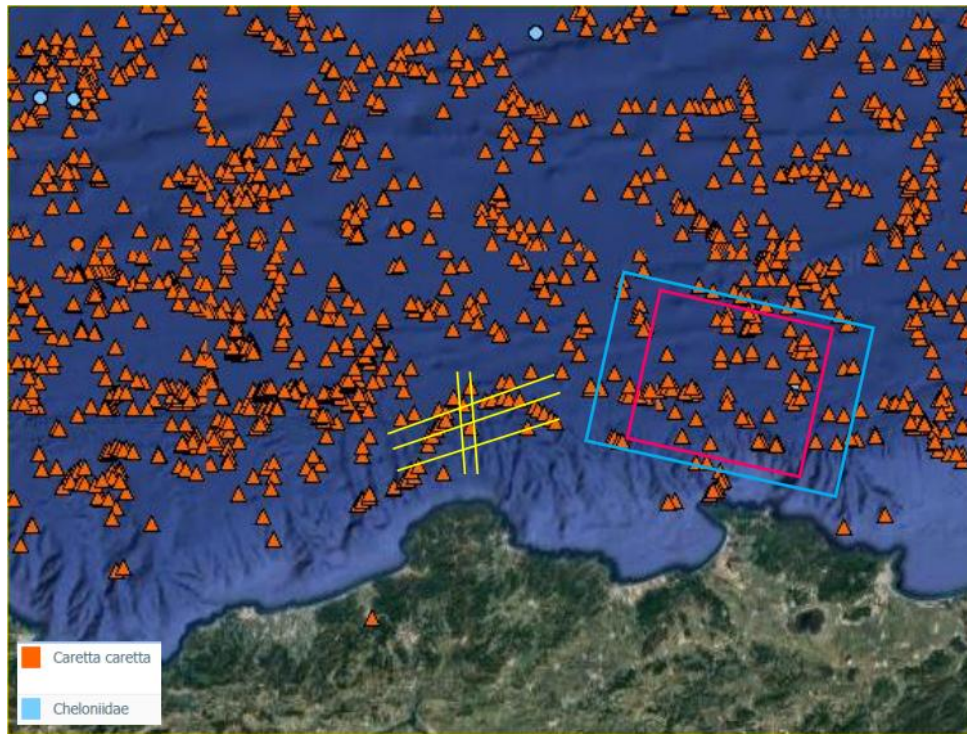


Figure 34: Observations des tortues Marines caouannes dans la zone d'étude entre 2003-2018 (OBIS Seamap).

II.2.5.4 Les espèces marines protégées

L'Algérie a adhéré aux engagements régionaux en matière de conservation de la biodiversité marine en Méditerranée, en ratifiant le Protocole relatif aux aires spécialement protégées et à la diversité biologique en Méditerranée, adopté à Barcelone le 10 juin 1995. Cette ratification a été officialisée par le décret présidentiel n°06-405, publié au Journal officiel de la République algérienne (JORADP n°74 du 22 novembre 2006). Ce protocole constitue un cadre juridique régional essentiel pour la protection des écosystèmes marins et côtiers sensibles ainsi que pour la gestion durable de la biodiversité en Méditerranée.

L'annexe II de ce protocole fournit la liste des espèces protégées dont certaines ont été identifiées dans la zone d'étude ou à proximité (Tableau 5). L'annexe III du protocole susmentionné énumère également les espèces dont l'exploitation est réglementée (Tableau 6). Parmi ceux-ci, nous avons énuméré ceux qui ont été répertoriés sur la côte est algérienne.

CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tableau 6:Listes de l'Annexe II des espèces identifiées dans ou à proximité de la zone d'étude (document interne).

Familles	Espèces	Rareté/Abondance Répartition spatio-temporelle
Magnollophyta	Posidonia oceanica Zostera marina Zostera noltii	Répandue ; on la trouve sur toute la côte Très Rare ; Peu répandue ; elle a été identifiée dans l'ouest de la baie d'Annaba
Phaeophyta	Cystoseira amentacea var. stricta Cystoseira sedoides Cystoseira spinosa	Ces trois espèces ne sont pas rares sur les côtes orientales. Elles ont été identifiées en particulier dans le Parc National de Taza (à l'ouest de la zone).
Rhodophyta	Lithophyllum lichenoides	Répandue sur la côte Algérienne de Béjaïa à Annaba.
Porifera	Aplysina sp. plur. Axinella cannabina Axinella polypoides Ircinia foetida Ircinia pipetta Petrobiona massiliana Tethya sp. plur.	Aucune information disponible sur leur répartition sur la côte algérienne, leur rareté ou abondance
Cnidaria	Astroides calycularis Errina aspera Gerardia savaglia	Aucune information disponible sur leur répartition sur la côte algérienne, leur rareté ou abondance
Echinodermata	Asterina pancerii Centrostephanus longispinus Ophidiaster ophidianus	Espèces relativement rares et répertoriées essentiellement sur les zones centre et Est de la côte algérienne
Bryozoa	Hornera lichenoides	Aucune information disponible sur leur répartition sur la côte algérienne, leur rareté ou abondance
Mollusca	Ranella olearia Charonia lampas Charonia tritonis Dendropoma petraeum Erosaria spurca Gibbula nivosa Lithophaga lithophaga Luria lurida Mitra zonata Patella ferruginea Patella nigra Pholas dactylus Pinna nobilis	Peu d'informations disponibles sur la répartition de ces espèces sur la côte algérienne, leur rareté ou abondance. Sauf : Dendropoma petraeum identifiée dans la région centre sur les trottoirs à vermetes. Patella ferruginea : Identifiée au parc marin des Iles Habibas (côte occidentale algérienne). Pinna nobilis et Pinna rudis sont relativement abondantes sur la côte algérienne. Elles ont été identifiées dans les parcs marins de la côte orientale (parc national de Taza et parc national d'El Kala).

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

	Pinna rudis Schilteria achatidea Tonna galea Zonaria pyrum	
Crustacea	Ocypode cursor Pachylasma giganteum	Aucune information disponible sur leur répartition sur la côte algérienne, leur rareté ou abondance.
Pisces	Cetorhinus maximus Carcharodon carcharias Hippocampus ramulosus Hippocampus hippocampus Mobula mobular	Ces espèces de poissons sont très rares sur la côte algérienne. Le requin blanc semble surtout cantonné à la côte orientale.
Reptiles	Caretta caretta Dermochelys coriacea	Ces deux espèces de tortue de mer sont rares. Il a été signalé quelques nidifications sur la côte extrême orientale algérienne.
Aves	Pandion haliaetus Calonectris diomedea Diomedea eleonora Falco eleonora Hydrobates pelagicus Larus audouinii Numenius tenuirostris Phalacrocorax aristotelis Puffinus yelkouan Sterna albifrons Sterna bengalensis Sterna sandvicensis	Trois types d'oiseaux de mer : Ceux qui sont présents toute l'année avec une large aire de répartition sur la côte orientale (Calonectris diomedea, Sterna sandvicensis, Larus audouinii, Phalacrocorax aristotelis) Ceux qui sont présents essentiellement à une saison – hiver ou printemps - (Pandion haliaetus, Puffinus yelkouan) Migrateurs que l'on observe surtout dans leurs périodes de passage (Sterna bengalensis, Falco eleonora, Hydrobates pelagicus) Leur abondance est très variable. Les oiseaux nichent sur les falaises ou les îlots de la côte orientale. Leurs petits peuvent être vulnérables alors aux prédateurs.
Mammalia	Balaenoptera physalus Delphinus delphis Globicephala melas Grampus griseus Monachus monachus Physeter macrocephalus Stenellacoeruleoalba Tursiops truncatus Ziphius cavirostris	Trois types d'espèces : - Largement réparties sur la côte et assez fréquentes (Delphinus delphis, Tursiops truncatus, Stenella coeruleoalba, Balaenoptera physalus, Ziphius cavirostris) - Espèces rares et/ou localisées (Globicephala melas, Grampus griseus, Physeter macrocephalus) - Espèces non rencontrées depuis plusieurs décennies (Monachus monachus)

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Tableau 7: Liste des espèces dont l'exploitation est réglementée par le décret n ° 06-405
(document interne)

Cnidaria	Porifera	Crustacea	Echinodermata	Pisces
Antipathes sp. plur. Corallium rubrum	Hippospongia communis Spongia agaricina Spongia officinalis Spongia zimocca	Homarus gammarus Maja squinado Palinurus elephas Scyllarides latus Scyllarus pigmaeus Scyllarus arctus	Paracentrotus lividus	Alosa fallax Anguilla anguilla Epinephelus marginatus Isurus oxyrinchus Petromyzon marinus Prionace glauca Raja alba Sciaena umbra Squatina squatina Thunnus thynnus Umbrina cirrosa Xiphias gladius

II.2.5.5 Les zones humides protégées

Les zones humides algériennes, particulièrement concentrées dans l'extrême nord-est du pays, jouent un rôle écologique fondamental en abritant une biodiversité remarquable. Parmi les sites les plus emblématiques figurent la plaine de Guerbes-Sanhadja (Figure 36), située dans la wilaya de Skikda, et le lac Fetzara (Figure 37), situé dans la wilaya d'Annaba. Ces milieux naturels uniques offrent des paysages étonnants et rares, contribuant fortement à la conservation des écosystèmes méditerranéens (Abdi, 2014).

II.2.5.5.1. Le complexe de zones humides de Guerbes-Sanhadja

Situé au nord-est de l'Algérie, à l'ouest d'Annaba, le complexe de Guerbes-Sanhadja couvre une superficie d'environ 42 000 hectares. Il est reconnu comme l'un des principaux réservoirs de biodiversité du bassin méditerranéen (Abdi, 2014). Ce site, classé zone RAMSAR depuis le 2 février 2001, est d'une grande importance pour l'irrigation, le pâturage et la régulation hydrique locale (Boumezbeur, 2001).

La plaine de Guerbes-Sanhadja constitue un véritable carrefour bioclimatique : les vents dominants apportent en hiver une fraîcheur humide, tandis que l'appauvrissement de la végétation dunaire accentue l'abaissement des températures dans certains habitats aquatiques (Boumezbeur, 2001).

Le relief est relativement plat : 48,5 % des terrains présentent une pente inférieure ou égale à 3 %, et 12,5 % du terrain a une pente de 12,5 %. Les altitudes varient de 0 à 200 mètres. La lithologie locale est dominée par des dépôts alluviaux et éoliens (Toubal et al., 1998). Le complexe abrite une diversité d'habitats, parmi lesquels :

- Des forêts de chêne-liège couvrant 82,24 hectares
- Des forêts de pin maritime
- Une petite zone de Zenaie, un chêne caducifolié s'étendant sur des sols profonds et frais, depuis le niveau de la mer jusqu'à 1800 mètres d'altitude (C.F.S., 2006).

Le réseau hydrologique du site est principalement constitué par l'Oued El Kebir et l'Oued Magroune, ainsi que d'autres petits oueds (Toubal et al., 1998).

Enfin, l'ensemble dunaire du littoral, qui s'étend sur 14 km, contribue également à la richesse écologique du site.

Sur le plan écologique, Guerbes-Sanhadja représente un exemple rare de zones humides naturelles en Méditerranée et au Maghreb. Sa biodiversité est remarquable avec 234 espèces environ de plantes recensées, dont 19 espèces rares et 23 extrêmement rares, en plus de 50 espèces d'oiseaux et 27 espèces d'Odonates (Refes, 2011). Certaines espèces remarquables ont été recensées telles que (Refes, 2011) :

- L'Erismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*), avec une population dépassant 1 % de l'effectif mondial.
- Le Fuligule nyroca.
- La Poule sultane.

Ce complexe est aussi une zone cruciale pour la migration de l'anguille européenne et d'autres espèces marines (mulets, barbeaux), favorisée par l'abondance de ressources alimentaires (Halpin et al., 2009).

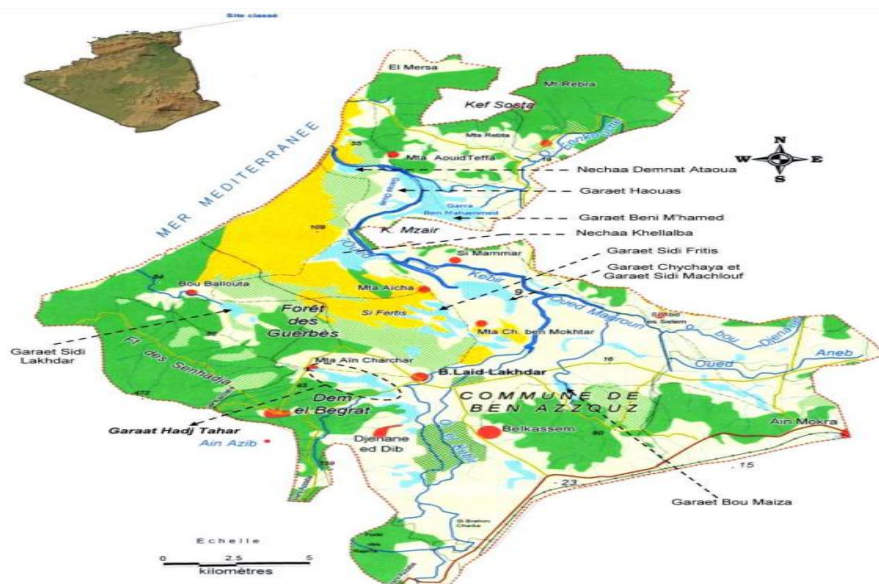


Figure 35: Le complexe de Guerbes-Sanhadja (Oumessaad, 2014)

II.2.5.5.2. Le lac Fetzara

Le lac Fetzara est localisé à 18 km au sud-ouest de la ville d'Annaba et à seulement 14 km de la mer Méditerranée (Figure 37). Il s'étend sur 17 km d'est en ouest et atteint jusqu'à 13 km dans sa plus grande largeur. Le lac est encadré au nord par le massif de l'Edough et au sud par les collines d'Aïn Berda. Tandis qu'à l'est et à l'ouest, il est entouré par des cordons dunaires. Ce lac représente une zone humide naturelle rare et typique de la région méditerranéenne. Sa superficie importante et son caractère partiellement temporaire en font un habitat très attractif pour de nombreuses espèces. Le lac Fetzara joue un rôle écologique stratégique en complément des zones humides du complexe d'El Kala. À la fin de l'hiver, lorsque l'élévation du niveau d'eau rend difficile

l'alimentation des espèces herbivores dans les lacs Oubeira et Tonga, un grand nombre d'anatidés migrent vers le lac Fetzara (Karima Mellouk & Najet Aroua, 2009).

Le site est reconnu pour son importance internationale puisqu'il accueille régulièrement 1 % des populations mondiales de plusieurs espèces : le Canard siffleur (*Anas penelope*), l'Oie cendrée (*Anser anser*), le Canard souchet (*Anas clypeata*) et le Canard chipeau (*Anas strepera*) (Karima Mellouk & Najet Aroua, 2009). Ainsi, le lac Fetzara constitue une zone essentielle pour la conservation de l'avifaune migratrice dans le nord-est algérien.



Figure 36: La Situation géographique du lac Fetzara (Mellouk, Aroua.2015)

II.2.6. Les paramètres physiques et biogéochimiques des eaux marines

II.2.6.1. Les paramètres physiques :

Les caractéristiques physiques de la colonne d'eau dans la zone d'étude révèlent une forte variabilité saisonnière, principalement observée au niveau des profils de température et de salinité. Les données issues de MEDATLAS (2002), représentées par les figures ci-dessous, permettent de dégager les principales tendances verticales et temporelles.

La thermocline saisonnière, définie comme la zone de transition rapide de température en fonction de la profondeur, présente une évolution notable au fil de l'année. En hiver, elle s'étend jusqu'à environ 100 mètres de profondeur, signe d'une homogénéisation verticale efficace induite par le refroidissement de surface et l'action des vents. À l'inverse, durant l'été, cette thermocline se

resserre fortement dans les 10 premiers mètres en raison du réchauffement intense de la surface par le rayonnement solaire, générant ainsi une stratification thermique marquée. Ce phénomène se traduit par une augmentation sensible des températures dans les couches superficielles : alors qu'en hiver, la température en surface varie entre 13 et 14 °C, elle peut atteindre 25 à 26 °C durant la saison estivale. La figure 39 illustre clairement cette dynamique en montrant une hausse rapide de la température dans les 50 premiers mètres entre le printemps et l'été, avec un écart thermique de l'ordre de 11 à 12 °C, ce qui reflète bien l'impact du cycle saisonnier sur la structure thermique de la mer.

Concernant la salinité, les profils étudiés révèlent une stratification en trois couches typiques de la Méditerranée occidentale (figure 40). En surface, on retrouve les eaux atlantiques modifiées (MAW), d'origine océanique, caractérisées par une salinité avoisinante 37,5, qui prédominent jusqu'à environ 100 mètres de profondeur. En-dessous, vers 450 mètres, se situent les eaux levantines intermédiaires (LIW), plus salines, avec des valeurs pouvant atteindre 38,5, traduisant leur origine plus évaporée. Enfin, les eaux profondes ouest-méditerranéennes (WMDW), issues du golfe du Lion, se distinguent par une salinité relativement homogène autour de 38,4 et une température quasi constante de 12,9 °C. Ces eaux profondes, situées au-delà de 500 mètres, présentent une grande stabilité et sont peu affectées par les variations saisonnières. Toutefois, certaines structures de méso-échelle, comme les tourbillons anticycloniques, peuvent induire ponctuellement des mouvements verticaux, entraînant le déplacement de masses d'eau intermédiaires vers des profondeurs plus importantes.

La salinité en surface montre également une variabilité saisonnière notable, particulièrement entre janvier et avril. Un minimum est observé en mars, avec des valeurs inférieures à 36,5, probablement liées aux apports en eau douce provenant des précipitations hivernales et du ruissellement terrestre. Cette baisse temporaire de la salinité en surface s'accompagne d'un affaiblissement de la stratification haline, favorisant les échanges verticaux dans les couches supérieures. En été, à l'inverse, cette stratification s'intensifie parallèlement à celle de la température, limitant davantage les échanges entre les différentes couches de la colonne d'eau

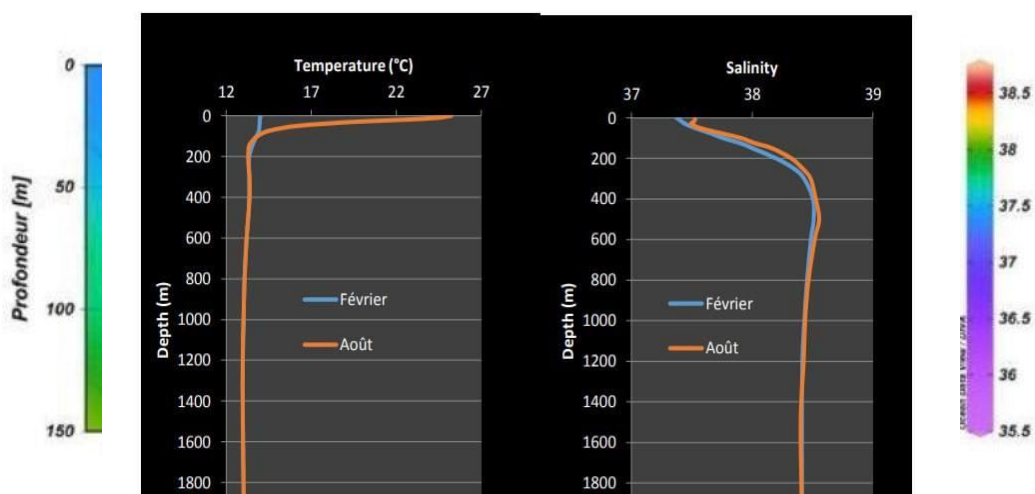


Figure 37: Profils de température et salinité moyens dans la zone d'étude (MEDATLAS, 2002)

II.2.6.2. Les paramètres biogéochimiques :

L'existence de plusieurs provinces biogéochimiques en Méditerranée a été mise en évidence d'après les données de MEDATLAS. La zone d'étude, située dans la province biogéochimique du Sud-est du bassin occidental de la Méditerranée, s'étend des côtes orientales algériennes jusqu'au bassin Sardaigne-Minorque.

- **L'oxygène dissous** : La distribution temporelle de l'oxygène dissous dans cette zone selon la figure 39 montre que, dans les eaux de surface (0-100 m), les concentrations dépassent 5 ml/l, liées à la production primaire et aux échanges air-mer. Cependant, en août, une diminution de

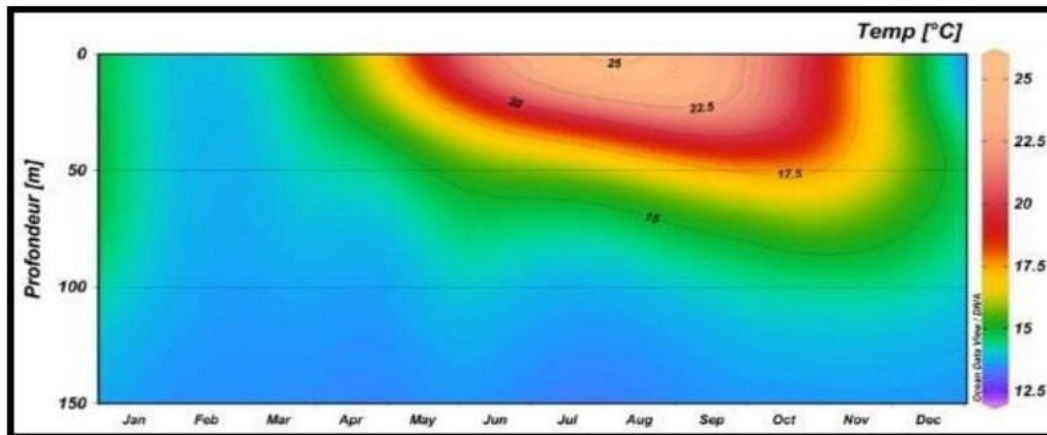


Figure 38: Cycle annuel des températures et salinités entre 0 et 150 m dans la zone d'études (MEDATLAS, 2002)

l'oxygène est observée en surface. Les eaux intermédiaires présentent des concentrations d'O₂ d'environ 4 ml/l, tandis que les eaux profondes du bassin algérien sont bien oxygénées.

