

PARC NATUREL MARIN DE MAYOTTE

Conseil de gestion du 13 Novembre 2024

Délibération

PNMM_del_cdg_2024_9_Avis_conforme_usine_potabilisation_dessalement_Ironi_Be

Portant sur

Avis conforme sur la création d'une usine de potabilisation par dessalement sur Ironi Bé, commune de Dembéni (Les eaux de Mayotte)

Vu le code de l'environnement, notamment l'article L334-4, L.334-5 et R181-27,

Vu le décret n°2019-1580 du 31 décembre 2019 relatif à l'Office français de la biodiversité (OFB),

Vu le décret n°2021-1379 du 21 octobre 2021 modifiant le décret n°2010-71 du 18 janvier 2010 portant création du Parc naturel marin de Mayotte,

Vu l'arrêté inter-préfectoral n°2022/SGAR/546 du 30 mai 2022 portant composition du Conseil de gestion du Parc naturel marin de Mayotte,

Vu la délibération n°2020-05 du conseil d'administration de l'Office français de la biodiversité du 3 mars 2020, portant délégation au Conseil de gestion pour se prononcer sur les demandes d'autorisation d'activités dans les conditions prévues à l'article L.334-5 du Code de l'environnement,

Vu la délibération du Conseil d'administration de l'Agence des aires marines protégées n°2016-07 du 24 février 2016 portant approbation du règlement intérieur du Parc naturel marin de Mayotte,

Vu la délibération du Conseil de gestion du Parc naturel marin de Mayotte PNMM_2020_12 du 18 juin 2020 approuvant la réunion des instances du Parc en visioconférence,

Vu le dossier de demande d'autorisation environnementale déposée par Les Eaux de Mayotte (LEMA) auprès de la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement, du Logement et de la Mer (DEALM),

Vu l'arrêté n°2023-DEALM-SEPR-0970 autorisant le recours à la procédure d'urgence civile pour le projet d'installation de dessalement d'Ironi Bé, commune de Dembéni,

Vu la saisine du conseil de gestion pour avis conforme de la DEALM comportant les pièces du dossier en date du 08 novembre 2024, confirmée par accusé de réception en

date du 25 octobre 2024 et complétée par de nouvelles pièces - annulant et remplaçant certaines des pièces du dossier initial - en date du 5 novembre 2024,

Vu le plan de gestion du Parc naturel marin de Mayotte adopté par le Conseil de gestion le 14 décembre 2012 et par le Conseil d'administration de l'Agence des aires marines protégées le 10 juillet 2013, et notamment l'orientation « *obtenir une bonne qualité de l'eau dans le lagon, notamment par une gestion appropriée des mangroves et en participant à la mobilisation des acteurs pour atteindre les objectifs du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) du bassin de Mayotte* ».

Vu l'arrêté 347/DAF fixant la liste des espèces animales terrestres et tortues marines protégées et les mesures de protection de ces espèces animales représentées dans la collectivité territoriale de Mayotte complétant les listes nationales,

Vu l'arrêté 362/DEAL/SEPR/2018 fixant la liste des espèces végétales protégées et réglementant l'utilisation d'espèces végétales menacées dans le département de Mayotte,

Considérant que l'activité se situe dans une zone « *de valorisation du patrimoine naturel et culturel en soutien aux activités écologiquement exemplaires* » de la carte des vocations du Plan de gestion du Parc naturel marin de Mayotte,

Considérant la stratégie nationale pour la biodiversité et la stratégie nationale pour les aires protégées,

Considérant les éléments contenus dans le dossier déposé par le pétitionnaire et transmis par le service instructeur,

Considérant la note technique de l'office français de la biodiversité rédigée par les équipes du Parc naturel marin de Mayotte avec l'appui d'experts indépendants et de l'OFB (rapports annexés),

Considérant la richesse du lagon de Mayotte en termes de biodiversité marine (biotopes et biocénoses),

Considérant que l'ensemble des écosystèmes du lagon de Mayotte dépendent de la qualité de ses eaux,

Considérant les nombreux et indispensables services écosystémiques que les masses d'eaux côtières et les écosystèmes associés offrent, notamment aux habitants de Mayotte (protection, nourriture, sources de revenus, source d'innovations technologiques et médicales, source de bien être etc...),

Considérant les nombreux et indispensables liens de fonctionnalité que les masses d'eaux côtières et ses écosystèmes offrent, notamment aux autres espèces de la bio-région (abris, protection, nourriture, lieu de reproduction etc...),

Considérant la sensibilité et la vulnérabilité aux pressions anthropiques des écosystèmes de ce milieu lagunaire fermé,

Considérant que ce milieu et les écosystèmes qui y sont présents subissent déjà de fortes pressions anthropiques de diverses natures (notamment au niveau local : système d'assainissement et de collecte des déchets déficient, érosion terrestre massive etc.),

Considérant que ces pressions accrues se traduisent par une dégradation de l'état écologique des masses d'eau de surfaces,

Considérant que les capacités de résistance et de résilience des écosystèmes marins sont limitées et que la survie des récifs coralliens en particulier est menacée à courte échéance (Référence : GIEC),

Considérant que les capacités de résistance et de résilience face aux pressions anthropiques globales (dérèglement climatique, acidification des océans etc...) des écosystèmes présents dans ce milieu seront d'autant plus fortes que les pressions locales seront limitées,

Considérant que ce projet se situe dans une zone à enjeux écologiques forts (ZNIEFF terrestres et marines, passe en S, réserve naturelle terrestre et marine de l'ilot Mbouzi, zone humide, mangroves classée zone humide, ZICO et réservoir de biodiversité) sur laquelle des espèces protégées sont présentes (notamment *Bruguiera gymnorhiza* (L.) – Palétuvier gros poumons et *Ardeola idae* – crabier blanc),

Considérant que les recherches actuelles, notamment celles de *Lattemann et Höpner* (2008), mettent en évidence que les rejets de saumure issus des usines de dessalement entraînent une augmentation de la salinité, affectant la biodiversité marine, particulièrement dans les environnements à faible renouvellement d'eau, tels que les systèmes semi-fermés ; et que, comme le soulignent *Panagopoulos et Haralambous* (2020), les technologies disponibles visent principalement à prévenir ou à gérer ces rejets afin de limiter leur impact environnemental, mais ne permettent pas de restaurer les conditions naturelles une fois que des nappes de saumure dense se sont formées, en raison de leur faible dispersion et de leur persistance dans les écosystèmes vulnérables (cf. *Lattemann, S., Höpner, T., Desalination, 2008 ; Panagopoulos, A., Haralambous, K.J., Marine Pollution Bulletin, 2020*).

Considérant que le choix du site a été priorisé par les disponibilités foncières, la proximité des réseaux de distribution d'eau et autres considérations techniques,

Considérant les besoins de compléments nécessaires au dossier en matière de données fournies et de mesures ERCSA proposées,

Considérant qu'en l'état, la modélisation hydrodynamique des rejets de l'usine de dessalement d'Ironi Bé présente des lacunes techniques qui réduisent la fiabilité des conclusions,

Considérant qu'en l'état, il n'est pas possible de connaître l'impact que la salinité et les substances chimiques utilisés auront sur l'ensemble des communautés marines,

Considérant, par voie de conséquence la capacité limitée des équipes techniques du Parc à analyser pleinement certains enjeux, impacts et mesures,

Considérant les effets cumulés d'autres projets de construction et d'aménagements dans la zone du projet,

Considérant de l'ensemble de ces faits, qu'en application de l'article L.334-5 du code de l'environnement cette « activité est susceptible d'altérer de façon notable le milieu marin d'un parc naturel marin »,

Considérant la responsabilité de Mayotte à préserver ce patrimoine naturel pour les générations présentes et futures,

Considérant la forte pression sur les ressources en eau potable limitées du département de Mayotte et la procédure d'urgence engagée afin de fournir une eau en quantité et qualité suffisante à l'ensemble de la population lors des épisodes de sécheresse,

Considérant le SDAGE de Mayotte (2022-2027) et ses engagements en matière de mises en œuvre de mesures complémentaires pour préserver les ressources en eau, tel qu'un plan de reboisement des forêts publiques, le soutien à l'usage de la récupération d'eau de pluie et d'autres ressources (eaux usées traitées etc.), l'incitation à des usages sobres en eau, la réparation et la détection des fuites, la poursuite du développement de l'assainissement collectif etc,

Considérant le « Plan pluriannuel eau de Mayotte » tel que présenté par la préfecture de Mayotte en séance du bureau du conseil de gestion du 30/10/2024 et l'engagement de la préfecture de Mayotte via le LEMA dans les 4 ans à des opérations notamment de réparation des canalisations afin de limiter les fuites d'eau du réseau actuel, et d'améliorations du système d'assainissement de Mayotte,

Considérant la présentation en séance du projet par « Les eaux de Mayotte » et l'analyse du projet par l'équipe technique du Parc naturel marin de Mayotte, les questions réponses des membres du conseils de gestion au porteur du projet, équipes techniques du Parc et experts présents ainsi que les débats tenus (cf. Compte-rendu de séance et annexes),

Considérant le procès-verbal de dépouillement du vote à bulletin secret du 13 novembre 2024 au terme duquel 31 suffrages se sont exprimés dont 23 voix favorables assorties de réserves, prescriptions et recommandations ; et de 8 voies défavorables à la création d'une usine de potabilisation par dessalement sur Ironi Bé, Commune de Dembéli (Les eaux de Mayotte),

Considérant que le quorum est atteint et après avoir valablement délibéré, adopte les décisions suivantes :

Article 1 :

Le Conseil de gestion du Parc naturel marin de Mayotte émet un avis favorable assorti des réserves, prescriptions et recommandations suivantes au projet de création d'une usine de potabilisation par dessalement sur Ironi Bé, Commune de Dembéli :

Voix pour	23
Voix contre	8
Absentions	1

Total des votes (pour + contre + abstention)	32
Total des suffrages exprimés (Pour + contre)	31
Majorité absolue des suffrages exprimés = 1/2 suffrage +1	16

Réserves

Réserve 1 – Ajuster le modèle de courantologie et évaluer l'impact des rejets sur la qualité de l'eau et la biodiversité

1. Ajuster le modèle de courantologie en prenant en compte les recommandations des experts indépendants (cf. Annexes de la Note technique) et notamment réaliser un bilan de masse (volumes de matière évacuée par les flux au cours du jusant, variation globale de masse en plusieurs zones du lagon), affiner le maillage horizontal, en prenant en compte les bancs découvrant, affiner la résolution dans la zone de rejet et mettre en adéquation les indications dans le rapport, représenter l'écoulement en sortie des diffuseurs par un traitement particulier (position de plan fixe au niveau des points sources et prise en compte des vitesses des jets en sortie des diffuseurs), réitérer les calculs en considérant des hypothèses plus réalistes sur la concentration en sel du lagon, affiner le maillage vertical, prendre en compte la stratification dans le modèle de turbulence vertical, réaliser une étude de sensibilité des résultats numériques aux différents paramètres, prendre en considération la houle, intégrer une partie océanique dans le domaine de calcul, prendre des mesures d'erreur, prendre une échelle de comparaisons de séries temporelles d'observations et de résultats lisible, simuler les rejets de saumures simultanément avec ceux des autres traceurs ;
2. Préciser les molécules chimiques rejetées (AOX, floculant, antitartre) ;
3. Mettre à jour l'analyse des impacts en prenant en compte les résultats issus du nouveau modèle, les variations temporelles des différents paramètres, les rejets de nutriments (azote et phosphore total) ;
4. Ajuster les mesures ERCSA en fonction des nouveaux résultats obtenus ;

Réserve 2 – Faire mettre en place le comité de suivi du milieu naturel par le LEMA avec les membres prévus en intégrant des experts indépendants en courantologie et écotoxicologie.

Réserve 3 - Transmettre l'intégralité des éléments listés en Annexe 1 au Comité de suivi du milieu naturel.

Réserve 4 - Permettre au Comité de suivi du milieu naturel d'analyser les résultats obtenus suite aux réserves 1 et 3 pour transmission d'un rapport à l'autorité administrative.

Prescriptions

A. Évaluation des impacts et mesures ERCs

Alternatives technologiques

1. Dans les 3 premières années d'exploitation de l'usine, réaliser les études suivantes : possibilités de valoriser les saumures et les déchets boues et géotubes, d'utiliser des produits chimiques à moindre impact environnemental pour faire fonctionner l'usine, et recherche d'alternatives permettant de faire fonctionner l'usine à l'aide de sources d'énergies renouvelables.

Pollution par les matières en suspension

2. Prévoir la végétalisation des volumes excavés ;

Pollution accidentelle et gestion des produits chimiques

3. Prévoir le stockage des produits chimiques dans des bacs de rétention étanches et adaptés au volume des contenants ;

4. Prévoir un accueil environnement pour chaque ouvrier, puis 1/4h hebdomadaire tout au long du chantier avec exercices réguliers de mise en situation de pollution accidentelle;

Pollution lumineuse

5. Prévoir un éclairage limité voire une extinction complète des lampes de nuit;

B. Suivis et autres mesures d'accompagnement

Coordinateur environnemental et écologue

6. Inclure le contrôle des mesures de suivi et d'accompagnement dans la mission du coordinateur environnemental;
7. En plus de la visite hebdomadaire, une présence quotidienne du coordinateur environnemental ou de l'écologue est nécessaire pour les opérations de défrichage, débroussaillage/élagage;

Comité de suivi du milieu naturel

8. Prévoir une réunion 1 fois par mois pendant les travaux sensibles, une fois par trimestre la première année d'exploitation, puis une fois par an;
9. Ajouter la présence au comité : du coordinateur environnemental et écologue, des structures animant les PNA, notamment en faveur du Crabier blanc, d'un représentant du service départemental (OFB) et d'experts (courantologie, Eco toxicologie à minima – comme décrit dans la réserve);
10. Étendre le rôle du comité de suivi du milieu naturel au suivi et améliorations des mesures de compensation et d'accompagnement mises en place;
11. Transmettre les suivis ERCA, le bilan d'évaluation de la mise en œuvre des mesures ERCA et les suivis trimestriels des contrôles des matériels au Comité de suivi du milieu naturel;

Suivi des récifs coralliens

12. En phase chantier, prolonger le suivi des récifs coralliens sur toute la durée des travaux en mer et pas seulement à T+3 et T+6 mois;

Suivi des communautés ichtyologiques

13. Réaliser des suivis des communautés ichtyologiques sur des stations de substrat meubles plus proches du rejet;

Suivi de la turbidité

14. Ajouter une station de mesure de la turbidité à 50m et déplacer la station de référence à une distance suffisante de la zone projet pour garantir l'absence d'impact sur cette station.

Suivi des rejets:

15. Développer un modèle de courantologie adaptatif qui utiliserait les données de suivi pour auto-ajuster ses prédictions et anticiper les déplacements des effluents en fonction des conditions marines locales. Ce modèle serait un outil de pilotage permettant d'optimiser le fonctionnement de l'usine en adaptant les rejets pour minimiser leur impact.

Suivi des substances chimiques

16. Réaliser un suivi spécifique des substances chimiques (mesurer les concentrations de substances chimiques utilisées dans les processus industriels comme les antitartres, les floculants à base d'acrylamide, les AOX, ainsi que l'azote et le phosphore totaux) et de leurs effets écotoxiques en réalisant des prélèvements de sédiments et d'eau de mer tous les trimestres (avant le démarrage de l'usine et lors de la phase d'exploitation, soit quatre fois par an couvrant les saisons sèches et humides);
17. Réaliser des tests écotoxicologiques, comprenant à minima l'inhibition de la croissance des algues marines (*Phaeodactylum tricorutum*), la toxicité aiguë de l'eau ou des sédiments avec le crustacé *Artemia franciscana*, et l'évaluation de la toxicité de l'eau avec des lignées cellulaires de branchies de poisson (norme ISO/DIS 21115)

Suivi de l'état de santé toxicologique des communautés ichthyologiques

18. Réaliser des analyses concernant la concentration de ces molécules dans les chairs de poissons.

Tous les suivis

19. Réaliser tous les suivis prévus pendant la durée d'exploitation de l'usine et non sur une période limitée à 10 ans ;

Recommandations

Suivi de la turbidité :

1. Installer un dispositif de mesure en temps réel sur des sites clés,
2. Élaborer un plan d'intervention détaillé incluant l'identification des sources de dépassement, l'ajustement des méthodes de travail telles que l'installation de protections additionnelles (barres stabilisatrices, géotextiles plus denses) et la formation des opérateurs.

Suivi des effluents rejetés en mer et dans le milieu marin récepteur

3. Prévoir des capteurs en temps réel pour les paramètres clés des rejets (salinité, turbidité, métaux), connectés à un système de surveillance permettant de déclencher des alertes immédiates. En cas de suspicion de contamination, il conviendrait d'étendre ces suivis à l'intégralité des masses d'eau du lagon concernées.

Préparer le futur

4. Réaliser un retext de la construction de l'usine d'un point de vue impact environnemental et proposer des suggestions pour de potentiels projets.

Article 2 :

Le directeur général de l'Office français de la biodiversité est chargé de l'application de la présente délibération qui fera l'objet de mesures de publicité prévues par l'article R 334-15 du code de l'environnement et notamment la publication au recueil des actes administratifs de l'Office français de la biodiversité¹.

Le Président du Conseil de gestion du
Parc naturel marin de Mayotte



M. Abdou DAHALANI

¹ Le destinataire de la présente décision qui désire la contester peut directement saisir le tribunal administratif compétent d'un recours contentieux dans les deux mois suivant sa notification. Si le requérant réside en outre-mer et qu'il doit saisir un tribunal siégeant en métropole ou si le requérant réside en métropole et qu'il doit saisir un tribunal siégeant en outre-mer, le délai de recours contre un acte administratif est de trois mois à partir de sa publicité. Il peut également, dans les deux mois suivant sa notification, saisir d'un recours gracieux, l'auteur de la décision, ou d'un recours hiérarchique, le supérieur de l'auteur de la décision. Ceux-ci disposeront d'un délai de deux mois pour lui répondre. En cas de rejet exprès ou implicite de la demande - la décision naît dans ce cas du silence gardé par l'administration pendant un délai de deux mois - le délai du recours contentieux, prorogé par l'exercice de ces recours administratifs, ne recommence à courir à l'égard de la décision initiale que lorsqu'ils ont été l'un et l'autre rejetés.

Annexe 1 – Liste des éléments à transmettre (réserve 3) :

A. - Travaux

1. Fournir les plans, phasages, descriptions des moyens techniques des travaux prévus ;
2. Préciser le nombre de canalisations de pompages prévues et leurs tracés ; le diamètre des canalisations et les calculs de charge,
3. Préciser la hauteur et la méthode de curage des têtes de pieux, ainsi que le devenir des matériaux curés ;

B. Évaluation des enjeux, états initiaux et protocoles associés

Mangrove

4. Ajuster l'aire d'étude immédiate du projet alternatif et réaliser l'état initial associé ;
5. Détailler le protocole RAM mangrove (localisation des transects, descripteurs écologiques relevés) et justifier les paramètres et seuils retenus pour caractériser l'état de santé ;

Compartiment sédimentaire

6. Évaluer l'enjeu du compartiment sédimentaire ;
7. Caractériser précisément le sédiment (réaliser un état initial) au droit du projet en réalisant des prélèvements (variations des différents paramètres granulométriques dans la zone, qualité physico-chimique dont métaux et taux de matière organique...);

Compartiment benthique

8. Évaluer l'enjeux du compartiment benthique ;
9. Caractériser précisément (réaliser un état initial) les communautés benthiques (diversité, richesse spécifique, biomasse...) en réalisant des prélèvements en plusieurs points d'échantillonnage, répartis selon un gradient de distance par rapport à la source de rejet et définis en fonction de la nature précise des sédiments et de la courantologie ;
10. Justifier le protocole d'échantillonnage envisagé (car un échantillonnage réparti selon un gradient de distance par rapport à la source de rejet et définis en fonction de la courantologie de la zone ou de type BACI semblerait plus appropriés que celui actuellement proposé).

Compartiment planctonique

11. Évaluer l'enjeux des communautés planctoniques ;
12. Caractériser ces communautés (réaliser un état initial) en réalisant des prélèvements au droit du projet ;
13. Justifier le protocole d'échantillonnage envisagé (car un échantillonnage réparti selon un gradient de distance par rapport à la source de rejet et définis en fonction de la courantologie de la zone ou de type BACI semblerait plus appropriés que celui actuellement proposé).

Ichtyofaune

14. Fournir des informations sur les communautés de poissons présentes (abondance, diversité, biomasse par espèces) sur plusieurs stations par habitat présent dans la zone (pas uniquement pour les habitats coralliens) ;
15. Préciser la durée du comptage effectué ;
16. Transmettre les sources et données relatives à l'évaluation de la pêche dans la zone ;

C. Évaluation des impacts et mesures ERCs

Alternatives technologiques – mesures d'évitement

17. Détailler les différentes alternatives technologiques envisagées pour diminuer la concentration en sel des rejets de saumure (41mg/L) ;

Risques naturels

18. Préciser si les dynamiques de fortes houles et marées, du phénomène de montée des eaux (recul du trait de côte), et de l'actualité quant à l'affaissement naturel de l'île de Mayotte (2024) ont été prises en compte, et fournir une analyse mise à jour le cas échéant ;
19. Transmettre la procédure d'alerte et d'urgence ;

Phase chantier

Défrichage d'habitats / Mangrove

20. Mettre à jour précisément l'analyse d'impact de l'alternative en indiquant les espèces concernées (et s'il s'agit d'espèces protégées), le nombre d'individus, leur taille actuelle et les surfaces/hauteur à défricher et à tailler et préciser quelles sont les mesures compensatoires associées ;
21. Fournir les résultats de l'expertise géotechnique à terre (mangrove) et en mer (mission G2 a minima) pour justifier le nombre exact de pieux, leur dimension, l'espacement entre chaque pieu et le matériau utilisé.
22. Analyser l'impact de ces pieux sur la faune et la flore terrestre et marine et proposer les mesures éventuelles associées.

Matières en suspension et autres éléments chimiques

Gestion des eaux et transparence hydraulique

23. Établir des mesures de dimensionnement des bassins, fournir le protocole de suivi des eaux rejetées et prévoir l'utilisation de flocculants ;
24. Préciser les équipements anti-hydrocarbures et les protocoles de suivi qui seront utilisés ;

Pollution par les matières en suspension

25. Fournir les plans de stockage des matériaux déplacés ;
26. Préciser quelles seront les structures de prise en charge des déchets solides et transmettre le protocole de contrôle des volumes de remblais ;

Remise en suspension des matériaux, stabilisation des sols et protection contre l'érosion

27. Indiquer la profondeur des pieux ;
28. Préciser s'ils seront installés par vibro-fonçage ou par battage et les mesures ERC associées ;

Pollution accidentelle et gestion des produits chimiques

29. Transmettre le protocole de stockage des produits dangereux sur le chantier ;
30. Transmettre le plan de formation des ouvriers aux mesures préventives et curatives en cas de pollution accidentelle ;

Pollution lumineuse

31. Préciser les horaires prévus des travaux et le besoin en éclairage

Pollution sonore

32. Préciser quelle sera la technique employée, et en fonction, mettre à jour l'analyse des impacts et des mesures de réduction avec notamment mention des niveaux de pollution sonore atteints au regard des seuils de sensibilité des espèces concernées.
33. Délimiter une zone d'exclusion acoustique.

Phase d'exploitation

Continuité écologique – mangroves

34. Préciser le protocole de la taille des palétuviers sous l'emprise et à proximité directe de la passerelle en phase d'exploitation. Réaliser une analyse des impacts et mesures associées.

Gestion des bovins

35. Apporter des garanties quant au stockage et évacuation de ces déchets ;
Consommation énergétique et production de CO2

36. Proposer des alternatives énergétiques plus ambitieuses ; à défaut, des mesures de compensations adaptées à l'impact élevé de cette production de CO2 ;

Modélisation de la zone hydrodynamique de la zone de rejet

37. Fournir le fichier de configuration complet et détaillé de la modélisation (hydrodynamisme, rejet, dont champs proches incluant les diffuseurs).

38. Décrire la représentation des diffuseurs, préciser les hypothèses faites concernant leur fonctionnement ainsi que les données et analyses de sensibilité justifiant que ces hypothèses sont avérées ;

39. Préciser le modèle de turbulence vertical utilisé et si l'effet de la stratification sur la turbulence est pris en compte, les valeurs du coefficient de turbulence horizontal utilisé, comment la différence de rugosité entre les fonds sableux et les récifs de corail a-t-elle été prise en compte, si les bancs couvrants ont été pris en compte, quelle a été la profondeur minimum considérée par rapport au niveau moyen, quelle est la profondeur moyenne réelle de ces récifs le long de la frontière ouverte du modèle, comment le champ proche a-t-il été modélisé, quelle est la résolution horizontale du maillage aux alentours de chacun des points de rejet, quelle est la répartition verticale des couches de la maille verticale, quelles sont les conditions initiales et de frontière pour les différents traceurs, si la salinité et les effets baroclines correspondants ont été pris en compte dans la simulation des autres traceurs ;

40. Montrer une comparaison entre la bathymétrie réelle et celle introduite dans le modèle à travers du maillage, montrer à une échelle appropriée les séries temporelles de niveaux d'eau et de vitesses pour les données et les résultats, les vitesses résiduelles observées et modélisées. De même pour les vitesses de la constituante de marée MSf, montrer des diagrammes de dispersion des niveaux et des vitesses (observations vs. Modèle) ainsi que les analyses de sensibilités justifiant les valeurs attribuées aux paramètres de modélisation (démonstration de convergence des résultats vers la valeur choisie) ;

41. Transmettre un zoom du maillage avec l'indication des points de rejet ;

D. Suivis et autres mesures d'accompagnement

Surveillance du front de mangrove

42. Mettre à jour cette mesure en fonction des nouvelles zones et surface de mangrove à défricher ;

Suivi de l'état de santé de la mangrove

43. Détailler les paramètres suivis et la méthode de notation pour chacun, ainsi que les seuils d'alerte et d'arrêt ;

44. Préciser les mesures à prendre en cas de dégradation avérée de l'état de santé de la mangrove ;

Suivi de la sédimentation et envasement de la baie

45. Justifier le nombre de pièges à sédiments à installer, définir leur position et les seuils d'alerte et d'arrêt ;

46. Préciser les mesures à prendre en cas de sur-sédimentation avérée ;

Suivi de l'état de santé des récifs coralliens

47. Préciser les mesures complémentaires à prendre en cas d'observation de modifications significatives de l'état de santé des récifs coralliens ou des communautés de poissons ;

48. Préciser dans le protocole de suivi des poissons le temps de comptage et la saison ;

Exploitation

Suivi des effluents rejetés en mer eau et du milieu marin récepteur

49. Définir des seuils d'alerte et d'arrêt basés sur les paramètres critiques (salinité, MES, concentrations en métaux lourds) des effluents rejetés ;
50. Préciser par quels moyens les seuils d'alerte et d'arrêt sont détectés, les informations de suivi transmises (au gestionnaire, au comité de suivi, au grand public) et le protocole associé ;

Suivi des substances chimiques

51. Réaliser des prélèvements de sédiments et d'eau de mer avant la mise en service de l'usine ;

Régénération de la mangrove impactée

52. Mettre à jour les mesures prévues suite à l'alternative et envisager d'abord des techniques de restauration passive en cas d'échec de la régénération naturelle (avant la restauration active) ;
53. Préciser sur quel seuil est établi le succès ou l'échec de la repousse de propagules à l'issue de l'année 2 ;
54. Détailler les actions en cas d'échec de restauration et / ou de dépérissement généralisé de la mangrove ;
55. Transmettre des informations relatives à la phase finale d'exploitation de l'usine (durée d'exploitation prévue, durée de vie des canalisations, mesures de démantèlement, d'évolution ...)

E. Impacts cumulés

56. Proposer une/des mesure(s) ERC associée(s).



NOTE TECHNIQUE

POUR AVIS DU CONSEIL DE GESTION DU PARC NATUREL MARIN

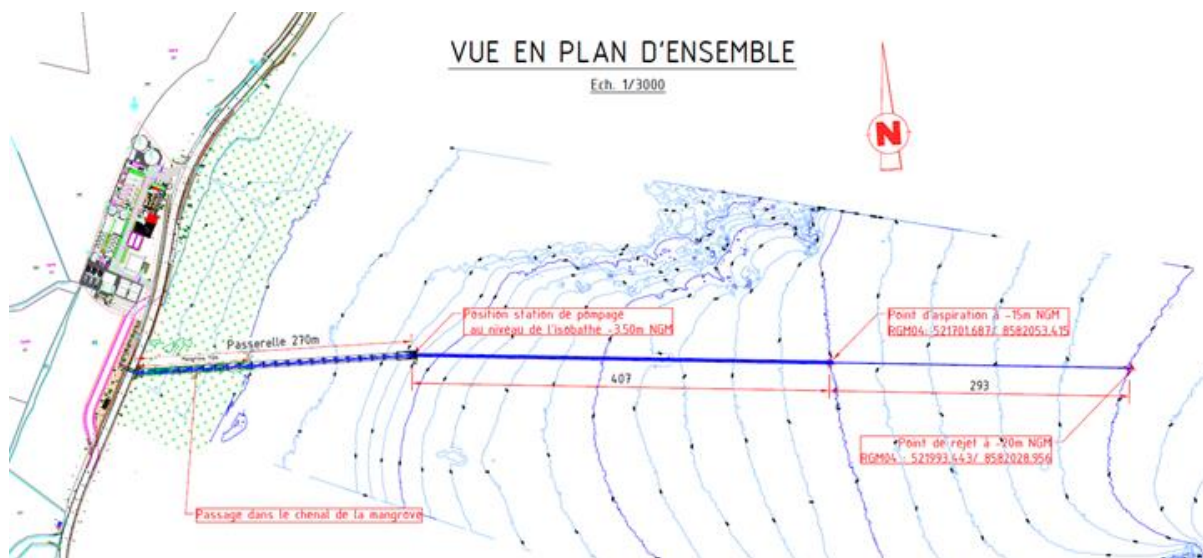
Pamandzi, le 08/11/2024

Objet	Avis usine de potabilisation par dessalement d'eau de mer d'Ironi Bé
Commune	Dembéni
Pétionnaire	Les eaux de Mayotte (LEMA)
Service instructeur	DEALM
Procédure	Urgence civile
Date de la saisine	26/10/2024 puis 05/11/2024 (mise à jour du dossier)
Date de réponse	29/11/2024 (suite à dernière saisine)
Commission Avis	Bureau élargit à la commission avis : 30/11/2024 / Commission avis (complément de dossier) : 08/11/2024
Type d'avis	Conforme

1. Caractéristiques du projet

1.1. Le projet

Le projet d'implantation de l'usine se situe au nord-est de la commune de DEMBENI, au niveau d'Ironi Be sur une parcelle appartenant à l'Etat.



Le projet comprend les réalisations pérennes suivantes :

- **1 passerelle de 270 m de longueur et de 5.5 m de largeur sur 40 pieux** vibrofoncés tous les 12m, dans un chenal naturellement présent dans la mangrove (sur 112 m de long), et abritant une partie des 3 canalisations de pompage et de rejet, ainsi qu'une station de pompage en son extrémité.
- **2 canalisations de pompage en mer sur une distance d'environ 677m de la côte** constituée de tubes en PEHD assemblés par soudage thermique avec une prise d'eau à près de -15 m NGM.
- **1 canalisation de rejet des saumures en mer sur une distance d'environ 970 m** de la côte constituée de tubes en PEHD assemblés par soudage thermique avec un point de rejet à près de -20 m NGM, pour une capacité de rejet de 12 730 m³/j en moyenne journalière.
- **1 usine à terre sur une surface de 0.96 ha**, utilisant la technique de l'osmose inverse dimensionnée pour produire 10 000 m³/j d'eau traitée durant 24h/j soit 417 m³/h en tranche 0. Elle devrait être utilisée à la moitié de sa capacité (5000 m³/j), en dehors des situations de sécheresse exceptionnelle ou d'arrêt de l'une des grosses UPEP, et à sa capacité maximale le cas échéant. L'usine comprend les infrastructures pour accueillir des trains supplémentaires permettant d'augmenter la capacité de production de 6600 m³/j (soit une capacité totale de 16 600 m³/j).

