

## 1 Introduction

Les récents débats sur l'extraction de nodules polymétalliques à des fins commerciales ont montré une nouvelle fois que l'océan est un espace d'opportunités économiques et de débats écologiques dont la conjugaison est complexe. Les connaissances scientifiques forment un socle indispensable à toute réflexion sur le futur de nos océans et l'association Symposium est particulièrement attachée à la promotion du débat notamment scientifique. Dans ce cadre nous avons invité en 2024 l'architecte naval Renaud Bañuls qui a exposé l'état des connaissances et de la réflexion autour de l'industrie maritime et de sa nécessaire transition, plus particulièrement sur les risques auxquels fait face la biodiversité concernant les collisions entre les bateaux et le monde marin, ainsi que les voies de progrès vers un transport maritime plus responsable. .

Il nous semble aussi important de souligner l'importance du rôle des océans dans les enjeux d'alimentation mondiale, les perspectives attachées à ceux-ci et les risques notamment ceux liés à la contamination au mercure.

## 2 Conférence de Renaud Bañuls

Renaud Bañuls est un architecte naval maître de conférences à l'ENSA Nantes, fondateur de *Share The Ocean* (programme qui vise à réduire le nombre de collisions entre des navires et la mégafaune marine) et cofondateur de « MATritime » (laboratoire qui travaille sur des modèles de simulation numérique au service de la conception navale, partagé entre l'école polytechnique, le CNRS, l'INRIA et Bañulsdesign). Il travaille pour l'industrie du transport maritime et dans la voile de haut niveau, il a par exemple participé au dessin du trimaran *Ultim Sodebo*.

Sa conférence à CentraleSupélec, organisée par les association Symposium et Club Voile, porte notamment sur les manières d'exploiter les liens existant entre la course au large et le transport maritime et comment les exploiter au service d'objectifs environnementaux. Il insiste en particulier sur les méthodologies de modélisation de systèmes complexes communes aux deux domaines, mais dont les modalités diffèrent de par leur temporalité.

### 2.1 Rendre le transport maritime plus responsable

En premier lieu il faut garder à l'esprit quelques ordres de grandeur importants: le secteur du transport maritime transporte 90% des volumes mondiaux, il est responsable de 3% des émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau mondial. L'organisation maritime internationale a fixé deux objectifs : une réduction de 70% des émissions de GES en 2040 par rapport à 2008 et la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Pour atteindre ces objectifs il faut travailler à la transition maritime; cette nécessaire transition est trop souvent réduite à des innovations de rupture comme la propulsion vélique. Bien qu'intéressantes, ces idées sont assez incertaines et n'offrent pas des solutions à court terme. Il faut donc travailler sur plusieurs échelles de temps différentes. En effet les navires qui sont aujourd'hui en construction seront encore en service dans plusieurs dizaines d'années.

Pour bien différencier la nature des innovations proposées, il est possible d'utiliser la classification développée par Stéphane Le Pochat qui est composée de 4 types d'améliorations.

- Type 1 : optimiser les flottes existantes. Un exemple de ce type d'amélioration opérée par Renaud Bañuls est la rénovation de navires de la CMA CGM par une modification du bulbe. Grâce à un travail statistique (d'optimisation robuste) en collaboration avec cette entreprise, ils

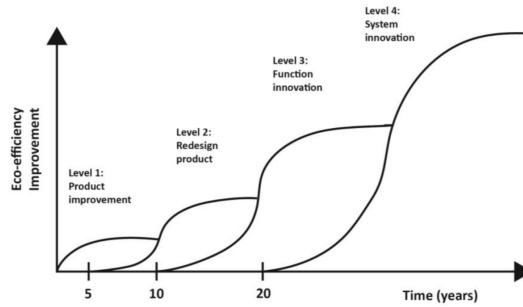


Figure 1: Illustration de la typologie d'innovation<sup>1</sup>

ont ainsi pu identifier les navires pour lesquelles une transformation était la plus favorable et les mettre en chantier.