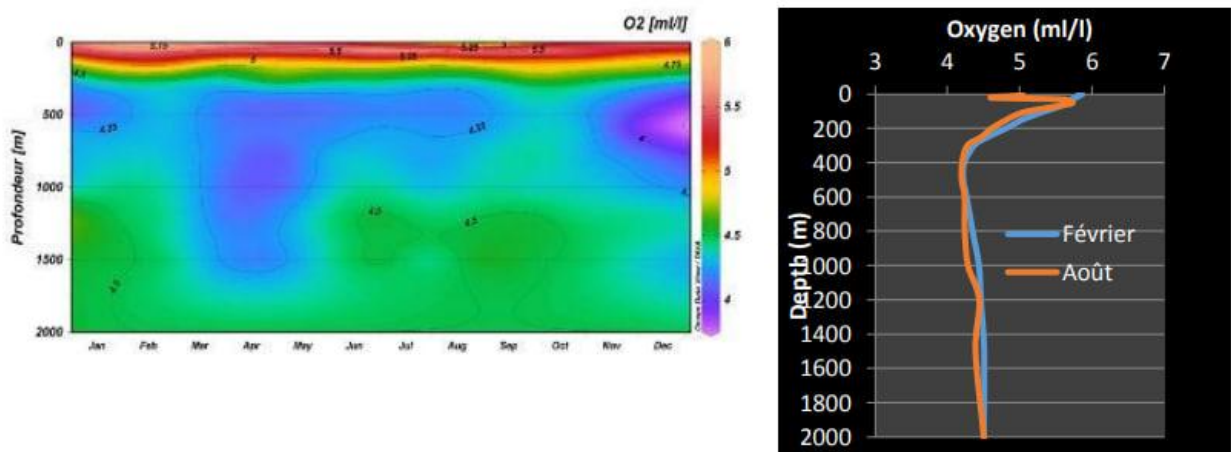


Figure 39: Cycle annuel d'oxygène entre 0 et 2000m (à gauche) et profils moyens d'oxygène dissous en Février et Août (à droite) (MEDATLAS, 2002)

- **La chlorophylle a et les nitrates** : Les cycles annuels de la chlorophylle a et des nitrates, entre 0 et 150 m de profondeur, montrent un maximum de production pendant les mois d'hiver, en corrélation avec les concentrations maximales de nitrates. La nitracline se situe autour de 75 m, s'approfondissant légèrement en été, et les eaux de surface, entre 0 et 75 m, affichent une faible teneur en nitrates, caractérisant la zone comme oligotrophe. Les concentrations de chlorophylle dans le bassin algérien sont généralement inférieures à 1 mg/m³, le classant comme no-bloom en

Méditerranée. Toutefois, des épisodes occasionnels d'intenses blooms phytoplanctoniques peuvent survenir, souvent associés à des structures méso-échelles le long des côtes algériennes, atteignant jusqu'à 20 mg/m³.

II.3. Caractéristiques techniques et physico-chimiques du forage offshore :

II.3.1. Description de la plateforme de forage adaptée à l'exploration offshore

Dans le cadre d'un forage d'exploration offshore situé à 4000 mètres de profondeur d'eau et nécessitant une capacité de forage jusqu'à 3000 mètres sous le fond marin, le choix d'une unité de forage ultra-profonde s'impose. Parmi les différentes plateformes disponibles, le navire de forage Saipem 12000 se distingue comme une solution idéale pour ce type d'opération (Figure 40).

C'est l'un des navires de forage les plus performants au monde dans la catégorie des drillships pour eaux ultra-profondes. Construit entre 2009 et 2010 par Samsung Heavy Industries en Corée du Sud, ce navire autopropulsé à positionnement dynamique a été spécialement conçu pour mener des forages dans des profondeurs d'eau allant jusqu'à 12 000 pieds (environ 3 600 mètres), avec une profondeur de forage maximale de 9 000 mètres.

Doté d'une technologie de pointe, d'une capacité de stockage de 140 000 barils de pétrole, et d'un système énergétique diesel-électrique produisant 42 000 kW, le Saipem 12000 permet de mener des campagnes de forage complexes tout en répondant aux standards internationaux en matière de sécurité, de confort et de performance environnementale. Sa charge utile de 20 000 tonnes, ses installations de test étendu des puits (EWT), ainsi que sa capacité d'hébergement pour 200 personnes en font une unité autonome, endurante et parfaitement adaptée aux contraintes d'un forage exploratoire en offshore profond, comme celui envisagé dans le périmètre étudié (document interne).



Figure 40: Navire de forage ultra-profond Saipem 12000 (Gora Lô 2023)

II.3.2. Déroulement chronologique des opérations de forage

Le forage d'un puits d'exploration offshore suit une séquence rigoureuse d'opérations visant à garantir la sécurité, la stabilité du puits et la bonne progression des travaux. L'intervention commence par le positionnement et l'installation de la tour de forage en mer, accompagnée de tous les équipements nécessaires au forage. La première phase technique consiste à forer une section de 36 pouces de diamètre jusqu'à une profondeur d'environ 150 mètres, à l'aide d'une boue à base d'eau de mer et de bentonite, adaptée aux conditions peu profondes.

Ensuite, un tubage de 30 pouces est posé et cimenté pour assurer l'intégrité structurelle du puits. Un système de déviation d'urgence (Diverter) est installé, dimensionné à 30 pouces et conçu pour supporter une pression de 1000 psi. Le forage des "drill floats" est ensuite effectué, afin de permettre la poursuite des travaux sans obstruction.

La tête de puits est alors installée, suivie du montage du dispositif anti-éruption (BOP) de 18 3/4 pouces, capable de supporter une pression de 10 000 psi. Des tests sont réalisés pour s'assurer de la fiabilité de ces dispositifs critiques. Le forage continue ensuite avec une section de 26 pouces jusqu'à 500 mètres, puis une section de 16 pouces jusqu'à environ 1520 mètres. À chaque étape, des opérations de diaggraphie, des tests de production et des essais de pression (FIT) sont effectués, en complément de la cimentation et des éventuels carottages.

Enfin, une procédure d'abandon temporaire du puits est mise en œuvre à la fin de l'opération. La durée totale prévue pour l'ensemble des opérations de forage, y compris les phases de test et de contrôle, est estimée à 75 jours

II.3.3. Composition des fluides de forage à base d'eau (WB) et à base d'huile (OB) :

Les fluides de forage, également appelés boues de forage, sont essentiels au bon déroulement des opérations de forage en mer. Ils assurent plusieurs fonctions cruciales : refroidissement et lubrification du trépan, maintien de la pression dans le puits, évacuation des déblais de forage, stabilisation des parois du puits et prévention des éruptions incontrôlées. Selon les conditions géologiques et les objectifs opérationnels, deux grandes catégories de fluides sont couramment utilisées : les fluides à base d'eau (Water-Based Mud – WBM) et ceux à base d'huile (Oil-Based Mud – OBM).

Les fluides à base d'huile sont particulièrement utilisés dans des environnements géologiques complexes, notamment en présence de formations argileuses gonflantes, de températures ou pressions élevées, ou dans des zones où la stabilité du puits est un enjeu critique. Leur formulation repose sur une phase continue constituée de distillats pétroliers ou d'huiles minérales, auxquels sont ajoutés des agents émulsifiants, des tensioactifs, des inhibiteurs, ainsi que des additifs de lubrification, de contrôle du pH et de traitement des filtrats. Ces fluides présentent une excellente performance technique, notamment en termes de lubrification et de stabilité thermique, mais posent des défis environnementaux non négligeables, notamment en matière de gestion des déblais et de rejets en mer (Caenn et al., 2011 ; Neff et al., 2000).

Les fluides à base d'eau, quant à eux, sont plus largement utilisés en raison de leur coût plus faible et de leur impact environnemental réduit. Leur formulation repose sur une phase aqueuse enrichie en divers agents chimiques tels que des viscosifiants (comme la gomme xanthane ou des polymères de cellulose), des inhibiteurs d'argiles (comme le chlorure de potassium), des agents de contrôle du pH, des sels, ainsi que des additifs de contrôle des pertes de fluide. Ce type de fluide est adapté aux zones moins instables géologiquement, et permet une gestion plus aisée des résidus sur site ou à terre (Bourgoyne et al., 1986 ; Growcock et al., 1994)

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Tableau 8: Composantes des boues à base d'huile et des boues à base d'eau (document GHAZI .M)

Composantes des OBM	Composantes des WBM
Ilménite ou Barite	Ilménite ou Barite
Distillats (pétrole hydrotraité, fraction moyenne)	Acide citrique
Polyamide	Gomme xanthane
Huile minérale	Polyalkylène glycol (Mw = 240)
2-butoxyéthanol	Chlorure de potassium
2-(2-butoxyéthoxy) éthanol	Polymère de cellulose polyanionique
Mélange d'acides gras	Carbonate de sodium
Complexe amido-amine lignite	Hydrogénocarbonate de sodium
Hydroxyde de calcium	
Chlorure de calcium	
Bentonite ammonium quaternaire alkyle	
Carbonate de calcium	
Graphite	

II.3.4. Propriétés physico-chimiques des systèmes de fluides de forage

Les caractéristiques physico-chimiques des fluides de forage utilisés tout au long du puits varient en fonction des sections forées et des conditions géologiques rencontrées. À chaque niveau de profondeur, la formulation du fluide est ajustée pour assurer une stabilité optimale du puits, un bon hydraulique et une compatibilité chimique avec les formations traversées. Ces propriétés incluent notamment la densité, la viscosité, le point d'écoulement et la composition chimique du système de boue.

Pour la première section de 36 pouces, située entre 90 et 150 mètres de profondeur, une boue à base d'eau de mer enrichie en bentonite est envisagée. Ce fluide présente une densité comprise entre 1,05 et 1,18 g/cm³, assurant une suspension efficace des déblais et une bonne stabilité du puits dans les formations superficielles.

Dans la section de 26 pouces (150 à 500 m), l'emploi d'une boue également à base d'eau de mer, complétée par des pilules de viscosité élevée (Hi-vis), permet un meilleur contrôle de la viscosité, favorisant une circulation fluide et homogène ainsi qu'un nettoyage efficace du fond du trou.

La section de 16 pouces, entre 500 et 1520 mètres, requiert un fluide inhibiteur de type WBM (Water-Based Mud), avec une densité équivalente à celle utilisée en surface (1,05 à 1,18 g/cm³), mais avec un point d'écoulement situé entre 20 et 25°C, garantissant une bonne maniabilité du fluide malgré la baisse de température à ces profondeurs.

Pour la section de 12 ¼ pouces, forée entre 1520 et 2765 mètres, une boue polymérique à base de chlorure de potassium (KCl) est proposée. Elle présente une densité légèrement plus élevée, de l'ordre de 1,15 à 1,20 g/cm³, et un rapport huile/eau de 75/25, indiquant la présence d'un système pseudo-émulsionné pour améliorer la lubrification, la stabilité des parois et l'inhibition des argiles réactives.

Enfin, dans la section la plus profonde (8 ½ pouces, entre 2765 et 3000 m), un fluide à base d'eau enrichi en hydroxyéthylcellulose (HEC) est recommandé. Ce système présente une densité modérée (1,03 à 1,05 g/cm³) tout en offrant une viscosité suffisante pour transporter les déblais et maintenir la stabilité du puits, même à grande profondeur.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Tableau 9: Propriétés des boues de forage dans chaque section (document interne)

Section du puits (Phase)	Profondeur	Système de boues			
		WBM		OBM	
Phase 36"	90 – 150 m	Composition	Eau de mer + Bentonite	Composition	
		Densité	/	Densité	/
26"	150 – 500 m	Composition	Eau de mer + bouchons haute viscosité (Hi-vis pills)	Composition	
		Densité	/	Densité	/
16"	500 – 1520 m	Composition	Boue à base d'eau (inhibitrice)	Composition	Boue à base d'huile
		Densité	1,05 – 1,18	Densité	1,05 – 1,18

12 ½" Section [1520 – 2765 m] :

Système de boue	Polymère à base de chlorure de potassium (KCl)	Boue à base d'huile
Densité de la boue	1,15 – 1,20	1,15 – 1,20
Viscosité plastique	ALAP	ALAP
Point d'écoulement	25 – 30	25 – 30
Lecture R3/R6 du viscosimètre Fann	15/12	15/12
Filtrat	ALAS	< 2 All oil
Force de gel à 10 s / 10 min (Lb/100 pi ²)	12/18	12/18
Solides à faible densité (%)	< 6	< 6
Stabilité électrique (volt)	-	> 800
Rapport huile / eau	-	75/25
Salinité de la phase aqueuse (g/l)	300 – 350	300 – 350

Section 8 ½" [2765 – 3000 m]

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Système de boue	Eau + HEC(Hydroxyéthylcellulose)
Densité de la boue	1,03 – 1,05

- **ALAP (As Low As Possible) :** Aussi bas que possible ; Cela signifie qu'il n'y a pas de valeur fixe pour ce paramètre, mais qu'on cherche à le minimiser pour optimiser les performances du fluide de forage
- **ALAS (As Low As Safely) :** Aussi bas que possible sans compromettre la sécurité ; cela veut dire qu'on vise une valeur minimale pour un paramètre donné, sans risquer la stabilité du puits ou la sécurité des opérations.

**CHAPITRE III : ÉVALUATION DES IMPACTS
ENVIRONNEMENTAUX**

III.1. Identification et évaluation des impacts environnementaux

III.1.1. Méthodologie d'identification des impacts

La prévision des impacts environnementaux et sociaux constitue une étape fondamentale et objective visant à déterminer les effets potentiels qu'un projet, ainsi que ses activités associées, pourrait engendrer sur l'environnement et les communautés humaines. Il s'agit d'identifier les interactions possibles entre les différentes composantes du projet et l'état initial de l'environnement physique, social, ainsi que les droits humains. Ces interactions permettent de mettre en évidence les récepteurs susceptibles d'être affectés et d'évaluer, dans la mesure du possible, la nature et l'ampleur des impacts envisagés.

La démarche méthodologique adoptée repose sur l'élaboration d'une matrice de cadrage, destinée à recenser de manière systématique les effets potentiels sur les différentes composantes de l'environnement. Cette matrice facilite l'identification des impacts en mettant en relation les activités du projet avec les caractéristiques des milieux récepteurs.

III.1.2. Identification des impacts environnementaux

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

PHASE DU PROJET	ACTIVITÉS/SOURCE D'IMPACT		Milieu physique				Milieu biologique		Milieu socio-économique				Impacts environnementaux		
			Sol	Eau	Sédiments	Air	Flore	Faune	Trafic maritime	Pêche et Ressources Marines	Economie	Sécurité et Santé humaine			
PHASE DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE	Acquisition de données sismiques	Déplacements du navire sismique et des bateaux de supports										×		Défavorisation du secteur touristique à cause de la dégradation provisoire du paysage	
									×	×	×	×		Perturbation des activités de pêche locale	
										×		×			Perturbation du trafic maritime
							×	×							Empiètement des zones d'intervention avec les aires protégées
				×		×								×	
		Bruit et vibrations						×		×	×			Perturbation des comportements	

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

		Emissions lumineuse						×			×		biologiques des espèces marines
Forage d'exploration	Mobilisation du navire de forage	Positionnement, mouillage, installation des équipements	×		×		×	×					Perturbation physique du fond marin (ancre, chaînes)
									×		×		Perturbation de la navigation
							×	×					Destruction d'habitats et adhérence biologique sur les streamers
					×	×	×					×	Emissions atmosphériques locales (NOx, SOx, CO2, particules)
	Fonctionnement des moteurs, des générateurs						×			×	×		Perturbation, stress éloignement temporaire de la faune marine liés aux bruits en surface
	Pertes de circulation en profondeur lors du forage des phases du puits		×	×		×	×			×			Écotoxicité aquatique liée aux substances toxiques des fluides de forage (Hydrocarbures, métaux...) Lors

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

											(microorganismes du sol) liée au traitement onshore des rejets de forage
	×	×	×								Alteration physique et chimique du milieu marin
Déversement accidentel en surface (hydrocarbures et de produits chimiques)		×	×		×	×		×	×	×	Ecotoxicité aquatique
			×					×		×	Écotoxicité des sédiments
										×	Toxicité humaine
			×	×		×	×		×		Dégradation de la qualité physico-chimique de l'eau
Émissions atmosphériques (moteurs, torchage, manutention)				×				×	×	×	Réchauffement climatique
		×	×					×	×	×	Acidification
Bruits en surface et sous-marins générés par le forage						×		×	×	×	Perturbation du comportement des espèces marines
Rejets d'eaux usées		×			×	×			×	×	Altération locale de la qualité de l'eau
Utilisation de matières premières									×		Épuisement de ressources naturelles

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

											×		Epuisement d'Énergie fossile		
	Trafic maritime lié au forage et aux navires de soutien													Perturbation des routes maritimes et exclusion temporaire de certaines zones de pêche.	
						×	×	×						×	Pollution atmosphérique liée aux émissions des navires
							×	×				×	×		Perturbation acoustique des espèces marines
Abandon du puits	Fermeture et abandon du puits (bouchage, retrait d'équipements)	×	×	×		×	×					×		Perturbation du fond marin	
		×	×	×		×	×				×		×		Dispersion de substances polluantes
	Démobilisation du navire, retrait d'équipements et d'ancres	×		×		×	×								Perturbation des fonds marins (retrait d'ancres et des chaînes)
		×	×	×											Remise en suspension des sédiments
	Gestion des déchets et équipements usagés (retour à terre)	×	×	×		×	×					×	×		Contamination des sols et des eaux par les déchets mal

III.1.3. DESCRIPTION DES IMPACTES

III.1.3.1 Impacts sur milieu biologique :

- **Impact sur la faune marine**

Les activités de forage d'exploration offshore ont des conséquences notables sur la faune marine. Le bruit sous-marin généré par la prospection sismique, le forage et le fonctionnement constant des navires peut provoquer un stress acoustique important chez de nombreuses espèces. Les cétacés, par exemple, dépendent du son pour s'orienter, chasser et communiquer. Lorsqu'ils sont exposés à des niveaux élevés de bruit artificiel, ils peuvent modifier leur trajectoire, interrompre leur alimentation ou fuir la zone. À cela s'ajoutent les risques d'exposition à des substances toxiques, comme les hydrocarbures ou les boues de forage, qui peuvent provoquer des effets écotoxiques aigus ou chroniques (mortalité, perturbation de la reproduction, bioaccumulation dans les tissus). Ces impacts peuvent menacer la stabilité des populations locales, notamment dans les zones riches en biodiversité ou proches d'aires marines protégées.

- **Impact sur la flore marine**

La flore marine, notamment les herbiers sous-marins, les macro-algues et les organismes photosynthétiques comme le phytoplancton, subit aussi les effets des forages offshore. Le déversement accidentel d'hydrocarbures, de boues ou de produits chimiques pollue l'eau et le substrat marin, altérant les fonctions physiologiques des plantes et réduisant leur capacité de photosynthèse.

Les actions mécaniques liées à l'ancrage, au dragage, ou aux rejets de déblais recouvrent physiquement les végétaux marins, bloquent la lumière et étouffent les racines ou frondes. Ces atteintes provoquent un dépérissement progressif de la végétation, une perte de biomasse, et entraînent la disparition d'habitats essentiels pour de nombreuses espèces marines comme les poissons juvéniles ou les invertébrés benthiques, ce qui déséquilibre l'écosystème dans son ensemble.

III.1.3.2 Impacts sur milieu physique

- **Impact sur l'eau de mer**

La qualité de l'eau de mer est affectée par les rejets issus des activités de forage : boues, hydrocarbures, eaux usées, fluides de forage, etc. Ces substances altèrent les paramètres physico-chimiques (pH, oxygène dissous, turbidité) et peuvent provoquer des phénomènes comme l'eutrophisation ou l'acidification. Cela nuit à la faune et à la flore aquatique, compromet la chaîne alimentaire, et rend l'eau impropre à des usages économiques (pêche, baignade, aquaculture).

- **Impact des rejets de fluides de forage**

Au cours de la phase de forage d'exploration, l'utilisation de boues de forage de type WBM (Water-Based Mud) ou OBM (Oil-Based Mud) est indispensable pour stabiliser le puits, évacuer les déblais et lubrifier les équipements. Toutefois, ces fluides contiennent souvent des additifs

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

chimiques, lubrifiants et agents de traitement qui, en cas de rejet accidentel ou de mauvaise gestion, peuvent contaminer l'eau de mer. Ces rejets entraînent une altération physico-chimique de l'eau, une écotoxicité pour les espèces aquatiques et peuvent provoquer une eutrophisation locale. Ils sont également à l'origine de la bioaccumulation dans les réseaux trophiques, menaçant la santé humaine et la chaîne alimentaire marine.

- **Impact des déchets solides**

Les déchets solides produits lors du forage (débris métalliques, filtres, équipements usagés, emballages contaminés, etc.) représentent un risque environnemental majeur s'ils sont mal stockés ou évacués. En mer, une mauvaise gestion de ces déchets peut entraîner une contamination directe des sédiments, une altération des fonds marins, ou encore des dommages physiques aux habitats benthiques. Lors de la phase de retour à terre, le stockage, le tri ou le transport non conforme de ces matériaux dangereux peut conduire à une contamination des sols et des eaux continentales, ainsi qu'à une pollution atmosphérique liée aux opérations de traitement (brûlage, incinération, transport).

- **Impact des émissions sonores**

Les émissions sonores constituent une source majeure de perturbation dans l'environnement marin, particulièrement durant la phase de prospection sismique, où des canons à air comprimé sont utilisés pour sonder la géologie sous-marine. Ces ondes acoustiques intenses se propagent sur de longues distances dans l'eau, affectant gravement la faune marine. Pendant la mobilisation des navires et les opérations de forage, les moteurs, les générateurs et autres équipements industriels produisent un bruit constant qui contribue à une pollution sonore chronique. Les espèces marines, notamment les cétacés et les poissons, qui dépendent du son pour naviguer, communiquer, se nourrir ou se reproduire, subissent alors des effets de stress, de désorientation et parfois des lésions auditives. Ces perturbations acoustiques peuvent entraîner un éloignement temporaire ou permanent des espèces sensibles, une interruption de leurs comportements vitaux et, à long terme, une altération de la structure des populations marines dans la zone affectée.