A noter : La possibilité de produire ultérieurement un volume de 16 600m³/jour ne fait l'objet ni de cet avis, ni demande d'autorisation, et nécessiterait une nouvelle instruction au titre de la réglementation environnementale.

Le projet comprend les aménagements provisoires (prévus en phase chantier seulement) suivants :

- **Déviations de la Route Nationale** sur près de 0,25 ha.
- **Base de vie** pour la durée du chantier sur près de 0.247 ha.

Le projet est mis en œuvre par deux marchés :

- Conception réalisation plateforme, prise d'eau, passerelle et RN provisoire, émissaire de rejet des saumures, réservation sous RN **réalisés par le groupement porté par NEGRI.**
- Marché global de performances usine 10 000 M3/j **réalisés par le groupement porté par STEREAU** incluant une période d'exploitation de 3 ans.

1.2 Travaux prévus

A terre, sont prévus les travaux suivants :

- Aménagement d'accès au site ;
- Débroussaillage et décapage des terres végétales de la zone d'implantation de la plateforme et de la base vie chantier ;
- Terrassements et préparation de la plateforme (environ 17 500m³ de déblais, environ 25 600 m³ de remblais en volume total) ;
- Dévoisement de la canalisation fonte DN125 d'eau potable existante ;
- Dévoisement de la Route Nationale (RN2).

A l'interface Terre-Mer, sont prévus les travaux suivants :

- Destruction d'une zone humide de 1 ha environ (mangrove, arrière mangrove et ripisylves) ;
- Installation de la passerelle sur 112 m de Mangrove sur 40 pieux vibrofoncés (ou par battage si les sondages en montrent la nécessité) tous les 12 m dans le chenal naturellement présent dans la mangrove. La passerelle sera réalisée par avancement. Cette installation nécessite néanmoins la suppression de palétuviers sur environ 13m², et la taille de palétuviers sur environ 130 m².

En mer, sont prévus les travaux suivants :

- Poursuite de la passerelle (vibrofonçage ou battage de pieux jusqu'à 270 m de la côte) ;
- Réalisation de fondations (fonçage de pieux) sur le fond marin, accueillant des poutres (pour la pose des canalisations) en acier revêtu d'un traitement anticorrosion, et scellées dans les pieux au béton colloïdal ;
- Transport, assemblage (en tronçons) et stockage provisoire des canalisations amarrées à des coffres d'amarrage ;
- Assemblage en flottaison, et installation en immersion des tronçons de canalisation par cerclage sur des berceaux fixés sur les poutres.

La durée cumulée des travaux prévue s'étend environ sur 21 mois :

- Lot 1 "conception usine" : **14 mois.**
- Lot 2 "génie civil et pose de canalisation" (avec passerelle et RN provisoire) : **12/13 mois.**

A noter :

- (1) La description des travaux manque souvent de précisions (plans, phasage, moyens techniques...), pourtant indispensables à la bonne compréhension du projet et à l'analyse des impacts en phase travaux.
- (2) L'alternative prévoit le passage de trois canalisations (2 de pompage, 1 de rejet) alors que dans le dossier d'étude d'incidence il n'est mentionné qu'une seule conduite de pompage.
- (3) La fixation des canalisations sur le fond marin prévoit le curage des pieux $\phi 1000$ sur une petite hauteur sans préciser la hauteur, la méthode de curage et le devenir des matériaux curés.

2. Spécificités et enjeux de biodiversité

2.1. Interface terre-mer

2.1.1. Zones protégées

L'implantation des aménagements en partie terrestre et dans la mangrove se superpose à des enjeux écologiques forts, en particulier au droit de la mangrove et de l'arrière-mangrove :

- Le projet est situé au sein des zones de mangrove et d'arrière-mangrove d'Ironi Be classées en **ZNIEFF 1 continentale** "mangrove de Ironi Bé". **Un arrêté préfectoral de protection de biotope** est en cours de signature pour la mangrove d'Ironi Be.
- Parcelle terrestre d'implantation et mangrove intégralement classée en **réservoir de biodiversité** du futur Schéma Régional de Cohérence Ecologique ;
- Parcelle terrestre d'implantation et mangrove intégralement classés en **Zone d'Intérêt pour la Conservation des Oiseaux (ZICO)** : « mangroves et zones humides d'Ironi Be et Dembéni » ;
- Intégralité de la mangrove et près d'1/3 de la parcelle terrestre d'implantation identifiées comme **zone humide** avérée.

2.1.2. Faune et Flore

De nombreuses espèces de faune ont été recensées sur la zone d'étude (hors espèces introduites) : 40 espèces de faune terrestre sont intégralement protégées dont 37 avec leurs habitats. Ces espèces sont majoritairement inféodées aux espaces boisés qui sont matérialisés par les habitats de mangrove et d'arrière-mangrove et de l'agrosystème forestier.

Concernant la flore, l'enjeu de la zone d'étude concerne principalement la présence d'espèces inféodées aux arrières-mangroves et aux mangrove sensu stricto, **dont l'espèce *Bruguiera gymnorhiza* (L.) qui est protégée.**

2.2. Milieu marin

2.2.1. Zones protégées

Le site du projet se situe :

- En « **Zone de valorisation du patrimoine naturel et culturel en soutien aux activités écologiquement exemplaires** » sur la carte des vocations du Parc naturel marin (carte présente dans le plan de gestion).
- Au sein de la **ZNIEFF marine de type 2** des « Récifs frangeants de Grande-Terre et Petite-Terre ».
- A environ 3 km de la **ZNIEFF marine de type 2** des « Récifs frangeants des îlots » (îlots M'Bouzi et îlots Hajangoua) et de la réserve naturelle terrestre et marine de l'îlot Mbouzi.
- A environ 5 km de la **ZNIEFF marine de type 2** du "récif barrière" et de la **ZNIEFF marine de type 1** « Bordure de la Passe en S » (également zone de pêche réglementée).
- A environ 6 km de la **ZNIEFF marine de type 1** "Platier récifal barrière de Pamandzi".

2.2.2. Masse d'eau côtière

Le projet se situe dans la masse d'eau côtière FRMC12 « Pamandzi-Ajangoua-Bandrélé côtière » présentant un **état écologique médiocre**, conséquence de pressions moyennes à fortes dues à des problématiques d'assainissement, de gestion des déchets, d'imperméabilisation des surfaces, et d'élevages. De plus, le **taux de renouvellement des eaux y est faible**, entraînant un temps de réponse du milieu plus important (SDAGE, 2022-2027).

3. Pertinence de l'état initial

3.1. Interface terre-mer

3.1.1. Mangroves

Suite à la proposition d'alternative, l'aire d'étude immédiate n'est plus pertinente et n'a pas été ajustée. **L'état initial concernant le passage des canalisations dans la mangrove est à réaliser.**

Le protocole RAM Mangrove a été utilisé pour l'évaluation de l'état de santé de la mangrove. Ce protocole n'est pas détaillé dans le dossier (localisation des transects, descripteurs écologiques relevés). **Les paramètres et seuils retenus pour caractériser l'état de santé doivent être justifiés.**

3.1.2. Avifaune

Les niveaux d'enjeux affectés aux espèces d'oiseaux protégés sont sous-estimés, en particulier les espèces protégées avec leur habitat dont le Crabier blanc. **De manière générale, le calcul des Enjeux Locaux de Conservation (ELC) n'est pas fourni pour chaque espèce et ne permet pas d'en analyser la bonne évaluation ou non. De plus, les données du PNA Crabier blanc 2019-2023 ne sont pas mentionnées** (nombre de couples nicheurs, période de reproduction, ...).

3.2. Milieu marin

3.2.1. Habitats marins

Habitat : Récifs coralliens

Dans le dossier du pétitionnaire, l'enjeu sur les récifs coralliens est évalué de faible à fort, l'enjeu fort étant principalement sur les récifs frangeants et les massifs coralliens.

L'argument d'une surpêche est avancé pour expliquer une faible diversité spécifique en poisson, sans justification bibliographique ou observation de cette activité.

Habitat : Herbiers marins

L'enjeu sur les herbiers situés à la pointe d'Ironi Be, à 500m au sud et à 3 km du site du projet, sont classés en enjeu moyen. Pas de remarques particulières à ce sujet.

Habitat : Compartiment sédimentaire

Concernant le compartiment sédimentaire (substrat meuble à dominance de vase), **aucun enjeu n'est mentionné.** L'état initial se base sur des prélèvements d'une station de suivi DCE (Directive cadre sur l'eau) datant de 2020 et située au sud de l'îlot M'Bouzi (à 2 km de la zone du projet). **Des interrogations se posent sur la méthode utilisée et la précision du diagnostic.** En particulier, l'absence de prélèvement au droit du projet ne permet pas une caractérisation précise du sédiment (variations des différents paramètres granulométriques dans la zone, qualité physico-chimique dont métaux et taux de matière organique...).

3.2.2. Faune marine

Communautés benthiques

Nous notons une prise en compte des communautés benthiques, toutefois **aucun enjeu n'est associé à ces communautés** alors même qu'elles sont une source de nourriture pour de nombreuses espèces d'intérêt commercial. De plus, aucun prélèvement n'a été réalisé pour caractériser les communautés benthiques au droit du projet et dans les alentours. Ainsi l'état initial est établi grâce aux données de 2020 d'une station DCE située au sud de l'îlot M'Bouzi (à 2 km de la zone du projet).

Par ailleurs, le pétitionnaire indique que les résultats provenant de cette station témoignent que : « *Les seuls peuplements sont représentés par l'endofaune de substrat meuble, dont les communautés sont dominées par des espèces opportunistes et résistantes* » et que « *Les peuplements d'endofaune du*

sédiment se caractérisent par une forte abondance de crustacés, d'annélides et de bivalves. Les indices montrent un bon état écologique, en amélioration par rapport aux résultats de 2011 et de 2015.". Il n'est pas précisé si la "résistance" des espèces concerne des phénomènes comme la sursalure, les modifications de pH et de température ou les polluants chimiques (antitartre par exemple).

Compte tenu de la distance de cette station, de la variabilité spatiale naturelle de ces communautés et de l'utilisation d'un indicateur (M-AMBI) qui rend compte principalement de l'eutrophisation et non des impacts de la sursalure ou de l'augmentation de température, **l'état initial proposé par le pétitionnaire n'apparaît pas satisfaisant**. Des prélèvements devraient être effectués en plusieurs points d'échantillonnage, répartis selon un gradient de distance par rapport à la source de rejet et définis en fonction de la nature précise des sédiments et de la courantologie afin de caractériser les communautés benthiques (diversité, richesse spécifique, biomasse...) de la zone. Ceci est indispensable pour suivre l'évolution de ce compartiment lors des phases de travaux et d'exploitation d'autant plus que le dessalement est connu pour avoir des impacts sur ces communautés (modification de la proportion des groupes d'espèces principalement) en lien avec les changements de température, de salinité et les potentielles pollutions chimiques. Or, ces changements peuvent affecter le fonctionnement global de l'écosystème benthique de la baie (géochimie du sédiment, production de matière organique...) et induire des perturbations dans l'ensemble du réseau trophique, jusqu'aux poissons d'intérêt halieutique qui se nourrissent de ces espèces.

Communautés planctoniques

Nous notons également une prise en compte des communautés planctoniques, **mais aucun enjeu n'est associé à ces communautés** dans le dossier du pétitionnaire.

De plus, et comme pour la faune benthique, aucun prélèvement n'a été effectué à proximité de la zone des travaux et l'état initial se base sur les données de la DCE dont la station est située à plus de 2 km de la zone du projet. Plusieurs études scientifiques ont pourtant déjà démontré que les processus de dessalement peuvent avoir des effets délétères non négligeables sur ces compartiments qui sont à la base du fonctionnement des écosystèmes marins et que ceci pourrait potentiellement altérer de façon définitive ou temporaire l'ensemble des maillons trophiques. **L'état initial devrait donc être complété.**

Ichtyofaune

Les espèces mentionnées dans les annexes de la CITES (requins et raies principalement), ainsi que celles de l'arrêté pêche de 2018 n'apparaissent pas dans l'évaluation du caractère protégé ou patrimonial des espèces.

Il est indiqué que "*lors de l'inventaire des peuplements marins, pour chaque station MSA, un inventaire des poissons et macro-invertébrés a été réalisé au sein de 2 points de comptages stationnaires de 4 m de rayon*" mais aucune liste complète des espèces observées par station n'est fournie. Seules quelques familles de poissons sont mentionnées dans certains passages de l'étude d'incidence. **Des informations globales sur les communautés de poissons (abondance, diversité, biomasse par espèces) sur plusieurs stations par habitat présent dans la zone (pas uniquement pour les habitats coralliens) apparaissent indispensables pour suivre par la suite l'impact du dessalement sur les communautés de poissons et les enjeux économiques qui en découlent.**

Par ailleurs, le choix de points de comptages stationnaires de 4m de rayon alors que ce type de protocole est normalement effectué avec un rayon de 7m (Bohnsack & Bannerot, 1986) est discutable. Aucune information n'est donnée quant à la durée du comptage effectué alors que ceci peut également influencer la densité et la richesse spécifique relevée par station. L'absence d'observation de gros piscivore dans la zone pourrait donc résulter de biais méthodologiques (les prédateurs sont plus fréquemment comptés dans la zone 5-10m que 0-5m dans les suivis par vidéo effectué à Mayotte), bien plus que la surpêche dans une zone où cette activité n'est pas particulièrement importante.

Il serait utile de préciser les sources d'informations concernant la pêche dans la zone car elles ne sont pas en accord avec les informations connues par le PNMM (via le SIH et les suivis aériens) de l'activité dans la zone.

Mégafaune : Mammifères marins et Tortues marines

Les enjeux sur la mégafaune ont été considérés faibles à modérés, notamment à cause de la présence potentielle du Grand dauphin d'Indo-Pacifique et de la Tortue Imbriquée. **Il conviendra de délimiter une zone d'exclusion acoustique et d'assurer une surveillance quotidienne quant à la présence de mégafaune autour de la zone de travaux, notamment pour contrôler les effets de la pollution sonore** (paragraphe 4.2.4).

4. Prévision d'impacts et pertinence des mesures d'évitement, de réduction et de compensation des atteintes à la biodiversité

4.1. Chantier & Exploitation

4.1.1. Évitement et alternatives

Alternatives technologiques du procédé de désalinisation

L'étude d'incidence environnementale du dossier du pétitionnaire justifie le recours à la technique de dessalement pour subvenir au besoin en eau potable, mais ne détaille pas les différentes alternatives technologiques qui auraient pu être envisagées, notamment pour diminuer la concentration en sel des rejets de saumure. Il aurait été souhaitable d'étudier des solutions innovantes et peut-être encore peu répandues, comme par exemple d'explorer les possibilités de revalorisation de saumures produites.

Alternatives à la localisation du projet : choix du site

Le dossier comporte une synthèse des différentes études quant à la localisation de l'usine, réalisées depuis 2013. En l'absence des différentes études elles-mêmes (notamment celles réalisées par LEMA et la DEALM pourtant mentionnées en annexes), l'analyse suivante s'intéresse à retracer l'historique de ces études et leurs résultats et les critères sur lesquels se basent les choix qui ont été faits.

1ère étude 2013 - 2017 portée par LEMA

L'étude a été menée sur 4 sites : **Port de Longoni, Badamiers, Ironi Be, Bandrélé.**

L'étude conclut que, pour la mise en place d'une unité de dessalement, **le site le plus favorable est celui de Bandrélé** (sécurisation de l'alimentation en eau potable de la partie sud de l'île), **mais qui présente un impact environnemental défavorable** (au même niveau que Longoni et Ironi Be), notamment concernant le rejet pour lequel il faudrait prévoir des mesures pour favoriser la dilution de la saumure (systèmes de diffuseurs) afin de minimiser l'impact sur le milieu marin. Par ailleurs, **le site des Badamiers présentait le moins d'impact environnemental** (critère évalué comme favorable).

Les conclusions du volet environnemental de l'étude menée entre 2013 et 2017 sont remises en contexte en 2024 par rapport aux évolutions du projet et des caractéristiques des sites. Dans l'étude, il est mentionné pour les sites d'Ironi Be et de Bandrélé que *"l'impact de la saumure à forte salinité sur les espèces peuplant les fonds marins serait défavorable, d'autant plus que les faibles courants dans le lagon ne facilitent a priori pas la dilution et la dispersion rapide de la saumure"*. Sur le site de Bandrélé, les enjeux environnementaux sont toujours considérés comme importants dû à une *"vitalité corallienne exceptionnelle à l'îlot Bambo"*, et la *"présence d'herbiers sur tous les platiers récifaux"*. Concernant le site d'Ironi Be, le critère environnemental défavorable semble être amélioré dû à l'abandon des projets de fermes aquacoles sur la zone et à la crainte de tenues en MES élevées sur la qualité de l'eau pompée. Le site des Badamiers est toujours favori d'un point de vue environnemental, notamment sur le critère de rejet où *"les courants importants et la forte agitation au large, côté océan, sont favorables à une dispersion rapide du rejet"*. A ce stade, il est mentionné que la modélisation courantologique du rejet des eaux sursalées a montré que l'emploi des avancées techniques pour maximiser la dilution des rejets, permet de relativiser l'incidence des eaux sursalées sur les peuplements marins alentour. **Cet aspect est questionné au paragraphe 4.3.5 (impact des rejets) de ce document.**

2ème étude 2019 portée par la DEALM

L'étude porte le nombre de sites évalués à 15 (en intégrant Longoni Badamiers et Ironi Be). Concernant le critère des enjeux environnementaux, le site d'Ironi Be apparaît désormais comme neutre, alors que ceux de Bandré et des Badamiers apparaissent comme favorables. En conclusion, l'analyse multicritère identifie 4 sites potentiels : Bandré - Bambo Est, Mgnambani - Pointe Rassi Bambo, Sada - Mtsangabeach et le Port de Longoni. Puis en 2022, suite à une actualisation de cette analyse, le site de la Pointe d'Ironi Be (parcelle de l'Etat) est ajouté à cette liste, considérant que la parcelle privée présentée dans l'étude de 2013 avait pénalisé l'évaluation du site d'Ironi Be.

Analyse multicritères réalisée par la DEALM en 2022, synthèse et choix final

L'analyse et la décision finale porte sur les 5 sites : Dembeni - Ironi Be, Sada - Mtsangabeach, Mgnambani - Pointe Rassi Bambo, Bandré - Bambo Est, Port de Longoni.

Sur la base de critères environnementaux, tous les sites se trouvent à proximité de plusieurs zones à enjeux et, à l'exception du Port de Longoni, tous se trouvent sur un corridor et/ou réservoir de biodiversité défini par le Schéma Régional de Cohérence Ecologique. Une analyse des enjeux liés au milieu marin sur chacun de ces sites a été menée sur la base de données récentes (2021-2023), les éléments utilisés dans les analyses précédentes étant considérés comme parcellaires et sans études récentes à l'appui. Les choix réalisés ainsi que leurs raisons principales sont résumés dans le tableau ci-après.

Site	Raison prioritaire	Raisons secondaires	Analyse Enjeu milieu marin du pétitionnaire
Dembeni - Ironi Be Site retenu <i>Ajustement de la parcelle retenue pour cause de contraintes techniques</i>	Raison technique majeure <i>Seul site permettant d'alimenter le nord et le sud de l'île</i>	Raisons techniques et foncières <i>Disponibilité foncière et électrique pour alimenter l'usine</i>	Récif frangeant et reliquat d'herbier dégradés, état de santé médiocre Passage possible en fond de baie sans tranchée dans le récif Traversée de mangrove
Bandrele - Bambo Est Site non retenu	Raisons techniques majeures <i>Alimentation en eau potable et réseaux électrique existants sous-dimensionnés</i>	Raisons environnementales mineures <i>Corridor écologique (SRCE), Espace fonctionnel de Zone humide de Bambo Ouest</i>	Récif frangeant moyennement en état de santé moyen Nécessité probable de tranchée dans le récif Traversée de mangrove
Mgnambani - Pointe Rassi Bambo Site non retenu	Raisons techniques majeures <i>Alimentation en eau potable et réseaux électrique existants sous-dimensionnés</i>	Raisons environnementales <i>Corridor écologique (SRCE), Propriété Conservatoire du littoral, Aire protégée UICN</i>	Récif frangeant riche à herbiers et coraux durs en bon à très bon état de santé. Nécessité probable de tranchée dans le récif
Sada - Mtsangabeach Site non retenu	Raisons techniques <i>Alimentation en eau potable et réseaux électrique existants sous-dimensionnés</i>	Raisons foncières, administratives et environnementales <i>Zone NS du PLU, Corridor/Réservoir de biodiversité (SRCE),</i>	Récif frangeant riche à herbiers et coraux durs en bon état de santé. Nécessité probable de tranchée dans le récif

		<i>Espace fonctionnel de Zone humide, ZNIEFF de Type 1 en milieu marin récepteur</i>	
Port de Longoni Site non retenu	Raisons environnementales majeures <i>Risque industriel majeur, proximité d'hydrocarbures</i>	Raisons foncières et administratives <i>Parcelle contigüe au zone Up du PLU</i>	Fond sableux à herbier dégradé devant la parcelle. Passage possible dans le fond sableux sans tranchée dans le récif Herbier dégradé et récif corallien en bon état et de l'Île Blanche (reposoir d'importance mondiale pour les sternes), avec présence régulière de tortues

Alternatives de rejet hors-lagon

La faisabilité d'un rejet dans une zone à plus fort hydrodynamisme, permettant une meilleure dispersion des saumures, a été étudiée depuis le site d'Ironi Be. Au total, 5 options ont été proposées:

- Rejet hors lagon - Passage entre les îlots Hajangoua en traversant le récif barrière
- Rejet hors lagon - Passage dans la passe en S (en suivant ses courbures)
- Rejet hors lagon - Passage dans la passe Bandrélé
- Rejet en lagon - Pointe Hamouro (zone de plus fort hydrodynamisme)
- Rejet en lagon - Ironi Be (solution actuelle)

Dans le dossier du pétitionnaire, il ressort de cette analyse multicritère que la solution d'un rejet hors lagon n'est pas satisfaisante aux niveaux techniques, environnementaux et financiers. En effet, de prime abord, ces solutions apparaissent comme relativement complexes, sans certitude sur le caractère plus ou moins impactant. La limite de cet exercice réside dans le fait que ces alternatives soient étudiées uniquement depuis le site d'Ironi Be. Il semble plus opportun et naturel, que les différentes options du point de rejet soient traitées en même temps que l'analyse des sites alternatifs, comme cela a d'ailleurs été le cas dans les études réalisées (critère environnemental).

Par ailleurs, le retour d'expérience de l'usine de dessalement de Petite Terre ne comprend pas d'analyse environnementale au point de rejet. Il aurait été intéressant de constater l'état et idéalement l'évolution du milieu en ce point précis, de manière à avoir un résultat d'expérience réelle (même sans conditions similaires).

4.1.2. Risques naturels

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- *Mesure ME01 : Évitements des zones à aléas forts inondation/MVT et choix de la zone d'implantation du projet (p 310)*
- *Mesure MR03 : Saisonnalité du chantier/période d'intervention imposée (p 250)*
- *Mesure MR08 : Suivi de l'évolution météorologique et anticipation des phénomènes de submersion marine (p 254)*
- *Mesure MR19 : Suivi et gestion en cas de phénomènes de crues (p 275)*
- *Mesure MR21 : Gestion du risque incendie (p 306)*
- *Mesure MR22 : Gestion de l'aléa submersion marine (p 311)*

Les mesures d'évitement - notamment sur le choix de la zone d'implantation du projet (ME01) - et de réduction prévues concernant les phénomènes de crues et de submersion marine sont importantes. Après application de ces mesures, le risque naturel de submersion marine évalué par le pétitionnaire passe de modéré à faible. Toutefois, l'évitement n'est pas total et l'usine reste en partie implantée sur une zone où le risque de submersion va de faible à fort.

Nous notons qu'il est mentionné (MR25) la surélévation des plateformes de construction de l'usine en partie haute du site (+4.60 m NGM), et des lagunes eaux sales et rejets en partie basse (+5 m NGM), comme étant au-dessus de la côte de submersion marine mais sans l'indiquer. **La question se pose donc quant à la prise en compte des dynamiques de fortes houles et marées, du phénomène de montée des eaux (recul du trait de côte), et de l'actualité quant à l'affaissement naturel de l'île de Mayotte** (le bulletin sismo-volcanique REVOSIMA cité dans le dossier du pétitionnaire date de 2020). Par ailleurs, il est mentionné dans les mesures de suivi météorologique en anticipation de ces phénomènes, un plan d'assurance environnementale et des procédures liées au système d'alerte qui restent à définir et à finaliser avant démarrage des travaux. **Il serait souhaitable d'avoir le détail de procédures d'alerte et d'urgence avant le démarrage des travaux**, pour écarter tous risques indirects sur l'environnement et la biodiversité.

4.2. Chantier

4.2.1. Défrichage, gestion des déchets et impacts milieu terrestre (@Oriane terminé)

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- *Mesure MC01 : Acquisition / Restauration / Gestion de zone humide et de forêt mésophile (p 366)*
- *Mesure MR01 : Adaptation de la période des débroussaillages et d'abattage à la phénologie des espèces avant intervention sur les secteurs végétalisés (p 325)*
- *Mesure MR02 : Translocation des espèces à capacité de mobilité réduite (p 326)*
- *Mesure MR03 : Défrichage doux et stockage temporaire des déchets verts in situ (p 327)*
- *Mesure MR04 : Mise en défens des habitats à enjeu (p 328)*
- *Mesure MR06 : Lutte contre les espèces invasives et prévention des introductions (p 332)*

Défrichage d'habitats

Le pétitionnaire propose une alternative au passage des canalisations sous forme de passerelle surélevée. Il est indiqué dans la pièce "Note Technique Complément Passerelle" que cette installation nécessite le défrichage de 13m² de mangrove sur les 260m² identifiés sous l'emprise de la passerelle, et la taille de palétuviers sur environ 130 m². Toutefois, dans la pièce "Modifications dossier suite au complément", pour ce qui concerne la Pièce 5 Autorisation environnementale - Etude d'incidence, il est indiqué que "les surfaces impactées par les habitats devient caduque pour l'habitat mangrove", enfin dans cette même pièce, pour la Pièce 9 - Dérogation espèces protégées il est indiqué "surfaces impactées à ajuster". Par ailleurs, aucune information sur la hauteur de canopée au droit de la passerelle n'est fournie, il n'y a donc pas d'argumentaire sur le besoin de défrichage ou de taille des arbres. En conclusion, l'analyse des impacts de l'alternative n'a pas été sérieusement étudiée et ne permet pas de savoir quelles surfaces de palétuviers vont être réellement abattus ou taillés, et quelles espèces sont concernées (en particulier s'il s'agit d'espèces protégées). **Cette analyse doit être mise à jour précisément, en indiquant les espèces protégées concernées, le nombre d'individus, leur taille actuelle et les surfaces/hauteur à défricher et à tailler, ainsi que les mesures compensatoires qui en découlent** (mesure compensatoire MC01 annoncée comme caduque et non remplacée).

D'autre part, il est annoncé un nombre de 40 pieux au total comme fondation à la passerelle, mais aucun résultat d'étude géotechnique n'est fourni pour justifier du nombre de pieux nécessaires. Les pieux guides ne sont pas pris en compte dans l'analyse alors qu'ils génèrent une emprise au sol

identique aux pieux définitifs, et donc un impact temporaire direct (écrasement de souches ou plantules, crabes, microfaune du sol en général).

Les résultats de l'expertise géotechnique à terre (mangrove) et en mer (mission G2 a minima) doivent être fournis pour justifier le nombre exact de pieux, leur dimension, l'espacement entre chaque pieu et le matériau utilisé. L'impact de ces pieux sur la faune et la flore terrestre et marine doit être analysé et les mesures éventuelles proposées.

Lors des opérations préparatoires (débroussaillage, abattage, terrassement...) une capture temporaire par récupération manuelle et un déplacement systématique des espèces protégées à mobilité réduite par le coordinateur environnement est prévu. S'agissant d'espèces fortement territoriales, le pétitionnaire ne tient pas compte du risque pour les individus déplacés d'être déposés dans des espaces déjà occupés et donc de ne pas pouvoir s'installer.

4.2.2. Impact des matières en suspension (MES) et autres polluants chimiques

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- *Mesure MR04 : Utilisation de palplanches pour la réalisation de la digue provisoire (p 250) - mesure initiale révisée*
- *Mesure MR05 : Réduction de la dispersion de MES lors de l'installation & démantèlement de la digue provisoire (p 252) - mesure initiale révisée*
- *Conception et réalisation de la prise d'eau provisoire, de la canalisation de rejet des saumures et de la plateforme de la future usine de dessalement de Grande Terre à Ironi Bé*
- *Mesure MR06 : Gestion des pollutions accidentelles (p 253)*
- *Mesure MR07 : Prévention contre le risque pollution (p 254)*
- *Mesure MR09 : Limitation du phénomène d'érosion (p 255)*
- *Mesure MR 13 : Maintien de la transparence hydraulique sur le chantier (p 267)*
- *Mesure MR14 : Gestion et assainissement des venues d'eau en fond de fouilles lors des terrassements (p 268)*
- *Mesure MR15 : Limitation de l'envol de poussières sur site (p 269)*
- *Mesure MR16 : Gestion des produits polluants et déchets de chantier à proximité du cours d'eau & mangrove (p 270)*
- *Mesure MR17 : Prévention contre le risque de pollution accidentelle des eaux et assainissement du chantier (p 270)*
- *Mesure MR18 : Mesures relatives à la gestion des engins de chantier (p 275)*
- *Mesure MR23 : Remise en état du chantier (p 372)*
- *Mesure MR24 : Propreté de la zone de chantier (p 373)*
- *Mesure MR07 : Mise en place d'un écran anti-MES pour les travaux en contact avec le fond marin (p 277)*
- *Mesure MR08 : Prévention des pollutions accidentelles pour les engins de chantier en contact avec le milieu marin (p 278)*

Gestion des eaux et transparence hydraulique (MR13, MR14)

Aucun calcul précis des volumes d'eau interceptés n'a été effectué, ni le dimensionnement des bassins de décantation. Il manque des informations essentielles sur la retenue des hydrocarbures et sur la méthode de décantation (floculation, simple décantation). **Il est impératif de préciser les équipements anti-hydrocarbures et les protocoles de suivi pour assurer une qualité d'eau rejetée conformément aux normes environnementales. Il est nécessaire d'établir des mesures de dimensionnement des bassins, garantir un suivi des eaux rejetées et prévoir l'utilisation de floculants pour renforcer la décantation des matières en suspension (MES).**

Pollution par les MES

Le projet ne décrit pas précisément l'impact des terrassements sur la pollution par MES, ni les plans de stockage des matériaux déplacés. **Il est nécessaire de prévoir des structures de prise en charge des**

déchets solides et un contrôle des volumes de remblais, par exemple en appliquant les recommandations des rapports LESELAM/BRGM qui préconisent la végétalisation des volumes excavés afin de lutter contre l'érosion à Mayotte.