- Type 2 : travailler sur les designs des bateaux qui sortiront bientôt de chantier. Cela passe notamment par des études poussées sur la distribution de conditions en fonction des routes empruntées pour trouver une bonne combinaison des milliers de paramètres qui entrent en jeu lors de la conception d'un navire.
- Type 3 : mettre en place des innovations de rupture. ces perspectives sont naturellement plus incertaines mais peuvent aussi donner des gains plus significatifs. Une des grandes perspectives dans ce domaine est d'intégrer de la propulsion vélique dans les navires de transport. Un aspect qui influence beaucoup le développement de ces innovations est la réglementation, qui est souvent en retard par rapport au contexte technique.
- Type 4 : changer de stratégie industrielle. Ce sujet est bien plus large que celui de la conférence, et n'a donc pas été abordé.

## 2.2 Protection de la faune marine contre les collisions

Les collisions des bateaux avec la mégafaune marine sont très visibles dans la course au large parce qu'elles occasionnent de forts dégâts, a contrario les navires de commerce ne remarquent même pas ces collisions. Cela a entraîné une forte prise de conscience, par exemple lors du Race Atlantic de 2019, il a été relevé une moyenne de 5 collisions avec des mammifères par bateau. Pour éviter ces rencontres, Renaud Bañuls et les équipes de *Share The Ocean* ont collecté des données biologiques et statistiques sur ces rencontres, afin d'établir une cartographie des probabilités de rencontre. A partir de ces données, il a collaboré avec des organisateurs de cours au large pour établir des zones d'exclusion dans les parcours, permettant de réduire le danger à la fois pour les espèces concernées mais aussi pour les navigateurs.



Figure 2: Dérive du bateau SVR-Lazartigue après une collision probable avec un cétacé

## 2.3 Conclusion

Ces deux exemples montrent comment des connaissances transdisciplinaires sont utilisées par des acteurs différents, qui collaborent pour avancer vers un objectif commun, ici la protection de l'environnement et la préservation de la faune marine.

# 3 Les océans : des réservoirs stratégiques pour l'alimentation humaine face à la pollution au mercure

## 3.1 Rôle stratégique des océans dans l'alimentation humaine

Depuis les années 1960, la consommation mondiale de produits aquatiques a quintuplé, selon le rapport 2022 de la FAO sur les pêches et l'aquaculture. Ce chiffre illustre l'importance croissante des océans comme réservoirs alimentaires stratégiques. Les produits de la mer fournissent des protéines essentielles à des milliards de personnes dans le monde, en particulier dans les régions côtières. En effet les produits marins représentent 2% des calories et 15% des protéines ingérées à l'échelle mondiale. Les projections montrent que la consommation de protéines pourrait augmenter de 70 % d'ici à 2050 et la nourriture d'origine marine pourrait aider à satisfaire ce besoin.

Dans cette perspective la FAO préconise d'augmenter les volumes de nourriture provenant d'échelles plus basses de la chaîne trophique comme les mollusques ou les algues et de s'intéresser à des produits peu exploités comme le zooplancton, les poissons mésopélagiques et les macroalgues.

Cependant, l'Anthropocène, marqué par l'intensification des activités humaines, a entraîné une pollution massive des écosystèmes marins, notamment par le mercure (Hg). Cette pollution menace non seulement la biodiversité mais aussi la sécurité alimentaire, les poissons contaminés pouvant représenter un risque sérieux pour la santé humaine.

## 3.2 Source et cycle du mercure dans les océans

Le mercure (Hg) est un élément naturellement présent dans l'environnement mais l'activité humaine a grandement augmenté sa libération. Les principales sources de pollution incluent :

- Les activités industrielles via la combustion de combustibles fossiles (en particulier du charbon), l'extraction minière et la production de ciment
- L'agriculture de part l'utilisation de certains pesticides et engrais contaminés
- Les déchets industriels et domestiques qui peuvent également être contaminés

Une fois émis dans l'atmosphère, le mercure se retrouve dans l'océan :

- Soit par le ruissellement des sols contaminés ou des rejets industriels et agricoles non traités. Les zones côtières sont particulièrement vulnérables à ce type de contamination, notamment dans les régions industrialisées ou à forte densité urbaine
- Soit sous forme de dépôts secs ou humides. Lorsqu'il pleut, le mercure dissous est entraîné dans les eaux de surface. Il s'agit d'une grande partie du mercure de l'atmosphère
- Soit par échange gazeux avec l'atmosphère. L'océan absorbe le mercure présent dans l'atmosphère qui se dissout et commence alors son cycle biogéochimique dans l'océan

Une fois dans les océans, la forme inorganique du mercure (Hg(II)) est convertie par des processus microbiens en mono-méthylmercure (MMHg), forme hautement toxique, absorbée par les poissons, sous laquelle nous le retrouvons ensuite dans notre alimentation.