- **Impact des émissions lumineuses**

Lorsqu'un navire de forage opère de nuit, ce qui est fréquent pour les opérations d'un puits d'exploration offshore, il utilise un éclairage puissant en continu pour assurer la sécurité des manœuvres. Pendant les phases de mobilisation, de forage, puis de démobilisation, cette lumière artificielle émise en mer peut perturber le cycle naturel jour-nuit du milieu marin. Ce phénomène modifie les comportements des espèces photoréactives : certaines espèces de poissons et de plancton sont attirées par la lumière (effet phototactique positif), ce qui perturbe leur répartition naturelle, tandis que d'autres, comme certains invertébrés ou larves, fuient la lumière, ce qui altère les chaînes alimentaires locales. Les oiseaux marins migrateurs, eux aussi, peuvent être désorientés par l'intensité lumineuse et entrer en collision avec les structures du navire.

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- **Impact sur les sédiments**

Les sédiments marins sont affectés par les opérations mécaniques (pose et retrait d'ancre, forage, dragage) et par les dépôts issus des rejets en mer. Ces activités provoquent une remise en suspension des particules fines, ce qui augmente la turbidité de la colonne d'eau et affecte les espèces benthiques (vivant dans ou sur les sédiments). Les polluants (métaux, hydrocarbures) peuvent aussi s'adsorber sur ces particules et s'accumuler dans les fonds marins, contaminant à long terme les écosystèmes benthiques. Ces perturbations physiques et chimiques peuvent altérer la composition biologique du sédiment et entraîner une perte de biodiversité locale.

- **Impact sur le fond marin (substrat)**

Le sol marin est modifié par les activités mécaniques comme l'installation de l'équipement de forage, le positionnement du navire (mouillage, ancres), le creusement du puits, ou encore le retrait du matériel lors de l'abandon. Ces interventions causent une altération permanente ou temporaire de la morphologie du fond marin, affectant les espèces qui y vivent où s'y nourrissent. De plus, les injections de ciment ou les bouchages de puits lors de la phase d'abandon peuvent modifier la composition chimique locale du substrat, ce qui rend certaines zones impropres à la recolonisation biologique.

- **Impact sur l'air**

Les émissions atmosphériques générées tout au long du projet (moteurs, torchage, transport logistique, traitement des déchets) participent à la dégradation de la qualité de l'air. Ces émissions comprennent du CO₂ (gaz à effet de serre), des NO_x et SO_x (précurseurs des pluies acides), des particules fines et du monoxyde de carbone. En zone offshore, cela peut sembler moins préoccupant localement, mais ces polluants contribuent au changement climatique global et peuvent également affecter la santé des travailleurs embarqués, surtout en l'absence de systèmes de filtration. Si le forage est proche des côtes, les vents dominants peuvent aussi transporter ces émissions vers les zones habitées.

III.1.3.3 Impacts sur milieu socio-économique :

- **Impact sur le trafic maritime**

Les opérations de forage offshore nécessitent une logistique maritime importante, impliquant la présence prolongée de navires spécialisés (plateformes, ravitailleurs, navires de soutien). Cette situation peut entraîner une modification temporaire des routes maritimes, créant un risque de conflits d'usage avec d'autres activités maritimes comme le transport commercial, la pêche artisanale ou le tourisme nautique.

En cas d'accident, de pollution ou d'incident technique, des zones entières peuvent être interdites à la navigation, perturbant ainsi les flux économiques, la logistique portuaire et les activités de subsistance locales. De plus, les risques de collision entre navires de forage et embarcations de

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

pêche constituent une menace sérieuse pour la sécurité maritime des pêcheurs, pouvant entraîner des pertes de matériel, des blessures, voire des pertes en vies humaines.

- **Impact sur l'économie locale**

Le forage offshore peut avoir des effets ambivalents sur l'économie locale. D'un côté, il génère des retombées économiques positives, notamment par la création d'emplois directs et indirects dans les secteurs du transport maritime, de la logistique, de la maintenance et des services portuaires. Ces opportunités peuvent dynamiser l'activité économique locale et favoriser le développement d'infrastructures.

Cependant, ces bénéfices doivent être mis en balance avec les impacts négatifs sur d'autres secteurs, en particulier les pêcheries artisanales et le tourisme. Les activités de forage peuvent restreindre l'accès à certaines zones de pêche, et le bruit sous-marin généré par les navires et équipements peut perturber les espèces halieutiques, réduisant ainsi les captures et affectant directement les revenus des pêcheurs. Par ailleurs, les effets à plus long terme liés au changement climatique, comme le réchauffement des eaux, peuvent modifier la répartition des espèces marines et entraîner une détérioration de la qualité des produits pêchés.

Le secteur touristique peut lui aussi subir des conséquences, notamment en cas de pollution marine, de marée noire ou de dégradation des zones côtières protégées. Une telle perte d'attractivité peut engendrer une baisse de fréquentation touristique et porter atteinte à l'image de la région. Enfin, les coûts associés à la gestion des déchets, aux actions de dépollution et aux mesures compensatoires peuvent représenter une charge financière significative, tant pour les exploitants que pour les collectivités locales.

- **Impact sur la santé et la sécurité humaine**

Les activités de forage offshore présentent plusieurs risques pour la santé et la sécurité humaine, tant pour les travailleurs que pour les populations côtières. À bord des plateformes, les conditions de travail sont particulièrement exigeantes : les ouvriers sont exposés à des niveaux élevés de bruit, à des émissions de gaz polluants et à des substances chimiques potentiellement toxiques. Le risque d'accidents graves, tels que des explosions, des incendies ou des fuites de produits dangereux, nécessite une vigilance constante et la mise en œuvre de protocoles de sécurité stricts.

Ces risques ne se limitent pas aux zones de forage. En cas d'incident majeur, les effets peuvent s'étendre jusqu'aux côtes. La pollution atmosphérique transportée par les vents, la contamination des produits de la mer ou la dégradation de la qualité de l'eau peuvent avoir des conséquences directes sur la santé des populations littorales. De plus, la mauvaise gestion des déchets industriels, en particulier ceux contenant des produits chimiques ou des résidus toxiques, peut présenter un danger au moment de leur traitement à terre.

Enfin, la présence accrue de navires spécialisés dans les zones de pêche augmente le risque de collisions avec les embarcations artisanales, exposant les pêcheurs à des situations dangereuses

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

pouvant entraîner des pertes de matériel, des blessures, des noyades, voire des pertes humaines. Ces enjeux de sécurité maritime exigent la mise en place de dispositifs de prévention adaptés et une meilleure coordination entre les différents usagers de la mer.

III.1.3.4 Déversement accidentel d'hydrocarbures

Un déversement accidentel d'hydrocarbures ou de fluides chimiques peut survenir durant la phase de forage d'exploration, notamment en cas de rupture de conduite, de dysfonctionnement des équipements ou d'erreur humaine, mais également lors de la phase d'abandon du puits, si le scellement est mal réalisé ou s'il subsiste une fuite résiduelle. Ce type d'incident entraîne une contamination immédiate de la colonne d'eau, altérant ses propriétés physico-chimiques et provoquant une mortalité aiguë chez de nombreuses espèces sensibles. Une partie des hydrocarbures se dépose sur les sédiments, où elle peut persister sur le long terme. Cette accumulation conduit à une écotoxicité des sédiments, affectant les espèces benthiques vivant dans ou sur le fond marin, comme les mollusques, les crustacés ou les larves de poissons. Ces polluants peuvent entraîner des effets sublétaux chroniques (ralentissement de la croissance, perturbation du métabolisme), et représenter une source de contamination continue pour l'ensemble du réseau trophique. Sur le plan biologique, ce type de pollution affecte les fonctions vitales de la faune marine (reproduction, alimentation, respiration), provoque des perturbations endocriniennes, et peut conduire à la bioaccumulation dans les tissus des organismes, avec un risque de transfert dans la chaîne alimentaire. D'un point de vue socio-économique, les conséquences sont importantes : fermeture temporaire ou durable de zones de pêche, atteinte à la réputation de la région, pertes dans le secteur touristique, et coûts élevés pour les opérations de dépollution. L'impact peut également s'étendre à la santé humaine, notamment en cas de consommation de produits de la mer contaminés ou d'exposition aux vapeurs toxiques libérées.

III.1.4. Évaluation des impacts environnementaux

III.1.4.1 Méthodologie d'Évaluation des impacts

L'approche adoptée tient compte de critères génériques d'évaluation d'impact environnemental (données interne) – géographique avec l'air affectée (a), temporelle avec la durée de l'effet (d), dimensionnelle avec la magnitude de l'effet (m) – pour fournir une valeur cumulative caractérisant l'impact, intitulée conséquence (a+d+m). Le produit de la conséquence et de la fréquence (f) (nombre d'occurrences possibles par unité de temps) permet ensuite de déterminer une valeur de risque selon les formules suivantes :

$$\text{Conséquence} = a + d + m$$

$$\text{Risque} = \text{conséquence} \times \text{fréquence, soit risque} = (a + d + m) \times f$$

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Tableau 11: Critères d'évaluation qualitative d'impact (données interne)

Critères	Définition	Score
Aire (A)	Très localisée – à quelques mètres de la source	0
	Localisée – à moins d'un kilomètre	1
	Locale – un à 20 kilomètres	2
	Régionale – à plus de 20 kilomètres	3
La durée	Très court terme – jours ou semaines	0
	Court terme – jusqu'à un an	1
	Moyen terme – de un à trois ans	2
	Long terme – plus de trois ans	3
Magnitude (m)	Négligeable – sans effet notable sur la ressource dans son ensemble et susceptible de ne pas être remarquée par les populations utilisant déjà la ressource.	0
	Faible– impact susceptible d'affecter légèrement un nombre restreint d'individus de populations humaines ou environnementales.	1
	Moyenne – un grand nombre d'individus est faiblement affecté, ou un petit nombre est fortement affecté.	2
	Forte– grand nombre d'individus largement affectés (perte d'habitat, épuisement de ressources...).	3
Fréquence (f)	Très rare.	1
	Rare.	2
	Occasionnel.	3
	Fréquent.	4
	Continu	5

La prédiction des impacts environnementaux de l'installation et de l'extension, ainsi que l'identification de leur nature et de leurs effets sur l'environnement, ont été conduites en se référant à la bibliographie (données interne) disponible et aux observations faites lors de visites de l'installation. Cette évaluation s'est aussi appuyée sur les retours d'expérience disponibles pour des opérations pétrolières existantes en particulier dans le Sahara algérien.

On rappelle que l'EIE est un outil servant à indiquer un impact global sur l'environnement, et que l'on a recours au jugement de l'évaluateur pour s'assurer que toute anomalie révélée a été traitée. Dans le texte des sections suivantes, on a brièvement expliqué le raisonnement à la base du classement.

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Tableau 12: Scores de l'impact

A	Impact intolérable	37 – 45
B	Impact majeur	28 – 36
C	Impact modéré	19 – 27
D	Impact mineur	10 – 18
E	Impact négligeable	1 – 9
	Impact insignifiant à positif (pas d'interaction)	0

III.1.4.2 Résultats de l'évaluation des impacts environnementaux

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Tableau 13: Matrice d'évaluations de impactes

Impact	Aire (a)	Durée (d)	Magnitude (m)	Fréquence (f)	Calcul de la Conséquence = a + d + m	Calcul de risque Risque = conséquence * fréquence, soit risque = (a + d + m) * f	Score de L'impact
Défavorisation du secteur touristique à cause de la dégradation provisoire du paysage	1 – Localisée	1 – Court terme.	2-moyenne	5 – continue	4	20	
Perturbation des activités de pêche locale	2 – Locale :	1-court terme.	3– forte	5 – continue	6	30	
Perturbation du trafic maritime	2 – Locale :	1 – Court terme	2 – moyenne :	3 – occasionnel	5	15	
Empiètement des zones d'intervention avec les aires protégées	3 – Régionale :	3 – Long terme	3 – Forte :	4 – Fréquent	9	36	
Pollution atmosphérique due à la combustion des moteurs	2 – Locale	2 – Moyen terme :	2 – Moyenne :	4 – Fréquent	6	24	
Perturbation des comportements biologiques des espèces marines	2 – Locale	2 – Moyen terme	3 – forte	4 – Fréquent	7	28	

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Perturbation physique du fond marin (ancre, chaînes),	1 – Localisée	3 – Long terme	2- Moyenne	3 – Occasionnel	6	18	
Perturbation de la navigation	2 – Locale	1 – Court terme	1 – Faible	3 – Occasionnel	4	12	
Destruction d’habitats et adhérence biologique sur les streamers	1 – Localisée.	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	3 – Occasionnel	5	15	
Emissions atmosphériques locales (NOx, SOx, CO2, particules)	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	4 – Fréquent	6	24	
Perturbation, stress éloignement temporaire de la faune marine liés aux bruits en surface	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	5-continue	6	30	
Écotoxicité aquatique liée aux substances toxiques des fluides de forage (Hydrocarbures, métaux...) Lors du forage des phases du puits	2 – Locale	2 – Moyen terme	3– forte	4–fréquent	7	28	
Toxicité humaine liée à la bioaccumulation de substances toxiques	2 – Locale	2 – Moyen terme	3– forte	4-frequent	7	28	

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

dans les produits de la mer consommés par l'homme							
Écotoxicité aquatique liée aux substances toxiques des fluides de forage (Hydrocarbures, métaux...) dans le cas de rejet en mer	2 – Locale	2 – Moyen terme	3-forte	4 – fréquent	7	28	
Perturbation des habitats marins par accumulation de déblais de forage (Cuttings) si les rejets sont en mer	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	5-continue	6	30	
Acidification aquatique	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	4-fréquent	6	24	
Ecotoxicité terrestre (microorganismes du sol) liée au traitement onshore des rejets de forage	2-local	2-moyen terme	3-forte	4-frequent	7	28	
Alteration physique et chimique du milieu marin	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	5-continue	6	30	
Ecotoxicité aquatique	2 – Locale	2 – Moyen terme	3-forte	4 – fréquent	7	28	
Écotoxicité des sédiments	2 – Locale	3– long terme	3-forte.	4-frequent	8	32	

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Toxicité humaine	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	4-frequent	6	24	
Dégradation de la qualité physico- chimique de l'eau	2 – Locale	2 – Moyen terme	3– forte	4-frequence	7	28	
Réchauffement climatique	2-locale	2-moyen terme	2-moyenne	5-continue	6	30	
Acidification	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	4–fréquent	6	24	
Perturbation du comportement des espèces marines	2 – Locale	2- moyene	2 – Moyenne	5-continue	6	30	
Altération locale de la qualité de l'eau	2 – Locale	2 – Moyen terme	2-moyenne	4– fréquent	6	24	
Epuisement des ressources naturelles	2-locale	1-court terme	2-moyene	5-continue	5	25	
Epuisement d'Energie fossile	0-(cest un impact global, non spatialement limité. Donc le critère "Aire", nest pas applicable)	2-moyen terme	1-faible	4-frequent	3	12	
Perturbation des routes maritimes et exclusion temporaire de certaines zones de pêche.	2 – Locale :	1-court terme	2 – Moyenne	5-continue	5	25	

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Pollution atmosphérique liée aux émissions des navires	2 – Locale	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	4– fréquent	6	24	
Perturbation acoustique des espèces marines	2 – Locale	1– court terme	2 – Moyenne	5-continue	5	25	
Perturbation du fond marin	1- localisée	2 – Moyen terme	2 – Moyenne	3 – Occasionnel	5	15	
Dispersion de substances polluantes	2 – Locale	3-long terme	2 – Moyenne	4-frequent	7	28	
Perturbation des fonds marins (retrait d’ancres et des chaînes)	1 – Localiser	1-court terme	2 – Moyenne	3 – Occasionnel	4	12	
Remise en suspension des sédiments	2 – Locale	1-court terme	3-forte	3 – Occasionnel	6	18	
Contamination des sols et des eaux par les déchets mal stockés ou mal transportés/ par des matériaux dangereux	2 – Locale	3– long terme	3– forte	3 – Occasionnel	8	24	
Pollution atmosphérique liée au transport /traitement des déchets	3 – régional	0- trescourt terme	2 – Moyenne	3- occasionelle	5	15	

III.1.5 Les Mesures d'atténuation

Les mesures de prévention proposées sont élaborées conformément aux réglementations nationales et internationales en vigueur. Elles visent à assurer la protection, la conservation et la durabilité des écosystèmes. Par ailleurs, leur mise en œuvre contribuera à la réduction des émissions de gaz à effet de serre tout au long du déroulement de l'activité.

III.1.5.1 Mesures d'atténuation environnementale intégrées aux opérations du projet

- Choix du site pour minimiser l'impact sur les habitats sensibles (privilégier le forage horizontal).
- Utilisation du positionnement dynamique pour éviter l'ancrage lourd.
- Effectuer un suivi environnemental initial (monitoring des fonds marins sur un rayon de 500 m).
- Utiliser des boues de forage à faible toxicité et un système de recyclage des boues.
- Suivre la qualité des sédiments et de l'eau.
- Appliquer les normes strictes en cas d'abandon de puits : vérification de l'intégrité, balisage, application des procédures Sonatrach.
- Réaliser un audit environnemental final et un relevé des fonds marins par ROV.
- Assurer un suivi post-démobilisation et une gestion à terre conforme à la réglementation algérienne et au PMD de Sonatrach

III.1.5.2 Mesures d'Atténuation du Bruit Sous-Marin

- Avant toute opération sismique, une campagne d'observation de 15 jours est réalisée, combinant la surveillance visuelle par des observateurs spécialisés (MMO) et la surveillance acoustique passive (PAM) pour détecter la présence de mammifères marins et de tortues.
- Se conformer aux lignes directrices internationales visant à réduire l'impact du bruit sous-marin, notamment par :
 - L'installation de systèmes de réduction du bruit sur les équipements (silencieux, isolation),
 - La limitation de la puissance acoustique des impulsions,
 - La mise en place d'une surveillance acoustique en temps réel lorsque des espèces sensibles sont détectées à proximité.
- Planifier les activités en tenant compte des périodes biologiquement sensibles pour la faune marine, à travers :
 - Une étude préalable de la faune locale et de ses cycles de vie, ainsi qu'une coordination avec les autorités environnementales pour définir des fenêtres d'intervention adaptées.
- Appliquer rigoureusement les procédures opérationnelles lors des phases d'abandon du puits, incluant :

- Le choix de techniques à faibles émissions sonores,
 - Une surveillance acoustique continue afin de détecter toute perturbation anormale, et des mesures spécifiques pour garantir la protection de la faune pendant ces opérations sensibles.
-
- Les navires doivent également faire l'objet d'un entretien régulier afin de réduire le bruit, notamment le nettoyage de l'hélice et de la coque sous-marine
 - Limiter les opérations bruyantes en période critique (de reproduction) pour la faune.
 - Mettre en œuvre des protocoles d'arrêt si une faune sensible est détectée.
 - Effectuer un suivi acoustique renforcé et utiliser des équipements capables d'absorber ou atténuer les ondes acoustiques.

III.1.5.3 Mesures d'atténuation du bruit des hélicoptères sur la faune marine

- Planifier à l'avance les trajectoires de vol afin de garantir qu'aucun vol ne survole les zones protégées ;
- Éviter les vols côtiers prolongés à basse altitude (< 914 m et à moins de 2 km du rivage)
- La trajectoire de vol entre la base logistique terrestre et le navire de forage doit être perpendiculaire à la côte.
- Une altitude de vol supérieure à 305 m doit être maintenue en permanence, sauf lors des atterrissages et des décollages de l'aéronef sur le navire de forage et la base logistique.
- Maintenir une altitude d'au moins 914 m dans les aires marines protégées.
- Les entrepreneurs doivent se conformer pleinement aux directives et règles de l'aviation et des autorités.
- Informer tous les pilotes des risques écologiques associés au vol à basse altitude le long de la côte ou au-dessus des mammifères marins.

III.1.5.4 Mesures d'atténuation et de gestion des émissions atmosphériques

- Interdiction totale de brulage des hydro en mer
- Utilisation de combustibles à faible teneur en soufre, lorsqu'ils sont disponibles, pour minimiser les émissions polluantes liées à la combustion.
- Optimisation de l'utilisation du carburant pour accroître l'efficacité énergétique et réduire les émissions.
- Mise en œuvre d'un Plan de Maintenance Planifiée (PMS) : il s'agit d'un système organisé d'entretien régulier des équipements afin d'assurer leur bon fonctionnement, d'optimiser la combustion, de réduire les pannes imprévues, et ainsi minimiser les émissions polluantes et maximiser la sécurité des opérations.
- Un système d'enregistrement et de reporting sera utilisé pour suivre la consommation de carburant et assurer le contrôle des émissions.
- Entretien régulier des moteurs pour améliorer la combustion et limiter les émissions.

- Surveillance renforcée des émissions via l'installation de filtres à particules sur les échappements.

III.1.5.5 Mesures d'Atténuation pour l'Eclairage Artificiel

- L'éclairage extérieur des navires sera réduit au minimum à celui requis pour la navigation en toute sécurité, la sécurité des navires et la sécurité des opérations de plate-forme, sauf dans le cas d'urgence.
- Les sources lumineuses doivent être orientées principalement vers les équipements et éléments du navire, en évitant de diriger la lumière vers l'eau ou le ciel afin de limiter la pollution lumineuse et l'impact sur la faune marine.

III.1.5.6 Mesures d'Atténuation pour la Pollution Marine par les Rejets Courants

➤ Mesures d'Atténuation pour les Eaux Usées, Eaux Grises et Déchets Alimentaires

- Tous les systèmes de collecte, traitement et stockage des eaux usées et des déchets alimentaires seront pleinement fonctionnels avant le début des opérations de forage.
- Les installations à bord seront certifiées conformes à l'Annexe IV de MARPOL 73/78, garantissant un traitement adéquat des eaux usées avant rejet ;
- Les déchets alimentaires seront broyés, séchés, et réduits à une taille inférieure à 25 mm avant tout rejet en mer, conformément aux exigences de l'OMI ;
- Les rejets d'eaux usées traitées ne seront autorisés qu'à plus de 12 milles nautiques de la côte et à une vitesse d'au moins 4 nœuds. Aucun rejet d'eaux usées non traitées ne sera effectué ;
- Le déversement de déchets alimentaires ne sera permis qu'à une distance supérieure à 3 milles nautiques de la côte ;
- Tous les rejets seront consignés dans les journaux de bord (un registre officiel à bord du navire permet d'assurer la traçabilité des incidents, de respecter les exigences réglementaires, et de faciliter les actions correctives en cas de pollution accidentelle) des navires de soutien et des unités de forage.
- Traitement des eaux usées à bord conforme au décret exécutif n°06-141 relatif aux limites des rejets liquides industriels.