Remise en suspension des matériaux, stabilisation des sols et protection contre l'érosion

Les travaux de vibrofonçage (ou battage) de pieux, de curage des têtes de pieux sous l'eau, de tracé de canalisation, de déviation de la RN et d'installation de chantier risquent de remettre en suspension des sédiments, affectant la biodiversité marine. L'utilisation d'écrans anti-MES est essentielle mais limitée.

La profondeur des pieux nécessaires pour assurer la stabilité de la passerelle est inconnue. De plus, il n'est pas encore défini si les pieux seront installés par vibration ou par frappe. Ces méthodes créent des ondes sismiques dans les sédiments environnants, qui risquent de remettre en suspension des particules et des sédiments.

Il est nécessaire d'intégrer des moyens contre la remise en suspension de matière dès l'origine, par exemple en assurant une couverture biodégradable sur les sédiments et zones susceptibles de s'éroder. Il est important également de mettre en place une surveillance continue de la turbidité, des MES et de la stabilité des sols, en particulier lors des périodes de marées et de fortes houles.

Pollution accidentelle et gestion des produits chimiques

Des mesures de gestion des pollutions accidentelles sont prévues (MR06 et MR07). Cependant ces mesures **ne prévoient pas le stockage des produits dangereux sur zone de chantier dans des bacs de rétention étanches et adaptés au volume des contenants, ni une formation des ouvriers à l'ensemble des mesures préventives et curatives des pollutions accidentelles** (par exemple : accueil environnement pour chaque ouvrier, puis 1/4h hebdomadaire tout au long du chantier avec exercices réguliers de mise en situation de pollution accidentelle).

En cas de tempête cyclonique venant de l'Est, le terre-plein risque d'être insuffisant pour protéger l'usine, surtout face aux transitions marines dues aux vagues de forte intensité. Dans le scénario de vagues cycloniques ou tsunamiques qui dépasseraient la barrière de corail, un effet de "gonflante" pourrait survenir, générant un risque d'inondation du site, avec des conséquences pour l'usine située en zone inondable ou semi-inondable. Ce phénomène pourrait provoquer la dispersion des produits chimiques stockés et leur rejet dans l'environnement. En guise de protection, des murs de soutènement pourraient s'avérer nécessaires.

4.2.3. Pollution lumineuse

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- *Mesure MR05 : Dispositifs d'éclairages adaptés à la faune patrimoniale (p 330)*

Les horaires de travaux ne sont pas précisés dans le dossier, et le besoin en éclairage "limité aux strictes nécessités de sécurité, sauf contraintes techniques de réalisations exceptionnelles" manque aussi de précision (horaires, localisations ...). L'impact ainsi que la mesure mis en œuvre sont donc difficilement analysables. Le pétitionnaire prévoit l'adaptation de l'éclairage en phase travaux et d'exploitation mais il est seulement question d'intensité lumineuse et de type d'éclairage. **Une réduction du temps d'éclairage voire une extinction complète des lampes de nuit afin de maintenir une trame noire dans ce corridor écologique est attendue.** Les dispositifs d'allumage automatique devront également être adaptés et en aucun cas s'allumer au passage de la faune.

4.2.4. Pollution sonore

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- *Mesure MR34 : Réduction des émissions de bruit et actions pour améliorer la qualité de l'ambiance sonore (p 391)*
- *Mesure ME01 : Délimitation d'une zone d'exclusion acoustique pour les espèces marines protégées - Mesure détaillée dans le dossier dérogation espèces protégées mais inexistante dans l'étude d'incidence environnementale*
- *Mesure ME02 : Surveillance quotidienne de l'absence de mammifères marins ou tortues marines dans le périmètre préalablement au démarrage des travaux sonores en mer (pre-watch) - Mesure détaillée dans le dossier dérogation espèces protégées mais inexistante dans l'étude d'incidence environnementale*
- *Mesure ME03 : Adaptation des périodes de travaux bruyants à la phénologie de reproduction du Crabier (p 324)*
- *Mesure MR10 : Augmentation progressive du niveau sonore des travaux en mer (soft-start) (p 360)*

Pour les nuisances sonores, les analyses du pétitionnaire portent surtout sur la mégafaune marine (Mammifères et Tortues) et sur les autres espèces protégées (ex. crabier blanc).

La mesure concernant la reproduction du Crabier blanc est dite spécifique à la réalisation de la digue provisoire, mais doit être reprise voire adaptée à la nouvelle alternative (passerelle haute). Il est désormais question de vibrofonçage de pieux, sous réserve de validation technique des sondages géotechniques qui n'ont pas été faits en milieu marin/mangrove au stade de l'étude fournie. **Il est donc attendu une validation finale de la technique employée, une mise à jour de l'analyse des impacts et mesures de réduction avec notamment mention des niveaux de pollution sonore atteints au regard des seuils de sensibilité des espèces concernées. Le périmètre d'exclusion doit être défini précisément au stade de la demande d'autorisation environnementale pour qu'il soit possible de juger de la pertinence de la mesure.**

4.3. Exploitation

4.3.1. Imperméabilisation des sols et eaux de ruissellement

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- *Mesure MR10 : Limitation de l'imperméabilisation des sols (p 257)*
- *Mesure MR20 : Traitement des eaux de ruissellement engendrées par le projet en phase exploitation (p 299)*

L'imperméabilisation est estimée à 0,96 ha pour la zone d'implantation de l'usine. L'intégration végétale et les zones d'infiltration mentionnées sont utiles mais nécessitent néanmoins une planification détaillée, avec des évaluations de capacité de stockage, d'absorption et de durabilité des installations.

4.3.2. Fragmentation des Continuités Écologiques

En perturbant les trames écologiques et en entraînant la déforestation partielle de la mangrove, ce projet compromet la fonctionnalité des corridors biologiques vitaux. La mangrove, en plus d'être un réservoir de biodiversité, agit comme une barrière naturelle contre l'érosion et contribue à la résilience des écosystèmes côtiers. Les coupes pour l'installation des émissaires dégradent ce rempart écologique et nuisent aux habitats de nombreuses espèces endémiques comme les geckos et les scinques, en plus de réduire la qualité de l'eau de la zone de mangrove, essentielle à la survie de la faune. Cette fragmentation va directement à l'encontre des objectifs de préservation inscrits dans le SRCE de Mayotte et rend la recolonisation naturelle incertaine, d'autant que la mangrove est soumise à de fortes pressions anthropiques.

En phase exploitation, la nécessité d'entretien de la taille des palétuviers sous l'emprise et à proximité directe de la passerelle doit être précisée. L'analyse des impacts et mesures associées reste à faire.

4.3.3. Gestion des boues

Il est prévu que les boues, principalement issues des matières en suspension (MES) présentes dans l'eau pompée, soient stockées en enveloppes souples Geotube pour une déshydratation solaire sur une plateforme de stockage des boues à Longoni, en cours de lancement par LEMA. De manière générale, il est mentionné que les boues, sous-produits et déchets, seront traitées conformément à la réglementation en vigueur, en associant le centre agréé d'enfouissement de Mayotte ISDND (installation de stockage des déchets non dangereux) qui permettra le suivi de l'évacuation du déchet industriel. **Il convient que soit précisé le devenir de ces déchets (boues et Geotube), et il serait nécessaire d'apporter plus de garanties quant au stockage et évacuation dont il est question. Bien entendu, une garantie sur la valorisation de ces déchets serait encore plus souhaitable.**

4.3.4. Consommation énergétique et production de CO2

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MR01 : Maîtrise énergétique du projet et lutte contre le changement climatique (p 239)
- Mesure MR02 : Intégration de production d'énergies renouvelables au projet (p 240)

La consommation énergétique de l'usine est estimée à 15 500 MWh. Il est proposé la mise en place de panneaux solaires dans les 5 ans de la réalisation des travaux avec 1 095 panneaux produisant une moyenne de 890 741 KW annuel, ce qui ne représente que 5% de la demande énergétique de l'usine. L'approvisionnement en énergie de Mayotte repose toujours sur des centrales fonctionnant au diesel. Le fonctionnement de cette usine induira nécessairement une hausse des gaz à effets de serre. **Les améliorations, comme les moteurs IE3, les récupérateurs d'énergie et les variateurs de fréquence, ne compensent que partiellement la consommation élevée de l'usine, surtout compte tenu de l'énergie nécessaire pour le dessalement par osmose inverse.**

4.3.5. Impacts des rejets dans le milieu naturel

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MR09 : Mise en place de diffuseurs sur le point de rejet (p 300)

4.3.5.1. Modélisation hydrodynamique de la zone de rejet

En l'état, la modélisation hydrodynamique des rejets de l'usine de dessalement d'Ironi Bé présente des lacunes techniques qui compromettent la fiabilité des conclusions (cf. rapports d'expertise en annexe) :

Modélisation des diffuseurs

La dispersion des rejets dépend fortement des scénarios de diffusion en sortie des diffuseurs. Or, les hypothèses et paramètres de fonctionnement des diffuseurs sont imprécis et mal représentés par la modélisation. En l'absence de spécifications détaillées, telles que la vitesse de sortie et la diffusion initiale des jets de saumure, la modélisation des panaches devient peu fiable.

Maillage horizontal et vertical

Le maillage horizontal, dont la résolution varie entre 5 et 200 mètres, et le maillage vertical composé de seulement 9 couches, sont insuffisants pour reproduire avec précision la diffusion des rejets. Une résolution trop grossière, notamment au niveau des diffuseurs et des passes, risque de fausser les

prévisions sur l'augmentation potentielle de salinité. De plus, le maillage vertical sous-estime le mélange vertical, particulièrement dans les zones de rejet de saumure, ce qui pourrait entraîner une accumulation, actuellement non évaluée, des contaminants.

Stratification verticale et courants de densité

La modélisation actuelle ignore l'effet de courants de densité provoqué par les rejets de saumure, en partie à cause d'une concentration en sel discutable (36,6 g/L). Un modèle intégrant la stratification est essentiel pour estimer l'effet des courants de densité, qui influencent directement la dispersion des rejets.

Zone géographique du modèle

Le domaine d'étude est restreint au lagon et n'inclus pas de zone océanique. Cette restriction introduit des risques d'erreurs dans les simulations à long terme puisque qu'elles ne prennent pas en compte la possibilité que les eaux plus salées du lagon (dues au rejet mais également à l'évaporation) puissent rester aux abords de la barrière et rentrer de nouveau lors de la marée suivante. Le même phénomène peut se produire pour les autres traceurs simulés.

Modélisation de la houle

Bien que dans le modèle les effets de la houle soient jugés négligeables, l'étude d'incidence témoigne des impacts de la houle sur la remise en suspension des sédiments du fond marin, autour d'Ironi Be. En ne tenant pas compte de la houle, l'étude omet un facteur qui peut influencer la diffusion horizontale des rejets.

Bilan de masse pour les effets cumulatifs des rejets

Les simulations ont été réalisées sur une période d'un an, aussi, la modélisation ne prend pas en compte les effets cumulatifs sur le long terme des rejets de saumure, de détartrants et de MES. Compte tenu des volumes importants de rejets, des simulations étendues sont nécessaires pour évaluer si le flux de marée peut disperser efficacement les contaminants ou s'ils s'accumulent dans le lagon.

Modélisation séparée des rejets de saumure et des autres molécules chimiques

Bien que cela ne soit pas explicitement écrit dans le dossier, les résultats des différentes simulations semblent indiquer qu'elles aient été faites séparément pour la salinité d'une part, et pour tous les autres traceurs ensemble (antitartres, MES, pH, température) d'autre part, au vu des directions de dispersion opposées par exemple entre panache de saumure et antitartre. Cette méthode peut introduire des erreurs significatives dans le transport des panaches des traceurs autres que le sel car les interactions entre les différents composants ne sont pas représentées.

Étude de sensibilité et validation des paramètres

L'absence d'études de sensibilité et de validation des paramètres numériques (maillage, modèles de turbulence) rend la modélisation peu robuste.

En conclusion, il est nécessaire d'ajuster le modèle, notamment :

- **Affiner les scénarios de diffusion des diffuseurs en intégrant des vitesses de sortie et des scénarios de diffusion détaillés.**
- **Améliorer le maillage horizontal et vertical et le comportement aux limites pour reproduire fidèlement la dynamique du panache en prenant en compte les échanges avec la zone océanique.**
- **Intégrer les effets de la houle et des courants de densité pour une simulation plus réaliste de la dispersion des rejets.**
- **Prolonger les simulations hydrodynamiques sur plusieurs années afin d'évaluer les effets cumulatifs des rejets dans le lagon.**

4.3.5.2. Impact des rejets sur la qualité de l'eau et la biodiversité

Le dossier décrit des rejets de saumure composés d'eau sursalée et de produits chimiques d'entretien. La modélisation insuffisante des diffuseurs et l'absence de suivi des interactions chimiques complexifient l'étude des potentiels impacts des substances chimiques qui seront utilisés sur le milieu marin côtier. **De manière générale, l'étude d'incidence environnementale ne reflète pas suffisamment la complexité du milieu marin, car elle n'intègre pas les variations temporelles des différents paramètres et leurs effets sur la qualité de l'eau et les biocénoses.** Une analyse par des experts de l'OFB est proposée en annexe.

Salinité

La modélisation actuelle ne permet pas d'évaluer correctement l'évolution de la salinité dans le lagon, que ce soit à court, moyen ou long terme. **En l'état, il ne semble donc pas envisageable de connaître l'impact qu'aura la salinité sur l'ensemble des communautés marines.** La sensibilité des espèces à l'augmentation de la salinité est dite "espèce-dépendante" et est liée à la capacité de chaque organisme à réguler sa pression osmotique et à se déplacer. Par exemple, **les peuplements endogés de substrat meubles qui sont peu mobiles et ont une concentration interne en sel similaire à celle de l'environnement (= osmoconformes), pourraient donc être particulièrement affectés par une augmentation locale de la salinité bien que le pétitionnaire les présente comme ayant un "enjeu écologique faible"**.

Substances Chimiques

Globalement, l'absence de détails sur les substances utilisées (numéros CAS, composition exacte) rend impossible une évaluation complète des risques.

Des produits chimiques comme les antitartres et les composés organo-halogénés adsorbables (AOX) pourraient avoir des effets toxiques significatifs, et leur impact être sous-estimé :

- **AOX** : Ces composés, souvent créés lors de traitements avec du chlore, présentent une génotoxicité pour les organismes marins. Des études montrent qu'à certaines concentrations, ils peuvent altérer le comportement de prédateurs, réduire l'activité de nage et induire des anomalies génétiques chez des mollusques. Avec une concentration estimée élevée dans les rejets ([AOX] = 559 g/j), il est impératif d'évaluer l'impact que pourrait avoir ce composé sur les communautés biologiques environnantes.
- **Floculant à Base d'Acrylamide** : L'acrylamide est cancérigène et toxique pour la reproduction humaine et animale. Bien que sa concentration en rejet soit basse, son accumulation potentielle et sa biodisponibilité en milieu marin posent des risques d'effets chroniques sur les espèces, nécessitant des études approfondies.
- **Antitartres** : En l'absence d'informations sur l'agent antitartre utilisé, il est impossible d'en évaluer l'impact. Par ailleurs, bien que le produit soit qualifié de « biodégradable », il reste à déterminer s'il l'est en milieu marin, en combien de temps, et quels métabolites en résultent. Il convient également de noter que "biodégradable" ne signifie pas que ce composé est exempt de toxicité, ni qu'il ne peut s'accumuler dans les tissus d'organismes bioaccumulateurs.

Nutriments (Azote et Phosphore Total)

L'excès de nutriments, bien que non intégré dans l'étude actuelle, est susceptible d'avoir des effets délétères à la fois sur les herbiers situés à 500 m du point de rejet - par une stimulation de la production d'algues et donc une réduction de la disponibilité en lumière -, mais également sur les coraux. En effet, l'azote excédentaire rend les coraux plus vulnérables aux maladies et à la bioérosion, réduisant leur capacité de reproduction. L'eutrophisation pourrait aussi perturber l'écosystème, en modifiant la composition des espèces et en réduisant la résilience des coraux au blanchissement.

Lagune tampon des eaux sales

Le formulaire de demande pour l'autorisation d'occupation temporaire du Domaine Public Fluvial signale l'existence d'une lagune tampon d'eaux sales correspondant aux eaux sales de lavage des filtres

bicouches, eaux de retour de la déshydratation et réseau d'égoutture. Ces eaux polluées (MES, sel à 70g/l, produits chimiques de lavage) pourraient surverser dans la ravine en cas de dysfonctionnement des outils de suivi des niveaux de cette lagune. Les impacts associés sont partiellement traités mais **aucune mesure n'est proposée.**

En conclusion, la modélisation ainsi que les simulations de rejets doivent être reprises conformément aux réserves du 4.3.5, en tenant compte de la complexité du milieu marin, en intégrant les variations temporelles des différents paramètres et leurs effets sur la qualité de l'eau et les biocénoses.

L'analyse des impacts et mesures associées doit être approfondie en précisant les molécules chimiques rejetées (AOX, floculant, antitartre) et en tenant compte de l'impact potentiel des nutriments (azote et phosphore total) - dont les niveaux de rejet dépassent les seuils de référence R1 - et du rejet accidentel lié à la surverse de la lagune des eaux sales.

5. Suivis et autres mesures d'accompagnement

5.1. Chantier & Exploitation

5.1.1. Comité de suivi du milieu naturel

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA02 : Mise en place d'un comité de suivi (p 418)

La mise en place d'un comité de suivi du milieu naturel est tout à fait intéressante. Mesures prévues : Réunion 1 fois par mois pendant les travaux sensibles (défrichage, débroussaillage, travaux en contact avec le milieu marin) et une fois par an en phase exploitation (voire une fois par trimestre la première année d'exploitation) en charge de contrôler la bonne exécution des mesures de suivi (incidences et mesures ERC associées) pouvant proposer des correctifs dans les fréquences des suivi et les mesures proposées. En complément, prévoir la présence du coordinateur environnemental et écologue, éventuellement d'un représentant du service départemental (OFB) chargé des suivis sur le milieu terrestre et de l'interface terre-mer, voire d'experts (courantologie, Eco toxicologie notamment). **Le rôle de ce comité devrait s'étendre au suivi des mesures de compensation et d'accompagnement mises en place, afin de s'assurer de leur efficacité et d'apporter des améliorations si nécessaire.**

5.1.2. Surveillance du front de la mangrove

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA 08 : Surveillance du front de la mangrove d'Ironi Be (p 423)

En tenant compte de la proposition d'alternative passerelle, le MOA précise que le contenu de cette mesure "n'a plus lieu d'être" mais qu'il "sera examiné si la passerelle justifie d'une mesure analogue". **Les zones de mangrove à défricher n'ayant pas été calculées ni localisées de façon précise, ce travail reste à faire.**

5.1.3. Suivi de l'état de santé de la mangrove

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA03 : Suivi de l'état de santé de la mangrove d'Ironi Bé (p 419)

Mesures prévues : Etat initial, trimestriel pendant les travaux, 6 mois et 1 an après le démantèlement de la digue, puis une fois par an pendant 10 ans (réduite à une fois tous les 2 ou 3 ans en cas de stabilité de la mangrove et sur validation du comité de suivi) selon une méthode d'évaluation rapide couvrant plusieurs compartiments, basée sur la thèse de Macéra (2024) et adaptée à Mayotte (contrat de recherche postdoctoral en cours).

Il est nécessaire de détailler les paramètres suivis et la méthode de notation pour chacun, de prévoir un suivi annuel pendant toute la durée de vie de l'usine, ainsi que des seuils d'alerte et d'arrêt en fonction de l'état de santé de la mangrove.

5.1.4. Suivi de la sédimentation et de l'envasement de la baie

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA 10 : Suivi de la sédimentation et l'envasement de la baie (p 424)

Mesures prévues : Suivi de la sédimentation en phase travaux au pieds des récifs coralliens (absence de sédimentation engendrée par les travaux en mer) par instrumentation de l'exécutoire du bassin versant (pluviomètre et préleveur automatique pour mesure les quantités de matières en suspension apportées par les pluies), ainsi qu'à l'aide de 2 pièges à sédiments avec préleveurs automatiques. Ces mesures seront pilotées par le BRGM et le MOA.

Il est nécessaire d'indiquer le nombre de pièges à sédiments à installer et de définir leur position, afin de démontrer que le protocole permettra bien d'analyser la sédimentation liée au projet (phase travaux et exploitation), notamment au droit des récifs coralliens présents dans la baie. Il est également important de préciser les mesures à prendre en cas de sur-sédimentation avérée liée au projet.

5.1.5. Suivi de l'état de santé des récifs coralliens

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA04 : Suivi de l'état de santé des récifs coralliens (p 421)

Le pétitionnaire prévoit un suivi de l'état de santé des récifs coralliens de type "rapid assessment" en phase chantier et exploitation sur 7 stations avec la temporalité suivante :

- 1 suivi avant les travaux pour mettre à jour l'état initial suite à l'épisode de blanchissement,
- 2 suivi lors des travaux en mer (3 mois et 6 mois après le début),
- 1 suivi par an pendant 10 ans entre septembre et décembre (avec une fréquence pouvant être réduite en cas de stabilité de l'état de santé et après validation du comité de suivi).

Un suivi des poissons sera également réalisé suivant le protocole de points de comptage fixe avec 2 comptages de 4 m par station.

Il est nécessaire que le suivi en phase travaux soit prolongé sur toute la durée des travaux en mer et pas seulement à T+3 et T+6 mois ; ainsi que de préciser les mesures complémentaires à prendre en cas d'observation, lors de ces suivis, de modifications significatives de l'état de santé des récifs coralliens ou des communautés de poissons.

Concernant les poissons, la description du protocole est lacunaire notamment sur le temps de comptage (qui peut grandement influencer les résultats) ainsi que sur la saison à laquelle seront effectués ces suivis (la période de septembre-décembre n'apparaît pas être la plus pertinente). **Il serait judicieux de mettre en place exactement la même méthodologie que celle utilisée dans le cadre de POCOMAY (2023) en termes de réplicats, distance et temps de comptage et saison ou de proposer un autre type de suivi pouvant être plus adapté dans les zones où la visibilité est réduite.**

Par ailleurs, il semble indispensable de faire également des suivis des communautés ichthyologiques sur des stations de substrat meubles, plus proches du rejet (comme évoqué dans la partie 3.2.2.).

5.2. Chantier

5.2.1. Coordination environnementale et écologique

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA01 : Coordination environnementale et écologique (p 425)

Mesures prévues : Visite hebdomadaire du site à minima et complétée par la présence d'un écologue dans les phases critiques sur le plan écologique pour s'assurer du respect des mesures ERC de l'arrêté préfectoral par les acteurs du chantier et des bonnes pratiques et limiter les incidences sur l'environnement. Écriture d'une charte de chantier vert reprenant l'ensemble des mesures décrites dans la présente étude et transmises aux entreprises comme document contractuel. Une sensibilisation des personnels aux enjeux et balisages sera réalisée. Le coordinateur sera force de proposition pour modifier les mesures du présent dossier si elles s'avéraient inefficaces ou insuffisantes. Des comptes rendus seront rédigés et un bilan trimestriel et final élaboré. Suivi de la mise en œuvre des mesures ERC en phase d'exploitation (10 ans) assorti de bilans trimestriels et de participation au comité de suivi.

Il serait judicieux d'inclure le contrôle des mesures de suivi et d'accompagnement dans la mission du coordinateur environnemental. Il est également nécessaire de renforcer la fréquence de suivi dans les phases critiques : en plus de la visite hebdomadaire, une présence quotidienne du coordinateur environnemental ou de l'écologue est nécessaire pour les opérations de défrichage, débroussaillage/élagage.

Concernant les mesures ERCSA et comme mentionné au 5.1.1 : le bilan d'évaluation de leur mise en œuvre devrait être transmis au Comité de suivi du milieu naturel et les mesures ajustées en fonction des rapports, afin de garantir une gestion adaptative basée sur les données recueillies.

5.2.2. Suivi de la turbidité de l'eau

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA06 : Suivi de la turbidité pendant les travaux en contact avec le milieu marin (p 426)

Suivi de la turbidité pendant les travaux en contact avec le milieu marin

Mesures prévues : Pendant les travaux en contact avec le milieu marin, un suivi quotidien de la turbidité est prévu pour évaluer l'impact sur la qualité de l'eau. Les mesures seront effectuées 2 à 4 heures après le début des travaux sur trois stations : juste après l'écran anti-MES, à 10-20 mètres de distance, et un point de référence situé à 50 mètres en amont. Les seuils d'alerte et d'arrêt sont respectivement fixés à 1,3 et 1,5 fois la mesure de référence, entraînant une suspension des activités si le seuil d'arrêt est atteint.

Ces mesures sont satisfaisantes, mais pourraient être renforcées :

- Mesure en temps réel : la turbidité peut fluctuer rapidement pendant les travaux, et l'absence de mesures en continu rend difficile la détection immédiate de pics de turbidité, ce qui permet à des niveaux de pollution temporairement élevés de passer inaperçus. Il est donc recommandé d'installer un dispositif de mesure en temps réel sur des sites clés avec des protections anti-vandalisme si nécessaire (bouées à ancrage profond, matériel camouflé ou éloigné des zones fréquentées), afin de réagir efficacement en cas de dépassement des seuils.
- Stations : Une station de référence à 100m minimum serait préférable pour s'assurer de l'absence d'impact travaux. Cependant une station de mesure à 50m permettrait de suivre l'éventuelle dispersion d'un panache en dehors du rideau anti-MES. Il est donc recommandé d'ajouter une station de mesure de la turbidité à 50m et de déplacer la station de référence à une distance suffisante de la zone projet pour garantir l'absence d'impact sur cette station.
- Plan d'action pour les dépassements : si un seuil est atteint, la réponse est l'arrêt des travaux, mais il n'est pas mentionné l'évaluation des causes spécifiques de dépassement pour la mise

en œuvre de mesures correctives. Il s'avère judicieux d'élaborer un plan d'intervention détaillé incluant l'identification des sources de dépassement, l'ajustement des méthodes de travail telles que l'installation de protections additionnelles (barres stabilisatrices, géotextiles plus denses) et la formation des opérateurs.

5.3. Exploitation

5.3.1. Moyens de surveillance/d'entretien

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MAXX : Moyens de surveillance et d'entretien des infrastructures (p 427)
- Mesure MR12 : Surveillance/Maintenance des systèmes de l'usine (p 259)

Matériel installé :

Les suivis trimestriels (et après chaque événement météorologique significatif) suivants sont prévus :

- Contrôle de l'ouvrage de prise d'eau, du diffuseur, des équipements de pompage, de la station d'alerte,
- Contrôle des bouées et balises cardinales,
- Contrôle des dispositifs d'ancrage,
- Contrôle des canalisations par plongeur,
- Vérification des encrassements,
- Vérification des mouvements éventuels des ouvrages et canalisations, de leur assise.

Mesures prévues : L'exploitant doit assurer en permanence la gestion, le réglage et l'entretien des installations de prise d'eau, de traitement et de rejet, ainsi que des équipements d'autosurveillance et de télésurveillance, avec une astreinte 24/7. Des agents doivent être présents quotidiennement pour les opérations courantes, avec des stocks adaptés pour pièces de rechange et réactifs, ainsi que pour la prise en charge des abonnements nécessaires. L'entretien couvre également la plateforme, les canalisations, et les infrastructures du site. En cas de défaillance, l'exploitant doit mobiliser immédiatement tous les moyens pour limiter les impacts et prévenir le Maître d'Ouvrage. Des contrôles trimestriels spécifiques sont prévus pour les ouvrages maritimes, incluant les prises d'eau, diffuseurs, équipements de pompage, balises, dispositifs d'ancrage, canalisations, et l'état des infrastructures sous-marines.

Ces mesures sont en effet nécessaires, toutefois elles reposent principalement sur l'autosurveillance de l'exploitant et un contrôle trimestriel, ce qui peut laisser des marges d'erreur et des retards dans la détection de problèmes environnementaux critiques.

5.3.2. Suivi des effluents rejetés en mer eau et du milieu marin récepteur

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MAXX : Suivi des effluents rejetés par l'exploitant (p 432)
- Mesure MA07 : Suivi de la qualité de l'eau du milieu marin récepteur (p 434)

Mesures prévues : un suivi mensuel et trimestriel pour évaluer la qualité des effluents rejetés et surveiller l'impact sur les eaux côtières sur une période de 10 ans. Chaque mois, l'exploitant analysera divers paramètres des effluents, notamment les matières en suspension (MES), les solides dissous (TDS), l'oxygène dissous, le carbone organique total (COT), ainsi que des métaux et éléments spécifiques (comme l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb), en utilisant des méthodes adaptées aux eaux sursalées. Les résultats seront envoyés aux autorités et au comité de suivi. Parallèlement, un suivi trimestriel sera réalisé sur dix stations dans la zone d'influence, mesurant des paramètres physico-chimiques (température, pH, salinité, oxygène dissous), la charge particulaire (MES et turbidité) et le fer dissous, à marée descendante pour limiter les influences extérieures. En outre, les

données de la qualité de l'eau brute pompée et les apports de projets de recherche en cours seront intégrées pour enrichir l'analyse et offrir une vue plus globale des impacts potentiels.

Ces mesures sont généralement satisfaisantes. Toutefois, il est nécessaire de définir des seuils d'alerte et d'arrêt basés sur les paramètres critiques (salinité, MES, concentrations en métaux lourds) des effluents rejetés permettant des actions correctives de l'usine en cas de dépassement, afin de prévenir l'accumulation d'une nappe sursalée en profondeur. Ces seuils devraient être assez rigoureux pour permettre des ajustements en temps réel, limitant l'impact environnemental en cas de dérive. De plus, **ces suivis devraient être programmés sur toute la durée d'exploitation de l'usine et non sur 10 ans.**

Par ailleurs, d'autres recommandations peuvent être formulées :

- Surveillance en temps réel : il est possible de prévoir des capteurs en temps réel pour les paramètres clés des rejets (salinité, turbidité, métaux), connectés à un système de surveillance permettant de déclencher des alertes immédiates. En cas de suspicion de contamination, il conviendrait d'étendre ces suivis à l'intégralité des masses d'eau lagon concernées.
- Modélisation de la courantologie pour la prévision des impacts : il pourrait être intéressant de développer un modèle de courantologie adaptatif qui utiliserait les données de suivi pour auto-ajuster ses prédictions et anticiper les déplacements des effluents en fonction des conditions marines locales. Ce modèle serait un outil de pilotage permettant d'optimiser le fonctionnement de l'usine en adaptant les rejets pour minimiser leur impact.

Suivi des substances chimiques

En plus de la méthode de comparaison BACI (Before-After-Control-Impact) recommandée par le pétitionnaire pour évaluer l'impact sur les communautés coralliennes, **un suivi spécifique des substances chimiques et de leurs effets écotoxiques s'avère essentiel.** Ce suivi, fondé sur les recommandations d'Aquaref (Manier et al., 2023), permettrait une évaluation approfondie des effets des rejets sur les écosystèmes marins. Pour cela, des prélèvements de sédiments et d'eau de mer devraient être réalisés avant la mise en service de l'usine, puis tous les trimestres (soit quatre fois par an, couvrant les saisons sèche et humide) pendant toute la durée de son fonctionnement. Ces analyses visent à mesurer les concentrations de substances chimiques utilisées dans les processus industriels (comme les antitartres, les floculants à base d'acrylamide, les AOX, ainsi que l'azote et le phosphore totaux). Des tests écotoxicologiques, tels que l'inhibition de la croissance des algues marines (*Phaeodactylum tricornutum*), la toxicité aiguë de l'eau ou des sédiments avec le crustacé *Artemia franciscana*, et l'évaluation de la toxicité de l'eau avec des lignées cellulaires de branchies de poisson (norme ISO/DIS 21115), pourraient être utilisés pour évaluer les impacts en première intention.

5.3.3. Suivi des peuplements planctoniques

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA05 : Suivi des peuplements planctoniques (p 435)

Le pétitionnaire prévoit un suivi des communautés de phytoplancton 4 fois par an pendant 10 ans (à la même période que les suivis DCE) sur 10 stations, après la réalisation d'un état initial réalisé avant la mise en service de l'usine. Aucun suivi des communautés de zooplancton n'est envisagé par faute d'un manque de connaissance locale. Aucune mesure complémentaire ne semble envisagée par le pétitionnaire en cas d'observation, lors de ces suivis, de modifications significatives des communautés de phytoplancton.

Comme mentionné dans la partie 3.2.2., **il est indispensable que l'état initial de ces communautés (phyto et zooplancton) soit réalisé avant le démarrage des travaux de l'usine qui pourrait avoir un effet également sur ces communautés (en lien avec la qualité de l'eau).** De plus, le protocole d'échantillonnage envisagé devra être justifié car un échantillonnage réparti selon un gradient de

distance par rapport à la source de rejet et définis en fonction de la courantologie de la zone ou de type BACI semblerait plus appropriés que celui actuellement proposé.

Enfin, il serait préférable que ces suivis soient réalisés sur toute la durée de fonctionnement de l'usine et non uniquement pendant 10 ans car ces communautés peuvent-être affectées par des changements à long terme de la qualité de l'eau.

5.3.4. Suivi de l'état de santé du benthos de substrat meuble

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA11 : "Suivi de la sédimentation et l'envasement de la baie" (p 437 ; erreur probable dans le titre)

Le pétitionnaire prévoit un suivi du benthos de substrat meuble par an pendant 10 ans (en avril/mai) sur 10 stations, après la réalisation d'un état initial réalisé avant la mise en service de l'usine. En cas de stabilité, le pétitionnaire prévoit une réduction de la fréquence des suivis mais aucune mesure complémentaire ne semble envisagée en cas d'observation, lors de ces suivis, de modifications significatives des communautés benthiques.

Comme mentionné dans la partie 3.2.2., **il est indispensable que l'état initial de ces communautés soit réalisé avant le démarrage des travaux de l'usine qui pourrait avoir un effet également sur ces communautés (en lien avec la qualité de l'eau) et que d'autres indicateurs que le M-AMBI (indicateur DCE) soient utilisés dans le cadre de ces suivis (richesse spécifique, proportion par groupe d'espèces...).** De plus, le protocole d'échantillonnage envisagé devra être justifié car un échantillonnage réparti et défini en fonction de la nature précise des sédiments et de la courantologie de la zone ou de type BACI semblerait plus appropriés que celui actuellement proposé. Enfin, il serait préférable que ces suivis soient réalisés sur toute la durée de fonctionnement de l'usine et non uniquement pendant 10 ans car ces communautés peuvent-être affectées par des changements à long terme.

5.3.6. Suivi de l'état de santé toxicologique des communautés ichthyologiques

Les poissons étant un maillon essentiel du fonctionnement de l'écosystème marin et une source de nourriture non négligeable à Mayotte, il apparaît indispensable de mettre en place un suivi concernant l'effet toxique que pourrait avoir les substances rejetées sur les communautés de poissons (en complément des suivis de l'état des communautés via les suivis MSA évoqués dans la partie 5.1.5). **Ainsi, des tests de génotoxicité sur lignées cellulaires de branchies de poisson devraient être réalisés concernant l'acrylamide et les AOX. En complément, des analyses concernant la concentration de ces molécules dans les chairs de poissons devraient-être envisagées par le pétitionnaire afin d'assurer la non-toxicité pour l'homme de la consommation de ces espèces, vivants à proximité du rejet.**

5.3.7. Régénération de la mangrove impactée

Les mesures d'évitement (ME), de réduction (MR) ou de compensation (MC) proposées par le pétitionnaire (le numéro de page de l'étude d'incidence environnementale est indiqué) sont :

- Mesure MA09 : Suivi de la régénération de la mangrove impactée en phase travaux (p 438)

Mesures prévues: Suivi par un écologue spécialisé dans le milieu marin et la mangrove sur toute la largeur de la mangrove de la côte vers le large (avec une attention particulière aux bordures de zone en contact avec la mangrove non impactée les deux premières années): trimestriel l'année 1 (abondance et richesse spécifique des propagules sur la zone impactée), puis: (1) Dans le cas d'installation de propagules après un an: semestriel l'année 2, puis annuel ensuite jusqu'à ce que les premières plantules atteignent 1,30 m ; (2) Dans le cas d'absence de propagules après un an: mise en place d'une restauration active sur la base d'expériences de l'association AME. Un suivi trimestriel sera

mis en place l'année 1, semestriel l'année 2 puis annuel ensuite jusqu'à ce que les premières plantules atteignent 1,30 m.

Suite à la proposition d'alternative passerelle, cette mesure n'a pas été réévaluée. Elle reste cependant d'actualité au vu des besoins de défrichement au droit de la passerelle, qui restent cependant à calculer de façon précise. Il serait nécessaire de préciser sur quel seuil est établi le succès ou l'échec de la repousse de propagules à l'issue de l'année 2. Par ailleurs, il est préférable d'envisager d'abord des techniques de restauration passive en cas d'échec de la régénération naturelle (avant la restauration active). Enfin, il sera utile d'envisager des actions en cas d'échec de restauration et / ou de dépérissement généralisé de la mangrove.

6. Impacts cumulés

Projets cités comme concernés par l'analyse des impacts cumulés :

- Le projet du Transport Collectif Urbain CARIBUS de la communauté d'agglomération Dombéni-Mamoudzou (cf. avis de la MRAE en date du 17 juin 2019)
- Extension du centre d'élevage de poules pondeuses et de production d'œufs à Ironi Bé – Société AVIMA (cf. avis de la MRAE en date du 18 décembre 2019)
- ZAC de Tsararano Dombéni – EPFAM (cf. avis de la MRAE en date du 10 février 2022)
- ZAE de Ironi Bé – EPFAM (instruction en cours)

Le porteur de projet note l'incidence cumulée de ces projets sur les risques de pollutions des milieux récepteurs en aval. **Il est attendu une mesure associée pour les éviter, réduire voire compenser.**

ANNEXES

A.1. Expertise_LNEC

A.2. André B. Fortunato_CV

B.1. Mobydyc_Expertise_24102024

B.2. Villaret_Catherine_CV

C. Note_qualité de l'eau_EIE_CD_OP2



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Relatório

SIGILOS

RESERVADO

s/classificação

EXPERTISE SUR LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE ET LA DISPERSION DE SAUMURE ASSOCIEES A UN PROJET D'USINE DE DESSALEMENT A MAYOTTE

Office Français de la Biodiversité

Lisbonne • Novembre 2024

I&D DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET
ENVIRONNEMENT

RAPPORT 000/2024 – DHA/NEC

Titre

EXPERTISE SUR LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE ET LA DISPERSION DE SAUMURE ASSOCIEES A UN PROJET D'USINE DE DESSALEMENT A MAYOTTE

Auteurs

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT

André B. Fortunato

Directeur de Recherche, Division des Estuaires et des Zones Côtières

Alphonse Nahon

Docteur, Division des Estuaires et des Zones Côtières

Marta Rodrigues

Chargée de Recherche, Division des Estuaires et des Zones Côtières

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.
Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa
e-mail: Inec@Inec.pt
www.Inec.pt

Rapport xxx/2024

Proc. 0604/1201/24377

EXPERTISE SUR LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE ET LA DISPERSION DE SAUMURE ASSOCIEES A UN PROJET D'USINE DE DESSALEMENT A MAYOTTE

Résumé

Un rapport d'étude de modélisation hydrodynamique et de dispersion de saumure associées à un projet d'usine de dessalement à Mayotte est analysé. L'analyse porte sur l'application et la validation du modèle, sur les résultats des simulations, ainsi que sur les conclusions du rapport. L'analyse révèle plusieurs points faibles : 1) une description insuffisante de la configuration et des conditions d'application du modèle au cas spécifique de Mayotte ; 2) certains choix méthodologiques pouvant compromettre la fiabilité des résultats ; 3) un manque de rigueur lors de la validation du modèle ; et enfin, 4) des résultats avec une crédibilité amoindrie.

Mots-clefs : Expertise / modèle hydrodynamique / modèle de salinité / Île de Mayotte

EXPERTISE ON HYDRODYNAMIC MODELING AND BRINE DISPERSION ASSOCIATED WITH A DESALINATION PLANT PROJECT IN MAYOTTE

Abstract

A study report examining the modeling of ocean currents, and the dispersion of brine discharged from a desalination plant in Mayotte was analyzed. This analysis focuses on how the model was applied and validated, the results of the numerical simulations, and the overall conclusions of the report. The analysis reveals several shortcomings: 1) an insufficient description of how the model was applied to the specific data for Mayotte; 2) methodological choices that could compromise the reliability of the results; 3) a validation of the model that is not sufficiently rigorous; and finally, 4) results that seem implausible.

Keywords: Expertise / hydrodynamic model / salinity model / Mayotte island

Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Evaluation du rapport	3
	2.1 Application du modèle.....	3
	2.1.1 Le modèle et ses paramètres	3
	2.1.2 Le domaine du modèle et le maillage	4
	2.1.3 Conditions de frontière	6
	2.2 Validation du modèle.....	6
	2.3 Scénarios	8
	2.4 Interprétation des résultats et conclusions	9
3	Conclusions.....	11
	Références	13

Liste des figures

Figure 1.1 – Zone d'étude (source : Google Earth).....	1
Figure 1.2 – Fichier ConfigT3D.txt fourni au LNEC.....	2
Figure 2.1 – Maillage et bathymétrie (cf. Figure 3.1, page 20). Les ellipses indiquent des chenaux où la résolution du maillage semble insuffisante pour reproduire la géométrie	5

1 | Introduction

L'Office Français de la Biodiversité a sollicité le Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) pour l'analyse d'un rapport sur l'étude de modélisation effectuée par le bureau d'études CREOCEAN. Ce rapport fait partie d'une étude d'incidence des rejets d'une future usine de dessalement dans l'Est du lagon de Mayotte. Le rapport CREOCEAN (2024) vise à « présenter des modélisations courantologiques de la diffusion des rejets d'une future usine de dessalement à travers 1) la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique 3D, basé sur un maillage fin créé pour le projet, 2) la validation de ce modèle par rapport à des mesures de courant in situ, et 3) la réalisation d'une étude de diffusion de panache des rejets en croisant différentes conditions. » Ces rejets seront faits à l'Est du lagon de Mayotte, localisé dans l'Océan Indien (Figure 1.1), dans la Baie d'Ironi Be.



Figure 1.1 – Zone d'étude (source : Google Earth)

Le document présent résume l'analyse faite du rapport CREOCEAN (2024), en termes d'adéquation entre l'application du modèle et les besoins de l'étude d'impact environnementale ; de la qualité de la

validation ; et sur la solidité des conclusions. Dans la mesure du possible, l'analyse se propose ainsi de répondre aux questions suivantes :

- Quels processus physiques ont été considérés dans la modélisation ? Est-ce que tous les processus pertinents ont été pris en compte correctement ?
- Tous les forçages océanographiques et météorologiques pertinents sont-ils pris en compte par le modèle ? Les conditions de forçage sont-elles représentatives de la réalité du lagon ?
- L'hydrodynamique a-t-elle été correctement calibrée avec des données in-situ ? Au regard de l'état de l'art, le niveau de calibration est-il acceptable ?
- La durée des simulations est-elle suffisante, notamment au vu des temps de résidence du lagon ? Comment ces temps de résidence ont-ils été estimés ? Est-il démontré que les simulations sont suffisamment longues pour représenter un état de convergence dynamique ?
- Les conclusions de l'étude sont-elles suffisamment supportées par les résultats de modélisation ?

En plus du rapport CREOCEAN (2024), le LNEC a reçu un fichier contenant des informations sur la configuration du modèle (Figure 1.2). Dans la mesure du possible, cette information a aussi été utilisée dans l'analyse.

Ce rapport est organisé en trois chapitres. Après cette courte introduction, le Chapitre 2 évalue le rapport, l'application et la validation du modèle, les scénarios choisis, l'interprétation des résultats et les conclusions. Le Chapitre 3 présente un bilan de l'analyse.

Tout au long du texte, les références en gras se rapportent au rapport de CREOCEAN (2024).

```
/-----  
Pas de temps : 5s  
Nbre de niveaux: 9  
Forçage Marée: Tpx h_tpxo9.v1 et u_tpxo9.v1  
Pas de Bancs couvrants  
TRAITEMENT DES HAUTEURS NEGATIVES: control du flux  
OPTION POUR LES FRONTIERES LIQUIDES: méthode de Thompson  
LOI DE FROTTEMENT SUR LE FOND: formule Nikuradse  
COEFFICIENT DE FROTTEMENT POUR LE FOND= 0.01  
MODELE DE TURBULENCE VERTICAL : Smagorinski  
MODELE DE TURBULENCE HORIZONTAL: Smagorinski  
MODELE DE LONGUEUR DE MELANGE : Tsanis  
CORIOLIS : YES  
SCHEMA POUR LA CONVECTION DES VITESSES: characteristics  
SCHEMA POUR LA CONVECTION DE LA HAUTEUR: conservative scheme  
VERSION NON-HYDROSTATIQUE: YES  
NON-HYDROSTATIC VERSION : YES  
STOCKAGE DES MATRICES : edge-based storage  
TRAITEMENT DES FLUX AUX FRONTIERES: priority to fluxes.  
LOI DE FROTTEMENT SUR LES PAROIS LATERALES: formule Nikuradse  
SCHEMA POUR LA CONVECTION DES TRACEURS: explicit + MURD scheme PSI,
```

Figure 1.2 – Fichier ConfigT3D.txt fourni au LNEC

2 | Evaluation du rapport

2.1 Application du modèle

2.1.1 Le modèle et ses paramètres

Le nom du modèle utilisé, Telemac3D, n'apparaît que dans la légende d'une figure. De même, aucune description ou référence n'est fournie, et la version utilisée n'est pas indiquée. Mis à part ce manque d'information, il s'agit d'un modèle éprouvé au niveau international et approprié à cette étude.

La houle n'a pas été modélisée. Ses effets sur la circulation sont considérés négligeables étant donné les faibles hauteurs de la houle et la profondeur d'une vingtaine de mètres aux points de rejet. Pourtant, au vu des **figures page 10 et 11**, la houle a un impact sur la circulation dans le lagon, avec des différences notables en régime « Miombéni ». Des informations supplémentaires sur la prédominance des quatre régimes de houle et les méthodes utilisés para CASAGEC pour établir ces cartes de courants permettraient d'avoir une meilleure idée des conséquences de la négligence des vagues. Par exemple, comment expliquer :

- En régime « Miombéni », l'absence de courant de flot rentrant dans la passe Nord-est (**figures de la page 11**) alors que les vagues avec une incidence frontale devraient favoriser le flot ;
- Les similitudes entre les régimes « Matoulahi » et « Kashkasi », pour lesquels les incidences des vagues sont diamétralement opposées.

Rien n'est écrit dans le rapport sur la représentation ou l'absence de différents processus physiques pertinents pour cette étude. De même, aucune référence à la littérature scientifique ou à des études antérieures similaires n'est fournie, ce qui ne permet pas juger quant à la pertinence de certains choix de modélisation. Par ailleurs, les différents paramètres physiques du modèle ne sont pas indiqués, ce qui rend difficile l'analyse approfondie de l'application du modèle.

En particulier, il serait important de savoir comment la turbulence verticale est représentée par le modèle. Le mélange turbulent est le principal mécanisme de transport vertical des panaches simulés. Les modèles comme Telemac offrent en général des modèles de turbulence sophistiqués, pour les cas où celle-ci joue un rôle essentiel, mais aussi des modèles de turbulence simplifiés. Le rapport devrait donc indiquer quel modèle de turbulence a été utilisé et justifier ce choix. En effet, il est par ailleurs mentionné dans le rapport MIO 2024 que des tests de sensibilité au modèle de turbulence (de même que pour les coefficients de diffusivité) ont été effectués pour le modèle CROCO.

Le fichier de configuration (Figure 1.2) indique que le modèle de turbulence vertical est celui de Smagorinski. Il s'agit d'un modèle simplifié qui ne tient pas compte de la stratification verticale. Ce modèle n'est pas adéquat pour représenter le mélange vertical dans le cas d'un écoulement fortement stratifié comme celui qui résulte d'un rejet de saumure.

De même, les gradients horizontaux de concentrations prévus par le modèle semblent faibles. Cela pourrait s'expliquer par des coefficients de mélange horizontaux trop élevés, conduisant artificiellement à une surestimation de ce mélange. En conséquence, cela peut induire une sous-estimation des concentrations maximales, d'où l'importance d'indiquer la valeur du coefficient de diffusion horizontale utilisé. Ici encore, le fichier de configuration fourni indique que ce coefficient est calculé à travers d'un modèle de Smagorinski, ce qui serait une approche acceptable.

Les échanges entre le lagon et l'océan se font d'une part par les passes et chenaux pendant tout le cycle de marée, et d'autre part par-dessus les récifs de corail à marée haute (Chevalier *et al.*, 2017). Etant donné les faibles hauteurs d'eau sur le récif, le flot y est fortement influencé par le frottement. Pour autant, il n'est pas indiqué comment a été défini le coefficient frottement, et en particulier si la rugosité des récifs a été prise en compte. Le fichier de configuration (Figure 1.2) suggère ainsi que ce coefficient est uniforme dans l'espace, et qu'en plus les bancs découvrants n'ont pas été pris en compte. Puisque les récifs coralliens qui limitent le lagon sont découverts à marée basse, cette approche introduit des erreurs additionnelles dans le calcul des échanges entre le lagon et l'océan.

Les diffuseurs constituent un élément important du système de rejet, parce qu'ils déterminent le mélange initial du panache. La conclusion de l'étude affirme même que ces diffuseurs expliquent la faiblesse des surplus de salinité dans la zone d'étude. Or, le rapport n'explique pas comment ces diffuseurs sont représentés dans le modèle. Par exemple, on ne sait pas s'il y a un modèle de champ proche, ni même si la quantité de mouvement initiale de la saumure est prise en compte. Le rapport n'indique pas non plus si le débit de saumure est introduit dans un seul élément du maillage ou dans plusieurs.

2.1.2 Le domaine du modèle et le maillage

Le domaine d'étude est limité au Sud-est et au Nord-est par des récifs coralliens (cf. **Figure 3.1, page 20**). Le domaine est ainsi restreint au lagon et n'inclut aucune zone océanique. Cette restriction introduit des erreurs dans les simulations à long terme. En effet, les eaux qui sortent du lagon sont plus salées que dans l'océan dû aux rejets (et aussi à une plus grande évaporation dans le lagon), et en réalité ces eaux peuvent rester aux abords de l'île et réentrer dans le lagon lors la marée suivante. Dans ce modèle restreint, cela ne peut se produire puisque les conditions de frontière ne tiennent pas compte de l'eau qui est sortie. Cette simplification peut ainsi réduire artificiellement l'augmentation progressive de la salinité dans le lagon au cours du rejet de saumure. Le même phénomène peut se produire pour les autres traceurs simulés.

Le rapport précise que le maillage horizontal a une résolution variable, entre 5 et 200 m : très fine aux abords de la zone de rejet et plus grossière ailleurs. En particulier, la résolution semble insuffisante pour reproduire correctement les chenaux qui relie le lagon à la mer (Figure 2.1). Cette résolution serait de l'ordre de 200 m, c'est-à-dire l'ordre de la largeur de ces chenaux. Cette basse résolution tendrait à réduire les échanges d'eau entre le lagon et l'océan dans le modèle. Cette réduction sera plus importante près du fond, du fait de la création artificielle de seuils. Deux de ces seuils sont bien visibles dans la bathymétrie du modèle (ellipses jaunes dans la Figure 2.1).

CREOCEAN (2024) affirme que la résolution horizontale est de l'ordre de 5 m au niveau de la zone de rejet. Ceci est difficile à vérifier, et la figure du maillage (Figure 2.1) suggère que la résolution serait bien plus grossière dans cette zone. En effet, la résolution semble être plus fine bien à l'Est de la zone de rejet, notamment aux alentours de Chissioua Kolo Issa et des Îles Hajangoua. Dans la zone de rejet, la résolution semble être plutôt de l'ordre de plusieurs dizaines à une centaine de mètres. Si c'était le cas, cette basse résolution conduirait à un fort mélange horizontal artificiel des panaches dès leur injection dans le lagon.

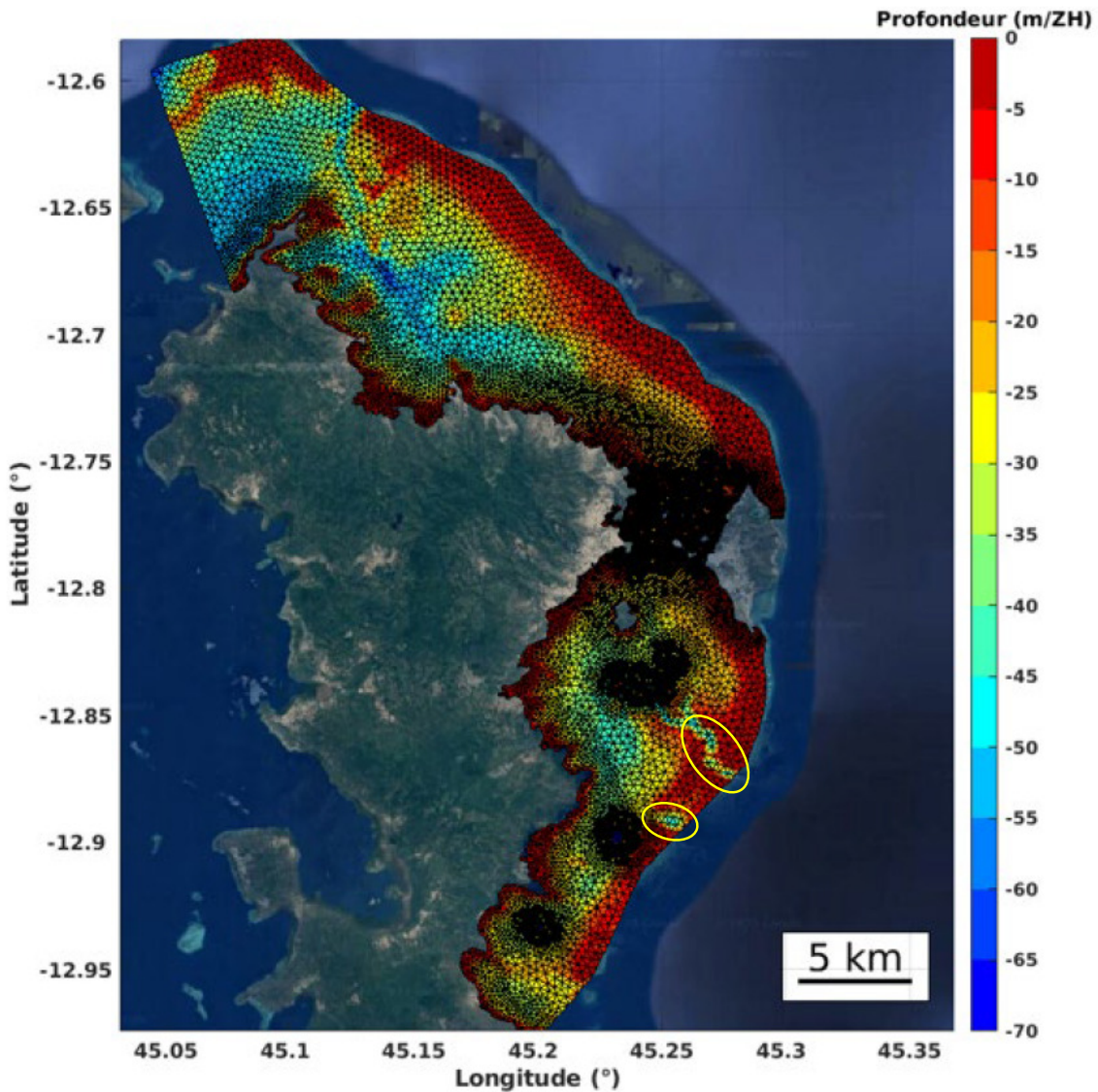


Figure 2.1 – Maillage et bathymétrie (cf. Figure 3.1, page 20). Les ellipses indiquent des chenaux où la résolution du maillage semble insuffisante pour reproduire la géométrie

Le maillage vertical a 9 couches (Figure 1.2). Cette résolution est suffisante pour reproduire des écoulements non-stratifiés, comme il serait le cas dans le lagon actuel. En revanche, elle semble insuffisante pour reproduire le mélange vertical dans la zone de rejets. En effet, il s'agit de zones avec des profondeurs de 20 à 25 m. Les couches du modèle auraient ainsi 2 à 3 m d'épaisseur en moyenne

(le rapport n'indique pas si l'épaisseur des couches est constante sur chaque verticale). Une telle épaisseur ne permet à priori pas au modèle de reproduire les forts gradients verticaux de salinité créés par les rejets. En conséquence, le modèle tendra à surestimer le mélange vertical, et à sous-estimer donc l'augmentation de salinité près du fond.

En somme, le maillage horizontal et vertical semble inapproprié pour reproduire l'évolution du panache.

2.1.3 Conditions de frontière

Le modèle est forcé à la frontière maritime par 15 constituantes de marée obtenues de la base de données OTIS. Ces constituantes de marée n'incluent pas la constituante MSf, qui a une période d'une quinzaine de jours. Or, les résultats des simulations du modèle à long terme montrent que les variations des concentrations à cette échelle temporelle sont importantes, voire dominantes (e.g. **figure en haut de la page 52**). La constituante MSf est en partie générée à l'intérieur du domaine, à travers d'interactions non-linéaires entre les constituantes M2 et S2, mais elle devrait également être imposée de l'extérieur du lagon. En ne prenant pas compte de cette constituante à la frontière océanique, le modèle néglige donc un forçage qui peut être important pour le comportement à long terme des panaches des rejets. Cette constituante est disponible publiquement pour tous les océans à travers des résultats d'un modèle océanique global (FES2014¹).

La salinité à la frontière a été considérée constante, ce qui semble acceptable étant donné sa faible variabilité. Cependant, la valeur de cette constante (36.6) semble élevée par rapport aux données présentées, qui varient entre 34 et 35.5 (cf. **Figure 2.8, page 18**).

Les profils verticaux de température ont été considérés constants dans l'espace, ce qui est acceptable face aux données présentées.

Les conditions de frontière pour les autres traceurs, ainsi que les conditions initiales, ne sont pas indiquées.

2.2 Validation du modèle

La validation du modèle présente de nombreuses faiblesses.

La validation est faite avec des vitesses moyennées sur la verticale. En revanche, la comparaison des profils verticaux modélisés avec les observations devrait permettre de valider ou corriger les choix de modélisation opérés. Moyenner observations et résultats sur la verticale occulte au moins une partie de la variabilité existante.

Aucune mesure d'erreur n'est présentée, ce qui empêche une évaluation quantitative de la précision du modèle. En outre, l'échelle temporelle à laquelle les comparaisons entre les observations et les résultats sont présentés ne permet pas de conclure quant à la précision du modèle (cf. **Figure 3.4, page 23**). Par

¹ <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>

exemple, d'éventuelles erreurs de phase ne sont pas visibles à cette échelle. Enfin, le rapport évoque l'existence de données de niveaux d'eau, sans que ces données ne soient utilisées dans la validation.

La comparaison entre les vitesses observées et calculées suggère que la variabilité des résultats est nettement inférieure à celle des données. Ceci signifie que le modèle ne reproduit pas une partie significative du signal observé. Il y aurait donc moins d'énergie cinétique dans le modèle qu'en réalité. En ce qui concerne la direction des courants de la station située au large, les résultats du modèle semblent avoir une variabilité nettement inférieure aux données. Ceci peut signifier que le vent n'est pas correctement pris en compte et/ou que les vagues font largement défaut. En effet, les courants de marée tendront à être alignés avec la direction du chenal (comme il semblerait être le cas pour le modèle), tandis que les courants dus au vent et aux vagues peuvent présenter une variabilité plus prononcée.

Au vu de cette sous-estimation de la variabilité dans le modèle sans vagues, il serait souhaitable d'effectuer la validation en considérant le forçage des vagues et l'impact des différents régimes sur les temps de résidence dans le lagon.

Etant donné que l'étude porte sur l'impact à long terme des rejets de saumure, la capacité du modèle de reproduire le transport à des échelles temporelles plus longues devrait être démontrée au cours de la validation. Cette démonstration n'est pas faite dans le rapport.

Pour cela, et afin d'améliorer la lisibilité des figures, il apparaît nécessaire de tracer les diagrammes de dispersion, modèle vs. observations. Cela permettrait de rendre compte de la capacité du modèle à reproduire, au moins qualitativement, la circulation dans le lagon. Il serait également souhaitable que cela soit réalisé en distinguant le fond, le milieu et le haut de la colonne d'eau.

Le transport de substances dissoutes dans l'eau est dû à l'advection et à la diffusion. Dans les zones côtières, l'advection est le processus dominant dans le plan horizontal, tandis que la diffusion domine sur la verticale. Il serait fondamental de démontrer que le modèle reproduit correctement les vitesses résiduelles horizontales, ainsi que les composantes de marée de longue période (ce qui inclut la constituante MS_f , mentionnée plus haut). Les données disponibles permettent de faire cette validation. Toutefois, elle n'est pas présentée. D'autre part, la diffusion horizontale est en général paramétrée avec un coefficient de diffusion constant, justement parce qu'elle est peu importante. Ceci implique que le coefficient de diffusion horizontale soit suffisamment petit pour que la diffusion horizontale soit effectivement négligeable par rapport à l'advection. Or, le coefficient de diffusion n'est pas indiqué. L'apparente absence de gradients horizontaux significatifs dans les résultats du modèle pourrait découler d'une valeur excessivement élevée de ce coefficient.

En ce qui concerne le transport vertical, les données disponibles ne permettent pas valider correctement le modèle. Il est donc fondamental d'utiliser un modèle de turbulence éprouvé et adapté à ce type d'étude. Une analyse de sensibilité à ce modèle permettrait aussi vérifier la robustesse des conclusions.

En somme, les résultats de validation du modèle présentés sont insuffisants. L'affirmation de CREOCEAN selon laquelle "les résultats de ces comparaisons sont jugés très satisfaisants" n'est pas soutenue par les résultats présentés. En l'état, rien ne démontre que le modèle Telemac3D, avec un

maillage non-structuré fin, reproduit la circulation dans le lagon avec un niveau de fiabilité équivalent ou supérieur au modèle GROCO du rapport MIO (2024) auquel se réfère l'étude de CREOCEAN.

2.3 Scénarios

Dans les scénarios considérés, le rapport traite séparément les rejets de saumure, de polluant antitartre, et de matière en suspension, ainsi que la chaleur et le pH. Bien que le rapport ne soit pas clair à cet égard, il semblerait que les simulations auraient été faites séparément pour la salinité d'une part, et pour tous les autres traceurs ensemble d'autre part.