➤ Mesures d'Atténuation pour les Autres Déchets Solides et Liquides

- Tous les déchets solides seront gérés selon les prescriptions de l'Annexe V de MARPOL ;
- Interdiction stricte du rejet de déchets solides en mer (rappel de MARPOL V).
- Aucun déchet plastique, domestique ou de maintenance ne sera rejeté à la mer. Les déchets seront triés, stockés à bord dans des contenants étanches, puis transférés à terre pour traitement ou recyclage ;

- Si des incinérateurs sont disponibles à bord, ils seront conformes aux normes de l'OMI. Leur utilisation sera strictement encadrée et consignée dans le journal de bord de la salle des machines ;
- Tous les déchets dangereux (produits chimiques, solvants, huiles, boues) seront stockés dans des zones désignées, puis évacués vers des installations de traitement agréées à terre ;
- Un Plan de Gestion des Déchets spécifique au projet sera mis en œuvre, incluant les procédures de tri, de stockage temporaire, d'étiquetage et de transport ;
- Tous les déchets accidentellement rejetés feront l'objet d'un rapport circonstancié et seront inscrits dans les registres de déchets.

III.1.5.7 Mesures d'atténuation pour la pollution marine par les rejets accidentels

➤ Mesures pour les matières dangereuses

- Toutes les substances dangereuses utilisées dans les opérations de forage (additifs, solvants, boues, etc.) seront stockées conformément à l'Annexe III de MARPOL 73/78.
- Séparation stricte et étiquetage clair des déchets dangereux, avec évacuation vers des installations à terre agréées.
- Un plan de gestion des produits chimiques (Chemical Management Plan) sera mis en place et régulièrement mis à jour.
- Mise en place de kits d'intervention en cas de déversement dans les zones de stockage critiques (carburants, additifs de forage).
- Formation du personnel de forage aux procédures d'urgence et au maniement de substances dangereuses.

➤ Mesures pour les déversements d'huile et de carburant

- Application rigoureuse du SOPEP (Shipboard Oil Pollution Emergency Plan): (le SOPEP est un plan obligatoire qui décrit les actions à suivre en cas de déversement d'hydrocarbures en mer ; son application rigoureuse permet une réponse rapide et efficace pour limiter la pollution), pour tous les navires de soutien et la plateforme de forage.
- Surveillance en continu de l'intégrité des équipements de ravitaillement en carburant.
- Réalisation des transferts de carburant uniquement par mer calme, de jour, et à distance >12 nm de la côte.
- Renouvellement régulier des équipements d'intervention pour garantir leur efficacité.
- Organisation de deux simulations de déversement pour tester la réactivité des équipes.

- Assurer un ravitaillement en mer pour maintenir les capacités de lutte antipollution en continu.
- **Mesures contre les collisions de navires**
- Mise en œuvre de navires de poursuite pour signaler la présence de la plateforme et des navires de soutien. (Navire éclaireur)
- Affichage de feux et balises de navigation, système AIS activé, veille radar continue.
- Respect du COLREGS (le COLREGS est le règlement international de prévention des abordages en mer ; son respect permet d'éviter les collisions entre navires, et la documentation des incidents garantit le suivi et la transparence des opérations) et documentation de tout incident.

III.1.5.8 Mesures d'atténuation pour les impacts économiques

- **Perturbation de la pêche**
- Information anticipée des pêcheurs et des autorités locales (affiches, radios marines, flyers).
- Coordination avec les coopératives de pêche pour ajuster les zones d'activité.
- Utilisation de navires de poursuite pour gérer les interactions.
- Compensation possible en cas de dommage avéré à l'équipement de pêche.
- **Perturbation de la navigation**
- Signalement clair de la présence de la plateforme de forage.
- Publication des coordonnées de la zone de sécurité dans les avis aux navigateurs.
- Surveillance permanente de la navigation autour du site.

III.1.5.9 Mesures d'atténuation des impacts potentiels des déversements ou fuites accidentelles

- Les navires de forage et de soutien adopteront les bonnes pratiques internationales en matière de sécurité, de gestion des carburants et de prévention de la pollution marine, conformément aux conventions applicables telles que MARPOL 73/78 .
- Chaque navire impliqué dans le projet disposera d'un plan d'urgence en cas de pollution par les hydrocarbures (SOPEP) à bord, ainsi que de l'équipement d'intervention adéquat pour faire face à un déversement accidentel.
- Les procédures de soutage (bunkering): (l'opération de ravitaillement en carburant d'un navire) seront strictement encadrées. Les mesures suivantes seront appliquées systématiquement :

- Le ravitaillement en carburant s'effectuera uniquement en journée, dans des conditions météorologiques favorables, et à une distance minimale de 12 milles nautiques des côtes.
 - Une inspection visuelle préalable et continue des jauges, raccords, tuyaux et de la surface de la mer sera réalisée avant, pendant et après chaque opération.
 - L'utilisation de raccords à accouplement sec (dry-break couplings) sera obligatoire sur tous les tuyaux de transfert pour éviter les fuites.
 - Une analyse de risques spécifique (Job Hazard Analysis - JHA) sera réalisée avant toute opération de soutage.
- Des kits d'intervention en cas de déversement (spill kits) seront placés à proximité immédiate des zones de stockage d'hydrocarbures et de produits chimiques, régulièrement vérifiés et réapprovisionnés.
 - Les membres du personnel impliqués dans les activités à risque seront formés à la prévention des fuites et à l'utilisation du matériel de lutte contre les déversements, conformément aux standards HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) de l'opérateur.
 - En cas de fuite ou déversement, des dispositifs de confinement (barrages flottants anti-marée noire, boudins absorbants) seront déployés autour de la zone contaminée afin de limiter la dispersion des hydrocarbures.
 - Tous les incidents, même mineurs, feront l'objet d'un rapport détaillé et seront immédiatement signalés à l'autorité maritime algérienne compétente ainsi qu'à l'opérateur principal du projet.
 - Déclenchement immédiat de plans d'urgence antipollution avec déploiement de barrages flottants, skimmers et absorbants.
 - Former le personnel et assurer une surveillance continue.

III.2. Analyse des impacts environnementaux dans le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

III.2.1. Méthodologie d'analyse des impacts environnementaux selon l'ACV

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode normalisée (ISO 14040, 2006) permettant d'évaluer de manière structurée les impacts environnementaux d'un système tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale. Dans le cadre de cette étude, l'ACV a été appliquée aux boues de forage générées lors de la réalisation de puits offshore dans le périmètre marin Skikda–Annaba.

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

L'objectif principal est d'évaluer les impacts environnementaux associés aux différentes phases de forage (26", 16", 12 ¼", 8 ½") et aux scénarios de gestion des boues de forage. Les principaux éléments considérés sont :

- Les pertes de fluide et les émissions de substances toxiques durant les différentes phases de forage,
- Les rejets et les résidus générés par les traitements et stockages intermédiaires.

L'unité fonctionnelle retenue est : la gestion environnementale de 3 500 tonnes de boues de forage

Quatre scénarios de gestion ont été analysés :

- Scénario 1 : Rejet direct en mer.
- Scénario 2 : Enfouissement.
- Scénario 3 : Traitement par stabilisation/solidification.
- Scénario 4 : Traitement par désorption thermique.

Dans le contexte spécifique des boues de forage pétrolier offshore, quatre catégories d'impact ont été sélectionnées :

- Toxicité humaine
- Écotoxicité des eaux marines,
- Écotoxicité des sédiments marins,
- Écotoxicité terrestre.

Ces catégories ont été choisies pour leur pertinence par rapport à la toxicité des boues et aux milieux récepteurs potentiellement affectés.

La conversion des émissions (masses) en scores d'impact repose sur la formule suivante (Huijbregts et al. 2001). La caractérisation de chaque type d'impact lié à chaque émission est élaborée par des modèles mathématiques multimedia qui prennent en compte le devenir géochimique et le transfert de la substance émise dans chaque compartiment environnemental (Eaux, Airs, Sols, Sédiments) ainsi que la réponse de la cible exposée (Ecosystèmes terrestres et marins, Homme) (Ghazi 2011, 2023). Dans le cas de la Toxicité humaine, l'impact est exprimé en DALY « Disability-Adjusted Life Year » ou « Années de vie ajustées sur l'incapacité », ce qui signifie la somme des années de vie potentielle perdues en raison d'une mortalité prématurée et des années de vie productives perdues en raison d'incapacités. Dans le cas de l'Écotoxicité terrestre et marine, l'impact est exprimé en PDF.m².year « Potentially Disappeared Fraction of species », ce qui signifie la fraction d'espèces potentiellement disparues dans une surface (m²) et par année.

$$S_i = \sum \sum CF_{i,x,e} \times M_{x,e}$$

avec :

- S_i : Score d'impact pour la catégorie i ,
- $CF_{i,x,e}$: Facteur de caractérisation de la substance x dans le compartiment e ,
- $M_{x,e}$: Masse de la substance x émise dans le compartiment e ,
- n et m : Nombre total de substances et de compartiments considérés.

Les scores d'impact obtenus ont été exprimés par phase de forage (pour identifier les phases critiques) ainsi que par scénario de gestion (pour comparer les performances environnementales des solutions envisagées)

III.2.2. Inventaire des flux entrants et sortants du forage du puits

Dans le cadre de l'évaluation des impacts environnementaux du forage pétrolier, l'étape d'inventaire des flux constitue un élément central de l'analyse. Cette phase permet de recenser de manière exhaustive l'ensemble des flux de matière et d'énergie associés aux différentes phases de réalisation du puits. L'inventaire couvre à la fois les flux entrants — consommation d'énergie, de fluides de forage et de matériaux — et les flux sortants — émissions atmosphériques, rejets dans le milieu marin et dépôts dans les sédiments.

Le tableau 13, détaille ces flux pour chaque phase de forage du puits (26", 16", 12 ¼" et 8 ½"), en distinguant les principales catégories de substances émises. Cet inventaire constitue la base de modélisation nécessaire pour le calcul des impacts environnementaux par catégories, en cohérence avec les exigences méthodologiques de l'analyse du cycle de vie (Ghazi, 2008, 2010).

Tableau 14: Flux entrants et sortants du forage du puits

	Unité	Phases forées du puits			
		Phase 26"	Phase 16"	Phase 12 ¼"	Phase 8 ½"
Flux entrants					
Ressources					
Energie	kWh	6.03E+01	1.06E+06	4.98E+05	1.07E+06
Pétrole	m3	3.96E+02	6.47E+01	5.25E+02	6.34E+02
Gaz naturel	m3	1.37E+04	5.62E+04	3.21E+04	1.02E+05
Baryte	t	1.79E+02	1.78E+01	8.80E+02	1.14E+00
Bentonite	Kg	1.16E+05	4.10E+00	4.96E+00	1.29E+01
Bauxite	g	4.12E+01	7.79E+00	1.78E+02	6.65E+01
Flux sortants					
Emissions à l'air					
Oxydes de soufre	Kg	3.43E+02	1.54E+03	1.44E+03	1.89E+03
Oxydes d'azote	Kg	1.42E+02	1.54E+03	9.32E+02	1.88E+03
Particules	Kg	1.34E+02	2.87E+02	9.45E+02	9.25E+01

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

NMCOV	Kg	3.57E+02	5.62E+03	2.89E+03	5.06E+03
Méthane	mg	1.86E+02	3.52E+01	8.07E+02	3.00E+02
CO2	t	6.58E+01	2.88E+02	2.63E+02	4.26E+02
CO	Kg	2.81E+01	3.96E+02	2.11E+02	4.73E+02
Emissions à l'eau de mer					
Pb	g	2.67E+02	1.08E+02	3.39E+02	1.88E+02
Cu	g	5.51E+01	1.17E+02	3.00E+02	1.83E+02
Co	g	2.16E+01	1.11E+01	1.02E+02	3.64E+01
Cr	g	1.14E+02	6.02E+01	5.21E+02	1.99E+02
As	g	2.22E+01	8.22E+02	1.22E+02	7.55E+01
Sb	mg	1.69E+02	7.14E+01	7.82E+02	2.82E+02
Ba	Kg	1.09E+01	1.26E+01	1.39E+01	3.95E+01
Al	Kg	4.01E+01	1.24E+02	5.62E+01	2.66E+01
Hydrocarbures aromatiques	Kg	1.65E+00	5.29E+04	1.17E+01	2.52E+01
Emissions aux sédiments marins					
Pb	g	1.54E+02	1.07E+02	4.13E+02	1.62E+02
Cu	g	4.21E+01	1.09E+02	2.97E+02	1.22E+02
Co	g	2.08E+01	1.07E+01	1.01E+02	4.14E+01
Cr	g	1.03E+02	5.92E+01	4.98E+02	2.01E+02
As	g	2.14E+01	7.92E+02	1.03E+02	8.55E+01
Sb	mg	1.70E+02	8.14E+01	7.81E+02	3.02E+02
Ba	Kg	1.10E+01	1.30E+01	1.40E+01	4.01E+01
Al	Kg	3.91E+01	1.20E+02	5.52E+01	2.77E+01
Hydrocarbures aromatiques	Kg	1.87E+00	4.99E+04	1.09E+01	2.69E+01

Le tableau 14, présente les flux entrants (consommation de ressources) et les flux sortants (émissions vers l'air, le sol et les sédiments) pour chacun des scénarios de gestion des rejets de forage. Cet inventaire constitue la base de l'évaluation des impacts environnementaux, en permettant d'identifier les principales substances contribuant aux différentes catégories d'impacts (Ghazi, 2008, 2010).

Tableau 15: Flux entrants et sortants des scénarios de gestion des rejets de forage

	Unit	Scénarios de traitement des boues (3500 t)			
		Rejets en mer	Enfouissement	Stabilisation-Solidification	Désorption thermique
Flux entrants					
Ressources					
Eau	Kg	5.11E+06	2.33E+06	5.86E+06	3.11E+06
Energie	MJ	1.38E+05	1.32E+05	2.23E+05	-8.14E+05
Baryte	Kg	6.13E+02	4.35E+01	6.59E+01	4.24E+01
Bentonite	Kg	4.18E+06	3.78E+00	3.89E+03	2.82E+03
Carbone	Kg	1.30E+04	8.20E+04	1.10E+05	-2.00E+03

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Gaz naturel	M ³	1.76E+03	6.80E+03	9.67E+03	-4.38E+03
Fer	Kg	7.86E+00	9.61E+01	1.29E+02	1.67E-01
Flux sortants					
Emissions à l'air					
CO2	Kg	4.75E+05	4.64E+05	6.26E+05	-3.71E+04
CO	Kg	1.85E+02	5.54E+02	7.49E+02	-6.47E+01
CH4	Kg	6.58E+02	6.20E+02	8.69E+02	-4.23E+02
VOC	Kg	2.03E+05	x	1.89E+05	1.37E+05
Emissions au sol et aux sédiments					
Al	Kg	7.60E+04	7.71E+04	1.68E+05	1.37E+05
As	Kg	2.90E+00	4.71E-01	6.29E-01	1.34E+00
Ba	Kg	2.29E+05	1.17E+05	1.86E+05	1.61E+05
Pb	Kg	1.06E+03	2.06E+03	3.47E+03	1.43E+03
Ni	Kg	4.84E+01	3.26E+01	5.71E+01	5.20E+01
Zn	Kg	7.26E+03	2.09E+03	3.06E+03	1.17E+03
Cu	Kg	1.48E+02	2.33E+02	1.57E+02	5.20E+02
Cr	Kg	2.06E+03	1.35E+03	3.21E+03	1.03E+03
Co	Kg	3.29E+03	2.17E+03	1.73E+03	2.61E+03
Cd	Kg	8.60E+03	6.71E+03	4.68E+03	1.37E+03
Hydrocarbures aromatiques	Kg	3.87E+05	3.62E+04	5.81E+04	1.02E+04

III.2.3. Scores d'impact des pertes de circulation du puits

III.2.3.1. Scores d'Ecotoxicité du sous-sol marin

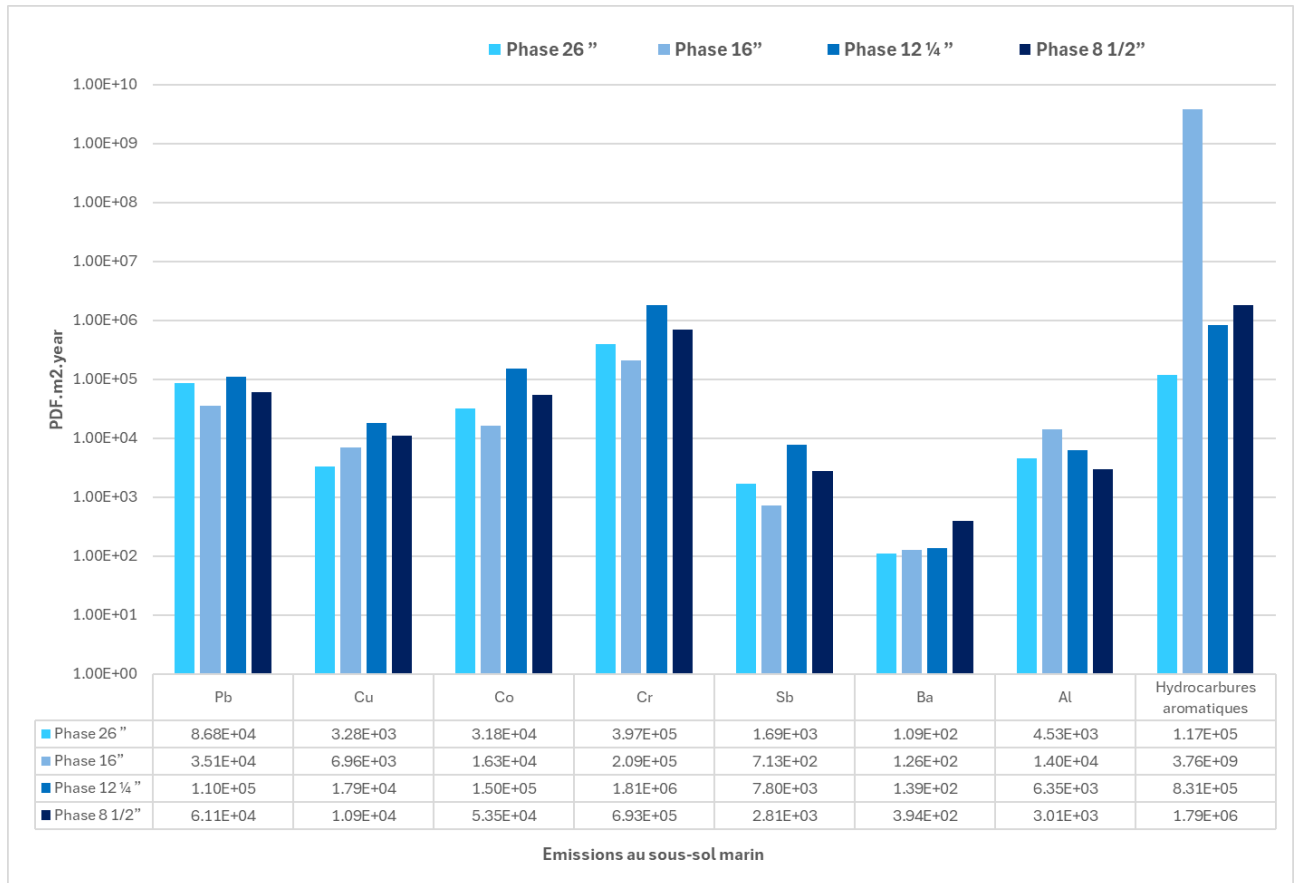


Figure 41: Scores d'Ecotoxicité du sous-sol marin liés au forage des phases du puits pétrolier offshore

L'analyse détaillée permet d'identifier les substances émises localement à la suite des pertes de fluide survenues lors du forage des différentes sections du puits, et leur contribution à l'écotoxicité terrestre. Il ressort du graphique de la figure 41 que les hydrocarbures aromatiques présentent les scores de contribution les plus élevés, toutes phases confondues, et plus particulièrement au cours de la phase 16", avec un pic remarquable atteignant 3,76E+09. Cette forte contribution s'explique par leur toxicité aiguë, leur persistance dans les milieux naturels, ainsi que leur capacité à se fixer dans les sols et à interagir avec les organismes vivants.

D'autres substances telles que le chrome (Cr), le cobalt (Co) et l'aluminium (Al) affichent également des scores notables, notamment au cours de la phase 12 1/4", traduisant une influence marquée sur la qualité des sols exposés. Ces substances, en fonction de leur concentration dans les pertes de fluide et de leur seuil de toxicité, représentent un risque écologique important pour les compartiments terrestres. Par exemple, le chrome atteint un score de 1,81E+06 au cours de la phase 12 1/4", ce qui s'explique par sa forte toxicité et sa mobilité dans les sols.

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et l'antimoine (Sb) montrent quant à eux des contributions intermédiaires, variables selon les phases, alors que le baryum (Ba), pourtant couramment utilisé dans les boues de forage, présente des scores relativement faibles, suggérant une moindre toxicité terrestre ou une plus faible présence dans les rejets.