Cette approche conduirait à des erreurs qui peuvent être significatives car les interactions entre les différents composants ne sont pas représentées. En particulier, l'eau du rejet est plus dense que l'eau environnante du fait de sa salinité plus élevée. Le mélange entre l'eau de rejet et l'eau du lagon sera d'autant plus limité que les faibles courants, l'absence de houle et la stratification verticale réduisent la turbulence. La séparation des différents composants empêcherait le modèle de tenir compte de la réduction du mélange vertical par la stratification, et augmenterait donc la dispersion du panache par rapport à la réalité. En outre, l'eau du rejet est plus dense que l'eau du lagon à cause de la salinité, mais elle est aussi plus chaude. Dans le cas du panache thermique, celui-ci tendra même à remonter en surface si l'on ne prend pas en compte qu'il est également plus salé. Si effectivement tous les traceurs hormis le sel (polluant antitartre, matière en suspension, chaleur et pH) sont simulés ensemble, les résultats pourraient indiquer de manière erronée que tous ces traceurs remonteraient en surface.

Le découplage entre la salinité et les autres traceurs est visible dans les résultats présentés. Les résultats du panache de salinité par vent nul (e.g., **figures de la page 39**) montrent que le panache au fond se dirige vers l'Est. Au contraire, le panache réactif antitartre au fond se dirige vers l'Ouest (**figure du dessus à droite, page 43**). Or, il s'agit de la même eau. Dans la simulation de la salinité, la densité plus élevée du panache le conduit vers les zones plus profondes et l'océan ; dans la simulation du panache réactif antitartre, ces différences de densité ne sont pas prises en compte, et le panache se dirige vers la côte, ce qui est probablement incorrect. Le même phénomène est aussi visible dans les résultats du pH (**figures de la page 49**).

En général, les simulations du panache des traceurs autres que le sel montrent des concentrations plus élevées en surface que près du fond (voir les **figures de l'annexe**). Même les simulations de matière en suspension par vent nul (**résultats de la page 54**) montrent des concentrations plus élevées à la surface qu'au fond. Ce résultat est contre-intuitif : la matière en suspension étant plus dense que l'eau, c'est à priori l'inverse qui devrait se produire. Il semblerait donc que la matière en suspension a été simulée simultanément avec la chaleur du panache, mais sans sa salinité accrue.

En somme, les résultats suggèrent que le modèle a été utilisé d'abord pour la salinité seule, puis pour les autres composants du panache ensemble. Cet abordage semble introduire des erreurs significatives dans le transport des panaches des traceurs autres que le sel.

2.4 Interprétation des résultats et conclusions

Cette section vise à discuter les principales conclusions de CREOCEAN (2024) et à vérifier si elles sont supportées par les résultats du modèle. Ces conclusions sont listées ci-dessous (en italique), et chacune d'elles est discutée face à l'analyse présentée dans les sections précédentes.

1. *Les résultats ont mis en évidence :*

a. *L'absence de sursalinité en surface*

En effet, les résultats du modèle indiquent que la sursalinité en surface est négligeable. Si l'on considère que le modèle surestime probablement le mélange vertical, entre autres du fait de résolutions horizontale et verticale grossières du maillage au point de rejet, cette conclusion paraît fondée.

b. *Au fond, des sursalinités inférieures à 0,035 g/L (0,1% de la salinité naturelle) à proximité des récifs et massifs coralliens. Des sursalinités supérieures à 0,35 g/L (1% de la salinité naturelle) limitées à un rayon de 50m autour du point de rejet.*

De même que la probable surestimation du mélange vertical par le modèle conduirait à une surestimation des salinités en surface, elle les sous-estimerait près du fond. Ce problème peut être exacerbé par une résolution horizontale trop grossière dans la zone de rejet. D'autre part, l'absence de validation du modèle de transport remet en question sa capacité de prévoir l'évolution des panaches à long terme. Cette conclusion semble donc peu robuste.

c. *L'absence d'accumulation de sel dans le temps*

Les résultats présentés suggèrent que, dans le modèle, le transport est dominé par un mélange horizontal et vertical proche de la zone de rejet. Cette eau bien mélangée sortirait ensuite du lagon pendant le jusant. Cependant, si le mélange est surestimé par le modèle, comme il semble être le cas, le comportement du panache de saumure peut en réalité être très différent. En particulier, le modèle ne permet pas de garantir la non-formation d'une lentille d'eau à haute salinité près du fond, qui s'écoulerait lentement vers l'océan. Cette eau très salée pourrait alors se trouver partiellement piégée dans les zones profondes du lagon.

Une analyse de données dans la partie Nord du lagon (Chevalier *et al.*, 2017) indique d'ailleurs que l'eau entrerait dans le lagon surtout par les passes, et en sortirait surtout par-dessus les récifs coralliens. S'il en était de même dans la partie en question du lagon, ce phénomène contribuerait à l'accumulation de sel dans le temps. En effet, l'eau sortante serait surtout celle de surface, moins salée, tandis que l'eau plus salée demeurerait plus longtemps dans le lagon.

d. *L'absence de sursalinité à proximité des zones à enjeux environnementaux et du point de pompage.*

Les zones mentionnées dans cette conclusion ne sont pas indiquées dans le rapport.

2. *En conclusion et quels que soient les scénarios considérés, les surplus de salinité sont faibles dans la zone d'étude. Les sursalinités supérieures à 1% de la salinité ambiante (0,35 g/L) sont observées uniquement autour des points de rejet, dans un rayon de 30 à 50m selon le scénario. Ces résultats s'expliquent par la présence de diffuseurs qui permettent une bonne dilution des rejets.*

Le seuil de 1% pour la salinité n'est pas justifié. Jenkins et al. (2012) présente une analyse bibliographique à ce sujet, et considère un seuil plus élevé : 2 à 3 g/l. Ce seuil ne devrait pas être dépassé à une distance de l'ordre d'une centaine de mètres du point de rejet.

L'interprétation selon laquelle les résultats s'expliqueraient par la présence de diffuseurs ne peut être déduite des résultats. Il faudrait avant tout faire des simulations avec différents types de diffuseurs pour affirmer cela. D'autre part, il faudrait démontrer que le modèle représente correctement les processus de dilution à petite échelle. Finalement, le maillage devrait avoir une résolution horizontale inférieure à une dizaine de mètres pour que les résultats dans un rayon de 30 à 50 m autour des points de rejet soient vraisemblables. Toutefois, la figure de maillage horizontal suggère que cette résolution est en réalité bien plus grossière, contrairement aussi à ce qui est indiqué dans le texte.

3. *Par ailleurs, étant donné la densité des eaux sursalées, une très faible quantité remonte en surface sous les effets combinés de la vitesse de rejet et de la diffusion verticale.*

Cette conclusion est probablement correcte. Si l'on considère que le modèle surestime le mélange vertical, le fait que les résultats montrent des augmentations de salinité très petites en surface montre qu'en réalité la sursalinité de surface devra y être négligeable.

4. *Les concentrations en réactif (antitartre), MES, et les différences de température et de pH par rapport aux conditions moyennes ont été modélisées sur P4. Les résultats montrent :*

a. *Pour tous les paramètres, les conditions les plus pénalisantes obtenues par vent nul.*

Le vent augmente le mélange et les échanges entre le lagon et l'océan. Il est donc vraisemblable que les concentrations maximales soient observées pour les conditions de vent nul.

b. *Une concentration en antitartre maximale de 0,05 mg/L à proximité des récifs coralliens, par vent nul. Par vent de nord ou de sud, le panache est fortement dilué et proche de 0 mg/L autour des récifs. Il s'agit d'une hypothèse pénalisante puisque la modélisation ne prend pas en compte la biodégradabilité du réactif.*

Comme expliqué plus haut, le panache d'antitartre devrait suivre celui de la saumure. Le fait que ce ne soit pas le cas suggère qu'il n'a pas été correctement modélisé.

c. *Près des récifs, une concentration en MES maximale par vent nul de 0,05 mg/L en surface et 0,2 mg/L sur le fond. Ces concentrations sont nettement inférieures au bruit de fond (4 mg/L en moyenne).*

d. *Une augmentation de température maximale de 0,01°C dans un rayon de 100m autour du point de rejet, par vent nul. Au-delà, aucune augmentation n'est observée.*

e. *Par vent nul, le pH à proximité des récifs coralliens est de 8,08 au fond et 8,06 en surface.*

Le fait que les résultats indiquent des concentrations de la matière en suspension plus élevées à la surface que près du fond remet en cause ces résultats.

Encore une fois, les résultats suggèrent que le panache thermique monte à la surface. Ceci suggère que les simulations ne prennent pas en compte la salinité.

3 | Conclusions

Le rapport analysé ci-dessus montre des limitations de plusieurs types :

1. Absence de détail sur l'application
 - a. La description de l'application dans le rapport ne suffit pas à vérifier que la configuration de Telemac3D utilisée est adéquate. En particulier, le modèle de turbulence n'est pas spécifié, les coefficients de diffusion horizontale et de frottement ne sont pas indiqués, et la représentation des diffuseurs n'est pas décrite. Le fichier de configuration apporte des éléments additionnels qui rajoutent de l'incertitude. En particulier, le coefficient de frottement ne tiendrait pas compte de la rugosité plus élevée des récifs coralliens par rapport aux fonds sableux, de même que le modèle de turbulence ne prendrait pas en compte la stratification de la colonne d'eau.
2. Choix inadéquats qui peuvent avoir des impacts significatifs sur la représentativité du modèle
 - a. Le domaine de calcul devrait inclure une partie océanique pour permettre représenter les masses d'eau oscillantes entre le lagon et l'océan.
 - b. Le maillage horizontal est trop grossier au niveau des principaux chenaux, ce qui compromet la représentation des échanges d'eau entre le lagon et l'océan. De même, le fichier de configuration indique que les bancs découvrants ne seraient pas pris en compte. Cela ajoute aux erreurs dans le calcul des échanges d'eau entre le lagon et l'océan. Enfin, il semblerait que la résolution dans la zone de rejet ne soit plus grossière que le rapport ne l'indique.
 - c. Le maillage vertical trop grossier et le modèle de turbulence vertical ne prenant pas en compte la stratification conduisent probablement à la surestimation du mélange vertical.
 - d. Certains résultats présentés suggèrent que la houle pourrait être considérée du fait de son impact sur les vitesses à l'intérieur du lagon. Sous certaines conditions, et dans des proportions qu'il reste à établir, cela pourrait favoriser la dispersion des rejets.
3. Validation insuffisante du modèle
 - a. L'absence de mesures d'erreur empêche une quantification de la précision du modèle.
 - b. Les comparaisons de séries temporelles d'observations et de résultats sont présentées à une échelle qui les rend illisibles.
 - c. La validation présentée ne permet pas de conclure quant à la capacité du modèle de reproduire le comportement du panache à long terme.
4. Résultats invraisemblables
 - a. Les résultats des panaches suggèrent que le modèle a été utilisé d'abord pour simuler les rejets de saumure uniquement, puis les autres traceurs simultanément. En conséquence, le panache pour les traceurs autres que le sel est moins dense que l'eau du lagon dû à sa température plus élevée, et remonte en surface. Or, le panache est

effectivement plus dense que l'eau du lagon dû à sa haute salinité, et donc il reste près du fond. Les résultats pour les traceurs autres que le sel seraient donc incorrects.

Ces limitations mettent en question la validité des résultats des simulations.

Lisbonne, LNEC, Novembre 2024

VISAS

Le Chef de la Division d'Estuaires et de Zones
Côtières

Luís Portela

La Directrice du Département d'Hydraulique et
Environnement

Helena Alegre

AUTEURS

André Fortunato
Directeur de Recherche

Alphonse Nahon
Docteur

Marta Rodrigues
Chargée de Recherche

Références

CHEVALIER, C.; DEVENON, J.L.; PAGANO, M.; ROUGIER, G.; BLANCHOT, J.; ARFI, R. 2017 – **The atypical hydrodynamics of the Mayotte Lagoon (Indian Ocean): Effects on water age and potential impact on plankton productivity.** *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196: 182-197.

CREOCEAN, 2024 – **Modélisation des rejets dans le lagon de Mayotte. Rapport d'étude.**

JENKINS, S.; PADUAN, J.; ROBERTS, P.; SCHLENK, D.; WEIS, J. 2012 – **Management of Brine Discharges to Coastal Waters. Recommendations of a Science Advisory Panel.** Technical Report 694.
www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/ocean/desalination/docs/dpr051812.pdf

MIO, 2024 – **Les Eaux de Mayotte. Rapport Modélisation. Etude de définition d'une usine de dessalement sur Grand-Terre Lot 1.** Rapport 822C34, 13/12/2023

Expertise

Modélisation des rejets dans le lagon de
Mayotte
Société CREOCEAN Rapport N°221288,
Sept. 2024

24/10/2024

Client

Parc naturel marin de Mayotte

Contact

Oriane LEPEGNEUL

Auteur

Catherine Villaret

Adresse

Dr Catherine Villaret
Mail: contact@mobidyc.fr
Tel: 33 6 37 48 91 51

Société – Mobidyc

SIREN N 899668081

IBAN : FR761695800001623561513006 BIC : QNTOFRP1XXX



Résumé

Pour faire face aux besoins en eau potable de la population de Mayotte, une usine de dessalement doit être construite dans l'urgence à Ironi Bé situé au Nord Est sur Grande Terre. La Tranche 0 qui assurera la production de 10 000 m³ d'eau potable par jour doit être opérationnelle dès 2025.

Les produits de rejet (saumure, detartrant MES et panache thermique) seront rejetés par le biais de diffuseurs par 20 m de fond dans le lagon. La dilution de ces rejets a été étudiée sur modèle numérique par la société CREOCEAN. Les résultats doivent être intégrés dans le dossier de Demande d'Autorisation Environnementale.

Un modèle 3D a été construit pour représenter les écoulements dus à la marée et au vent sur une portion du lagon de 50 km d'extension et centrée sur Ironi Bé. Plusieurs points de rejets ont été étudiés et différents scénarios de rejet envisagés. D'après les résultats de cette étude, l'incidence des rejets sur la qualité des eaux de Mayotte est limitée à un périmètre de 50 m autour des rejets.

Cependant les choix de modélisation sont insuffisamment justifiés, voire incorrects, et ont tendance généralement à augmenter la dilution du panache.

Des études complémentaires doivent être impérativement mises en place pour :

- **Mieux comprendre le bilan de masse**

Les simulations sur 1 an ne permettent pas de mettre en évidence l'effet cumulatif des rejets. Ce résultat surprenant compte tenu des volumes de saumure rejetés sur un an. Quels sont les volumes de matière évacuée par les flux au cours du jusant ; quelle est la variation globale de masse en plusieurs zones du lagon ?

Cette étude permettra aussi de vérifier que les calculs réalisés sont bien conservatifs

- **Prise en compte des stratifications verticales**

Les courants de densité, générés par les rejets de saumure, peuvent être transportés sur le fond sur des distances importantes.

Les calculs doivent être réitérés en considérant des hypothèses plus réalistes sur la concentration en sel du lagon (35 g/l au lieu de 36.6 g/l) afin de ne pas minimiser l'effet des sursalinités.

La modélisation des stratifications nécessite un maillage plus raffiné sur la verticale.

Le modèle de turbulence doit prendre en compte l'effet des stratifications par un modèle adapté (modèle k-eps ou fonction d'amortissement).

- **Etude de sensibilité**

En l'absence de données de validation – une étude de sensibilité des résultats numériques aux différents paramètres numériques est conseillée pour justifier les choix de modélisation et étudier l'effet du maillage et de la résolution verticale ainsi que le choix du modèle de turbulence.



- **Etude du champ proche**

La représentation de l'écoulement en sortie des diffuseurs nécessite un traitement particulier (position de plan fixe au niveau des points sources et prise en compte des vitesses des jets en sortie des diffuseurs).

La modélisation actuelle suppose un mélange homogène des rejets dans la maille de fond soit donc sur 2m50 de hauteur et ne permet pas de reproduire les panaches dans la zone de rejet. Les points de rejet P1 et P2 sont particulièrement mal représentés (taille des mailles de l'ordre de 30 m)



Contents

1. Contexte et objectifs	2
1.1. Usine de dessalement	2
1.2. Modélisation des rejets	2
1.3. Objectifs de cette expertise	3
2. Domaine de modélisation et maillage	4
2.1. Domaine de modélisation	4
2.2. Position des rejets	5
2.3. Maillage vertical	6
3. Hypothèses de modélisation	7
3.1. Choix du modèle	7
3.2. Processus non pris en compte	7
4. Résultats hydrodynamiques	9
5. Analyse des résultats de dispersion	10
5.1. Scénarios étudiés	10
5.2. Sursalinité et seuils admissibles	10
5.3. Etudes complémentaires recommandées	13
6. Conclusions	15
7. Références	17



1. Contexte et objectifs

1.1. Contexte

Une usine de dessalement doit être construite à Mayotte pour subvenir aux besoins en eau potable de la population. Le projet a été confié au Syndicat Les Eaux de Mayotte (LEMA). Une première tranche (Tranche 0) qui permettra de produire environ 10 000 m³/jour d'eau potable doit être mise en service dès 2025 puis une seconde tranche (Tranche 1) de 16 667 m³/jour est prévue pour 2026.

Le site d'Ironi Bé, situé sur la côte Est de Grande Terre, a été retenu sur la base de critères technico-économiques et environnementaux (cf. [6]). La dissémination dans le lagon des saumures et autres produits de rejet est susceptible de mettre en péril la biodiversité du lagon. L'impact de ces rejets doit faire l'objet d'une demande d'Autorisation Environnementale (Procédure simplifiée qui compte tenu du caractère urgent du dossier, remplace l'étude d'impact environnementale).

1.2. Usine de dessalement

La production d'eau potable par osmose inverse est un procédé couramment utilisé qui consiste à filtrer l'écoulement marin à travers des membranes extrêmement fines, pour éliminer le sel et autres particules fines. L'injection de produits chimiques est indispensable pour éviter le colmatage des membranes.

Ce procédé s'accompagne d'un rejet en mer de saumure, de substances chimiques (produits chlorés, détartrants ...) et de matière en suspension. Ces rejets présentent un risque environnemental important avec des effets négatifs sur les écosystèmes marins (acidification du milieu, prolifération d'algues...) et notamment sur les coraux.

Les rejets de l'usine soit 12 800 m³/jour (pour la Tranche 0) doivent être réalisés dans le lagon à une vingtaine de m de profondeur. Des diffuseurs placés sur les canalisations doivent permettre d'améliorer la dilution des rejets.

Plusieurs points de rejets sont envisagés et ont fait l'objet d'une étude sur modèle numérique. Les résultats obtenus doivent être intégrés à la demande d'autorisation environnementale

1.3. Modélisation des rejets

La société CREOCEAN a été mandatée pour étudier la dispersion des rejets de l'usine. Des simulations de rejet dans plusieurs configurations de sursalinité et pour des situations météo caractéristiques des conditions d'été et d'hiver ont été réalisées sur des périodes de 15 jours.

D'après les résultats de cette étude, l'incidence des rejets sur la qualité des eaux de Mayotte est limitée à un périmètre de 50 m autour des rejets. Le point le plus proche de la côte P4 a été retenu pour des simulations de rejet de polluants chimiques, de MES et de panache thermique.



Ces simulations long-terme (1 an) confirment l'emprise limitée de la zone impactée par les rejets et n'ont pas permis d'observer d'effet cumulé significatif sur la qualité des eaux du lagon.

1.4. Objectifs de cette expertise

La société MOBIDYC a été mandatée par le Parc Marin de Mayotte pour donner un avis d'expert sur la qualité de la modélisation et des résultats obtenus. Cette expertise présente une étude approfondie de la pertinence des hypothèses de modélisation (maillage, conditions retenues, et processus physiques pris en compte) et de la précision des résultats obtenus.

L'objectif de cette expertise est de répondre aux questions particulières suivantes :

- Quels processus physiques ont été considérés dans la modélisation ? Est-ce que tous les processus pertinents ont été pris en compte correctement?
Une attention particulière doit être portée sur la capacité ou non de dilution de la saumure dans la colonne d'eau et des impacts d'une éventuelle stratification de long terme sur l'environnement.
- De même, est-ce que le modèle a été forcé par tous les forçages océanographiques, météorologiques, bathymétriques et de nature des fonds pertinents ?
- Est-ce que les conditions de forçage sont représentatives de la réalité du lagon?
- Est-ce que le modèle hydrodynamique a été correctement calibré avec des données in-situ? La validation est-elle acceptable, considérant l'état de l'art?
- La durée des simulations est-elle suffisante, considérant les temps de résidence du lagon? Comment ces temps de résidence ont-ils été estimés? Est-il démontré que la durée des simulations est suffisamment longue pour représenter un état de convergence dynamique?
- Les conclusions de l'étude sont-elles bien supportées par les résultats du modèle?
- Quelles études complémentaires sont recommandées pour apporter des réponses aux questions environnementales.



2. Domaine de modélisation et maillage

2.1. Domaine de modélisation

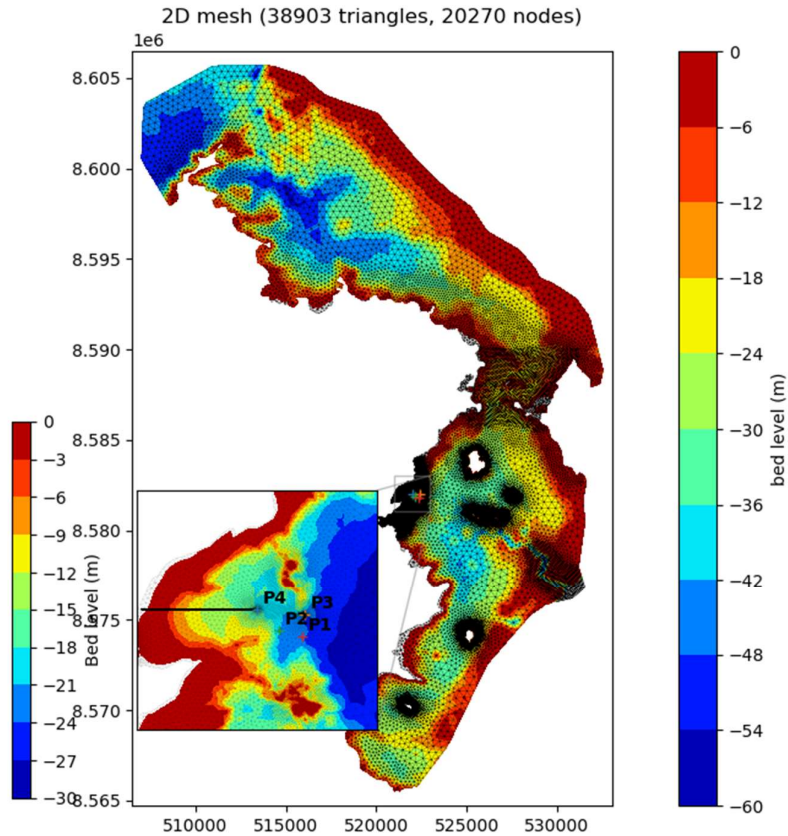


Figure 1 – Domaine de modélisation : ensemble du modèle et zoom au niveau de Ironi Bé

Le domaine de modélisation qui s'étend sur une cinquantaine de km est centré sur Ironi Bé. Le domaine est limité au niveau de la barrière de corail. Les échanges avec l'océan se font par la frontière maritime Nord et par 3 passes, dont la principale est la passe en S située au SE de Ironi Bé.

Le domaine de modélisation, son maillage et sa bathymétrie, sont représentés sur la Figure 1. A noter que l'ensemble des figures de [1] sont présentées en coordonnées spatiales (latitude et longitude) mais le maillage a été conçu en coordonnées cartésiennes (UTM 38 S). Le maillage horizontal est de moins de 100 m dans la passe en S pour une trentaine de m dans l'ensemble de la baie. La taille des mailles atteint 300 m environ dans les parties plus profondes du lagon.



Le maillage a été interpolé sur la base de données du SHOM Litto3D. La résolution est de 1m en zone littorale. Le lagon est généralement peu profond (moins d'une trentaine de m), avec des profondeurs maximales au large d'Ironi Bé et dans la passe en S atteignant localement plus de 50 m.

2.2. Position des rejets

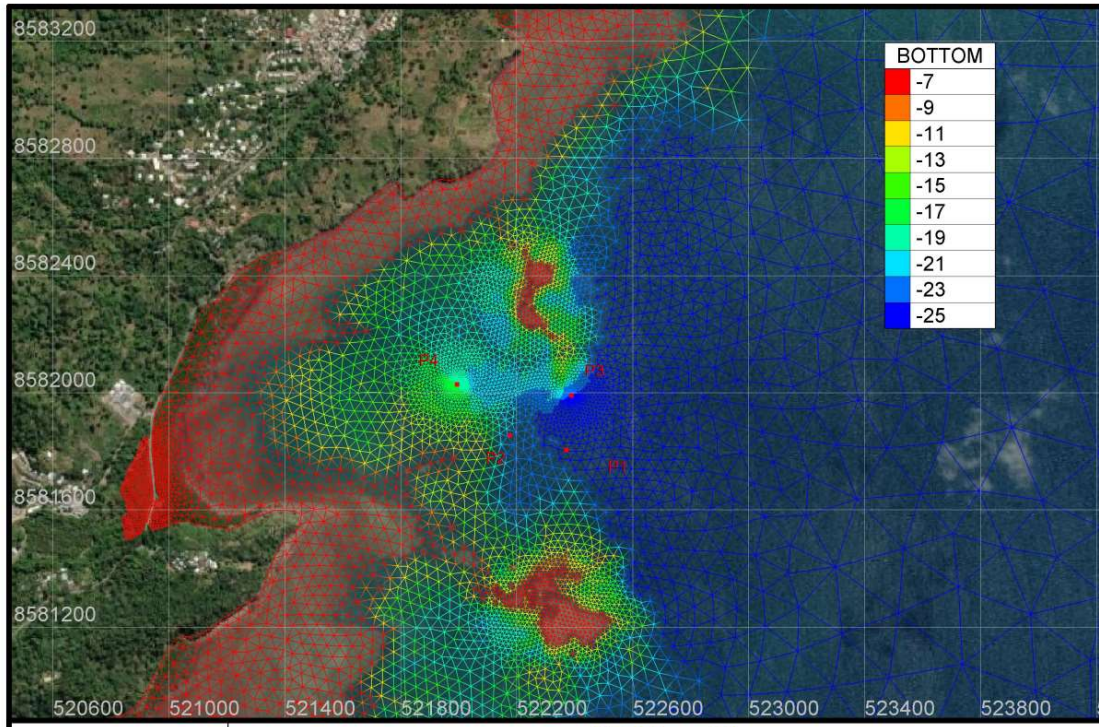


Figure 2 : Maillage et bathymétrie Ironi Bé

Plusieurs points de rejets sont étudiés, leur positions sont indiquées sur la Figure 2.

Le maillage horizontal est de moins de 5 m au niveau des rejets P1 et P4, mais **de 30 m environ au niveau des points P2 et P3**. Cela n'a pas été mentionné dans le rapport [1]. La taille des mailles est donc beaucoup trop large pour étudier finement l'écoulement en champ proche de diffuseurs en particulier au niveau des points P2 et P3.

Par ailleurs Il y a une inconsistance sur la profondeur des rejets entre les profondeurs mentionnées dans l'étude de conception et les profondeurs modélisées. En particulier le Point **P4** – le plus proche de l'usine **est situé à 17 m** seulement de profondeur – et ne satisfait donc pas le critère mentionné dans l'étude de conception [6]. Cette inconsistance est d'autant plus problématique que le point P4 a été retenu comme position optimale en s'appuyant sur les résultats du modèle.

Les profondeurs des points de rejet ont été repérées sur le maillage et sont reportées dans le Tableau 1 en Annexe. Les spécifications de l'étude de conception [6] sont reportées dans le

Tableau 3 en Annexe.



Les critères en maillage (moins de 5m autour des rejets) et profondeur de 18 m minimum n'ont donc pas été respectés.

2.3. Maillage vertical

Le maillage vertical comprend 9 plans sur la verticale mais il n'y a pas d'indication dans le fichier configuration (cf Annexe) sur la répartition verticale des plans.

Par défaut, le maillage est supposé équi-réparti – c'est-à-dire que la taille des mailles est constante sur la verticale et proportionnelle à la hauteur d'eau : la résolution verticale est alors de 2m50 par 20 m de fond.

Le maillage étant proportionnel à la hauteur d'eau, cela implique un mouvement sur la verticale des différents plans au cours de la marée. Pour un marnage de 2 m, la variation de la hauteur des mailles est de 25 cm sur la verticale – ce qui **augmente artificiellement la diffusion verticale du panache.**

Le maillage **n'est pas suffisamment raffiné** au niveau du fond pour représenter correctement les stratifications halines et le jet en sortie des diffuseurs.

La mise en place de **plan fixe au niveau des rejets** et d'un minimum de 30 plans sur la verticale est préconisée pour une étude de stratification dans l'étang de Berre (cf [5]) :

- Des plans fixes sont recommandés pour ne pas augmenter artificiellement la diffusion numérique sur la verticale (cf. [5])
- Il est aussi recommandé de placer des plans à hauteur fixe au niveau des sources pour éviter de les faire varier sur la hauteur d'eau (voir [8])

Le maillage vertical n'est pas suffisamment raffiné pour représenter les stratifications du panache halin. Par ailleurs le mouvement vertical du maillage risque d'augmenter la dilution verticale du panache.

La prise en compte de plan fixe est indispensable pour représenter correctement les termes sources.



3. Hypothèses de modélisation

3.1. Choix du modèle

Le modèle Telemac 3D est un outil en éléments finis (maillage triangulaire) bien adapté pour les géométries complexes et pour les modélisations côtières et littorales (prise en compte du vent et de la marée, des bancs découvrants ...) et offre un choix important dans les méthodes numériques.

Le modèle a été utilisé et validé pour modéliser des courants de densité (il a été notamment utilisé pour simuler l'incidence des rejets de l'usine de St Chamas sur la salinité dans l'étang de Berre cf. [5]). Cependant il est rappelé que les courants de stratification haline en sortie des diffuseurs induisent un courant de densité. La représentation de ce type d'écoulement nécessite un maillage adapté suffisamment raffiné sur la verticale et avec des plans fixes et un modèle de turbulence adapté – longueur de mélange avec fonction d'amortissement ou modèle k-eps.

3.2. Processus non pris en compte

Traitement des bancs découvrants

Le modèle Telemac 3D propose plusieurs méthodes numériques adaptées au traitement des bancs découvrants. D'après le fichier de configuration, le traitement des bancs découvrants n'a pas été pris en compte ce qui est surprenant. Le marnage est en effet de 2 m environ.

La bordure maritime du maillage est constituée par la barrière de corail : Une part importante du domaine de modélisation est donc située à des profondeurs de moins d'un mètre et affleure donc à marée basse.

Par ailleurs à l'intérieur de la baie Ironi Bé, le modèle comprend toute une zone de marécages en fond de baie (cf Figure 7). Il est difficile de comprendre ni pourquoi ni comment cette zone inondable a été représentée sans traitement des bancs découvrants.

Écoulement en sortie des diffuseurs

La prise en compte des rejets n'est pas détaillée ni dans le rapport ni dans le fichier configuration.

L'écoulement en sortie des diffuseurs est représentés dans Telemac-3D par des termes sources qui sont soit placés au niveau du plan le plus proche ou mélangés uniformément dans la première maille. Il est possible aussi de prendre en compte l'écoulement en sortie des diffuseurs mais cela n'a pas été mentionné dans le rapport.

L'hypothèse la plus simple qui consiste à mélanger uniformément le rejet sur la première maille (2m50 de hauteur) a probablement été utilisée. Cette hypothèse combinée à une variations sur la verticale de la hauteur des mailles ne permet pas de représenter correctement le champ proche (en sortie des diffuseurs).

Une étude de champ proche avec prise en compte des vitesses en sortie des diffuseurs doit être réalisée en utilisant un maillage adapté doit être réalisée pour déterminer les concentrations en sortie des diffuseurs. La vitesse des jets en sortie des diffuseurs doit aussi être prise en compte.

Aspiration au niveau de l'usine



Si le volume rejeté est de 12 000 m³/jour, les volumes pompés représentent 24 000 m³/jour et cette aspiration a vraisemblablement une incidence importante sur les courants côtiers (compte tenu des faibles hauteurs d'eau et des courants très faibles dans la zone). Les pompages de l'usine ne sont pas mentionnés dans le rapport et donc n'ont probablement pas été pris en compte.

Courants de densité

Lorsque des diffuseurs sont placés sur le fond comme spécifié dans [6], le courant de gravité est un courant stable – le fluide plus lourd étant situé sur le fond – ce qui empêche sa dilution avec le milieu ambiant. Ce processus d'amortissement de la turbulence est responsable de la formation de stratification thermique et haline.

Il n'y a aucune indication dans le rapport que ce processus déterminant ait été pris en compte correctement. Une étude de sensibilité sur l'influence du nombre de mailles sur la verticale ni sur la prise en compte de fonction d'amortissement.

Pour représenter les stratifications halines et thermiques dans l'étang de Berre, Martin et al [5] préconisent **l'utilisation d'un modèle de longueur de mélange avec fonction d'amortissement adapté pour les lagunes.**

Conservation de la masse

Le **bilan de masse n'est pas mentionné**, hors c'est une étape essentielle pour s'assurer que les calculs numériques sont corrects.

Un bilan de masse permet de vérifier que la conservation de la masse (en particulier des traceurs) est bien satisfaite. En effet, si le choix du schéma numérique est important, il convient aussi d'augmenter la précision du solveur.

Par ailleurs, un bilan général permettrait de mieux comprendre comment se répartissent les flux moyens (moyennés sur un cycle de marée) et de globalement mieux comprendre la dynamique générale (flux entrant/sortant par les passes ; flux rejetés).



4. Résultats hydrodynamiques

4.1. Validation

Le modèle 3D forcé par la marée et le vent a été appliqué sur une période de 3 mois et les courants – moyennés sur la verticale – ont été validés par rapport à 2 points de mesure : l'un situé au niveau du point de rejet P1, et le second au large dans la passe en S.

L'amplitude de la marée est de 1 m environ (cf [7]). Il n'y a **pas de validation** des variations de la surface libre par rapport aux marégraphes.

La validation a été réalisée sur une période de 3 mois (Août à Octobre 2023) sur la base des courants 2D **moyennés** sur la hauteur d'eau. La validation paraît acceptable : les intensités des courants au point P1 sont globalement en accord avec les mesures (voir Figure 8 en Annexe).

Cependant on peut émettre les **réserves suivantes** :

- Manque de clarté des graphes qui superposent les vitesses mesurées et calculées. Il semblerait cependant que **le modèle surestime les courants de jusants** vers l'ESE (Figure 3).
- Il y a très peu de différence entre les champs de courants de surface et au fond, ce qui indique que le mélange vertical est probablement surestimé et l'effet du vent sur la couche de surface n'est pas bien représenté (cf [1] Figure 3.11 et 3.12).
- La direction des courants au point P1 montre une grande variabilité en lien possiblement avec les vents variables sur la période. Cette répartition est assez mal représentée dans le modèle qui ne représente pas de manière suffisamment fine l'effet du vent sur la couche de surface (voir Figure 8 en Annexe).

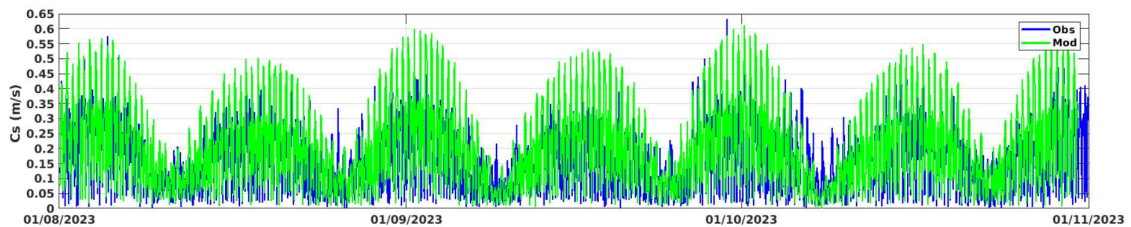


Figure 3 – Comparaison entre vitesses mesurées en bleu et résultats du modèle en vert au niveau de la passe en S (reproduit de la Figure 3.4 de [1]).



5. Analyse des résultats de dispersion

5.1. Scénarios étudiés

12 scénarios de rejet de sel ont été étudiés sur des durées de 15 jours pour comparer les différents points de rejet et étudier l'influence du vent.

Le point P4, le plus proche de la côte, a fait l'objet de simulations complémentaires toujours sur des durées de 15 jours mais pour étudier l'impact des polluants antitartres, des MES, de panaches thermiques et de panaches acides.

Pour chaque scénario de rejet, 3 conditions météorologiques pour représenter les conditions typiques des saisons sèche et pluvieuse.

- Absence de vent
- Secteur Nord-Nord-Ouest (NNO), vitesse moyenne de 3.5 m/s
- Secteur Sud-Sud-Est (SSE), vitesse moyenne de 4.6 m/s

5.2. Sursalinité et seuils admissibles

La salinité a été considérée constante et arrondie à **36.6 g/l** quelle que soit la saison, en raison de sa faible variabilité interannuelle (cf [1], p 18) ;

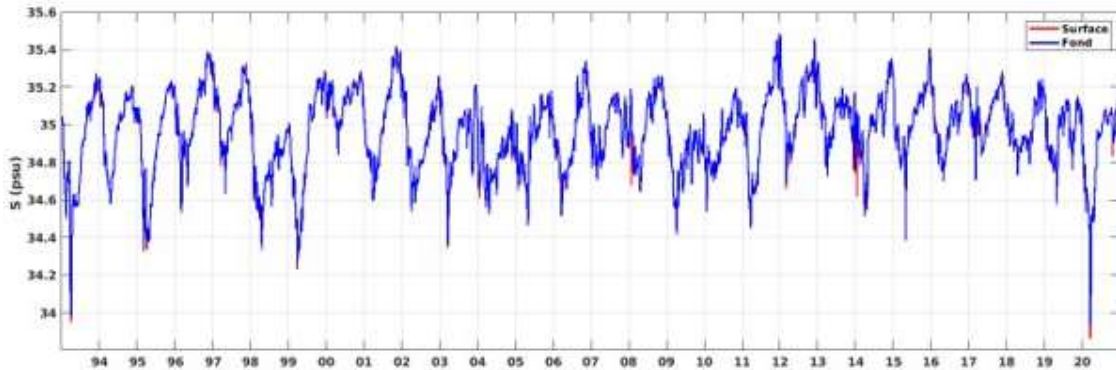


Figure 4 – Fluctuations de salinité mesurée (d'après [1])

Cette hypothèse est erronée car d'après la Figure 4, la salinité du lagon varie de +/- 0.5 g/l entre saison sèche et pluvieuse autour d'une valeur moyenne de 35g/l environ. La salinité du modèle est donc surestimée donc par rapport aux valeurs observées.

Cette hypothèse va **minimiser la sursalinité des rejets et donc les effets de densité** : en effet la sursalinité pour un rejet à la valeur nominale de 65,2 g/l n'est plus que de 28.6 g/l au lieu de 30.7g/l en saison des pluies et de 29.7g/l en saison sèche (**soit une erreur minimale de 1g/l sur les sursalinités au rejet**)

La Figure 5 montrent les valeurs des sursalinités (donc au-dessus de 36,6 g/l) obtenus au bout de 15 jours de simulation au niveau du fond. Les sursalinités atteignent un seuil de 0.35 g/l (et correspond donc à une salinité de **près de 37g/l**) dans un périmètre de 50m autour des rejets.



Cette variation de la salinité est considérée comme acceptable mais **sans justification** au regard de la fragilité des habitats.

Sur les vues zoomées le seuil minimal de l'échelle couleur est fixé à 0.35 g/l (**Salinité supérieure à 37 g/l**) et tend donc à **minimiser les effets des panaches**. Une sortie des iso-valeurs en concentration aurait été plus transparent.

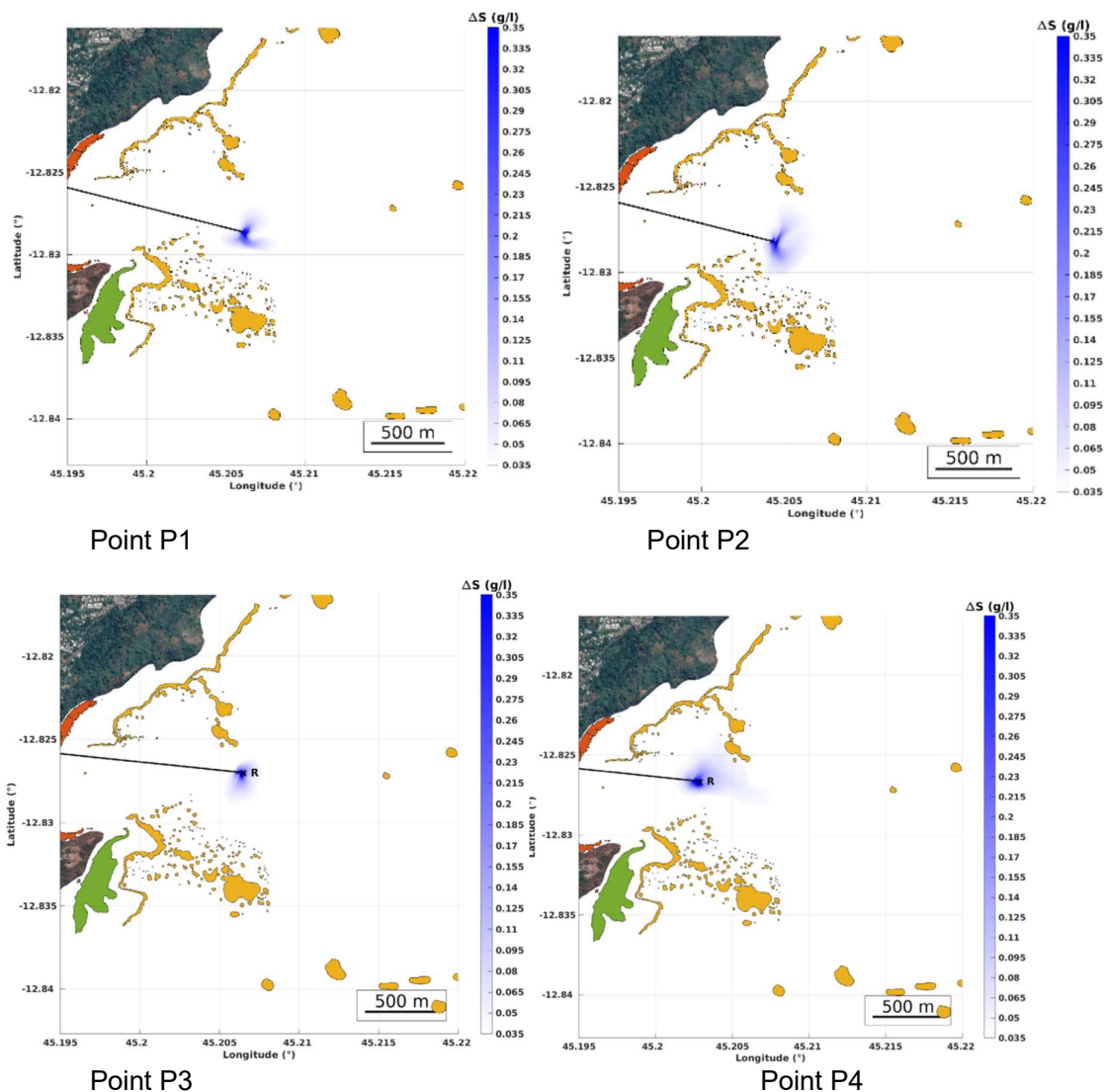


Figure 5 – panaches des sursalinités après 15 jours pour les différents points de rejet

C'est au Point P4 que le panache de sursalinité est plus étendu – mais sans atteindre les habitats sensibles. Les résultats sont confirmés pour un rejet à 70g/l. On n'observe pas d'effet



du vent sur ces résultats – ce qui est à prévoir compte tenu que le vent a peu ou pas d'influence sur les courants au fond.

Pour les autres traceurs, concentrations d'antitarte, MES etc, on observe un effet plus marqué du vent.

Les résultats les plus problématiques sont ceux obtenus par vent nul ou on observe une augmentation des concentrations en MES en fond de baie. La prise en compte des débits d'aspiration outre le risque de re aspiration des turbidités est susceptible d'aggraver encore ce problème. Le panache thermique est inexistant – ce qui peut s'expliquer du fait que l'écoulement chaud injecté au fond est un écoulement plus léger et donc se mélange sur la colonne d'eau.

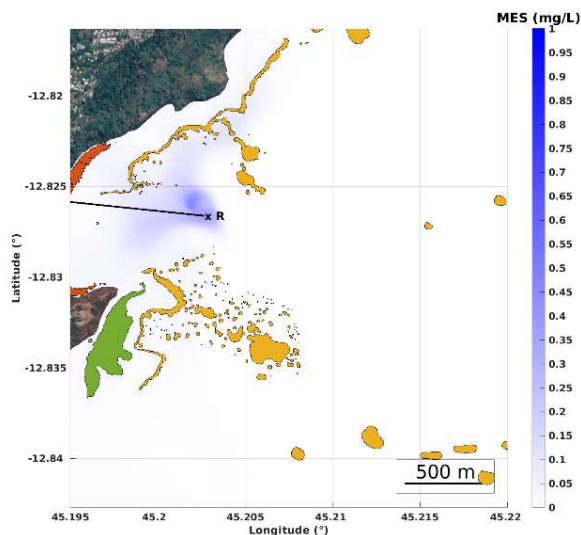


Figure 6 Concentration en MES autour du Point P4

Traitement indépendant de ces différents polluants

La méthodologie qui consiste à traiter séparément les traceurs halins et thermiques – qui influent sur la densité de l'écoulement, et les polluants MES et produits chimiques - qui sont des traceurs passifs et donc qui suivent l'écoulement, ne permet pas de tenir compte des interactions entre les rejets de polluants et les courants de densité.

Les polluants sont en effet des traceurs passifs et donc suivent l'écoulement et le panache halin.

Simulation long terme et conservation de la masse

Compte tenu des volumes de sel rejeté dans le milieu marin, il paraît surprenant que l'on n'observe pas d'effet cumulatif surtout compte tenu des faibles courants en fond de baie.

Des calculs de flux entrant et sortant au niveau de la frontière maritime permettraient d'expliquer si le renouvellement des eaux dans la baie permet d'expliquer ce résultat.

Surestimation de la dilution

Le choix du modèle de turbulence (Smagorinski) n'est pas justifié et n'est pas classique.



Ce modèle qui suppose la diffusion proportionnelle à la taille des mailles est en effet peu utilisé pour les écoulements côtiers et une analyse de sensibilité doit être réalisée.

La diffusion numérique augmente avec la taille des mailles ce qui favorise les mélanges. Une analyse de sensibilité des résultats du modèle à la taille des mailles horizontales et verticale est donc recommandée. La précision des résultats aux Points P2 et P1 (30m environ) est particulièrement questionable.

Etude du champ proche

D'après le

Tableau 3 en Annexe, la zone d'impact des sursalinités est estimée à moins de 50m. Mais la taille des mailles et la représentation des points sources ne permettent pas de représenter finement le jet et les processus de mélange en sortie des diffuseurs et donc de modéliser le champ proche et l'étendue des sursalinités.

5.3. Etudes complémentaires recommandées

Bilan de masse

Les simulations long terme sur 1 an ne permettent pas de mettre en évidence d'effet cumulatif. Ce résultat surprenant compte tenu des volumes de saumure rejetés sur un an peuvent s'expliquer par le bilan de masse : quels sont les volumes de matière évacuée par les flux au cours du jusant ; quelle est la variation globale de masse en plusieurs zones du lagon. Cette étude permettra aussi de vérifier que les calculs réalisés sont bien conservatifs.

Prise en compte des stratifications verticales

Les courants de densité, générés par les rejets de saumure, peuvent être transportés sur le fond sur des distances importantes.

Les calculs doivent être réitérés en considérant des hypothèses plus réalistes sur la concentration en sel du lagon (35 g/l au lieu de 36.6 g/l) afin de ne pas minimiser l'effet des sursalinités.

La modélisation des stratifications nécessite un maillage plus raffiné sur la verticale.

Le modèle de turbulence doit prendre en compte l'effet des stratifications par un modèle adapté (modèle k-eps ou fonction d'amortissement).

Etude de sensibilité

En l'absence de données de validation, une étude de sensibilité des résultats numériques aux différents paramètres numériques est requise **pour justifier les choix de modélisation**. Cette analyse devrait comporter en particulier une étude de sensibilité des résultats par rapport à la résolution verticale et au modèle de turbulence.

Etude du champ proche

La représentation de l'écoulement en sortie des diffuseurs nécessite un traitement particulier (position de plan fixe au niveau des points sources et des vitesses des jets en sortie).

La modélisation actuelle suppose un mélange homogène des rejets dans la maille de fond soit donc sur 2m50 de hauteur et ne permet pas de reproduire les panaches dans la zone de



rejet. Les points de rejet P1 et P2 sont particulièrement mal représentés (taille des mailles de l'ordre de 30 m)



6. Conclusions

Cette étude présente des inexactitudes, notamment sur la taille des mailles et la profondeur au niveau des points de rejet. Par ailleurs la validation hydrodynamique considérée comme satisfaisante mais reste qualitative (pas d'estimation des erreurs).

Pour la modélisation des rejets, les choix de modélisation et la résolution verticale du modèle ne permettent pas de reproduire la dynamique des écoulements en sortie des diffuseurs ni les effets de stratification qui gouvernent l'étendue du panache de saumure. En l'absence de données de validation, une étude de sensibilité des résultats (tests du maillage, du modèle de turbulence, résolution verticale) serait requise pour justifier les choix de modélisation.

Les choix de modélisation tendent généralement à **augmenter la dilution du panache** et donc à **minimiser l'impact environnemental des rejets**.

Des études complémentaires doivent être impérativement mises en place pour améliorer la qualité des résultats et répondre aux questions suivantes.

Q1/ Quels processus physiques ont été considérés dans la modélisation ? Est-ce que tous les processus pertinents ont été pris en compte correctement ?

Les différents choix de modélisation (salinité du milieu, le modèle de turbulence, résolution verticale) tendent à augmenter la dilution du panache et donc à minimiser les concentrations. Les effets de stratification du panache de saumure ne sont pas pris en compte correctement.

Q2/ Est-ce que le modèle a été forcé par tous les forçages océanographiques, météorologiques, bathymétriques et de nature des fonds pertinents ?

Le choix s'est porté sur 3 situations météorologiques types mais le vent a un effet négligeable sur l'écoulement au fond. La bathymétrie au niveau du point P4 est de 17 m et donc ne respecte pas le critère de 18 m minimum par marée basse.

Q3/ Est-ce que les conditions de forçage sont représentatives de la réalité du lagon ?

A priori oui (pas de validation des amplitudes de la marée et le flux sortant en passe S est probablement surestimé)

Q3/ Est-ce que le modèle hydrodynamique a été correctement calibré avec des données in-situ ? La validation est-elle acceptable, considérant l'état de l'art ?

La validation comporte des lacunes (pas de validation sur les niveaux notamment) mais est globalement acceptable. Il conviendrait de quantifier les erreurs moyennes pour comparer avec d'autres modèles (particulièrement celui du MIO).

Par contre le fait que les courants de jusant dans la passe en S soient surestimés est problématique car le modèle favorise alors l'expulsion des polluants et le renouvellement des masses d'eau dans le lagon.

Q3/ La durée des simulations est-elle suffisante, considérant les temps de résidence du lagon ? Comment ces temps de résidence ont-ils été estimés ? Est-il démontré que la durée des simulations est suffisamment longue pour représenter un état de convergence dynamique ?



Les simulations sur une durée d'un an ne permettent pas de mettre en évidence d'effet cumulé. Un bilan de masse global (flux entrant, flux sortant etc) permettrait de mieux comprendre la dynamique générale.

Q4/ Les conclusions de l'étude sont-elles bien supportées par les résultats du modèle?

Les résultats obtenus tendent à minimiser l'effet des rejets.

La présentation même des résultats en sursalinités dépend du choix arbitraire d'un seuil acceptable en deçà duquel les effets du panache sont négligeables. La valeur de ce seuil en sursalinité est fixée à 0.35 g/l (soit près de 37g/l en accord avec la valeur de 36.6 g/l sur la salinité du lagon) sans justification.

Q5/ Quelles études complémentaires sont recommandées pour apporter des réponses aux questions environnementales ?

Des études complémentaires sont recommandées pour représenter finement le champ proche en sortie des diffuseurs et prendre en compte les effets de stratification.

Des études de sensibilité des résultats du modèle sont recommandées pour justifier les choix de modélisation.



7. Références

- [1] CREOCEAN , Modélisation des rejets dans le lagon de Mayotte, Rapport N° 221288, Sept 2024.
- [2] Etude de l'hydrodynamisme du lagon de Mayotte - Elaboration d'un modèle opérationnel et multitâches - Caracterisation de la zone d'étude, Rapport de Phase 1, CASAGEC Ingénierie, Janv. 2022.
- [3] Baills J., Rihouey D., Foulquier C., Dinhut V., Lelabousse C., «Etude de l'hydrodynamisme du lagon de Mayotte : Elaboration d'un modèle opérationnel et multitâches,» *Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, n° %1DOI:10.5150/jngcgc.2022.001, 2022.
- [4] Atlas des résultats du modèle du PNMM, CASAGEC
- [5] Martin L. Gouze E., Durand N. Razafindrakoto E., Hervouet JM, Pham CT, Sferratore A., Modélisation tridimensionnelle de l'hydrodynamisme et de la biogéochimie de l'étang de Berre Construction d'un outil de connaissances et d'aide à la décision, Les Actes des Rencontres Scientifiques autour de l'Etang de Berre, 14-15 Mars 2011, Pp. 314-342.
- [6] Réalisation d'une usine de potabilisation par dessalement sur Grande Terre à Ironi Bé Note sur le dimensionnement de l'usine, Cyathea-N°2228-note-non-technique, Sept. 2024.
- [7]
- [8] Etude de définition d'une usine de dessalement sur Grand-Terre Lot 1, Rapport de Modélisation MOI 822C34, Dec 2023.

Telemac3d User Manual , release v8p5, Dec 2023 (www.opentelemac.org)



ANNEXE 1 - Bathymétrie et position des rejets

Tableau 1 : Coordonnées des différents points de rejets

Les coordonnées cartésiennes sont en UTM 38S) ; La profondeur a été calculée en repérant la position des rejets sur le maillage ; Dx est la taille des mailles au niveau du rejet.

	Lat °S	Lon °E	XX m	YY m	Profondeur m	Dx m
P1	12.828640	45.206153	5.2237e+05	8.5818e+06	24	30
P2	12.828205	45.204373	5.2218e+05	8.5819e+06	22	30
P3	12.826970	45.206318	5.2239e+05	8.582e+06	23	4
P4	12.826617	45.202674	5.2199e+05	8.582e+06	17	4

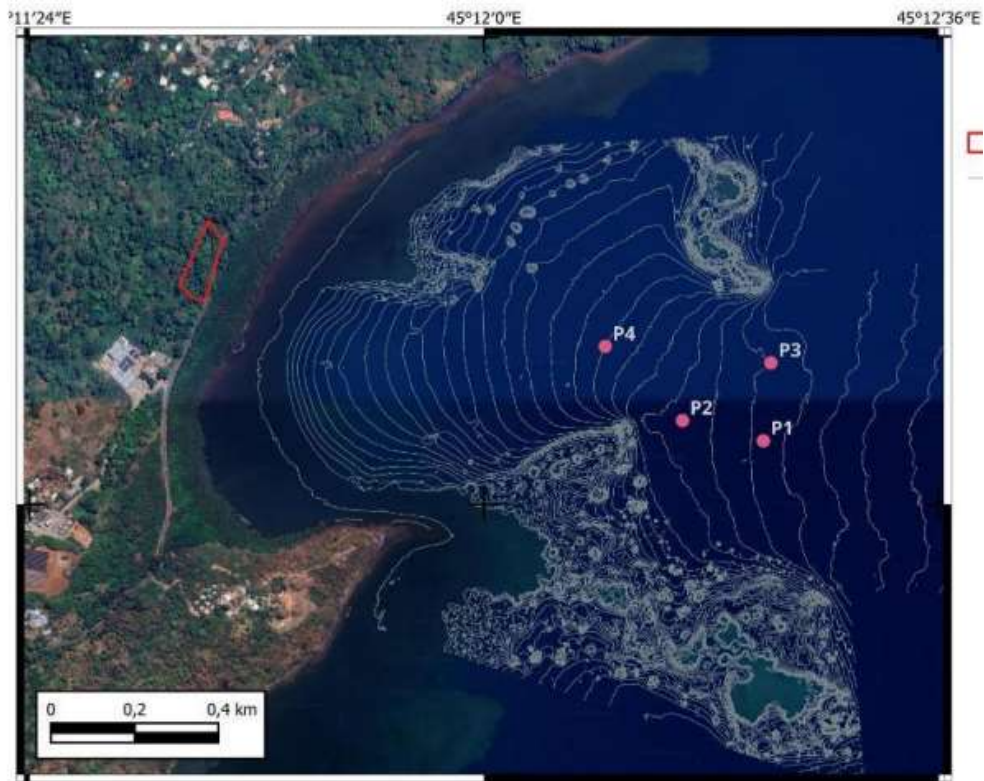


Figure 7 : Position des points de rejet d'après [1]



ANNEXE 2

FICHIER DE CONFIGURATION POUR LES CALCULS HYDRODYNAMIQUES

Pas de temps : 5s

Nbre de niveaux: 9

Forçage Marée: Tpx h_tpxo9.v1 et u_tpxo9.v1

Pas de Bancs couvrants

TRAITEMENT DES HAUTEURS NEGATIVES: control du flux

OPTION POUR LES FRONTIERES LIQUIDES: méthode de Thompson

LOI DE FROTTEMENT SUR LE FOND: formule Nikuradse

COEFFICIENT DE FROTTEMENT POUR LE FOND= 0.01

MODELE DE TURBULENCE VERTICAL : **Smagorinski**

MODELE DE TURBULENCE HORIZONTAL: **Smagorinski**

MODELE DE LONGUEUR DE MELANGE : Tsanis

CORIOLIS : YES

SCHEMA POUR LA CONVECTION DES VITESSES: characteristics

SCHEMA POUR LA CONVECTION DE LA HAUTEUR: conservative scheme

VERSION NON-HYDROSTATIQUE: YES

STOCKAGE DES MATRICES : edge-based storage

TRAITEMENT DES FLUX AUX FRONTIERES: priority to fluxes.

LOI DE FROTTEMENT SUR LES PAROIS LATERALES: formule Nikuradse

SCHEMA POUR LA CONVECTION DES TRACEURS: explicit + MURD scheme PSI,



ANNEXE 3 – Validation hydrodynamique

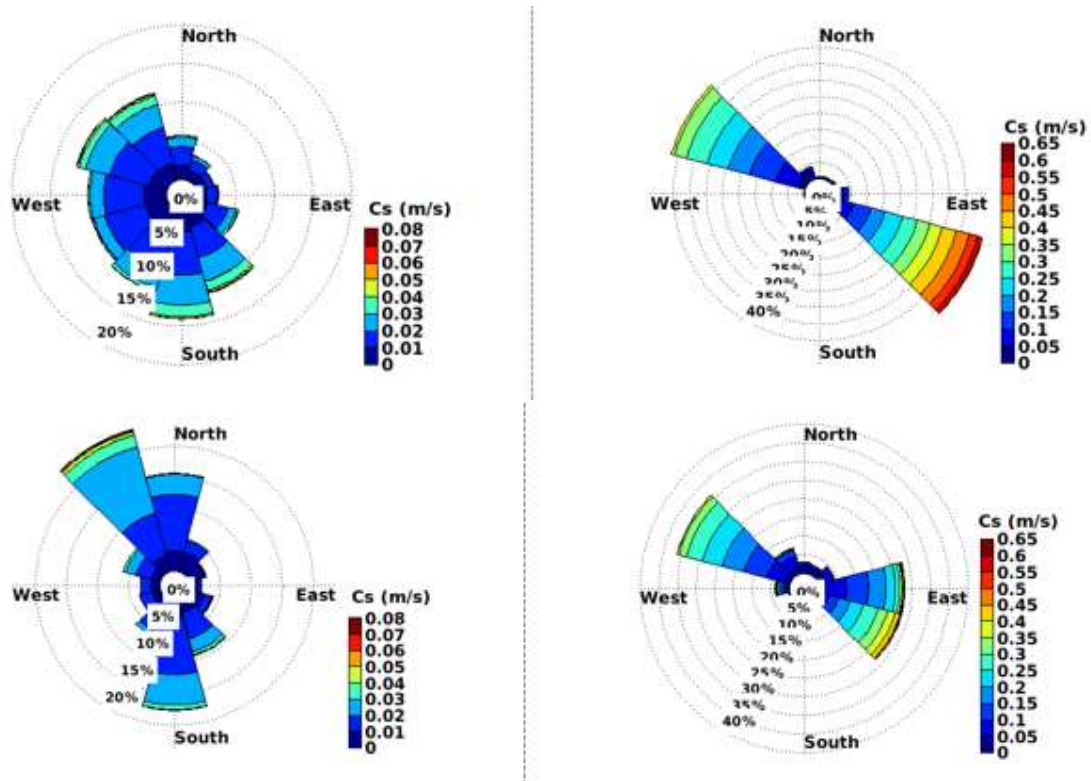


Figure 8-Distribution des courants moyennés sur la verticale pendant une période de 3 mois Aout-Oct 2023

Les figures du haut représentent les courants mesurés à la côte (à gauche) et au large(à droite) .
Celles du bas les résultats du modèle.



ANNEXE 4 – Condition des rejets

Les rejets se font par le biais de 5 diffuseurs

Les 5 diffuseurs sont répartis le long de la canalisation de rejet sur une distance de 36m soit 9 m d'écart entre chaque diffuseurs.

Tableau 2 – Schéma de principe des rejets extrait de [1])

Production d'eau traitée	(m ³ /j)	10 000 m³/j
Pompage eau de mer	(m ³ /j)	22 789 m ³ /j

Conversion globale de l'usine	(%)	43.9%
Rejets en fonctionnement à diluer	(m ³ /j)	12 789 m ³ /j
Facteur de concentration		1.782
Salinité	(g/L)	65.2 g/L

Diffuseurs		5
Volume par sortie pour diffusion	(m ³ /j)	12 789 m ³ /j
Volume par diffuseur pour diffusion	(m ³ /j)	2 558 m ³ /j
Distance entre 1 et 2	(m)	4 m
Distance entre 1 et 3	(m)	8 m
Distance entre 1 et 10	(m)	36 m
Disposition		

Le Tableau suivant est extrait de la note de principe du projet [6]. Le dimensionnement précis des diffuseurs (espacement, diamètre, position) n'est pas mentionnée dans le dossier de spécification – Cependant un espacement minimum de 4m et un rejet alterné sont recommandés ainsi qu'une orientation des jets à 55° vers la surface afin d'optimiser la dilution en sortie des diffuseurs.