De manière générale, les phases de forage les plus avancées (notamment 12 ¼" et 16") tendent à présenter des scores plus élevés, en raison d'une intensification des pertes de fluide et d'une concentration accrue en substances toxiques. En effet, ces phases correspondent à des profondeurs plus importantes, où les conditions de pression et de température sont plus élevées, augmentant ainsi la probabilité de pertes de fluide dans la formation géologique. De plus, les boues de forage utilisées dans ces sections profondes contiennent souvent une plus grande variété d'additifs chimiques (agents de densité, inhibiteurs de corrosion, agents de stabilisation, etc.) susceptibles de libérer des métaux lourds et des composés organiques toxiques. La combinaison de ces facteurs favorise une contamination plus significative des compartiments environnementaux, notamment des sols en cas de migration des polluants vers la surface terrestre ou lors du traitement des résidus à terre. Cela explique les pics observés dans les scores d'écotoxicité terrestre pour des substances telles que les hydrocarbures aromatiques, le chrome ou encore le cobalt durant ces phases critiques

III.2.3.2. Scores de Toxicité humaine :

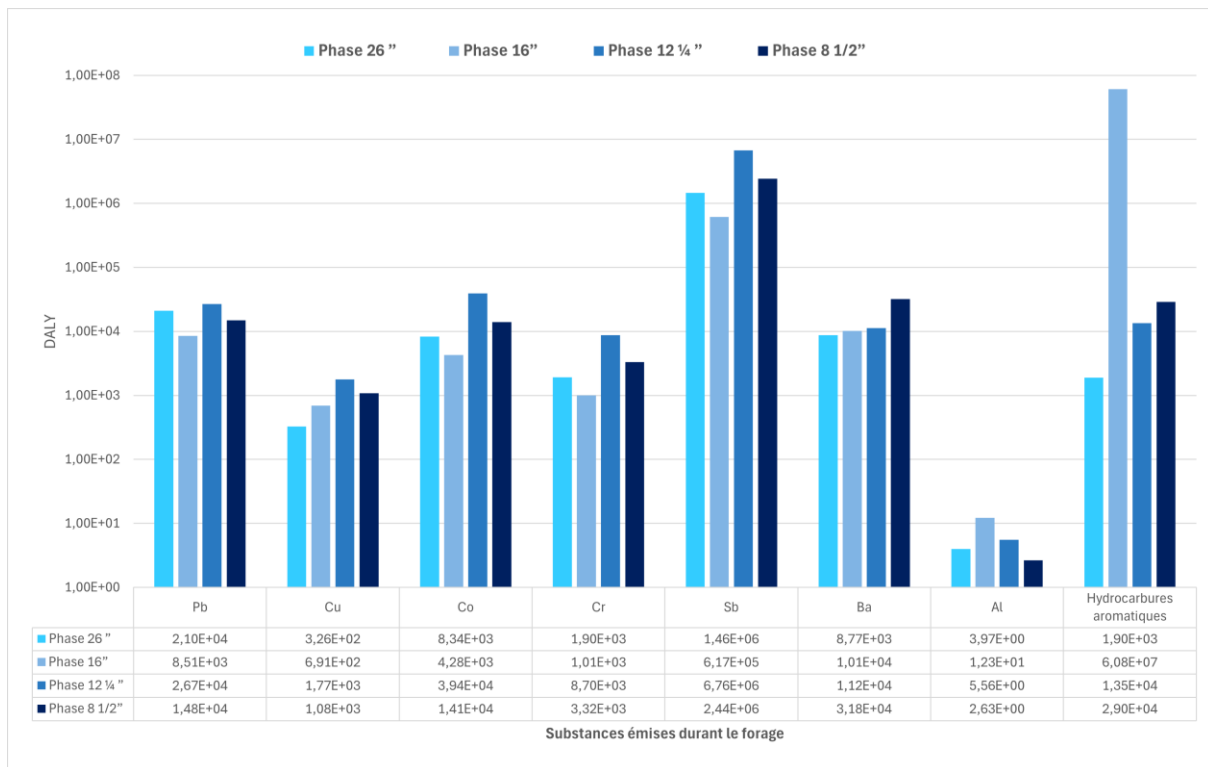


Figure 42: Scores de Toxicité humaine liés au forage des phases du puits pétrolier offshore

L'analyse des scores de toxicité humaine liés aux pertes de fluide de forage met en évidence l'importance de certaines substances émises au cours des différentes phases du puits. Le graphique ci-dessus montre que les hydrocarbures aromatiques constituent la principale source de toxicité

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

humaine, toutes phases confondues. Cette contribution est particulièrement marquée durant la phase 16", où un pic impressionnant de $6,08E+07$ est atteint. Cette valeur exceptionnelle s'explique par la toxicité aiguë de ces composés, leur caractère lipophile favorisant leur accumulation dans les tissus biologiques, ainsi que leur potentiel cancérigène reconnu, notamment via l'exposition chronique par inhalation ou contact cutané en milieu offshore.

Parmi les métaux lourds, l'antimoine (Sb) et le cobalt (Co) présentent également des scores élevés de toxicité humaine, notamment respectivement durant les phases 8 1/2" et 12 1/4". Le cobalt atteint par exemple $1,41E+04$ durant la phase 8 1/2", tandis que l'antimoine dépasse $6,76E+06$ durant la phase 12 1/4", traduisant un risque significatif pour la santé humaine, en lien avec leur potentiel de bioaccumulation et leurs effets sur les systèmes respiratoire et neurologique.

Le chrome (Cr), reconnu pour ses effets toxiques sur le système immunitaire et ses propriétés génotoxiques, enregistre également un score préoccupant de $8,70E+03$ durant la phase 12 1/4". De manière plus modérée, le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le baryum (Ba) affichent des valeurs variables mais non négligeables, selon les phases, témoignant d'une exposition diffuse mais potentiellement cumulative.

Enfin, même si l'aluminium (Al) reste globalement moins toxique, un pic est observé durant la phase 16" (score de $1,23E+01$), traduisant la présence d'additifs chimiques spécifiques dans les formulations de boues utilisées à cette profondeur.

Globalement, les phases intermédiaires et profondes du forage (notamment 12 1/4" et 16") génèrent les scores les plus élevés en termes de toxicité humaine. Ceci s'explique par des conditions de forage plus extrêmes, nécessitant l'emploi de formulations de boues plus complexes et chargées en composés potentiellement toxiques, ainsi qu'un risque accru de pertes de fluide dans la formation géologique. Ces pertes favorisent l'exposition du personnel et de l'environnement aux substances dangereuses, accentuant ainsi les risques pour la santé humaine sur les sites de forage offshore.

III.2.3.3. Scores d'Ecotoxicité des eaux marines :

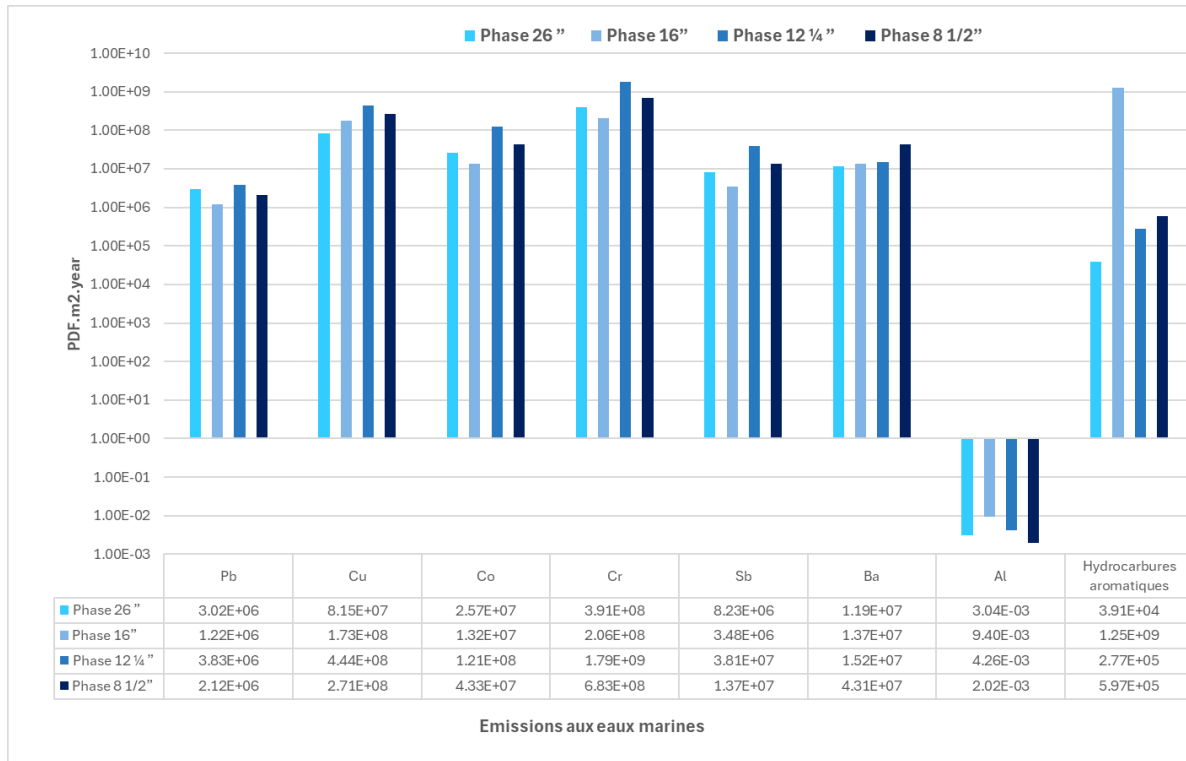


Figure 43: Scores d'Ecotoxicité des eaux marines liés au forage des phases du puits pétrolier offshore (PDF.m².year/Kg)

L'analyse des scores d'écotoxicité des eaux marines associés aux pertes de fluide de forage permet de mieux cerner l'impact potentiel des substances émises sur les milieux aquatiques. Le graphique ci-dessus révèle que le chrome (Cr) représente l'un des principaux contributeurs à l'écotoxicité marine, toutes phases confondues, avec un pic remarquable observé durant la phase 12 1/4", atteignant 3,91E+08. Cette valeur élevée s'explique par la toxicité aiguë du chrome sous forme hexavalente, qui est particulièrement nocif pour les organismes aquatiques, notamment les crustacés, les algues et les poissons, en raison de son fort pouvoir oxydant et de sa persistance dans les environnements marins.

Le cuivre (Cu) et le cobalt (Co) affichent également des scores très élevés, notamment durant la phase 12 1/4", avec respectivement 4,44E+08 et 1,79E+08. Ces substances sont connues pour leur toxicité chronique vis-à-vis des organismes marins, même à faibles concentrations. Le cuivre, souvent utilisé comme agent biocide dans les formulations de boues, perturbe les processus enzymatiques chez les invertébrés marins, tandis que le cobalt peut affecter la croissance et la reproduction des espèces aquatiques sensibles.

L'antimoine (Sb) enregistre aussi des contributions importantes, notamment en phase 12 1/4" avec un score de 3,87E+07, traduisant un risque non négligeable pour les compartiments aquatiques. À l'inverse, des substances comme le plomb (Pb) et le baryum (Ba) présentent des scores plus modérés, bien qu'ils restent significatifs, en particulier durant les phases 26" et 12 1/4". Le baryum,

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

largement utilisé dans les boues de forage sous forme de barytine, affiche un score maximum de $1,52E+07$, ce qui reste relativement bas au regard de son usage intensif, probablement en raison de sa faible solubilité et donc de sa biodisponibilité réduite en milieu marin.

Le cas de l'aluminium (Al) est particulier : il présente les scores les plus faibles de l'ensemble des substances, avec des valeurs de $3,04E-03$ en phase 26" et $2,02E-03$ en phase 8 ½". Ces faibles valeurs indiquent une contribution négligeable à l'écotoxicité marine, probablement en raison de sa faible solubilité en eau de mer et de sa tendance à précipiter rapidement, limitant ainsi son interaction avec les organismes aquatiques.

Enfin, les hydrocarbures aromatiques présentent des scores modérés comparés aux métaux, avec un maximum de $5,27E+05$ observé en phase 12 ¼". Bien que leur écotoxicité soit inférieure à celle observée pour la toxicité humaine, ils restent préoccupants en raison de leur potentiel de bioaccumulation et de leurs effets génotoxiques à long terme sur le biote marin.

De manière générale, ce sont les phases profondes du forage, telles que la 12 ¼" et la 8 ½", qui génèrent les scores les plus élevés d'écotoxicité, en raison d'une plus forte concentration en métaux lourds et additifs chimiques dans les boues utilisées à ces profondeurs. La complexité des formulations, combinée à des conditions physiques extrêmes (pression, température), augmente la probabilité de rejets nocifs dans l'environnement marin. Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion rigoureuse des fluides de forage et des pertes accidentelles, afin de préserver la qualité des eaux marines et la biodiversité des zones offshore

III.2.3.4. Scores d'Ecotoxicité des sédiments marins :

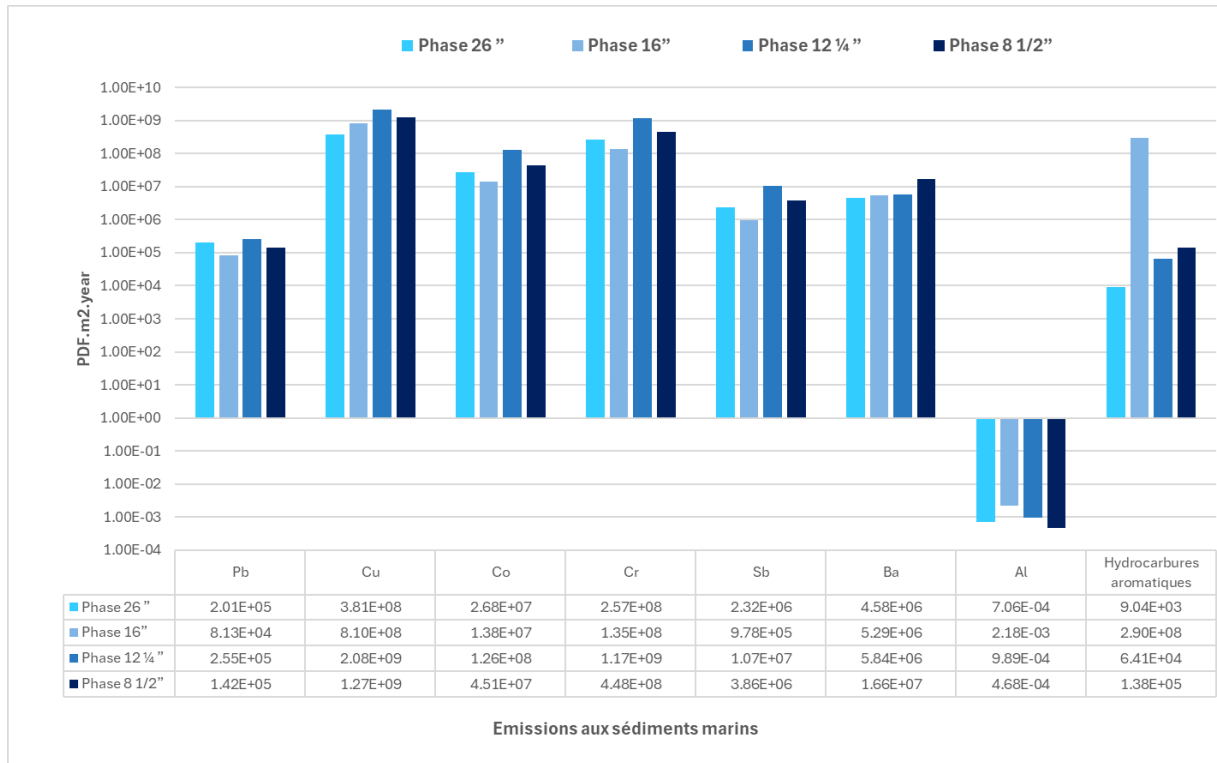


Figure 44: Scores d'Ecotoxicité des sédiments marins liés au forage des phases du puits (PDF.m².year/Kg)

L'analyse des scores d'écotoxicité associés aux sédiments marins met en lumière la contribution des différentes substances issues des pertes de fluide de forage durant les diverses phases du puits offshore. Le graphique révèle que le cuivre (Cu) est la substance qui présente les scores d'écotoxicité les plus élevés, toutes phases confondues, avec un pic atteignant 4,51E+09 lors de la phase 8 1/2". Ce résultat s'explique par la forte affinité du cuivre pour les particules sédimentaires, où il peut se fixer durablement, ainsi que par sa toxicité chronique élevée pour les organismes benthiques.

Le chrome (Cr) et le cobalt (Co) occupent également une place importante dans les scores d'écotoxicité des sédiments, avec respectivement 2,57E+08 et 2,68E+07 durant la phase 26", et des valeurs similaires dans les autres phases. Ces métaux lourds peuvent s'accumuler dans les sédiments et être mobilisés sous certaines conditions (changement de pH, redox), menaçant la faune benthique par bioaccumulation et transfert dans la chaîne alimentaire.

L'antimoine (Sb) montre un score important au cours de la phase 26" (2,32E+06), traduisant une présence significative dans les rejets. Il est connu pour sa persistance dans les sédiments, bien que ses effets écotoxiques soient moins étudiés que ceux d'autres métaux.

Le plomb (Pb) et le baryum (Ba) présentent des scores intermédiaires. Le baryum, bien qu'abondamment utilisé dans les boues de forage, atteint un maximum de 5,29E+06 (phase 16"), mais cela reste inférieur à d'autres métaux, probablement en raison de sa faible mobilité et

solubilité. Quant au plomb, bien qu'il soit un polluant classique des environnements sédimentaires, ses scores relativement plus bas peuvent être liés à une concentration moindre dans les pertes ou à une précipitation rapide dans la colonne d'eau.

En ce qui concerne l'aluminium (Al), on observe des valeurs très faibles (par exemple $7,06E-04$ en phase 26" ou $9,80E-04$ en phase 12 ¼"), ce qui correspond à une contribution quasi négligeable à l'écotoxicité des sédiments. Ces faibles scores s'expliquent par la faible biodisponibilité de l'aluminium en milieu marin et sa tendance à se complexer rapidement avec d'autres minéraux, limitant ainsi ses effets écotoxiques directs.

Enfin, les hydrocarbures aromatiques présentent des scores très variables selon les phases, avec un pic observé en phase 16" ($2,20E+08$). Bien qu'inférieurs à ceux des métaux comme le cuivre ou le chrome, ces composés demeurent préoccupants en raison de leur fort pouvoir de sorption dans les sédiments, leur biodégradabilité limitée, et leur toxicité génotoxique et cancérigène pour la faune benthique à long terme.

Globalement, les phases de forage profondes (notamment les phases 12 ¼" et 8 ½") sont associées à une augmentation des scores d'écotoxicité sédimentaire, en raison de la nature plus complexe des boues utilisées, contenant des agents chimiques plus diversifiés et potentiellement plus toxiques. Les sédiments agissent comme des pièges à polluants, et leur contamination pose un risque à long terme pour l'écosystème benthique et les chaînes trophiques marines.

III.2.3.5. Conclusion générale sur les contributions écotoxicologiques des pertes de fluide de forage

L'analyse croisée des contributions écotoxicologiques des substances issues des pertes de fluide de forage, selon les compartiments environnementaux (terrestre, marin) et l'exposition humaine, met en évidence des tendances claires et préoccupantes. Les hydrocarbures aromatiques se distinguent systématiquement comme les principaux contributeurs à la toxicité, toutes phases confondues, en raison de leur forte persistance, leur potentiel bioaccumulatif et leurs effets cancérigènes ou génotoxiques. Leur contribution est particulièrement marquée dans les phases profondes du forage, en lien avec l'utilisation de formulations chimiques plus complexes.

Les métaux lourds tels que le chrome, le cobalt, l'antimoine et le cuivre jouent également un rôle significatif, tant pour l'écotoxicité des sols et des milieux marins que pour les risques sanitaires. Le chrome, notamment sous forme hexavalente, affecte simultanément les écosystèmes terrestres, aquatiques et la santé humaine. Le cobalt et l'antimoine présentent quant à eux une toxicité chronique documentée, en particulier lors des phases intermédiaires et profondes du forage.

Les substances comme le baryum ou l'aluminium, bien que présentes dans les formulations, affichent des contributions plus modérées voire faibles, ce qui peut s'expliquer par leur faible biodisponibilité ou leur comportement physico-chimique limitant leur dispersion dans l'environnement.

Les phases de forage 12 ¼" et 16" concentrent l'essentiel des pics de toxicité observés. Ces sections correspondent aux profondeurs les plus critiques du processus de forage, où les conditions de

température, de pression et les pertes de fluide sont les plus importantes. Elles impliquent une mobilisation accrue d'additifs chimiques aux propriétés écotoxiques et une plus grande probabilité de migration de polluants dans les différents compartiments environnementaux.

III.2.4. Scores d'impacts environnementaux des scénarios de gestion des boues de forage :

III.2.4.1. Scores d'impacts environnementaux des rejets de forage en mer :

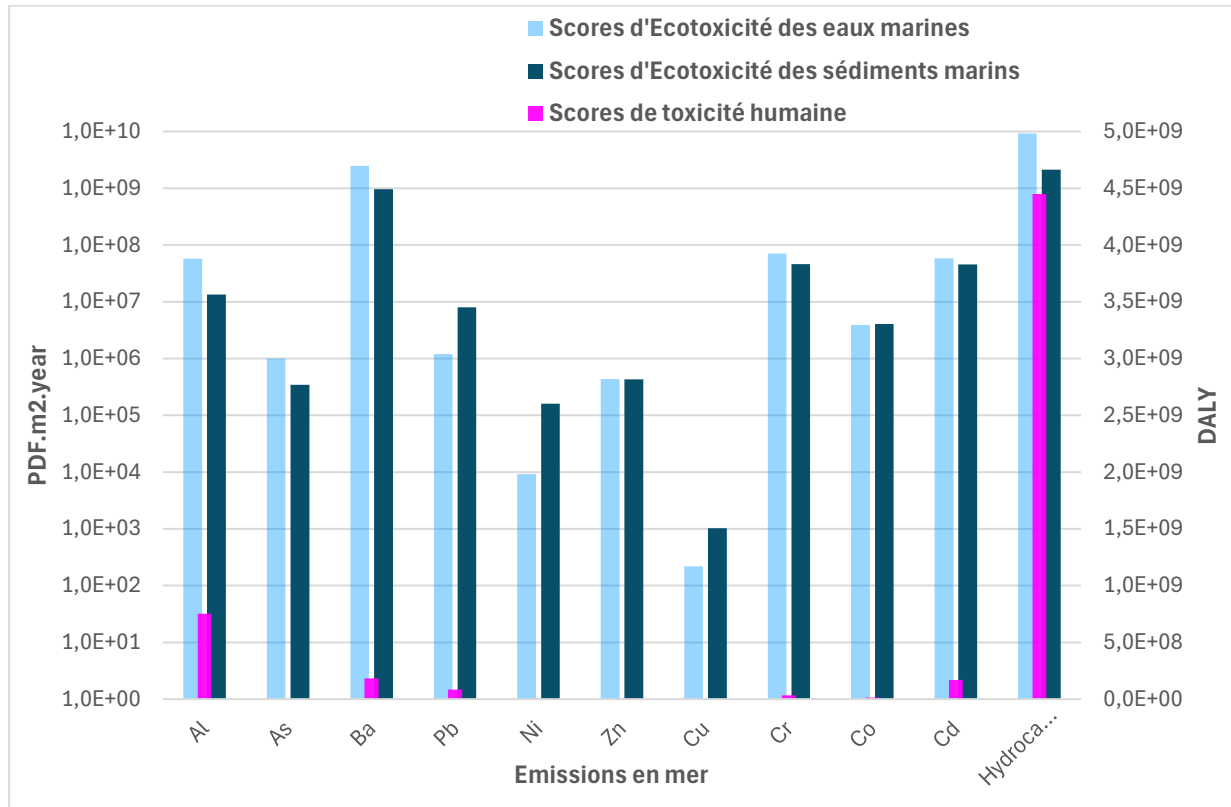


Figure 45: Scores d'impacts environnementaux des rejets de forage en mer

Dans le cadre de l'analyse des scénarios de gestion des boues de forage (3500 t), un scénario maximaliste a été étudié, supposant un rejet direct en mer des boues sans traitement préalable. La figure 46 présente les scores d'impacts environnementaux associés à ce scénario, répartis selon trois catégories d'impact : toxicité humaine, écotoxicité des eaux marines et écotoxicité des sédiments marins.