Tableau 3 – Spécification des points de rejet d'après [6]



	P1 (PFD)	P2	P3	P4
Critères techniques				
Linéaire approximatif	1370 m	1175 m	1360 m	965 m
Contraintes travaux	Epaisseur de vase supplémentaire à traverser pour les pieux	Epaisseur de vase supplémentaire à traverser pour les pieux	Epaisseur de vase supplémentaire à traverser pour les pieux	Epaisseur de vase minimale
Durée de la phase vibrofonçage des pieux	5 mois	4,5 mois	7 mois	4 mois
Profondeur du rejet	-25m	-23,5m	-25m	-20m
Distance aux écosystèmes proches	320m	170m	180m	300m
Sursalinité maximale sur les écosystèmes à enjeux les plus proches	0% au fond et en surface	0,05 g/L soit 0,14% au fond 0% en surface	0% au fond et en surface	0,05 g/L soit 0,14% au fond 0% en surface
Rayon de sursalinité >1%	45m	45m	45m	50m





Dr Catherine VILLARET
Independent Expert
Coastal Modeler & TELEMAC developer

More than 30 years of experience :

- ✓ Wave and currents interactions in the coastal zone,
- ✓ Turbulent flow and sediment transport modelling,
- ✓ Impact of coastal structures,
- ✓ Uncertainty and sensitivity analysis.

Academic background

- 1997 **Habilitation à Diriger des Recherches** (Université de Caen)
1987 **Ph.D.** in Physical oceanography, Université Joseph Fourier (Grenoble)
1984 **Engineer degree**, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur d'Hydraulique (Grenoble)

Positions

- 2018 - Independent Consultant (Start-up Mobidyc founded in 2021)
2012 - 2017 Associated Researcher at the Laboratoire d'Hydraulique St Venant (Chatou)
2014 - 2016 Principal Engineer at Hydraulic Research Wallingford (UK)
1992 - 2014 Research Engineer, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (EDF R&D, Chatou)
1990-1992 Post Doctoral Researcher at Woods Hole Oceanographic Institution (USA)

Expertise

- 2016-2018 Scientific committee member (CREST project, www.crest.eu.be)
2010-2016 Telemac scientific committee member
2001-2016 Telemac developer (responsible of the sediment transport module SISYPHE)
2016, 2021 Telemac Training for BE2T (Perpignan), ANTEA (Antwerp, UK)
2014 Organisation of Telemac summer school (HR Wallingford)

Commercial Projects

- 2022 - 2024 Offshore Wind Projects
✓ Review of coastal modelling projects (Deltares, Actimar)
Client : ABL (UK)
✓ Development of a coastal flow and sediment transport model for a UK Wind farm development
(Outer Dowsing, Total Energy)
✓ Expertise on the risks of scour development around structures
Client: ABL (UK)
- 2022 - 2024 Coastal structures design (risk of coastal erosion and inundation)
✓ Design of coastal path and risks of inundation (Mairie de St Raphael)
✓ Numerical model development and risks of inundation (Garbero, Mairie de Antibes)
- 2020 - 2022 Pollution and water quality modelling
✓ 3D modelling of the impact of fishfarm development on water quality issues (Cannes Aquafrais, Client CREOCEAN)
✓ 3D modelling of the fine sediment dispersion (Trouville, Society D2E)

Selected Journal Publications

Villaret C., Kopmann R., Wyncoll D., Riehme J., Merkel U., Naumann U. (2016): First-order Uncertainty Analysis using Algorithm Differentiation of the TELEMAC 2D/Sisyphé Morphodynamic Model, *Computers and Geosciences*, Vol. 90, Part B, 144-151, ISSN 0098-3004, doi: 10.1016/j.cageo.2015.10.012.

Villaret C., Hervouet J.M., Kopmann R., Merkel U., Davies, A.G. (2013): Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system, *Computers & Geosciences*, Vol. 53, 105-113, ISSN 0098-3004, DOI: 10.1016/j.cageo.2011.10.004

Davies A.G., Villaret C. (2002): Prediction of sand transport rates by waves and currents in the coastal zone, *Continental Shelf Research*, 22, pp. 2725-2737.

Davies AG., Villaret C. (1999): Eulerian drift induced by progressive waves above rippled and very rough beds, *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, n°C1, Jan.15.

Villaret C., Davies, A.G. (1995): Modelling of sediment-turbulent flow interactions, *Applied Mechanics Review*, Vol. 48, N°9, ASME, 601-609.

Villaret C., Trowbridge J. (1991): Effects of suspended sediment stratification on openchannel flow, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. C6, 10659-1068

Sheng, Y.P. and Villaret, C. (1989): Modeling the Effect of Suspended Sediment Stratification on Bottom Exchange Processes. *Journal of Geophysical Research*, 94(10), 14429.

Telemac User conference Proceedings

Villaret C., Avdis A., Rushton D., Mills A. (2018): The effect of mesh size and bed roughness on the simulation of sediment transport off the east coast of Norfolk, 25th TELEMAC-MASCARET User Club (TUC-2018), UK, 9-11 Oct 2018.

Villaret C., Goeury C., Knaapen M., Riehme J., Merkel U., Nauman U. (2015): First-Order uncertainty Analysis using AD: 2D Application, 22nd TELEMACMASCARET User Club (TUC-2015), UK, pp. 36-43.

Benson T., Villaret C., Kelly D., Baugh J. (2014): Improvements in 3D sediment transport modelling with application to water quality issues, 21st TELEMACMASCARET User Club, (TUC-2014), France.

Villaret, C., Van, L.A., 2012, User Manual of cohesive sediment transport in Sisyphé, release 6.2.

Destinataires : Direction des outre-mer/Parc naturel marin de Mayotte (PNMM)
Direction des outre-mer/Service police
Rédacteur : Camille Détrée, Chargée de mission « écotoxicologie et
bioindication appliquée aux milieux littoraux » (DRAS/EcoAqua)
Relecteur : Olivier Perceval, Chef de service (DRAS/EcoAqua)

Objet: Impacts potentiels des rejets de saumures issus d'une usine de potabilisation par dessalement sur Grande Terre, à Ironi Bé

Suite à l'examen de l'étude d'incidence environnementale (EIE) et de la note détaillée annexée au CERFA AEU fournies par le PNM Mayotte, vous trouverez ci-dessous nos observations et commentaires relatifs aux effets potentiels des effluents aqueux rejetés lors de la phase d'exploitation de l'usine de dessalement sur la qualité des eaux côtières et leurs impacts sur les biocénoses littorales et marines. Bien qu'ils aient un impact sur la qualité des eaux, les paramètres physico-chimiques (tels que la température, le pH, la salinité et la matière en suspension) ne feront pas l'objet d'une évaluation approfondie car ils ne relèvent pas du domaine d'expertise principal des auteurs.

Observations générales

Les documents examinés révèlent un certain manque de transparence et d'informations sur plusieurs aspects essentiels :

- **sur les substances utilisées** : Absence d'une liste précise des substances chimiques, de numéros CAS permettant leur identification, ou de composition exacte des produits chimiques utilisés lors de la phase d'exploitation ;
- **sur les impacts potentiels de certaines substances chimiques utilisées en phase d'exploitation** : notamment les composés organo-halogénés adsorbables sur charbon actif (AOX), les produits antitartres, ainsi que certains paramètres excédant le niveau de référence R1 dans les eaux de rejet (azote et phosphore totaux) ;
- **sur les paramètres intégrés dans les différents modèles proposés et sur le choix du pas de temps** (15 jours, à l'exception de la salinité), dont la pertinence est discutable. Par exemple, le document d'incidence ne fournit aucun renseignement sur les substances contenues dans l'antitartre, laissant en suspens la question de la pertinence d'une modélisation qui n'intègre ni le comportement des substances en milieu aquatique, ni leur densité, solubilité ou leur dégradabilité dans l'environnement et les matrices réceptrices.

Au-delà du manque d'information, l'étude d'incidence environnementale présente certaines imprécisions, erreurs et approximations dont les quelques exemples suivants :

- p 286, concentration d'antitartre dans les rejets est de 1,9 mg/L et p 344 de 2 mg/L
- p 291 « Le pH du rejet sera quasiment neutre (7,2 unités de pH en moyenne), ce qui est inférieur à la salinité moyenne de l'eau de mer ». *Notons que, bien que proche de la neutralité, le pH sera plus acide que l'eau de mer et donc inférieur à l'alcalinité moyenne.*
- p 346 « Une autre étude a montré que les effets sur le corail *Montipora capricornis* d'un séquestrant à base de polyphosphonates sont plus importants que ceux d'un séquestrant à base de polymère (Montes et al. 2023). Ce dernier a toutefois un effet négatif sur les tissus coralliens, sans que les concentrations testées soient indiquées ». *Les auteurs ont mentionné observés des effets négatifs sur les tissus coralliens à une concentration de **0,025 mL/L**, par ailleurs l'étude en question est signée par Marques et al., 2023 et non Montes et al., 2023.*

Ces différents points complexifient l'étude des potentiels impacts des substances chimiques qui seront utilisés sur le milieu marin côtier. De manière générale, l'étude d'impact ne reflète pas suffisamment la complexité du milieu marin, car elle n'intègre pas les variations temporelles des différents paramètres et leurs effets sur la qualité de l'eau et les biocénoses.

Etat initial de la masse d'eau concerné par les rejets

La masse d'eau FRMC12, concernée par le rejet des saumures, est suivie au titre de la Directive Cadre sur l'Eau. Elle est qualifiée dans le SDAGE (2022-2027) de ME présentant un « *état écologique médiocre, associé à des pressions et impacts moyens à forts (dont notamment assainissement, déchets, élevage et sites et sols pollués) et des scénarios tendanciels à la hausse* ». La zone de rejet est présentée dans l'EIE comme un lagon à dominance de vase avec « *une abondance et une richesse spécifique relativement faible et une dominance d'espèces opportunistes et résistantes, ce qui constitue un signe de perturbation locale de la macrofaune du sédiment* ». De plus, à 500 m de la zone de rejet se trouve une zone avec un herbier très dégradé.

Prévisions d'impacts sur la qualité des eaux côtières

Concernant les rejets, cinq substances et paramètres excèdent le niveau de référence R1, tel que spécifié dans la section dédiée aux rejets dans les eaux de surface de la Loi sur l'Eau (Tableau Référence R1, Annexe détaillée). Ces éléments incluent : les matières en suspension (MES), l'azote et le phosphore totaux, les composés organohalogénés adsorbables sur charbon actif (AOX) ainsi que les sels dissous. Malgré ces dépassements, l'azote, le phosphore total et les composés organohalogénés adsorbables n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation des impacts des rejets.

Leurs effets sont omis tant dans la section « Impacts du projet sur les eaux côtières en phase d'exploitation » que dans celle intitulée « Incidences sur les biocénoses marines ».

Azote et phosphore total

En milieu côtier, l'excès de nutriments, peut avoir de nombreuses conséquences sur les communautés benthiques et pélagiques. Des concentrations élevées de nutriments dans la colonne d'eau stimulent la production primaire, réduisant la pénétration de la lumière et sa disponibilité pour les herbiers marins (Lapointe et al., 2020 ; Lee et al., 2007), ce qui pourrait affecter la survie de l'herbier très dégradé situé à 500m du point de rejet d'Ironi Bé. L'enrichissement en nutriments peut aussi affecter la survie des communautés macrobenthiques en raison de la toxicité directe de l'ammonium ou de la réduction de la concentration en oxygène (Pascal et al., 2022). Enfin, l'excès de nutriment, surtout l'azote, peut nuire à la santé des coraux en réduisant leur résistance aux maladies et en favorisant la bioérosion, tout en diminuant leur succès reproductif (Dupuy et al., 2016).

Les composés organohalogénés adsorbables sur charbon actif (AOX)

Ils représentent la somme des composés organiques contenant du chlore, du brome et de l'iode, susceptibles d'être adsorbés sur charbon actif dans des conditions spécifiées (ISO 9562 :2004). Le niveau d'AOX constitue un indicateur couramment utilisé pour évaluer les composés néoformés résultant des réactions se produisant avec la matrice organique suite à des traitements par chlore gazeux ou hypochlorite de sodium. Concernant l'homme, les substances de ce groupe ne sont pas reconnues comme cancérigènes génotoxiques (Richardson et al., 2007 ; Moore et al., 2000). En milieu aquatique, des études en laboratoire ont révélé une diminution des taux d'attaques et du nombre de proies consommées chez le crustacé isopode exposé pendant 24 heures à des concentrations d'AOX variant de 0 à 10 400 µg Cl/L (Leonardsson, 1993), ainsi qu'une réduction significative de l'activité natatoire à une concentration d'AOX de 656 µg Cl/L (Kankaanpää et al., 1995). De plus, chez la moule *Mytilus edulis*, des tests de génotoxicité effectués en laboratoire ont montré que le taux d'anomalies nucléaires doublait après une exposition de 14 jours à une concentration d'AOX de 30 µg Cl/L (Wrisberg & van der Gaag, 1992). Ces études ont été menées en laboratoire. Cependant, compte tenu de la concentration élevée ([AOX] = 559 g/j) estimée dans les rejets de l'usine de désalinisation d'Ironi Bé, il semble impératif d'intégrer ce paramètre dans l'étude d'impact.

D'autres substances seront utilisées lors de la phase d'exploitation de l'usine : un floculant à base d'acrylamide et un antiscalant (molécule biodégradable et sans phosphate).

Floculant à base d'acrylamide

Les concentrations de rejets sont faibles (0,1 µg/L) et conformes aux normes de qualité de l'eau potable. Toutefois, l'acrylamide est classée comme une substance cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction pour l'Homme, pour des expositions chroniques ou répétées (<https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.001.067>), et les connaissances scientifiques concernant les flocculants à base d'acrylamide, ainsi que sur l'acrylamide en tant que tel en milieu marin (transfert, biodisponibilité) sont trop limitées pour permettre une évaluation de leur impact environnemental (Guzzo et Guezennec, 2015).

Antitartres

En l'absence d'informations sur l'agent antitartre utilisé, il est impossible d'en évaluer l'impact. De façon générale, les antitartres à base de polymères semblent avoir moins d'impact sur les organismes qui y sont exposés que les antitartres à base de phosphate. Ils ne sont pas inoffensifs, mais les effets sont dépendants du polymère utilisé. Comme indiqué précédemment, des dommages tissulaires ont été observés sur les tissus de coraux constructeurs de récifs à une concentration réaliste de 0,025 mL/L (Marques et al., 2023). Par ailleurs, bien que le produit soit qualifié de « biodégradable », reste à déterminer s'il l'est en milieu marin, en combien de temps, et quels métabolites en résultent. Il convient également de noter que biodégradable ne signifie pas que ce composé est exempt de toxicité, ni qu'il ne peut s'accumuler dans les tissus d'organismes bioaccumulateurs.

Conclusion et recommandations

Les informations fournies, ainsi que les connaissances scientifiques disponibles sur les substances qui seraient utilisées lors de la phase d'exploitation de l'usine de dessalement d'Ironi Bé et rejetées en mer, sont insuffisantes pour établir le niveau de risque chronique (i.e. manifestation d'effets toxiques sur le long terme) tel qu'indiqué dans l'étude d'incidence environnementale. En outre, les paramètres physico-chimiques et les substances n'agissent pas de manière isolée sur les espèces, mais interagissent entre eux avec des effets potentiellement synergiques, additifs ou antagonistes. A titre d'exemple, plusieurs études ont établi un lien entre la turbidité, de l'eau, l'excès de nutriments et une tolérance thermique réduite chez les coraux, affectant ainsi leur résistance au blanchissement (Wooldridge et al., 2009; Wiedenmann et al., 2012). Pour évaluer de manière réaliste les effets des rejets de saumures, il est essentiel de considérer ces paramètres dans leur globalité en tenant compte du fonctionnement global des écosystèmes et notamment des réseaux trophiques. Par ailleurs, le caractère chronique de l'exposition influence la réponse des biocénoses marines et ne doit pas être négligé.

Dans ce contexte, en complément de la comparaison spatio-temporelle de type BACI (Before-After-Control-Impact) ciblant les communautés coralliennes, comme proposé dans l'EIE, nous recommandons la mise en place d'un suivi des substances chimiques

et de leurs effets écotoxiques. Cette stratégie de suivi repose sur les recommandations d'Aquaref (Manier et al. , 2023), notamment pour le choix des tests d'écotoxicité, et permettrait une évaluation rigoureuse des impacts potentiels des rejets sur les écosystèmes marins.

Étant donné la nature homogène et constante des rejets au cours du temps, il est recommandé de réaliser des prélèvements de sédiments et d'eau de mer avant la mise en fonctionnement de l'usine, puis trimestriellement (soit quatre fois par an, couvrant les saisons sèche et humide)) durant les cinq premières années de fonctionnement. Ces prélèvements pourraient être effectués en plusieurs points d'échantillonnage, répartis selon un gradient de distance par rapport à la source de rejet et définis en fonction des courants locaux. Les points incluraient la zone de rejet et son panache, puis positionnés à des distances s'éloignant progressivement du panache/zone de mélange, ainsi que les environs des massifs coralliens de lagon et des récifs frangeants situés respectivement à 400 m et 500 m de cette zone.

Sur chacun de ces échantillons, les concentrations des substances chimiques utilisées dans le processus industriel (telles que l'antitartre, les flocculants à base d'acrylamide, les AOX, ainsi que l'azote et le phosphore totaux) seraient mesurées, de même que des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer, notamment la salinité, la température, et l'alcalinité. Ces mesures seraient complétées par des analyses d'écotoxicologie générale, visant au minimum **trois niveaux trophiques**. Des tests tels que l'inhibition de la croissance des algues marines (notamment avec les *Phaeodactylum tricornutum*), la détermination de la toxicité aiguë de l'eau ou des sédiments (eau interstitielle ou éluviat) à l'aide du crustacé *Artemia franciscana*, l'évaluation de la toxicité aiguë de l'eau à l'aide de lignées cellulaires de branchies de poisson (norme ISO/DIS 21115) pourraient être choisis en première intention (voir Tableau 1). A noter que les bioessais de type microbiotests peuvent être achetés sous forme de kits et sont simples d'utilisation (<https://www.l-ecotoxicite.com/gamme-microbiotests>).

Étant donné que l'acrylamide est classée comme une substance cancérigène, mutagène et reprotoxique pour l'Homme, et que les AOX présentent une génotoxicité avérée chez les moules, il est par ailleurs conseillé de réaliser des tests spécifiques pour déceler des effets mutagènes et reprotoxiques, selon la même périodicité. Une stratégie de type REACH pourrait être adoptée, impliquant systématiquement un test de génotoxicité sur lignées cellulaires de branchies de poisson. En cas de résultat positif, des tests complémentaires comme le test des micronoyaux, pourraient être effectués (Tableau 1).

Enfin, un suivi de la composition (diversité, abondance) des communautés phytoplanctoniques, réalisé en amont et pendant la phase d'exploitation, permettrait d'identifier l'impact potentiel de l'excès de nutriments sur la structure et la dynamique de la communauté pélagique.

Tableau 1. Exemples d'essais d'écotoxicité applicables sur des eaux marines.

Type de bioessais	Niveau trophique Groupe taxonomique	Nom de la méthode	Durée de l'exposition	Aigu (A) Chronique (C)	Référence normative
<i>In vivo</i>	Bactérie	Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of <i>Vibrio fischeri</i>	30 min	A (toxicité générale)	ISO 11348-1:2007 ISO 11348-2:2007 ISO 11348-3:2007
Microbiotest	Algue	ALGALTOXKIT M: Marine Algal toxicity test for toxicity screening of effluents with high conductivity values Growth inhibition test with the marine microalgae <i>Phaeodactylum tricornutum</i>	72 h	C (toxicité générale)	
<i>In vivo</i>	Algue	Growth inhibition test with the marine and brackish water macroalgae <i>Ceramium tenuicorne</i>	7 j	C (toxicité générale)	ISO 10710:2013
Microbiotest	Rotifère	ROTOXKIT M: Determination of the acute toxicity to the marine rotifer <i>Brachionus plicatilis</i>	24 h-48 h	A (toxicité générale)	
Microbiotest	Crustacé	ARTOXKIT M: Acute toxicity test with the marine crustacean <i>Artemia Franciscana</i>	24 h	A (toxicité générale)	
<i>In vivo</i>	Crustacé Copépode	Harpacticoid copepod development and reproduction test with <i>Amphiascus Tenuiremis</i>	36 j	C (toxicité générale)	OECD Guidance Document 201:2014
<i>In vivo</i>	Mollusque bivalve	Determination of the toxicity of water samples on the embryo-larval development of Japanese oyster	24 h et 48 h	A (toxicité générale)	ISO 17244:2015

		(<i>Crassostrea gigas</i>) and mussel (<i>Mytilus edulis</i> or <i>Mytilus galloprovincialis</i>)			
<i>In vitro</i>	Poisson	Determination of acute toxicity of chemicals and water samples to a fish gill cell-line (SAF1 marine fish)	24 h	A (cytotoxicité)	ISO/DIS 21115
<i>In vitro</i>	Poisson	<i>In vitro</i> fish cell comet assay (SAF1 marine fish)	3 h	A (génotoxicité)	
<i>In vitro</i>	Poisson	<i>In vitro</i> fish cell micronucleus test (SAF1 marine fish)	4 h	A (génotoxicité)	

Références

Duprey, N. N., Yasuhara, M., & Baker, D. M. (2016). Reefs of tomorrow: eutrophication reduces coral biodiversity in an urbanized seascape. *Global change biology*, 22(11), 3550-3565.

Guzzo, J., & Guezennec, A. G. (2015). Degradation and transfer of polyacrylamide based flocculent in sludge and industrial and natural waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 6387-6389.

Kankaanpää H., Lauren M., Mattson M. & Lindström M. (1995). Effects of bleached kraft-mill effluents on the swimming activity of *Monoporeia affinis* (crustacea, amphipoda). *Chemosphere*, 31, pp. 4455-44

Lapointe, B. E., Herren, L. W., Brewton, R. A., & Alderman, P. K. (2020). Nutrient over-enrichment and light limitation of seagrass communities in the Indian River Lagoon, an urbanized subtropical estuary. *Science of the Total Environment*, 699, 134068.

Leonardsson K., 1993. Long-term ecological effects of bleached pulp-mill effluents on benthic macrofauna in the gulf of Bothnia. *Ambio* 22, pp. 359-362.

Marques, J. A., Gafni, A., Adler, O., Levy, O., & Bar-Zeev, E. (2023). Antiscalants used in the desalination industry impact the physiology of the coral *Montipora capricornis*. *Water Research*, 229, 119411

N. Manier, S. Aït-Aïssa, P. Pandard (2023) Inventaire et évaluation des méthodes biologiques issues de l'écotoxicologie en vue de leur utilisation dans le cadre de la DCE – Rapport AQUAREF 2023 – 67 p.

Moore M.M, K. Harrington-Brock (2000). Mutagenicity of trichloroethylene and its metabolites: implications for the risk assessment of trichloroethylene, *Environ. Health Persp.* 108 (Suppl. 2): 215–223.

Pascal, L., Chaillou, G., Nozais, C., Cool, J., Bernatchez, P., Letourneux, K., & Archambault, P. (2022). Benthos response to nutrient enrichment and functional consequences in coastal ecosystems. *Marine Environmental Research*, 175, 105584.

Qualité de l'eau – Dosage des composés organiques halogénés adsorbables (AOX). <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:9562:ed-3:v1:fr>

Richardson SD, Plewa MJ, Wagner ED, Schoeny R, Demarini DM. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutat Res.* 2007 Nov-Dec; 636(1-3):178-242;

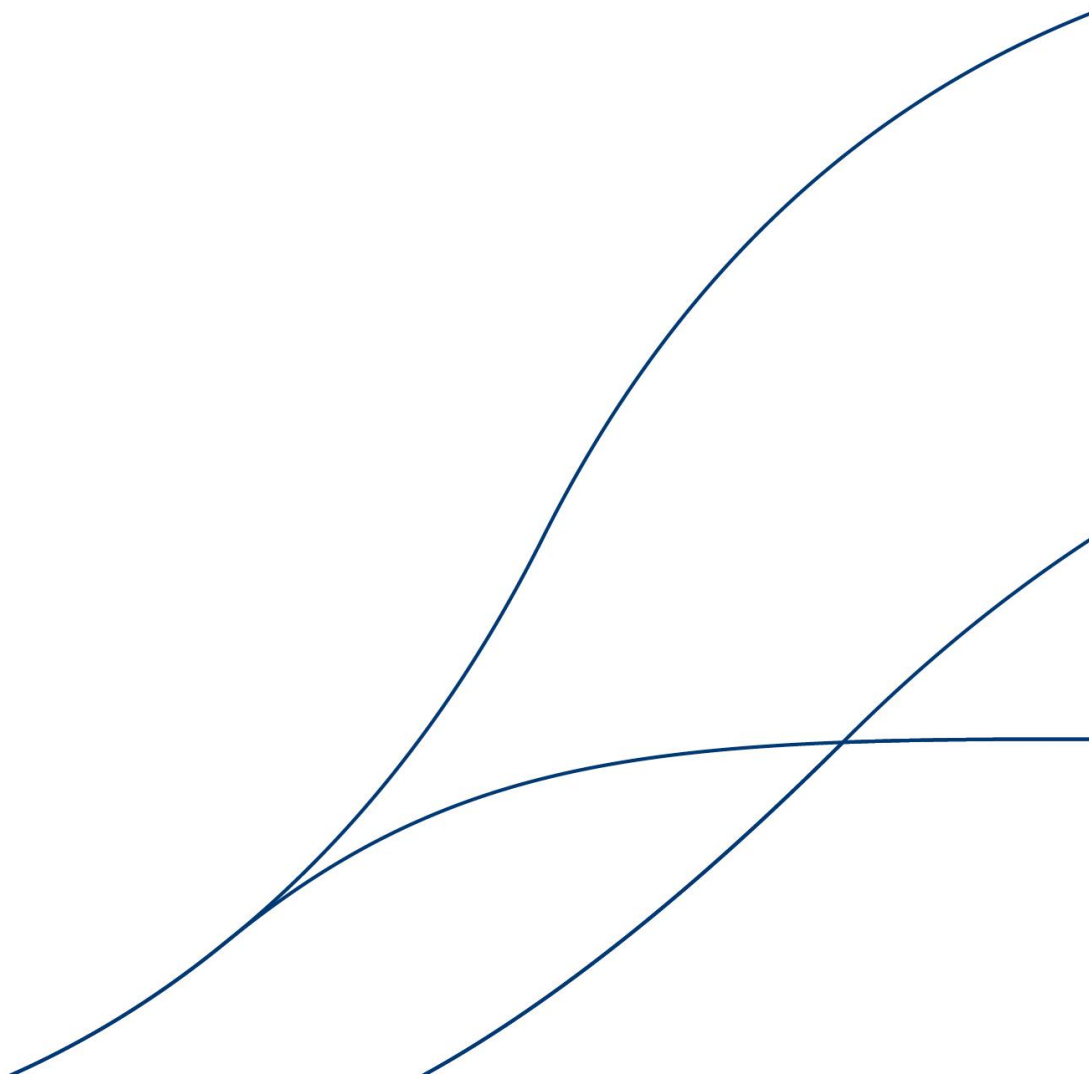
Wiedenmann J, D'Angelo C, Smith EG, Hunt AN, Legiret F-E, Postle AD, Achterberg EP (2012) Nutrient enrichment can increase the susceptibility of reef corals to bleaching. *Nature Climate Change*, 3, 160–164.

Wooldridge SA (2009a) Water quality and coral bleaching thresholds: formalising the linkage for the inshore reefs of the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 745–751.

Wrisberg M.N. & van der Gaag M.A., 1992. In vivo detection of genotoxicity in wastewater from a wheat and rye straw paper pulp factory. *The Science of the Total Environment* 121, pp. 95 – 108.

N. Manier, S. Aït-Aïssa, P. Pandard – Inventaire et évaluation des méthodes biologiques issues de l'écotoxicologie en vue de leur utilisation dans le cadre de la DCE – Rapport AQUAREF 2023 – 67 p.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES EFFETS DE SAUMURES ISSUS D'USINE DE DESSALEMENT SUR LE BIOTA MARIN



Contexte

Le présent document vise à évaluer *via* une analyse bibliographique, les effets des rejets de saumures sur les organismes marins. La recherche bibliographique a été effectuée à l'aide des mots-clés suivants : « impact » ou « effects » ou « toxicity » associés à « brine discharge », « desalination plant » ou « seawater desalination » et « marine biota » ou « marine organisms ». Afin d'élargir le champ des études recensées, une recherche plus ciblée a ensuite été menée pour identifier les publications évaluant les effets des substances utilisées dans les usines de dessalement, en s'appuyant sur les combinaisons de termes « toxicity » ou « effects » ou « impact » avec « antiscalant », « chlorine », « antifouling », « chlorination agents » ou « coagulant ».

Les impacts sont présentés à différentes échelles du vivant. Dans un premier temps, un résumé des études effectuées en milieu naturel (*in situ*) sera présenté et permettra d'appréhender les effets des rejets de saumures sur la structure, la diversité et l'abondance spécifique des assemblages et communautés. Puis les effets physiologiques et écotoxicologiques des variations de salinité induites par le rejet de saumure et l'utilisation de substances chimiques favorisant le bon fonctionnement des installations seront présentés. Cette seconde partie se focalisera donc sur des études en milieu contrôlé, à l'échelle des individus et populations. Finalement des recommandations permettant de limiter l'impact des rejets seront présentés en dernière partie.

1. Effets du rejet des saumures

1.1. Composition

Une vaste gamme de composés chimiques est employée dans les procédés de dessalement afin de surmonter divers défis techniques tout en optimisant les performances des installations.

Ces composés sont généralement répartis en deux catégories : « en ligne » et « hors ligne ». Les produits chimiques « en ligne » sont injectés directement dans le flux d'eau pendant le processus de dessalement actif et maintiennent les performances de l'installation en continu, en prévenant des problèmes tels que l'encrassement biologique ou l'entartrage et comprend des antiscalants, agents de chloration, de déchloration, coagulants et flocculants. Les produits chimiques « hors ligne » sont utilisés lors des opérations de maintenance, lorsque l'usine ou certaines parties de l'installation sont temporairement mises hors service. Ces produits, souvent plus puissants, sont employés pour des nettoyages en profondeur, comme la dissolution des dépôts et salissures sur les membranes de filtration (33, 34).

1.2. Etudes *in situ*

Office français de la biodiversité

Site de Brest

16 quai de la Douane

CS 42932

29229 Brest Cedex 2

Ces études en milieu naturel ont été menées en effectuant un état des lieux avant et après la mise en place d'une usine de dessalement (BACI : Before-After Control Impact), ou le long d'un transect (plus ou moins proche de la zone de rejet).

Quel que soit le site considéré, l'impact des rejets de saumures issus d'usine de dessalement sur les communautés benthiques est majoritairement négatif (Tableau 1.). Les rejets semblent favoriser les espèces résistantes au détriment d'espèces plus sensibles, induisant une perte d'abondance de ces dernières ainsi qu'une diminution de la diversité taxonomique. En ce qui concerne les communautés pélagiques (phytoplancton, zooplancton, assemblages de poissons), les effets des rejets sont plus contrastés voire nuls. Les espèces benthiques sont plus fortement affectées du fait de la densité de la saumure et de par leur mobilité, plus réduite que la majorité des espèces pélagiques nectoniques. La densité de la saumure étant plus élevée que celle de l'eau de mer, l'eau hypersalée se concentre proche des fonds.

Tableau 1. Récapitulatif des principales études *in situ* portant sur les effets des rejets de saumures et les principales conclusions et impacts.

Espèces/ Communauté	Situation géographique	Principales conclusions	Impact	Réf.
Echinodermes, polychètes et amphipodes	Mer Méditerranée (Espagne)	<ul style="list-style-type: none"> A proximité de la décharge de saumure, les échinodermes ont disparu, les amphipodes sensibles ont diminué, et les polychètes tolérants ont augmenté 	-	1
Polychètes, bryozoaires, éponges	O. Pacifique (Australie)	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de l'abondance des polychètes, bryozoaires et éponges (jusqu'à 100 mètres du point de déversement) Augmentation de l'abondance de balanes près du point de rejet. 	-	2
Communautés macrobenthiques	Mer Méditerranée (Espagne)	<ul style="list-style-type: none"> Le suivi (avant-après établissement d'une UD) n'a révélé aucun changement significatif de la macrofaune lié aux rejets de saumure 	0	3
Communautés des fonds meubles (macrofaune)	Mer Méditerranée (Espagne)	<ul style="list-style-type: none"> Diminution du nombre de groupes taxonomiques et de la diversité des assemblages macrofauniques à proximité de l'exutoire de l'UD L'abondance des nématodes a augmenté (groupe tolérant) 	-	4

Macrofaune	O. Atlantique (Iles Canaries)	<ul style="list-style-type: none"> Différences significatives dans l'abondance, la structure des communautés et la diversité de la faune macrobenthique à 0, 15 et 30 m de la zone de rejet Dominance de l'amphipode <i>Ampelisca brevicornis</i> à 15 et 30 m des rejets de saumure. 	-	5
Méiofaune	O. Atlantique (Iles Canaries)	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de l'abondance de la méiofaune (particulièrement les nématodes) et modification de la structure des communautés dans les stations impactées par les rejets de saumure 	-	6
Polychètes, Epifaune benthique	O. Pacifique (Etats-Unis, Californie)	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de l'abondance de polychètes Effet direct minimal du rejet 	0	15
Foraminifères	Mer Méditerranée (Israël)	<ul style="list-style-type: none"> L'abondance et la diversité totales des foraminifères étaient, plus faibles à proximité des points de rejet, et augmentaient à mesure que l'on se rapprochait des stations de contrôle 	-	16
Amphipodes	Mer Méditerranée (Espagne)	<ul style="list-style-type: none"> Une réduction de l'abondance et de la diversité des amphipodes a été observée dans les stations proches des rejets 	-	7
Phytoplancton	Mer Méditerranée (Israël)	<ul style="list-style-type: none"> Pas de modification de la structure trophique du plancton au point de rejet 	0	8
		<ul style="list-style-type: none"> Les eaux de rejet contenant de l'hydroxyde de fer ont causé une diminution de la densité du phytoplancton 	-	9
	Mer Rouge	<ul style="list-style-type: none"> Densité plus élevée de phytoplancton et une concentration accrue de chlorophylle au point de rejet Pas de modification des populations phytoplanctoniques 	+/-	10

	(Arabie Saoudite)		0	11
Zooplancton	Mer Méditerranée (Israël)	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'effet des rejets sur les communautés zooplanctoniques 	0	12
Assemblages de poissons	O. Pacifique (Australie)	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'effet des rejets sur la diversité des espèces et l'abondance de poissons 	0	13
Les herbiers de posidonies (<i>P. oceanica</i>)	Mer Méditerranée (Espagne)	<ul style="list-style-type: none"> Les herbiers exposés présentent davantage de marques nécrotiques et une abondance réduite d'épifaune 	-	14

UD : Usine de dessalement, Ref. : Références, - : impact négatif, + : impact positif et 0 : pas d'impact

1.3. Etudes en laboratoire

La nocivité de la saumure peut être due à une salinité anormalement élevée et/ou à la présence dans les rejets de substances chimiques d'origine naturelle ou synthétique, qui une fois dans le milieu récepteur peuvent exercer une toxicité vis-à-vis organismes marins quand elles dépassent certaines concentrations et/ou durées d'exposition. La présence de substances de pré-traitement et de maintenance d'installations tel que des agents anti-encrassement des membranes d'osmose inverse (anti-scalant), des métaux traces, des substances antifouling (chlore, acide) peuvent impacter les organismes marins vivant à proximité du rejet. Contrairement aux études *in situ* qui évaluent l'effet cumulé (ou cocktail) de la saumure sur les communautés, les études d'écotoxicologie en milieu contrôlé (laboratoire) permettent d'évaluer les effets de chaque facteur (ou substance) indépendamment, sur des individus ou population d'une espèce d'intérêt (souvent présent à proximité de la zone de rejet). De ce fait, les études en laboratoire sont généralement peu représentatives de la complexité du milieu marin et leurs conclusions sont à mettre en regard avec les observations dans le milieu naturel.

1.3.1. Effets de la salinité

La sensibilité des espèces à l'augmentation de la salinité est espèce-dépendante. Elle est influencée par deux facteurs principaux : la capacité d'un organisme à réguler la pression osmotique et sa mobilité. Les poissons marins sont, pour la plupart, des organismes osmorégulateurs (ils maintiennent un équilibre interne en sel et en eau stable) et sont donc moins affectés par les augmentations de salinité, ils sont par ailleurs mobiles et peuvent mettre

Office français de la biodiversité

Site de Brest

16 quai de la Douane

CS 42932

29229 Brest Cedex 2

en place des processus d'évitement (Tableau 2.). En revanche, de nombreux organismes sessiles tels que les coraux sont dits osmoconformes (leur concentration interne en sel est similaire à celle de l'environnement), ils sont donc plus sensibles et plus impactés par des variations de salinité. De fortes augmentations de la salinité dans l'environnement marin environnant provoquent l'écoulement de l'eau hors des cellules de ces organismes, ce qui pourrait entraîner une déshydratation cellulaire et, finalement, la mort des cellules.

Tableau 2. Récapitulatif des principales études analysant les effets d'eau hypersaline sur la physiologie d'organismes marins

Espèce	Salinité testé	Principales conclusions	Impact	Ref
Etoile de mer (<i>Ophiothrix spiculata</i>)	+ 10%	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'effet sur la croissance 	0	17
Coraux constructeurs de récifs (<i>Stylophora pistillata</i> , <i>Acropora tenuis</i> , et <i>Pocillopora verrucosa</i>)	+ 10%	<ul style="list-style-type: none"> Effets espèces spécifiques Modification de la physiologie et de l'apparence des coraux Impact négatif sur l'holobionte* 	-	18
Seiche (<i>Sepia apama</i>)	40 ppt	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la survie de l'embryon Engendre un stress osmotique chez l'œuf 	-	19
Dorade (<i>Pagrus major</i>)	50 ppt	<ul style="list-style-type: none"> Premiers effets létaux Evitement 	/	20
Palourde (<i>Ruditapes philipparum</i>)	60 ppt	<ul style="list-style-type: none"> Premiers effets létaux 		
Algues brunes (<i>Dictyota spp.</i>)	+2 et 7 psu	<ul style="list-style-type: none"> Relative tolérance à l'hypersalinité 	0	21
Phytoplancton	33-45 ppt	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'effets 	0	22
	39-44 ppt	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la biomasse 	-	

+ XX% ou +X psu : correspond au % ou à la valeur au-dessus de la salinité ambiante ;

* : L'holobionte comprend le corail et les micro-organismes symbiotiques qui y sont associés (microalgues et communauté bactérienne) qui fonctionnent comme une seule entité écologique.

Office français de la biodiversité

Site de Brest

16 quai de la Douane

CS 42932

29229 Brest Cedex 2

2.2.1 Effets des substances chimiques utilisés

Peu d'études ont, à ce jour, évalué l'impact des substances antitartre et plus globalement des rejets de substances chimiques issu des usines de dessalement sur les organismes marins. Cependant, il a été observé que des concentrations de 0.2 mg L⁻¹ (soit 0.2 ppm) d'antitartre à base de polyphosphonate ont des effets délétères sur les coraux constructeurs de récifs (Tableau 3.).

Tableau 3. Récapitulatif des principales études analysant les effets des substances qui seront utilisés dans l'usine de dessalement d'Ironi Be

Espèce	Produit/ Concentration	Principales conclusions	Impact	Ref
Coraux constructeurs de récifs (<i>Stylophora pistillata</i> , <i>Acropora tenuis</i> , et <i>Pocillopora verrucosa</i>)	Anti-scalant à base de polyphosphonate (0.2 mg L ⁻¹)	<ul style="list-style-type: none"> • Modification de la physiologie et de l'apparence des coraux • Impact négatif sur l'holobionte 	-	18
Coraux constructeurs de récifs (<i>Montipora capricornis</i>)	Anti-scalant à base de polyphosphonate (0.025 mL L ⁻¹)	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de l'activité des polypes • Dommages tissulaires • Diminution de l'abondance de microalgues symbiotiques 	-	23
Copépodes	Chlore (0.2 à 1.0 mg L ⁻¹)	<ul style="list-style-type: none"> • Les adultes et larves de copépodes sont relativement tolérante au chlore 	0	24
Zoo- et phyto-plancton	Chlore ≥ 0,01 mg/L	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'activité photosynthétique • Mortalité du zooplancton 	-	25
Cnidaire (<i>Nematostella vectensis</i>)	Anti-coagulant Gamme de concentration (0 à 1000 ppm)	<ul style="list-style-type: none"> • A des concentrations environnementales, pas d'effet genotoxique ou cytotoxique • A des concentrations environnementales, effets délétères sur le 	0 -	35

Office français de la biodiversité

Site de Brest

16 quai de la Douane

CS 42932

29229 Brest Cedex 2

		développement larvaire		
Cnidaire (<i>Nematostella vectensis</i>)	Anti-scalant Gamme de concentration (0 à 500 ppm)	<ul style="list-style-type: none"> • A des concentrations environnementales, pas d'effet génotoxique ou cytotoxique • A des concentrations environnementales, mortalité des larves planula 	0	35
Amphipodes (<i>Gammarus pulex</i> et <i>Gammarus roeselii</i>) (eau douce)	Anti-scalant à base d'acide polyacrylique et copolymère d'acide acrylique Gamme de concentration de 5 à 100% (v/v)	<ul style="list-style-type: none"> • LC 50* à 36.2 et 39.4% (v/v) après 96h et 26.6 et 58.0% (v/v) après 168h 	0/-	36
Communautés bactériennes	Anti-scalant à base de polyacrylate, (CA), polyphosphonate (PP), et dendrimères carboxylés (DN) (100 mg/L)	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbation de la diversité et de la composition des communautés bactériennes 	-	37

*LC 50 : est la concentration d'une substance qui induit 50 % de mortalité dans une population ou un système biologique donné.

2. Conclusions et recommandations

Cette note présente les résultats de la littérature scientifique concernant les effets des rejets de saumures sur les organismes marins. Cependant, il est à noter que les rejets de saumure ne sont pas les seuls facteurs impactant la biodiversité marine. Des perturbations du milieu ont été observées dès la construction de l'usine jusqu'à son fonctionnement en routine.

La construction d'usines de dessalement perturbe le fond marin, remobilisant des sédiments et des polluants, ce qui entraîne une augmentation de la turbidité de l'eau, la disparition de certaines espèces sensibles ainsi que la destruction des habitats (27). Une fois les usines en fonctionnement, d'énormes volumes d'eau sont pompés directement de la mer vers les installations. En plus de l'eau, de nombreux organismes sont aspirés dans le système, soit en étant bloqués par les grilles des tuyaux d'admission soit en étant entraînés avec l'eau jusqu'à l'usine (28). Il reste difficile d'évaluer l'impact sur l'environnement marin résultant de l'aspiration d'eau. Les stades de vie précoces (larves d'invertébrés, œufs de poisson) sont

Office français de la biodiversité

Site de Brest

16 quai de la Douane

CS 42932

29229 Brest Cedex 2

particulièrement sensibles à l'aspiration de par leur incapacité à nager contre le flux. Des paramètres tels que la vitesse d'aspiration, la taille des mailles des grilles, la taille des tuyaux et le volume d'eau pompé peuvent être pris en compte lors de la conception de l'usine pour réduire ces phénomènes (28). L'extraction d'eau souterraine représente une autre solution potentielle (29).

Comme présenté dans la première partie du document, le rejet de saumure peut affecter localement les communautés benthiques, en particulier lorsque les effluents insuffisamment dilués se dispersent sur le fond marin. Ces impacts peuvent être atténués en mettant en place des systèmes de diffuseurs optimisés, conçus et positionnés à partir de modèles hydrodynamiques prenant en compte les courants et les flux marins (30). Les retours d'expérience liés au dessalement par osmose inverse montrent que les impacts environnementaux peuvent être efficacement réduits grâce à une ingénierie adaptée, reposant sur une analyse d'impact environnemental approfondie réalisée avant la localisation et la conception des installations (28). La dilution de la saumure avec de l'eau de mer ou de l'eau douce non-potable (31) représente par exemple une mesure d'atténuation qui s'est montrée efficace. Cette mesure a permis le retour d'une population d'échinoderme (organismes stenohalin, osmoconformeurs) qui avait migré loin d'une zone affectée par les rejets (26). Certaines espèces sont plus sensibles aux rejets de saumures et ce dû à leur différence de tolérance aux variations de salinité et sensibilité aux substances rejetées. Les études scientifiques portant sur les effets de substances utilisés dans les usines de dessalement sont assez restreintes. Cependant, les effets délétères d'anti-scalant à base de polyphosphonate observés sur certains coraux fondateurs de récif à une concentration de 0.2 mg L⁻¹ (soit 0.2 ppm) et de 0.025 mL L⁻¹, questionnent quant aux effets possibles sur les coraux scléactiniaires présents à proximité de la zone de rejet d'Ironi Be. Des données de courantologie pourront apporter des informations complémentaires quant à l'exposition possible de ces coraux. Par ailleurs, nous n'avons pas trouvé d'études évaluant les variations de concentrations (avant / après la mise en place d'une usine) et les effets des métaux traces sur les organismes marins. Cependant de nombreuses études (27, 28, 30) suggèrent que les infrastructures en mer utilisées par les usines de dessalement peuvent relarguer des concentrations élevées de fer, de chrome et de nickel et suggèrent l'utilisation d'acier inoxydable de très bonne qualité pour atténuer ce phénomène.

Finalement, il est fortement conseillé d'établir une ligne de base des communautés de méiofaune et de macrofaune benthique avant le début de toute construction, suivie d'un monitoring régulier. Ces mesures pourront être réalisées à différentes distances de la zone de rejet (selon un transect) ou en sélectionnant des sites plus impactés (proche de la zone de rejet) et contrôle (éloignés de la zone). Cela permettra d'évaluer la récupération des communautés impactées par la construction, ainsi que les réponses de ces communautés à un rejet hypersalin continu (2, 32). En parallèles, des mesures ponctuelles de concentrations de métaux traces, d'anti-scalants et de sous-produits issus de la désinfection par le chlore pourrait permettre de mieux comprendre et de réagir aux réponses biologiques observées.

Références

1. De-la-Ossa-Carretero, J. A., Del-Pilar-Ruso, Y., Giménez-Casalduero, F., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2016). Monitoring the effects of wastewater treatment strategies. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-11.
2. Clark, G. F., Knott, N. A., Miller, B. M., Kelaher, B. P., Coleman, M. A., Ushiyama, S., & Johnston, E. L. (2018). First large-scale ecological impact study of desalination outfall reveals trade-offs in effects of hypersalinity and hydrodynamics. *Water Research*, 145, 757-768.
3. Raventos, N., Macpherson, E., & García-Rubies, A. (2006). Effect of brine discharge from a desalination plant on macrobenthic communities in the NW Mediterranean. *Marine Environmental Research*, 62(1), 1-14.
4. Ruso, Y. D. P., De la Ossa Carretero, J. A., Casalduero, F. G., & Lizaso, J. S. (2007). Spatial and temporal changes in infaunal communities inhabiting soft-bottoms affected by brine discharge. *Marine environmental research*, 64(4), 492-503.
5. Riera, R., Tuya, F., Ramos, E., Rodríguez, M., & Monterroso, Ó. (2012). Variability of macrofaunal assemblages on the surroundings of a brine disposal. *Desalination*, 291, 94-100.
6. Riera, R., Tuya, F., Sacramento, A., Ramos, E., Rodríguez, M., & Monterroso, Ó. (2011). The effects of brine disposal on a subtidal meiofauna community. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(4), 359-365.
7. De-la-Ossa-Carretero, J. A., Del-Pilar-Ruso, Y., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2016). Response of amphipod assemblages to desalination brine discharge: impact and recovery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 172, 13-23.
8. Grossowicz, M., Sisma-Ventura, G., Gal, G., 2019. Using stable carbon and nitrogen isotopes to investigate the impact of desalination brine discharge on marine food webs. *Front. Mar. Sci.* 6, 142.
9. Drami, D., Yacobi, Y.Z., Stambler, N., Kress, N., 2011. Seawater quality and microbial communities at a desalination plant marine outfall. A field study at the Israeli Mediterranean coast. *Water Res.* 4, 5449–5462.
10. Saeed, M.O., Ershath, M.M., Al-Tisan, I.A., 2019. Perspective on desalination discharges and coastal environments of the Arabian Peninsula. *Mar. Environ. Res.* 145, 1–10.
11. Ozair, G., Al-Sebaie, K.Z., Al-Zahrany, S., 2017. Impact of long-term concentrated brine disposal on the ecosystems of nearshore marine environment. *The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse/Sao Paulo, Brazil*
12. Grossowicz, M., Varulker, S., Koren, N., Gal, G., 2021. Desalination plants do not impact the diversity or abundance of zooplankton of the Israeli coast. *Desalination* 511.
13. Whitmarsh, S. K., Barbara, G. M., Brook, J., Colella, D., Fairweather, P. G., Kildea, T., &

- Huveneers, C. (2021). No detrimental effects of desalination waste on temperate fish assemblages. *ICES Journal of Marine Science*, 78(1), 45-54.
14. Sanchez-Lizaso, J., Romero, J., Ruiz, J., Gacia, E., Buceta, J., Invers, O., Torquemada, Y., Mas, J., Ruiz-Mateo, A., Manzanera, M., 2008. Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants. *Desalination* 221, 602e607.
 15. Petersen, K., Heck, N., G. Reguero, B., Potts, D., Hovagimian, A., & Paytan, A. (2019). Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions. *Water*, 11(2), 208.
 16. Kenigsberg, C., Abramovich, S., & Hyams-Kaphzan, O. (2020). The effect of long-term brine discharge from desalination plants on benthic foraminifera. *PLoS One*, 15(1), e0227589.
 17. Lykkebo Petersen, K., Heck, N., G. Reguero, B., Potts, D., Hovagimian, A., & Paytan, A. (2019). Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions. *Water*, 11(2), 208.
 18. Petersen, K. L., Paytan, A., Rahav, E., Levy, O., Silverman, J., Barzel, O., ... & Bar-Zeev, E. (2018). Impact of brine and antiscalants on reef-building corals in the Gulf of Aqaba– Potential effects from desalination plants. *Water research*, 144, 183-191.
 19. Dupavillon, J. L., & Gillanders, B. M. (2009). Impacts of seawater desalination on the giant Australian cuttlefish *Sepia apama* in the upper Spencer Gulf, South Australia. *Marine Environmental Research*, 67(4-5), 207-218.
 20. Iso, S., Suizu, S., & Maejima, A. (1994). The lethal effect of hypertonic solutions and avoidance of marine organisms in relation to discharged brine from a destination plant. *Desalination*, 97(1-3), 389-399.
 21. Muñoz, P. T., Rodríguez-Rojas, F., Celis-Pla, P. S., López-Marras, A., Blanco-Murillo, F., Sola, I., ... & Sáez, C. A. (2023). Desalination effects on macroalgae (part A): Laboratory-controlled experiments with *Dictyota* spp. from the Pacific Ocean and Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1042782.
 22. Gomes, P. H., Pereira, S. P., Tavares, T. C. L., Garcia, T. M., & Soares, M. O. (2023). Impacts of desalination discharges on phytoplankton and zooplankton: Perspectives on current knowledge. *Science of The Total Environment*, 863, 160671.
 23. Marques, J. A., Gafni, A., Adler, O., Levy, O., & Bar-Zeev, E. (2023). Antiscalants used in the desalination industry impact the physiology of the coral *Montipora capricornis*. *Water Research*, 229, 119411
 24. Ershath, M. M., Namazi, M. A., & Saeed, M. O. (2019). Effect of cooling water chlorination on entrained selected copepods species. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 129-134.
 25. Miri, R., & Chouikhi, A. (2005). Ecotoxicological marine impacts from seawater desalination plants. *Desalination*, 182(1-3), 403-410
 26. Y. Fernández-Torquemada, J.M. González-Correa, J.L. Sánchez-Lizaso, Echinoderms as indicators of brine discharge impacts, *Desalin. Water Treat.* 51 (1–3) (2013) 567–573.
 27. Dawoud, M. A. (2012). Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf case study. *International Journal of Environment and Sustainability*, 1(3).
 28. Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434, 198-215.
 29. Missimer, T. M., Ghaffour, N., Dehwah, A. H., Rachman, R., Maliva, R. G., & Amy, G. (2013). Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: Capacity limitation, water quality improvement, and economics. *Desalination*, 322, 37-51.

30. Hosseini, H., Saadaoui, I., Moheimani, N., Al Saidi, M., Al Jamali, F., Al Jabri, H., & Hamadou, R. B. (2021). Marine health of the Arabian Gulf: Drivers of pollution and assessment approaches focusing on desalination activities. *Marine Pollution Bulletin*, 164, 112085.
31. Sola, I., Fernández-Torquemada, Y., Forcada, A., Valle, C., del Pilar-Ruso, Y., González-Correa, J. M., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2020). Sustainable desalination: Long-term monitoring of brine discharge in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111813.
32. Sharifinia, M., Afshari Bahmanbeigloo, Z., Smith Jr, W. O., Yap, C. K., & Keshavarzifard, M. (2019). Prevention is better than cure: Persian Gulf biodiversity vulnerability to the impacts of desalination plants. *Global change biology*, 25(12), 4022-4033.
33. Frank, H., Fussmann, K. E., Rahav, E., & Zeev, E. B. (2019). Chronic effects of brine discharge from large-scale seawater reverse osmosis desalination facilities on benthic bacteria. *Water research*, 151, 478-487.
34. Plan Bleu (2023) "Dessalement en Méditerranée : Mise en place de mesures visant à atténuer les risques et impacts environnementaux"
35. Rosner, A., Grossmark, Y., Gertner, Y., Rabinowitz, C., Reem, E., & Rinkevich, B. (2023). Genotoxicity signatures near brine outflows from desalination plants in the levant. *Water*, 15(6), 1079.
36. Feiner, M., Beggel, S., Jaeger, N., & Geist, J. (2015). Increased RO concentrate toxicity following application of antiscalants—Acute toxicity tests with the amphipods *Gammarus pulex* and *Gammarus roeseli*. *Environmental Pollution*, 197, 309-312.
37. Al-Ashhab, A., Sweity, A., Al-Hadidi, L., Herzberg, M., & Ronen, Z. (2022). Antiscalants used in seawater desalination: biodegradability and effects on microbial diversity. *Microorganisms*, 10(8), 1580.

Biographical sketch

André B. Fortunato, b. 1966

Education

- 2006 Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, Habilitation in Maritime Hydraulics
- 1996 Oregon Graduate Institute of Science & Engineering, U.S.A., Ph.D. in Environmental Sciences and Engineering. Equivalence to the Ph.D. in Environmental Engineering, Instituto Superior Técnico, Portugal, 1997.
- 1989 Instituto Superior Técnico, Portugal, B.Sc. in Civil Engineering
- 1984 Académie de Toulouse, France, Baccalauréat de l'enseignement du second degré

Research interests

My research aims at solving coastal engineering problems, in particular those related to hydrodynamics, sediment dynamics and water quality. I have pursued several research threads: 1) the analysis of hydrodynamic processes in coastal zones, such as tides, waves and storm surges, as well as transport processes; 2) the analysis of the morphological evolution of coastal systems, with a major focus on tidal inlets; 3) the development of operational systems; and 4) the development and analysis of numerical models and methods to simulate circulation, morphodynamics and transport in coastal zones, with an emphasis on unstructured grids.

Present and previous positions

- since 1989* Principal Researcher (2022-), Senior Researcher with Habilitation (2006-22), Senior Researcher (2003-06), Assistant Researcher (1998-02), Research Trainee (1997), Fellow Assistant Researcher (1995-96), Fellow Research Trainee (1989-90).
Estuaries and Coastal Zones Division, LNEC, Portugal
- 2003 - 2012 Head, Estuaries and Coastal Zones Division, LNEC, Portugal
- 1990 - 1995 Graduate Research Assistant, Oregon Graduate Institute of Sc. & Techn., USA

Description of the present position

My present position includes both consultancy, primarily in response to requests from Portuguese Administration (environmental and harbor authorities), and research. My consultancy involves assessing coastal engineering problems, developing solutions, and analyzing them using numerical modeling. My research in recent years has a strong focus in operational oceanography.

Professional Experience

- Research* I have participated in 50+ research projects with competitive funding (5th/7th Framework Programs, H2020, Marie Curie Actions, Interreg), having led 5 of them. I developed and analyzed numerical models, contributed to the understanding of physical processes and characterized many Portuguese estuaries and coastal lagoons. I have been the advisor or co-advisor of 8 pos-docs, 3 PhDs and several MSc. I am presently the co-advisor of a thesis on residual circulation in stratified estuaries.
- Consultancy* I have participated in 60+ consultancy projects, in Portugal and abroad (Macao, U.S.A., Brazil, Morocco, Senegal, Taiwan), often as a PI. In this scope, I have evaluated and proposed solutions to coastal engineering problems, in the fields of hydrodynamics, sediment dynamics, coastal protection and water quality.
- Management* As the head of LNEC's Estuarine and Coastal Zones Division between 2003 and 2012, a group of about 20 people (including researchers, research fellows and

technicians), I led the transformation of this division to widen its approaches (field work, parallel computing), attract significant research funding and drastically increase its scientific production.

Service and honors I have reviewed research proposals for several agencies (from Portugal, EU, USA, the Netherlands, Romania and Estonia) and papers for major journals. I serve in the Editorial Board of the Journal of Integrated Coastal Zone Management, and in 16 Ph.D. thesis juries. I received the 2019 Editor's Citation for Excellence in Refereeing, from the American Geophysical Union.

Recent papers in the SCIE (last five years)

- 2024 Oliveira, FSBF, AB Fortunato, P Freire. Beach nourishment protection against storms for contrasting backshore typologies, *J. of Mar. Sc. and Engng.*, 12/9: 1465.
- 2024 David, LM, A Martins, M Rodrigues, A Oliveira, AB Fortunato, O Silva, A Ataíde, A Mendes. Sanitary sewer overflow discharges: estimation based on flow rate measurement in pumping mains, *Water*, 16: 1916.
- 2023 Nahon, A, AB Fortunato, FSBF Oliveira, A Azevedo, MJ Henriques, PA Silva, P Baptista, P Freire. 2DH modelling and mapping of surfbeat-driven flooding in the shadow of a jettied tidal inlet, *Coast. Engng.*, 184: 104342
- 2023 Barros, JL, PP Santos, AO Tavares, P Freire, AB Fortunato, A Rilo, FSBF Oliveira. The complexity of the coastal zone: definition of typologies in Portugal as a contribution to coastal disaster risk reduction and management, *Int. J. of Disaster Risk Reduction*, 86: 103556.
- 2022 Mengual, B, X Bertin, F Place, M Pezarat, T Coulombier, D Mendes, AB Fortunato. Wave-current interactions at the Tagus Estuary Mouth (Portugal) under storm wave conditions, *Ocean Model.*, 175: 102035.
- 2022 Stratoudakis, Y; M Caetano; C Afonso; C Bartilloti; A Santos; P Terrinha; I Figueiredo; M Miranda; JL Costa; I Caçador; V Fonseca; P Chainho; R Melo; B Quintella; MJ Costa; AB Fortunato; P Freire; M Rodrigues; L Portela; MB Pacheco; J Pombo; C Palma; A Oliveira; AG Tavares; F Porteiro; I Metelo; J Sá Fernandes; MC Freitas; H Cabral; M Cunha; C Pham; I Carvalho. One step from the deep ocean: Linking research and governance for the Tagus River estuary and the Lisbon canyon system – A conference report. *Mar. Policy*, 144: 105224.
- 2022 Krapez, J-C, J Sanchis Muñoz, C Mazel, C Chatelard, P Déliot, Y-M Frédéric, P Barillot, F Hélias, J Barba Polo, V Olichon, G Serra, C Brignolles, A Carvalho, D Carreira, A Oliveira, E Alves, AB Fortunato, A Azevedo, P Benetazzo, A Bertoni, I Le Goff, Multispectral optical remote sensing for water-leak detection, *Sensors*, 22: 1057.
- 2021 Fortunato, AB, P Freire, B Mengual, X Bertin, C Pinto, K Martins, T Guerin, A Azevedo, Sediment dynamics and morphological evolution in the Tagus Estuary inlet, *Mar. Geol.*, 440: 106590
- 2021 Freire, P, M Rodrigues, AB Fortunato, A Freitas, Flood and drought risk assessment for agricultural areas (Tagus Estuary, Portugal), *Nat. Hazards and Earth System Sc.*, 21: 2503–2521.
- 2021 Oliveira, A, AB Fortunato, M Rodrigues, A Azevedo, J Rogeiro, S Bernardo, L Lavaud, X Bertin, A Nahon, G Jesus, M Rocha, P Lopes, Forecasting multiple coastal and estuarine hydrodynamics with OPENCoastS, *Environmental Modelling & Software*, 143: 105132.
- 2021 Umgiesser, G, M Bajo, C Ferrarin, A Cucco, P Lionello, D Zanchettin, A Papa, A Tosoni, M Ferla, E Coraci, S Morucci, F Crosato, A Bonometto, A Valentini, M Orlic, ID Haigh, JW Nielsen, X Bertin, AB Fortunato, BP Gómez, EA Fanjul, D Paradis, D Jourdan, A Pasquet, B Mourre, J Tintoré, RJ Nicholls. The prediction of floods in Venice: methods, models and uncertainty, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21: 2679–2704.
- 2021 Rodrigues, M, R Martins, J Rogeiro, AB Fortunato, A Oliveira, A Cravo, J Jacob, A Rosa, A Azevedo, P Freire. A web-based observatory for biogeochemical assessment in coastal regions, *J. Environmental Informatics*, 38/1: 1.15.

CURRICULUM VITAE*Fortunato, A.B.*

- 2021 Rocha, M, Oliveira, A, Freire, P, Fortunato, AB, Nahon, A, Barros, JL, Azevedo, A, Oliveira, FSBF, Rogeiro, J, Jesus, G, Martins, RJ, Santos, PP, Tavares, AO, Oliveira, J. Multi-Hazard WebGIS Platform for Coastal Regions, *Applied Sciences*, 11: 5253.
- 2021 Rodrigues, M, A Rosa, A Cravo, J Jacob, AB Fortunato. Effects of climate change and anthropogenic pressures in the water quality of a coastal lagoon (Ria Formosa, Portugal), *Sc. Total Env.*, 780: 146311.
- 2020 Mendes, D, AA Pires-Silva, JP Pinto, AB Fortunato. Bound and free infragravity wave energy over a bar, *Ocean Engineering* 201: 107128.
- 2020 Oliveira, A, AB Fortunato, J Rogeiro, J Teixeira, A Azevedo, L Lavaud, X Bertin, et al. OPENCoastS: An open-access service for the automatic generation of coastal forecast systems. *Environmental Modelling & Software* 124: 104585.
- 2020 Mendes, D, AB Fortunato, X Bertin, K Martins, L Lavaud, A Nobre Silva, AA Pires-Silva, T Coulombier, JP Pinto. Importance of infragravity waves in a wave-dominated inlet under storm conditions. *Cont. Shelf Res.* 192: 104026.

Statistics 100+ peer-reviewed journal papers; 2400+ citations; Science Citation Index *h*-index=30