L'analyse des résultats montre que les hydrocarbures aromatiques dominent très largement l'ensemble des catégories, avec des scores de $9,17E+09$ pour la toxicité humaine, $5,38E+09$ pour l'écotoxicité des eaux marines et $2,12E+09$ pour l'écotoxicité des sédiments marins. Leur forte toxicité, combinée à une capacité élevée de dispersion dans le milieu marin et à une affinité marquée pour les particules solides, explique leur contribution importante aux impacts environnementaux. Ces substances peuvent non seulement contaminer la colonne d'eau et affecter directement les organismes marins, mais aussi s'accumuler dans les sédiments où elles peuvent persister pendant de longues périodes et continuer à relarguer des composés toxiques dans le milieu.

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les métaux tels que le baryum ($1,84E+08$ en toxicité humaine), le plomb ($8,35E+07$) et le nickel ($1,34E+07$) présentent également des contributions importantes. Ces éléments sont relativement mobiles en milieu marin et montrent une tendance marquée à se fixer dans les sédiments, ce qui représente un risque pour les écosystèmes benthiques. Leur présence dans les compartiments aqueux et sédimentaires indique qu'ils peuvent affecter à la fois les organismes vivant en pleine eau et ceux liés au fond marin.

L'aluminium ($7,52E+08$ en toxicité humaine) se distingue par un impact principalement sur la toxicité humaine, ce qui pourrait s'expliquer par sa biodisponibilité dans certaines formes chimiques et ses interactions avec la chaîne alimentaire. En revanche, son effet sur les eaux marines et les sédiments apparaît plus limité.

Les métaux tels que le chrome, le cobalt et l'arsenic montrent des niveaux d'impact intermédiaires. Leur comportement en milieu marin varie en fonction des conditions physico-chimiques (pH, salinité, matière organique), ce qui influence leur répartition entre phase dissoute et phase particulaire.

Enfin, le zinc et le cuivre, bien que présents en quantités mesurables, ont des contributions relativement faibles. Cela pourrait être lié à la formation de complexes stables en milieu salin, réduisant leur toxicité et leur disponibilité pour les organismes marins.

Globalement, ces résultats montrent que dans un scénario de rejet direct, plusieurs substances présentent un risque environnemental non négligeable, avec des mécanismes de transfert et de persistance différents selon les composés

III.2.4.2. Scores d'impacts environnementaux de l'enfouissement terrestre des rejets de forage

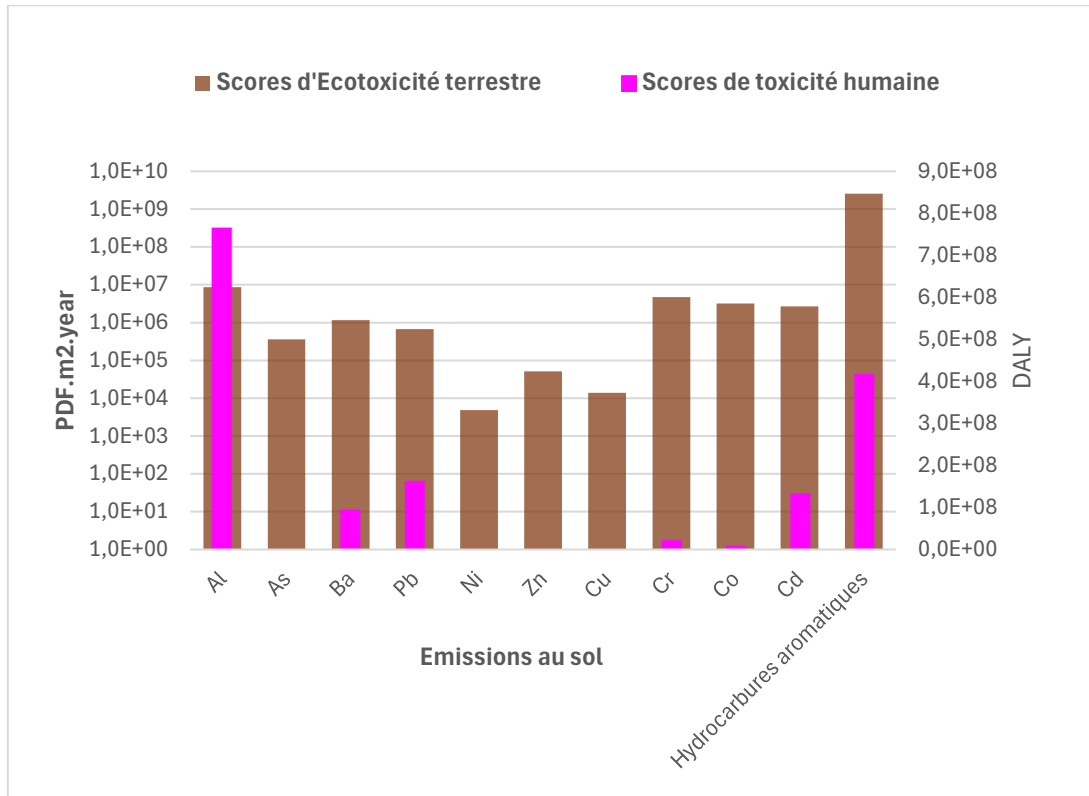


Figure 46: Scores d'impacts environnementaux de l'enfouissement terrestre des rejets de forage

Dans le cadre de l'analyse des scénarios de gestion des boues de forage (3500 t), un scénario d'enfouissement a été étudié. La figure 47 présente les scores d'impacts environnementaux associés à ce scénario, répartis selon deux catégories d'impact : toxicité humaine et écotoxicité terrestre.

L'analyse des résultats montre que les hydrocarbures aromatiques constituent les principaux contributeurs à l'écotoxicité terrestre (2,57E+09). Leur persistance dans les sols et leur forte affinité pour les matières organiques expliquent leur contribution importante aux impacts environnementaux. Ces substances peuvent altérer durablement la qualité des sols et affecter la faune et la flore terrestre.

Les métaux tels que l'aluminium (7,86E+08), le plomb (1,96E+08) et le cadmium (1,33E+08) présentent également des contributions élevées, principalement en toxicité humaine. Leur potentiel de migration dans les sols et de contamination des eaux souterraines constitue un facteur de risque sanitaire important.

Le chrome, le cobalt, le nickel et l'arsenic montrent des niveaux d'impact intermédiaires. Leur comportement en milieu terrestre dépend fortement des caractéristiques du sol (pH, capacité d'échange cationique, teneur en matière organique), qui influencent leur mobilité et leur disponibilité pour les organismes vivants.

Enfin, le zinc et le cuivre, bien que présents, affichent des contributions plus limitées. Cette faible contribution pourrait s'expliquer par leur rétention dans les complexes du sol, limitant ainsi leur transfert vers les compartiments biologiques sensibles

III.2.4.3. Scores d'impacts environnementaux de la solidification-stabilisation des rejets de forage

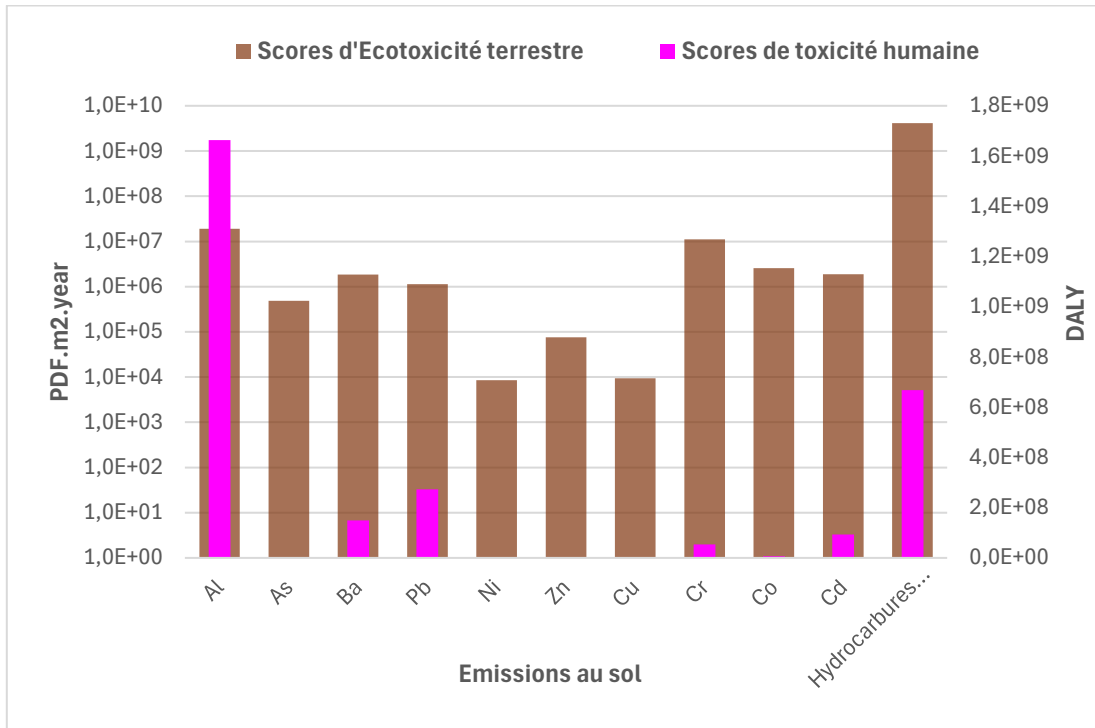


Figure 47: Scores d'impacts environnementaux de la solidification-stabilisation des rejets de forage

Dans le cadre de l'analyse des scénarios de gestion des boues de forage (3500 t), un scénario de stabilisation-solidification a été étudié. La figure 48 présente les scores d'impacts environnementaux associés à ce scénario, répartis selon deux catégories d'impact : la toxicité humaine et l'écotoxicité terrestre.

L'analyse des résultats montre que les hydrocarbures aromatiques sont les principaux contributeurs à l'écotoxicité terrestre, avec un score atteignant $4,13E+09$. Cette valeur élevée s'explique par leur forte persistance dans les milieux terrestres et leur capacité à se lier aux matières organiques du sol, limitant leur dégradation naturelle. Leur potentiel toxique envers la faune et la flore terrestre reste élevé malgré les efforts de stabilisation.

Du côté de la toxicité humaine, c'est l'aluminium (Al) qui enregistre le score le plus élevé ($1,66E+09$), traduisant un risque sanitaire majeur. Cette forte contribution peut être liée à sa capacité de rester partiellement mobile et bioaccessible, même après traitement. Il est suivi par le baryum (Ba) ($1,50E+08$) et le plomb (Pb) ($2,73E+08$), deux éléments bien connus pour leur toxicité chronique, notamment sur le système nerveux et le développement.

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les hydrocarbures aromatiques se distinguent aussi par un score notable en toxicité humaine ($6,68E+08$), traduisant leur double impact environnemental. De même, des substances comme le cadmium (Cd), le chrome (Cr) et le cobalt (Co) présentent des scores significatifs dans les deux catégories d'impacts, ce qui souligne leur comportement potentiellement mobile ou leur réactivité dans les conditions du sol post-traitement.

En revanche, certains contaminants comme le cuivre (Cu), le zinc (Zn) ou l'arsenic (As) affichent des scores plus faibles. Cette moindre contribution pourrait être due à leur immobilisation efficace dans la matrice stabilisée ou à leur faible concentration résiduelle. Dans le cas du cuivre, par exemple, sa forte affinité avec les phases solides du sol peut expliquer sa faible mobilité et donc son impact limité.

Enfin, les niveaux intermédiaires relevés pour le nickel (Ni) et le chrome (Cr) reflètent des comportements conditionnés par les caractéristiques physico-chimiques du sol, comme le pH ou la présence de matière organique, qui influencent leur biodisponibilité et leur potentiel de transfert

III.2.4.4. Scores d'impacts environnementaux de la désorption thermique des rejets de forage

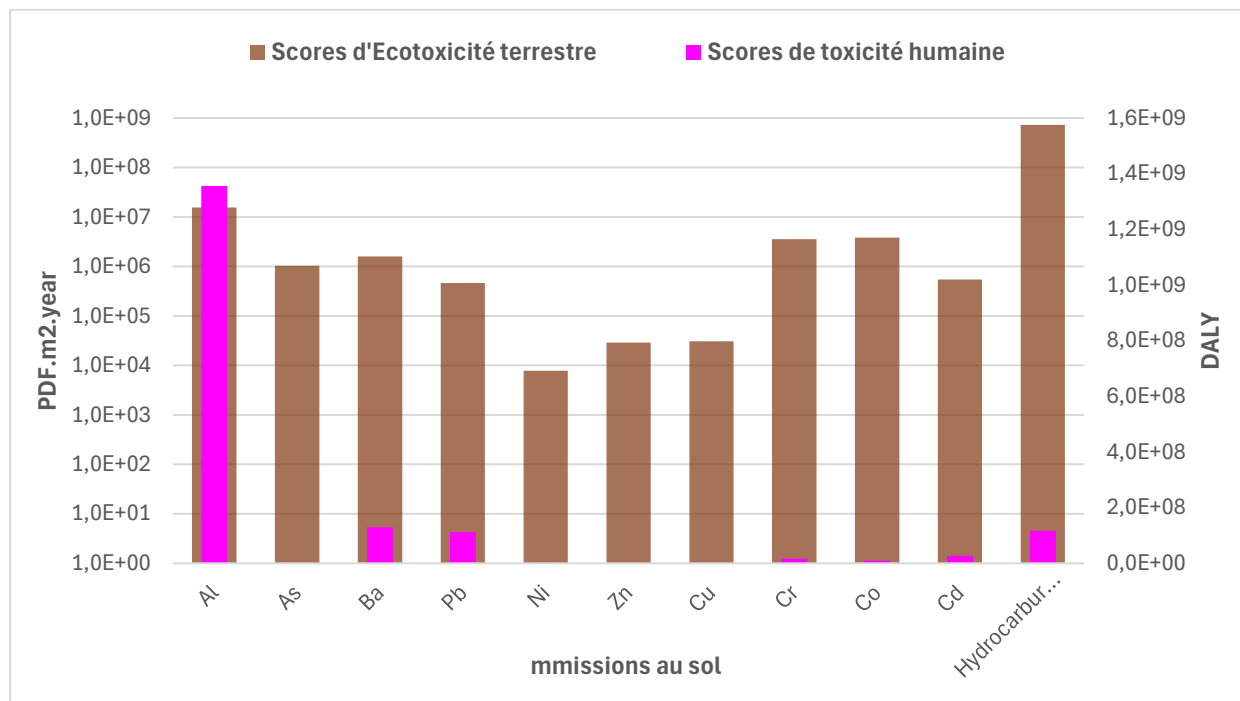


Figure 48: Scores d'impacts environnementaux de la désorption thermique des rejets de forage

Dans le cadre de l'analyse des scénarios de gestion des boues de forage (3500 t), un scénario de désorption thermique a été étudié. La figure 49 présente les scores d'impacts environnementaux associés à ce scénario, répartis selon deux catégories d'impact : la toxicité humaine et l'écotoxicité terrestre.

L'analyse des résultats révèle que les hydrocarbures aromatiques représentent les principaux contributeurs à l'écotoxicité terrestre, avec un score très élevé ($7,24E+08$). Leur comportement

persistant dans l'environnement, leur faible biodégradabilité et leur forte affinité avec les composés organiques du sol expliquent leur capacité à engendrer des effets toxiques à long terme sur la biodiversité terrestre.

Du point de vue de la toxicité humaine, l'aluminium se distingue avec le score le plus élevé (1,36E+09), traduisant un risque sanitaire majeur. Ce métal, difficile à éliminer totalement même après traitement thermique, peut rester partiellement mobile et bioaccessible. Il est suivi par le baryum (1,30E+08) et le plomb (1,13E+08), deux éléments également connus pour leurs effets neurotoxiques et leur potentiel de bioaccumulation.

Des contributions significatives sont également observées pour le chrome, le cobalt et le cadmium, tant pour la toxicité humaine que pour l'écotoxicité terrestre. Le chrome, en particulier, peut exister sous des formes oxydées très toxiques (comme le Cr⁶⁺), dont la stabilité dans l'environnement peut être accentuée par certaines conditions post-traitement.

En revanche, certains éléments comme le cuivre et l'arsenic présentent des niveaux d'impact relativement faibles. Cette faible contribution peut être attribuée soit à leur élimination efficace lors du processus de désorption thermique, soit à leur faible concentration résiduelle ou à leur rétention dans les matrices solides après traitement.

Enfin, les valeurs intermédiaires observées pour le nickel, le zinc ou encore le cobalt traduisent des comportements environnementaux dépendant fortement des propriétés physico-chimiques du sol (pH, capacité d'échange cationique, matière organique), qui conditionnent leur mobilité et leur biodisponibilité

III.2.5. Analyse comparative des scénarios de quatre puits pétroliers offshore

Dans le cadre de l'analyse des impacts environnementaux associés aux scénarios de gestion des boues de forage pour un puits pétrolier offshore (3500 t), une comparaison globale a été réalisée entre quatre scénarios représentatifs des principales filières de traitement ou de rejet, comme illustré dans la figure ci-dessous.

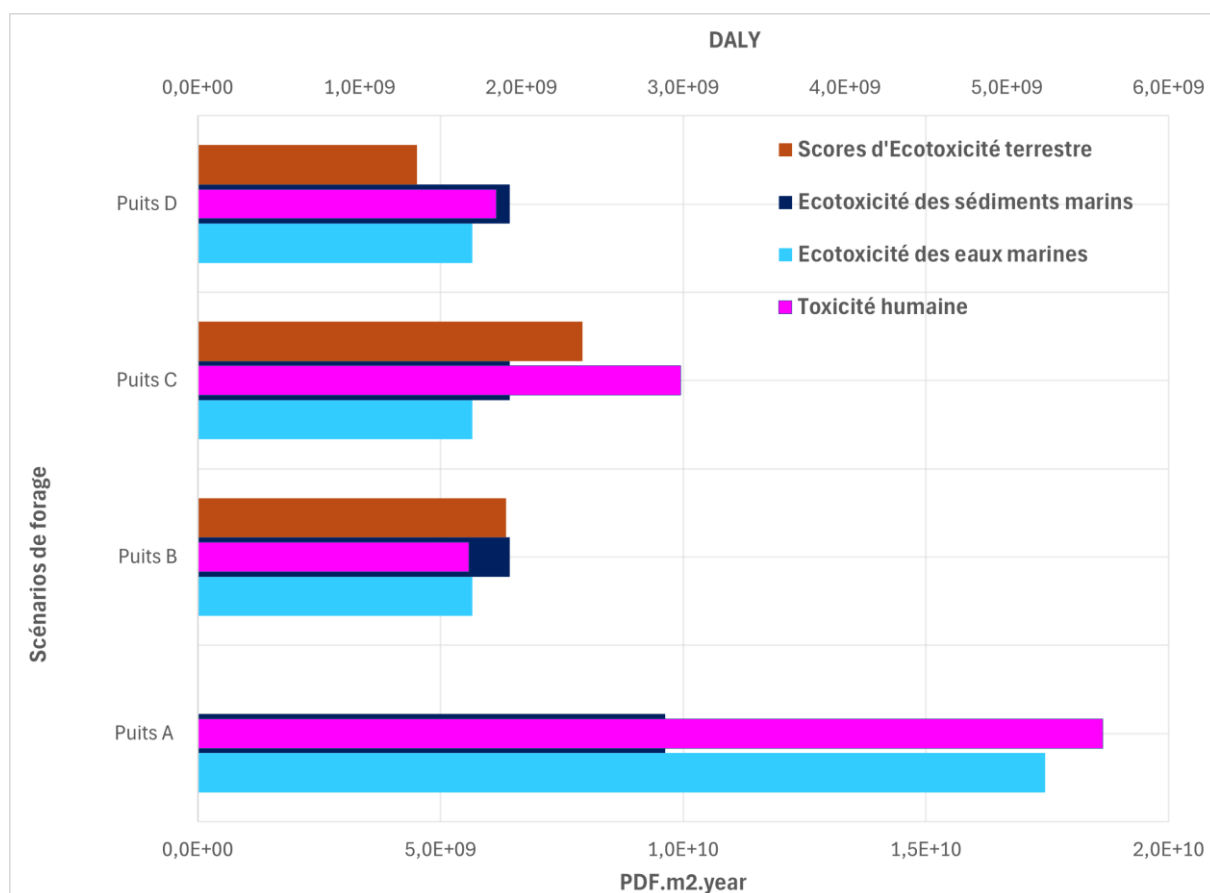


Figure 49: Analyse comparative des scénarios de quatre puits pétroliers offshore

Le premier scénario (Puits A), correspondant à un rejet direct en mer sans traitement, représente une situation maximaliste en termes de pression environnementale. Ce scénario se traduit par des scores d'impacts très élevés dans les compartiments marins, avec une écotoxicité des eaux marines atteignant $1,75E+10$ et une écotoxicité des sédiments marins de $9,63E+09$. La toxicité humaine reste également élevée ($5,95E+09$). Aucun impact terrestre n'est observé logiquement, le rejet se limitant au milieu marin. Ce scénario met en évidence les risques environnementaux importants d'un rejet direct en mer, avec des substances persistantes (notamment hydrocarbures aromatiques et métaux) susceptibles de contaminer durablement les écosystèmes marins.

Le second scénario (Puits B), basé sur l'enfouissement des boues, montre une réduction notable des impacts marins par rapport au rejet en mer, les scores d'écotoxicité des eaux marines et des sédiments tombant respectivement à $5,65E+09$ et $6,43E+09$. En revanche, l'écotoxicité terrestre devient significative ($6,35E+09$), reflétant un transfert potentiel de la pollution vers les sols en cas de défaut de confinement ou de lixiviation.

Le troisième scénario (Puits C), correspondant à un traitement par stabilisation-solidification, permet une maîtrise plus poussée des impacts environnementaux. Les scores restent modérés et équilibrés, avec une écotoxicité terrestre de $7,93E+09$, des impacts marins maîtrisés (écotoxicité des eaux marines et des sédiments à $5,65E+09$ et $6,43E+09$ respectivement), et une toxicité

CHAPITRE III : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

humaine réduite ($2,98E+09$). Cette technique limite la mobilité des polluants, réduisant les risques de dispersion secondaire.

Enfin, le scénario D (Puits D), basé sur un traitement par désorption thermique, apparaît comme le plus performant sur le plan environnemental. Les scores d'impacts y sont globalement les plus faibles, avec $4,51E+09$ en écotoxicité terrestre, $5,65E+09$ en écotoxicité des eaux marines, $6,43E+09$ pour les sédiments marins, et $1,84E+09$ en toxicité humaine. Le traitement thermique permet en effet de réduire fortement la charge polluante initiale, minimisant ainsi les risques de transfert vers l'environnement

Ces résultats démontrent que le rejet direct en mer reste la pratique la plus impactante, alors que des techniques comme la désorption thermique permettent de limiter efficacement la dispersion des polluants.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le développement du secteur offshore en Algérie constitue une opportunité stratégique pour renforcer la souveraineté énergétique nationale et diversifier les sources d'approvisionnement. Toutefois, ce potentiel ne peut être valorisé durablement qu'à travers une gestion rigoureuse de ses impacts environnementaux, particulièrement dans un contexte marin aussi fragile que celui de la Méditerranée.

L'étude d'impact environnemental menée dans ce mémoire a permis de mettre en évidence la complexité et l'ampleur des pressions générées par un puits de forage en mer, qu'il s'agisse des émissions chimiques, des perturbations physiques ou des risques accidentels. En s'appuyant sur une approche méthodologique robuste, intégrant à la fois des données d'inventaire détaillées, des analyses par catégories d'impact et une comparaison de scénarios de traitement, l'évaluation conduite a permis d'identifier les substances les plus critiques et les étapes les plus sensibles du processus de forage.

Les résultats obtenus soulignent la nécessité de privilégier des solutions de traitement performantes, telles que la désorption thermique ou la stabilisation-solidification, qui permettent une réduction significative des impacts sur les écosystèmes marins. Par ailleurs, les risques liés au rejet direct en mer justifient la mise en place de cadres réglementaires stricts et de mécanismes de contrôle renforcés.

Ce travail confirme également l'intérêt de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) comme outil d'aide à la décision dans les projets pétroliers, en offrant une vision globale des impacts potentiels selon différents choix techniques. En intégrant les flux entrants et sortants, les transferts de pollution et les effets à long terme, l'ACV permet d'orienter les pratiques vers une gestion plus durable, plus responsable et plus conforme aux engagements internationaux de l'Algérie.

Enfin, au-delà de ses résultats techniques, ce mémoire constitue une base de réflexion pour les futures opérations offshore algériennes. Il appelle à renforcer l'intégration des considérations environnementales dès la phase de conception des projets, à encourager l'innovation technologique et à développer une expertise nationale en matière de surveillance environnementale marine. À terme, seule une approche équilibrée entre performance énergétique et protection des milieux permettra de concilier développement et durabilité sur les côtes algériennes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abacha, I. (2015).** Étude géodynamique et sismotectonique de la Petite Kabylie (Algérie). Thèse de doctorat, Géosciences. Constantine : Université Mentouri, P. 280
- **Abderrahim.A, Ghaffar.A et al, (2005),** Synthèse sur l'Offshore Algérien, Rapport Interne Sonatrach.
- **Abdi, H. (2014).** Les zones humides de la plaine de Guerbes-Sanhadja et leur rôle dans la biodiversité du bassin méditerranéen. Mémoire de master, Environnement. Skikda : Université de Skikda, P. 118
- **AECOM. (2010).** *Évaluation environnementale stratégique de la mise en valeur des hydrocarbures dans le bassin de l'estuaire maritime et du nord-ouest du golfe du Saint-Laurent.* Rapport d'activité. Document non publié. Québec : Aecom Tecslut inc.
- **Amoco Production Company. (1988).** Drilling Fluids Manual. Houston : Amoco Services, P. 220
- **Benabdelmoumen M.S., Khennaf N et al, (2002),** Les perspectives pétrolières de l'offshore algérien, marge Orientale”, Geoplore IAP.
- **Bonton, A. P. (2014).** *Revue de littérature sur les technologies et les meilleures pratiques environnementales dans le secteur de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures en milieu extracôtier. Contexte du golfe du Saint-Laurent.* Rapport d'activité. Document non publié. Québec : MDDELCC.
- **Boumezbeur, A. (2001).** Étude géomorphologique de la plaine de Guerbes-Sanhadja et de ses caractéristiques écologiques. Rapport d'activité. Document non publié. Constantine : Université de Constantine
- **Bourgoyne, Adam T., Millheim, Keith K., Chenevert, Marc E., Young, Fred S. (1986).** Applied Drilling Engineering. Richardson : SPE Textbook Series, P. 300
- **Bouselsal, B. (2017).** FORAGE D'EAU : Procédés et mesures. Document de cours, Licence 3 Hydrogéologie. Ouargla : Université Kasdi Merbah, Faculté des Hydrocarbures, des Énergies renouvelables et des Sciences de la Terre et de l'Univers, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.
- **BRGM (2013).** Étude relative à l'impact environnemental des boues de forage. Rapport d'activité, document non publié. Orléans : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- **C.F.S. (2006).** Caractéristiques de la végétation et de la faune de la région de Guerbes-Sanhadja. Rapport d'activité. Document non publié. Alger : Ministère de l'Environnement et des Ressources en Eau
- **Caenn, Russel, Darley, Houston C. H., Gray, George R. (2011).** Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Houston : Gulf Professional Publishing, P. 720
- **Casale, Paolo, Affronte, Marco. (2018).** Tortues de mer de la Méditerranée : connaissances actuelles et priorités de conservation. MedPAN, Vol. 18, n° 2, P.P 44–59
- **Chikr, M. (2014).** Étude qualitative et quantitative du peuplement phytoplanctonique observé sur le littoral algérien. Rapport de stage. Blida : Université de Blida, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, P.38
- **Climats et Voyages. (2025).** Climat Skikda : température, pluie, quand partir. [En ligne]. [consulté le 25/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.climatsetvoyages.com/climat/algerie/skikda>
- **Comité MEAC (2018).** *Comment se sont formés les combustibles fossiles ?* [En ligne]. [Consulté le 05/02/2025]. Disponible sur le web : <https://comitemeac.com/dossiers-2/dossiers/capsules-energetiques-introduction/comment-se-sont-formes-les-combustibles-fossiles/>

Références bibliographiques

- **Commission OSPAR. (2010).** Évaluation de la qualité du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est – Chapitre 7.2 : Exploration et production d'hydrocarbures offshore. [En ligne]. Consulté le 20/02/2025. Disponible sur : https://qsr2010.ospar.org/fr/ch07_02.html
- **Connaissance des Énergies (2018).** *Formation du pétrole : origine, gisements, classification.* [En ligne]. [Consulté le 21/03/2025]. Disponible sur le web : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/formation-du-petrole>
- **Conseil économique, social et environnemental (CESE). (2012).** De la gestion préventive des risques environnementaux : la sécurité des plateformes pétrolières en mer (Avis présenté par Jacques Beall et Alain Feretti). Paris : Les Éditions des Journaux officiels, P.P. 1–82.
- **Court, Marielle. (2011).** *L'exploitation pétrolière s'installe en Méditerranée.* *Le Figaro*, 22 juin.
- **CRAAG – Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique. (1999).** *Sismicité du nord algérien (1931–1992) : carte altimétrique et répartition des épencentres selon magnitude.* [En ligne]. [consulté le 01/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.craag.dz>
- **Dauvin, Jean-Claude, Grimes, Sylvain. (2013).** Marine biodiversity on the Algerian Continental Shelf (Mediterranean Sea). *Journal of Natural History*, Vol. 47, n° 19–20, P. 1267–1285
- **Dauvin, Jean-Claude, Grimes, Sylvain. (2013).** Marine biodiversity on the Algerian Continental Shelf (Mediterranean Sea). *Journal of Natural History*, Vol. 47, n° 19–20, P. 1267–1285
- **DrillingForGas. (2024).** Drilling program example (Semi-Sub). [En ligne]. [consulté le 15/05/2025]. Disponible sur le web : <https://drillingforgas.com/en/drilling/offshore/drilling-program-example-semi-sub>
- **ENI Algeria Exploration BV. (2018).** *Étude d'impact sur l'environnement - Projet SKIKDA.* Données internes
- **GENIVAR. (2013).** *Évaluation environnementale stratégique sur la mise en valeur des hydrocarbures dans les bassins d'Anticosti, de Madeleine et de la baie des Chaleurs.* Rapport d'activité. Document non publié. Québec : Ministère des Ressources naturelles.
- **Ghazi M. (2010)** Analyse du cycle de vie des boues de forage pétrolier. Caractérisation des émissions toxiques en milieu aride. Thèse de doctorat, EOST, Université de Strasbourg.
- **Ghazi M., Duplay J., Hadjamor R., Khodja M, Ait Amar H., Kessaissia Z. (2011)** Life-Cycle Impact Assessment of oil drilling mud system in Algerian arid area. *Resources, Conservation and Recycling journal*, 55 (2011) P.P 1222–1231.
- **Ghazi M., Duplay, J., Khodja, M. (2008)** Life-Cycle Assessment (LCA) of drilling mud in arid area. The ninth SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production field, Nice, France, mars 2008, SPE-111646. Communication orale.
- **Ghazi M., Quaranta G., Duplay, J., Khodja, M. (2008)** Evaluation of specific fate factors of toxic emissions to groundwater. First results”. Society of Petroleum Engineers – 9th International conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production 2008-“In Search of Sustainable Excellence”, 2, P.P 968-981
- **Ghazi Malika, Benzouai Sihem, Duplay Joelle, Elberrichi Zohra, Rahal Farid, Hachelef Djamel, Bounoua Meriem (2023)** Analysis and geolocation of environmental

Références bibliographiques

impacts and chemical risks in the Algerian coastal zone by coupling Life Cycle Assessment and Mapping tools. Chemex Africa 23, Algiers, 23 September to 04 October 2023.

- **Ghazi, M., Quaranta, G., Duplay, J., Khodja, M. (2008)** Environmental impacts of oil drilling waste in arid region, by Life-Cycle Assessment (LCA). The step of pollutants inventory in reserve pits. 18th Annual Meeting of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) Warsaw, Poland, 25-29 may, Poster.
- **Google Earth. (2025).** Représentation géographique de la baie de Skikda et le golfe d'Annaba. [En ligne]. [consulté le 15/03/2025]. Disponible sur : <https://earth.google.com/>
- **Gora L'Or Noir Africa. (2023).** Saipem va convertir une plate-forme de forage en FPU pour Eni Congo. [En ligne]. Consulté le 01/06/2025 le mars 2025. Disponible sur le web : www.ornoirafrika.com/en/saipem-va-convertir-une-plate-forme-de-forage-en-fpu-pour-eni-congo/
- **Growcock, Frank B., Harvey, Thomas J., Downs, John D. (1994).** Mechanisms of shale inhibition with water-based drilling fluids. SPE Drilling & Completion, Vol. 9, n° 1, P.P. 22–28
- **Halpin, Patrick N., et al. (2009).** Impact des zones humides côtières sur la migration et l'alimentation des espèces marines dans la région de Guerbes-Sanhadja. Journal of Marine Biology and Conservation, Vol. 32, n° 1, P. 87–95
- **Huijbregts MAJ, Thissen U, Guinee JB, Jager T, Kalf D, Van De Meent D, et al. (2001).** Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi media fate, exposure and effects model USES-LCA. Chemosphere 2000;41:P.P 541–73.
- **IFM. (2012).** l'exploitation offshore en Méditerranée. (n° 3.12/GG) . institut français de la mer, France.
- **IFM. (2012).** l'exploitation offshore en Méditerranée. (n° 3.12/GG) . institut français de la mer, France.
- **IFP Energies nouvelles (2021).** *Investissements, activités et marchés en exploration-production (2020)*. [En ligne]. [Consulté le 05/02/2025]. Disponible sur le web : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/investissements-activites-et-marches-en-exploration-production-2020>
- **IFP. (Septembre 2019).** Fiche pédagogique « Quelles sont les grandes étapes d'un projet de développement d'un champ pétrolier ? ». Institut français du pétrole.
- **INERIS. (2015).** Les enseignements de l'accidentologie liée à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures. Rapport DRS-15-149641-02735A. Paris : INERIS.
- **Institut Algérien du Pétrole (IAP). (2007).** Completion, Applications et Méthodes. UFR Drilling, Production & Reservoir Engineering. Alger : IAP. Juin 2007. Document pédagogique.
- **International Association of Oil & Gas Producers (OGP). (2012).** Offshore Environmental Monitoring for the Oil & Gas Industry. Rapport n° 457. Londres : OGP.
- **IUCN. (2012).** Marine mammals and sea turtles of the Mediterranean and Black Seas. Compilé par María del Mar Otero & Michela Conigliaro. Gland : IUCN, P. 34
- **IUCN. (2012).** Marine mammals and sea turtles of the Mediterranean and Black Seas. Compilé par María del Mar Otero & Michela Conigliaro. Gland : IUCN, P. 34
- **Kanan, Rami. (2012).** Développements méthodologiques pour l'extraction et l'analyse des polluants organiques d'intérêt pour l'environnement marin : Application aux hydrocarbures aromatiques polycycliques. Thèse de doctorat, Chimie analytique et

Références bibliographiques

- environnement. Bordeaux : Université Bordeaux 1, École doctorale des sciences chimiques. P. 262
- **Khennaf N. et Benabdelmoumen M.S, (2013)**, Subsurface interpretation and pre-messinien deposits prospectivity of the Algerian Offshore basin”, SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, Aberdeen, United Kingdom.
 - **Khennaf N. et Laddada A., (2013)**, Available data and petroleum interest of the Algerian Offshore basin”, 11th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition in Ravenna OMC Italie.
 - **Khennaf N., Addoum B. et al, (2005)**, The Petroleum Interest of the Algerian Offshore Domain, Conference EAGE Alger.
 - **Le Temps. (2018)**. Développement de l’aquaculture : El Tarf, Annaba et Skikda mieux loties. [En ligne]. [consulté le 01/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.letempsdz.com/index.php/societe/179-regions/185797>
 - **Lebedev, Andrey & Cherepovitsyn, Alexey. (2024)**. Waste Management during the Production Drilling Stage in the Oil and Gas Sector: A Feasibility Study. *Resources*, vol. 13, n° 2, P. 26
 - **Leclaire. (1972)**. La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (Pré-continent algérien). Muséum National d’Histoire Naturelle, Paris 391pp
 - **MEDATLAS. (2002)**. Mediterranean and black sea data base of temperature, salinity and bio-chemical parameters climatological Atlas, (4 CD ROM). European Commission Marine Science and Technology Programme (MAST), MEDAR group.
 - **Mekhennene, A. (2016)**.Optimalisation du projet de forage offshore dans le champ de Mahdia au niveau du bassin Méditerrané occidentale par la proposition d’un puits type représentatif.
 - **Mellouk, Karima, & Aroua, Najet. (2015)**. Le lac Fetzara, une zone humide fragile, menacée par l’extension urbaine de la ville d’Annaba (littoral est algérien). Méditerranée, Vol. 125, P.P. 133–140.
 - **Mirales G., 2007**. Devenir d’une contamination pétrolière dans des sédiments côtiers infralittoraux et son impact sur les communautés bactériennes. Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée (Aix- marseille II), Marseille, France.P 231
 - **Neff, Jerry M., Lee, Kenneth, DeBlois, Elaine M. (2000)**. Environmental effects of offshore drilling activities: impact of synthetic-based drilling muds. *Ocean & Coastal Management*, Vol. 45, n° 2–3, P.P 157–176
 - **Neff, Jerry M., Lee, Kenneth, et DeBlois, Elisabeth M. (2011)**. Produced Water: Overview of Composition, Fates, and Effects. In Lee, K. et Neff, J.M. (Eds.), *Produced Water: Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies*. New York : Springer, P.P. 3–54
 - **OBIS SEAMAP. (2018)**. Species: Loggerhead turtle (*Caretta caretta*). [En ligne]. [consulté le 01/06/2025]. Disponible sur le web : <http://seamap.env.duke.edu/species/173830>
 - **ONM – Office National de la Météorologie. (2023)**. Bilan climatique annuel 2023 : Région Nord-Est Algérie. Rapport d’activité. Document non publié. Alger : ONM
 - **Ould-Ahmed, H. (2015)**. Étude de la flore algale des côtes algériennes : connaissance, caractérisation, conservation et utilisation. Doctorat en Sciences Agronomiques. Alger : ENSA, P. 196
 - **Oumessaad, T. A. (2014)**. Biodiversité méditerranéenne et changements globaux : cas du complexe de zones humides de Guerbès-Senhadja (Algérie). 273-295. skikda, Algerie.
 - **Patin, Stanislav. (1999)**. Environmental Impact of the Offshore Oil and Gas Industry. East Northport, NY : EcoMonitor Publishing. P. 425

Références bibliographiques

- **Pelaez, Jose A., et al. (2005).** Seismic hazard assessment in Northern Algeria. *Journal of Seismology*, Vol. 9, n° 3, P.P. 329–343
- **Refes, S. (2011).** Biodiversité floristique et faunistique de la plaine de Guerbes-Sanhadja et ses enjeux écologiques. Rapport de recherche. Annaba : Université Badji Mokhtar
- **Refes, S. (2011).** Contribution à la connaissance de la biodiversité des fonds chalutables de la côte algérienne : les peuplements ichtyologiques des fonds chalutables du secteur oriental de la côte algérienne. Thèse de doctorat, Sciences de la Mer. Annaba : Université Badji Mokhtar, P. 320
- **Régie de l'énergie du Canada (REC). (2022).** *Rôle de l'Office en ce qui a trait à la prospection sismique dans l'océan Arctique*. [En ligne]. [Consulté le 27/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/regie/nord-zones-extracotieres/archive/publications/fiche-renseignements-role-loffice-ce-qui-trait-prospection-sismique-dans-locean-arctique.html>
- **Sahi, M. (2003).** Rapport de mission sur la pêche aux grands migrateurs halieutiques par un navire japonais dans les eaux sous juridiction nationale. Rapport d'activité. Document non publié. Alger : Ministère de la Pêche, P 21.
- **SBM Offshore. (2019).** *Annual Report 2019*. Document non publié. Récupéré le 15/05/2025, disponible sur : <https://www.sbmoffshore.com/investors/annual-reports/>
- **Secrétariat Général du Gouvernement. (s.d.).** *Journal Officiel Algérien*. [En ligne]. [consulté le 01/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.joradp.dz/HFR/Index.htm>
- **Serbutoviez, S. (2011).** *Les hydrocarbures offshore*. Panorama 2012 – Le point sur..., IFP Énergies nouvelles, P.P. 1–7.
- **Sonatrach. (2017).** Récupéré sur <http://repporterre.net/Malagre-les-risques-ecologiques-l>
- **Statista. (2018).** *Nombre de plateformes offshore dans le monde par région*. [En ligne]. [Consulté le 02/05/2025]. Disponible sur le web : <https://fr.statista.com/statistiques/571569/nombre-de-plateformes-offshore-dans-le-monde-par-region/>
- **Toubal, S., et al. (1998).** Analyse des unités lithologiques et des caractéristiques géologiques de la région de Guerbes-Sanhadja. *Revue de Géologie et d'Écologie*, Vol. 15, n° 2, P. 123–135
- **Tudorache, Valentin-Paul, Avram, Lazare et Antonescu, Nicolas-Napoléon. (2020).** Aspects on offshore drilling process in deep and very deep waters. Vol. 5, n° 2, P.P. 157-172
- **Ukpene, Anthony O., Igborgbor, J.C., Oduma, E. & Konyeme, T.E. (2024).** Environmental impacts of oil spills on marine ecosystems: A case study of the Niger-Delta environment. *African Journal of Health, Safety and Environment*, Vol. 5, n°1, P.P 103-113.

ANNEXES

Annexe 1 : Procédure de Retrait Précautionneuse pour l'Abandon d'un Puits d'Exploration Offshore

Parmi les mesures d'atténuation des impacts environnementaux liés aux opérations de forage en mer, une attention particulière doit être accordée à la phase d'abandon des puits d'exploration nous avons proposé une procédure de retrait précautionneuse, issue des recommandations techniques du guide brésilien sur l'abandon de puits offshore, visant à garantir la sécurité des opérations, la protection du milieu marin et le respect des réglementations en vigueur. Cette procédure, appliquée spécifiquement dans le cas d'un puits d'exploration (non productif), comprend plusieurs étapes essentielles décrites ci-dessous.

1. Préparation de l'Abandon

Avant toute intervention, une analyse complète du puits doit être effectuée. Cela inclut :

- La collecte des données sur le type de puits, sa profondeur, sa configuration (tubage, cimentation).
- L'évaluation de la pression et des risques associés.
- L'identification des formations géologiques rencontrées.
- La planification logistique et la préparation des équipements.
- L'obtention des autorisations réglementaires nécessaires auprès des autorités maritimes et environnementales.

2. Circulation et Remplacement du Fluide de Forage

Afin d'assurer la stabilité du puits et éviter toute montée incontrôlée de fluide, le fluide de forage initial est remplacé par une boue de sécurité à densité contrôlée. Cette boue permet de maintenir la pression hydrostatique nécessaire. L'opération de circulation vise aussi à nettoyer le puits et éliminer les débris restants.

3. Installation des Bouchons de Ciment

Cette étape est cruciale pour isoler définitivement les zones productives ou perméables. Plusieurs bouchons de ciment sont posés à des points stratégiques :

- À la base du tubage ou dans la zone de production potentielle.
- Au-dessus des formations perméables pour prévenir toute migration de fluide.
- Dans la partie supérieure du puits, souvent dans le tubage de surface.

Chaque bouchon doit être vérifié par des tests de pression pour garantir son intégrité et son efficacité à long terme.

4. Sectionnement et Retrait de la Tête de Puits

Une fois les bouchons installés et validés, la tête de puits est sectionnée à une profondeur située au moins 1 à 3 mètres sous le fond marin. Cette opération vise à éliminer toute structure métallique émergente pouvant représenter un danger pour la navigation ou l'écosystème marin.

5. Vérification Finale et Documentation

L'abandon du puits ne peut être validé qu'après une inspection finale et la compilation d'un rapport technique. Ce rapport comprend :

- Le détail des bouchons posés (profondeur, longueur, volume de ciment).
- Le type de fluide utilisé.
- Les résultats des tests de pression.
- Les photos ou croquis de la configuration finale du puits.

Ce document est transmis aux autorités de régulation pour validation et archivage.

La figure ci-dessous montre une configuration standard pour abandonner temporairement un puits d'exploration

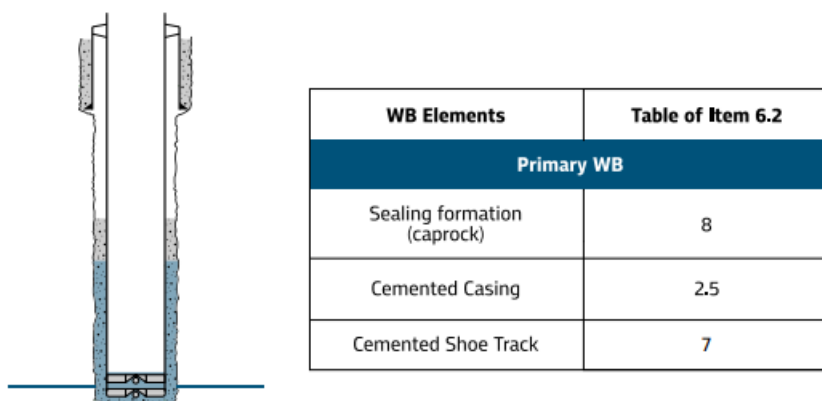


Figure : Configuration standard pour abandonner temporairement un puits d'exploration

Cette illustration représente un exemple d'abandon temporaire d'un puits tubé (cased well) sans intervalles de formations productives ou perméables, (puits d'exploration non productif)mais qui a été foré et tubé.

Explication des éléments de la figure :

L'image montre une coupe verticale du puits et les bouchons de barrière de puits (Well Barriers - WB) posés dans le cadre d'un abandon temporaire, en respectant les recommandations du guide.

1. Sealing Formation (caprock) – Item 8

Il s'agit d'une formation géologique imperméable (comme un shale ou un mudstone) située naturellement dans le sous-sol.

Elle est utilisée comme point d'appui naturel pour poser un bouchon de ciment, car elle empêche la migration des fluides.

2. Cemented Casing – Item 2.5

Cela désigne la colonne de tubage cimentée, qui est utilisée comme barrière mécanique.

Elle permet d'assurer l'étanchéité et de renforcer la structure du puits.

3. Cemented Shoe Track – Item 7

C'est la partie inférieure du tubage (la chaussure ou le « shoe ») remplie de ciment.

ANNEXES

Elle agit comme une barrière de fond pour éviter toute communication avec les formations plus profondes.

Annexe 2 : Durée moyenne de forage selon le type de puits :

Type d'environnement offshore	Profondeur d'eau	Durée moyenne de forage d'un puits d'exploration
Offshore peu profond (0–200 m)	Plateformes fixes	30 à 60 jours
Offshore intermédiaire (200–500 m)	Jack-up / semi-submersible	45 à 75 jours
Offshore profond (500–1500 m)	Navires ou semi-submersibles	60 à 90 jours
Offshore ultra-profond (>1500 m)	Navires de forage	90 à 150 jours (voire plus selon complexité)

Les Facteurs influençant la durée :

1. Conditions géologiques : formations complexes, pression élevée, instabilités, etc.
2. Technologie de forage : type de plateforme, systèmes de contrôle de puits, performances des équipements.
3. Conditions météorologiques et marines : tempêtes, courants forts, houle, etc.
4. Profondeur du puits (mesurée et verticale) : plus le puits est profond, plus le forage est long.
5. Problèmes techniques : pertes de fluide, collapsus du trou, zones à haute pression/température.
6. Nombre de sections de forage : plus il y a de sections (surface, intermédiaire, production), plus le temps augmente.

Annexe 3 : Grille d'évaluation qualitative des impacts sonores sur la faune marine

Type de source sonore en milieu marin (forage / activité)	Bande de fréquence dominante (Hz – kHz)	Niveau de pression acoustique (dB re 1µPa à 1m)	Espèces sensibles ciblées (en Méditerranée)	Durée d'exposition (courte / moyenne / prolongée)	Risque estimé (faible / modéré / élevé)
Bruit des générateurs électriques de la plateforme	50 – 1 000 Hz	120 – 140 dB	Cétacés à dents, poissons démersaux	Prolongée	Modéré

ANNEXES

Vibrations des pompes de circulation	des de	100 – 2 000 Hz	115 – 130 dB	Poissons, invertébrés benthiques	Prolongée	Faible à modéré
Bruit des hélicoptères (approche / départ plateforme)	des	100 – 500 Hz (air) / Couplage en mer : 50–200 Hz	100 – 115 dB en mer (réfraction)	Oiseaux marins, cétacés en surface	Courte	Faible
Bruit du forage rotatif (puits en cours de forage)		50 – 2 000 Hz	120 – 150 dB	Dauphins, poissons pélagiques	Moyenne à prolongée	Modéré
Tests de production (débits élevés, flare)	de	Large bande 10 Hz – 10 kHz	> 150 dB	Cétacés, poissons, tortues	Courte à moyenne	Élevé
Opérations de levage lourdes sous-marines (ROV / câbles)	de	50 – 500 Hz	110 – 130 dB	Faune benthique	Courte	Faible
Utilisation de sonar de positionnement dynamique	de de	20 – 50 kHz	> 180 dB	Cétacés à dents, dauphins	Courte	Élevé

Annexe 4 : La Législation Algérienne pour la Protection de l'Environnement liée aux Activités d'exploration en offshore

Une analyse des besoins juridiques algériens a été effectuée afin d'établir un inventaire des contraintes réglementaires environnementales existantes affectant les sites sur lesquels les activités de prospection sont prévues.

Dans les paragraphes qui suivent sont énoncées les lois et les sujets pour chaque aspect environnemental lié aux activités de forage d'exploration en offshore

A.GESTION DES HYDROCARBURES

Texte législatif : Décret exécutif n° 94-43 publié le 30 Janvier 1994.

Sujet : Décret fixant les règles pour la conservation des réservoirs d'hydrocarbures et la protection des aquifères associés.

Texte législatif : Loi n° 05-07 du 28 Avril, 2005 modifié et complété par l'ordonnance n° 06- 10 du 29 Juillet 2006 et la loi n° 13-01 du 20 Février 2013.

Sujet : Cette loi concerne les hydrocarbures (voir aussi la « observation » ci-dessous).

Observation :

Article 1 : cette loi a pour objectif de définir :- Le régime juridique de la recherche, l'exploitation, le transport par pipeline, le raffinage, la transformation des hydrocarbures, la commercialisation, le stockage, la distribution des produits pétroliers et des ouvrages et installations pour leur utilisation ;

- Le cadre institutionnel pour la réalisation des activités mentionnées ci-dessus ;
- Les droits et obligations des personnes exerçant une ou plusieurs des activités mentionnées ci-dessus.

Texte législatif : Ordonnance n ° 06-10 du 29 Juillet 2006.

Sujet : Décret modifiant et complétant la loi n ° 05-07 du 28 Avril 2005 sur les hydrocarbures.

Observation :

Cette commande modifie et complète des articles 5, 9, 12, 20, 32, 34, 44, 46, 48, 52, 53, 58, 68, 69, 70, 75, 77, 88 et 91 de la loi n ° 05 -07 du 28 Avril 2005.

Texte législatif : La loi n ° 13-01 du 20 Février 2013.

Sujet : Loi modifiant et complétant la loi n ° 05-07 du 28 Avril 2005 sur les hydrocarbures.

Observation :

La présente loi modifie et complète des articles 5, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 18, 19,20, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 63, 68, 69, 71, 72, 73, 75, 77, 78, 82, 83, 84, 85, 87, 89, 90, 91, 101 et 109 de la loi n ° 05-07 du 28 Avril 2005,

Article 13. L'autorité de régulation des hydrocarbures est chargée, pour les activités hydrocarbures régies par la présente loi, notamment de veiller au respect :

- * de la réglementation technique applicable aux activités régies par la présente loi ;
- * de la réglementation relative à l'application des tarifs et du principe du libre accès des tiers aux infrastructures de transport par canalisation et de stockage ;
- * de la réglementation en matière d'hygiène, de sécurité industrielle, d'environnement et de prévention et gestion des risques majeurs, notamment à la protection des nappes phréatiques et des aquifères à l'occasion de l'exercice des activités objet de la présente loi ;
- * de la réglementation en matière d'utilisation de produits chimiques dans le cadre de l'exercice des activités, objet de la présente loi ;
- * de la réglementation relative au dioxyde de carbone (CO₂) ;
- * du cahier des charges de la construction des infrastructures de transport par canalisation et de stockage ;
- * du contrôle de conformité et de qualité des produits pétroliers ;
- * de l'application de normes et de standards Etablis sur la base de la meilleure pratique internationale. Ces normes et standards sont définis par voie réglementaire ;

* de l'application des pénalités et amendes payables au Trésor public en cas d'infraction aux lois et règlements relatifs à :

- La réglementation technique applicable aux activités régies par la présente loi,
- La réglementation relative à l'application des tarifs et du principe du libre accès des tiers aux infrastructures de transport par canalisation et de stockage,
- La réglementation en matière d'hygiène, de sécurité industrielle et d'environnement. Article 17. Dans l'exercice des activités, objet de la présente loi, on observe le plus strict respect des obligations et des prescriptions relatives au contenu des lois et règlements en

vigueur en matière de protection de l'environnement et l'utilisation des produits en particulier dans les opérations d'hydrocarbures non conventionnelles.

Article 18. Avant d'entreprendre toute activité visée par la présente loi, toute personne doit préparer et soumettre à l'approbation de l'Autorité de régulation des hydrocarbures, une étude d'impact environnemental et un plan de gestion. L'environnement, qui doit inclure une description des mesures environnementales de prévention et de gestion des risques associés aux activités conformément à la législation sur l'environnement et de la réglementation en vigueur.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 13-40 du 27 Novembre 2013.

Sujet : Décret définissant les conditions pour l'octroi par l'Agence nationale pour le développement des ressources en hydrocarbures (ALNAFT), une autorisation de brûlage à la torche de gaz exceptionnelle, les seuils admissibles et les conditions tarifaires spécifiques dans les régions éloignées ou isolées.

Texte législatif : le décret exécutif n ° 14-06 du 15 Janvier 2014.

Objet : Fixation de la liste des biens d'équipement, des services, des matériaux et des produits exemptés de taxe sur la valeur ajoutée (TVA), droits, taxes et frais de douane relatifs à la recherche et / ou des activités d'exploitation, le transport par pipeline d'hydrocarbures, la liquéfaction du gaz et de séparation de gaz de pétrole liquéfié.

Texte législatif : la loi n ° 02-01 5 Février, 2002

Objet : A propos de la distribution de l'électricité et du gaz par pipeline

Texte législatif : La loi n ° 04-09 du 14 Août, 2004

Sujet : A propos de la promotion des énergies renouvelables dans le contexte du développement durable

Texte législatif : Décret exécutif n ° 08-314 du 7 Chaoual 1429 correspondant au 7 Octobre, 2008 modifiant et complétant le décret exécutif n ° 07-127 du 17 Rabie Ethani 1428

Sujet : relatif à la délimitation et à la classification de la zone minière dans les zones et la définition de la prospection, des périmètres de recherche et d'exploitation En mer et la protection du littoral

Texte législatif : La loi n ° 02-02 5 Février., 2002

Sujet : Loi relative à la protection et la valorisation du littoral.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 02-149 du 26 Safar 1423 correspondant au 9 mai 2002. **Sujet :** Fixer les règles d'inspection des navires

Texte législatif : Décret exécutif n ° 08-57 du 13 Février 2008.

Sujet : Fixer les conditions et les modalités de la concession d'exploitation pour les services de transport maritime.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 10-31 du 21 Janvier de 2010.

Sujet : Fixer les conditions d'extension de la protection des fonds mer et la détermination des activités industrielles en mer.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 02-01 du 6 Janvier 2002

Sujet : Fixant les règles générales pour l'exploitation et la sécurité des ports.

Texte législatif : La loi n ° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 Août 2005 relatif à l'eau

Texte législatif : Décret exécutif n ° 09-88 du 21 Safar 1430 correspondant au 17 Février 2009

Sujet : concernant la classification des zones côtières critiques.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 04-418 du 8 Dhou Kaada 1425 correspondant au 20 Décembre, 2004

Sujet : Désignation des autorités compétentes pour la sûreté des navires et des installations portuaires et la mise en place des organes compétents

Texte législatif : Décret exécutif n ° 10-31 du 05 Safar 1431 fixant les modalités d'extension de la protection des fonds

Sujet : Bord de mer et la détermination des activités industrielles en mer

***ÉVALUATION DES ETUDES D'IMPACT**

Texte législatif : Décret exécutif n ° 07-145 du 19 mai 2007.

Sujet : Décret déterminant la portée, le contenu et l'approbation des études et des avis d'impact sur l'environnement.

Observation :

Article 2. L'étude ou l'avis d'impact environnemental vise à déterminer l'insertion d'un projet dans son environnement en identifiant et en évaluant les effets directs et / ou indirects du projet, et vérifie la gestion du projet. Exigences relatives à la protection de l'environnement par le projet concerné.

Article 6. Développé sur la base de la taille du projet et son impact potentiel sur l'environnement, cet article définit le contenu de l'avis d'étude ou de l'impact.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 08-312 5 Octobre 2008.

Sujet : décret fixant les conditions relatives à l'homologation des études d'impact sur l'environnement des activités dans le domaine des hydrocarbures (recherche d'hydrocarbures, l'extraction, le traitement, le stockage, le transport, le raffinage et la transformation, l'opération de chargement, d'excavation, de modifications.).

Observation :

Article 2.

L'étude d'impact sur l'environnement est soumise à l'autorité de réglementation des hydrocarbures avant toute activité liée aux hydrocarbures par le contractant ou l'opérateur concerné, ci-après dénommé le demandeur.

Cette étude d'impact sur l'environnement doit inclure un plan de gestion de l'environnement, dans lequel sont décrites les mesures environnementales de prévention et de gestion des risques associés aux activités conformément à la législation sur l'environnement et de la réglementation en vigueur.

Article 7. L'étude d'impact sur l'environnement relative à la recherche d'hydrocarbures et les activités de prospection doit couvrir l'ensemble des activités menées dans la recherche et / ou de la zone de prospection, et notamment :

- Le forage de recherche et de forage stratigraphique ;
- Travaux sismiques ;
- La construction de bases de vie ;
- La construction de routes d'accès.

Dans le cas d'addition de toute activité supplémentaire, non prévu à l'origine, comme le forage de nouveaux puits ou relevés sismiques, l'étude d'impact environnemental initial doit être mise à jour par le demandeur, puis soumise à nouveau à l'approbation de l'Autorité de régulation des hydrocarbures sous les mêmes conditions que celles fixées aux articles 2 à 6.

Texte législatif : Décret exécutif n ° 18-255 du 9 Octobre, ici 2018.

Sujet : Décret modifiant et complétant le décret exécutif n ° 07-145 du 19 mai 2007 déterminant la portée, le contenu et l'approbation des études et des avis d'impact sur l'environnement.

Annexe 5 : Charte des responsabilités de l'exploitation pétrolière offshore

ACTEURS	ROLES
PHASE DE PROSPECTION	
Entreprises d'investigations géophysiques	- Assurent la réalisation de la prospection sismique et de la cartographie de la zone - Assurent la responsabilité de l'ensemble des impacts causés par l'acquisition sismique en collaboration avec les gestionnaires des aires protégées

ANNEXES

PHASE DE PLANIFICATION ET D'EXPLORATION	
Direction générale et Haute Direction	<ul style="list-style-type: none"> - Définit les objectifs stratégiques du Projet - Approuve le budget initial et les ressources - S'engage envers la sécurité, la qualité et l'environnement
Parties prenantes locales et communautés côtières	<ul style="list-style-type: none"> - Influencent les décisions et doivent être informées des impacts potentiels sur l'environnement
Equipe de Gestion de Projet	<ul style="list-style-type: none"> - Planifie la phase d'exploration - Coordonne les équipes d'exploration - Elabore un plan de gestion environnementale initial
PHASE DE FORAGE ET DE CONSTRUCTION DE LA PLATEFORME	
Equipe d'exploration	<ul style="list-style-type: none"> - Assure le forage exploratoire suite aux travaux menés pendant la première phase - Identifie les sites potentiels - Evalue les risques environnementaux initiaux
Département Santé, Sécurité et Environnement (SSE)	<ul style="list-style-type: none"> - Elabore des procédures de sécurité pour l'exploration - Assure les risques SSE liés aux activités d'exploration - Forme le personnel sur les pratiques sécuritaires
Consultation et expertise environnementale	<ul style="list-style-type: none"> - Fournit des conseils spécialisés pour évaluer et atténuer les impacts environnementaux
Direction générale et haute direction	<ul style="list-style-type: none"> - Approuve les plans de forage et de construction - Assure la conformité aux normes SSE
Equipe de gestion du Projet	<ul style="list-style-type: none"> - Planifie les opérations de forage et de construction - Coordonne les équipes de construction
Entreprises d'ingénierie et de construction	<ul style="list-style-type: none"> - Conçoivent et construisent les installations offshore
Entreprise de forage et de production	<ul style="list-style-type: none"> - Travaille avec les entreprises d'ingénierie et de construction pour la mise en place des structures de forage - Construit la plateforme

ANNEXES

	- Gère les opérations de forage, d'extraction et de production
Consultation et expertise environnementale	- Fournit des conseils spécialisés pour évaluer et atténuer les impacts environnementaux
Département SSE	- Surveille les conditions de sécurité sur le site - Mène des inspections SSE régulières - Coordonne les équipes d'intervention en cas d'urgence

Résumé

Ce mémoire présente l'étude d'impact environnemental (EIE) d'un puits de forage pétrolier d'exploration en zone offshore dans le périmètre marin de Skikda–Annaba. Il s'appuie sur une analyse complète du contexte géologique, des conditions océaniques, de la réglementation environnementale et des techniques de forage mises en œuvre. Le travail inclut également une évaluation détaillée des impacts potentiels générés par les activités de forage sur les compartiments marins, la biodiversité et les écosystèmes côtiers.

À travers une approche méthodologique combinant l'inventaire des flux de matières et d'énergie, l'analyse des scénarios de gestion des boues de forage, et l'intégration d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV), l'étude met en évidence les substances et processus les plus contributifs aux pressions environnementales. Les résultats démontrent l'intérêt des solutions de traitement avancées (désorption thermique, stabilisation-solidification) pour réduire les impacts sur les milieux marins, par rapport aux pratiques de rejet direct.

Ce mémoire vise ainsi à fournir des éléments d'aide à la décision pour orienter les futures opérations d'exploration offshore vers des pratiques plus durables, compatibles avec les engagements environnementaux nationaux et internationaux de l'Algérie.

المخلص

يقدم هذا العمل دراسة لتقييم الأثر البيئي لبئر استكشافي للنفط في المنطقة البحرية الواقعة بين سكيكدة وعنابة. يعتمد على تحليل شامل للسياق الجيولوجي، والظروف البحرية، والإطار التنظيمي البيئي، والتقنيات المعتمدة في عمليات الحفر البحري. كما يشمل تقييماً مفصلاً للأثار البيئية المحتملة الناتجة عن أنشطة الحفر على النظم البيئية البحرية والساحلية.

من خلال منهجية علمية تجمع بين جرد تدفقات المواد والطاقة، وتحليل سيناريوهات إدارة نفايات الحفر، وإدماج تحليل دورة الحياة، يسلط هذا البحث الضوء على أهم العوامل المؤثرة في الضغوط البيئية. وتظهر النتائج أهمية استخدام الحلول (ACV) الحياة المتقدمة لمعالجة النفايات (مثل المعالجة الحرارية والتثبيت/الصلابة) في تقليل الأثر البيئي مقارنة بخيارات التفريغ المباشر في البحر.

يسعى هذا البحث إلى تقديم أدوات لدعم اتخاذ القرار بهدف توجيه عمليات الاستكشاف البحرية المستقبلية نحو ممارسات أكثر استدامة ومتوافقة مع الالتزامات البيئية الوطنية والدولية للجزائر.

Abstract

This thesis presents an Environmental Impact Assessment (EIA) of an exploratory offshore oil well located in the marine zone between Skikda and Annaba. It is based on a comprehensive analysis of the geological context, oceanographic conditions, regulatory framework, and drilling technologies applied. The work also includes a detailed assessment of the potential impacts of offshore drilling on marine compartments, biodiversity, and coastal ecosystems.

Through a methodological approach combining material and energy flow inventories, analysis of drilling waste management scenarios, and the integration of a Life Cycle Assessment (LCA), the study identifies the key substances and processes contributing to environmental pressures. The results highlight the relevance of advanced waste treatment solutions (thermal desorption, stabilization/solidification) in mitigating impacts on marine environments, compared to direct discharge practices.

This research aims to support decision-making and guide future offshore exploration activities toward more sustainable practices in line with Algeria's national and international environmental commitments.