Ces émissions sont 5 à 10 fois supérieures aux émissions naturelles et auraient plus que triplé la concentration en mercure des eaux océaniques<sup>2</sup>. Le changement climatique et la surpêche exacerbent

<sup>1</sup>Bundgaard, A. M. (2016). Ecodesign for a Circular Economy: Regulating and Designing Electrical and Electronic Equipment. Aalborg Universitetsforlag. (Ph.d.-serien for Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet). DOI: 10.5278/vbn.phd.engsci.00159

<sup>2</sup>Jiskra M., Heimbürger-Boavida L.-E., Desgranges M.-M., Petrova M., Dufour A., Ferreira-Araujo B., Masbou J., Chmeleff J., Thyssen M., Point D., Sonke J. E. (2021). Mercury stable isotopes constrain atmospheric sources to the ocean. *Nature*

d'autant plus la bioaccumulation de MMHg chez les poissons. De plus, sa concentration augmente à mesure que l'on remonte la chaîne alimentaire. Ainsi, les grands prédateurs marins comme le thon, l'espadon ou le requin peuvent contenir des niveaux de MMHg des milliers de fois supérieurs à ceux mesurés dans l'eau environnante.

Ces dynamiques soulignent la nécessité de mieux comprendre et modéliser le cycle du mercure dans les océans, afin de limiter ses impacts sur la biodiversité et la santé humaine.

### 3.3 Impact du mercure sur la santé humaine

Le mono-méthylmercure (MMHg) est une neurotoxine puissante, qui a des effets nocifs sur la santé humaine. Chez les enfants l'exposition prénatale ou postnatale peut entraîner des troubles du développement, des retards cognitifs et des troubles comportementaux. Chez les adultes cela augmente le risque de maladies cardiovasculaires.

Cependant, de nombreux aspects de la toxicité du MMHg restent encore inconnus, en particulier concernant les effets à long terme et les interactions avec d'autres facteurs environnementaux ou génétiques. Ces questions représentent des enjeux majeurs qui doivent se traduire par la poursuite des recherches sur l'évaluation des risques sur la santé humaine, mais également sur la compréhension du cycle biogéochimique du mercure dans l'océan et sa bioaccumulation dans les chairs animales.

### 3.4 Comprendre et modéliser le cycle du mercure

Les modèles biogéochimiques actuels suggèrent que la majorité du mercure dans les océans provient de dépôts atmosphériques de Hg(II) (4 600 Mg/an) par rapport à l'absorption de mercure gazeux Hg(0) (1 700 Mg/an). Cependant, ces modèles rencontrent des limites dues à plusieurs facteurs. Tout d'abord, due au manque de mesures directes. En effet, Les flux air-mer, qu'il s'agisse de l'évasion de Hg(0) ou du dépôt de Hg(II), ne sont mesurés que sporadiquement et souvent sur des périodes courtes. De plus, les observations sont lacunaires : les données sur les dépôts secs et humides de Hg(II), ainsi que sur les concentrations de Hg(0) dissous dans les eaux de surface, sont limitées et souvent incomplètes. Enfin, due à la variabilité géographique et temporelle : les flux de mercure diffèrent considérablement selon les régions océaniques et les saisons, en fonction des conditions climatiques, des activités humaines, et des courants marins.

Ces lacunes rendent difficile la validation des modèles existants et entravent la capacité des scientifiques à prédire avec précision l'évolution du cycle du mercure.

Ainsi, améliorer les modèles biogéochimiques est crucial pour :

- Prévoir les impacts du changement climatique : Le réchauffement global et la désoxygénation des océans peuvent modifier la conversion du mercure en mono-méthylmercure (MMHg), augmentant ainsi sa bioaccumulation dans les chaînes alimentaires. Des modèles plus précis permettraient d'estimer comment ces processus évolueront.
- Évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions : La Convention de Minamata vise à réduire les émissions anthropiques de mercure. Des modèles robustes sont nécessaires pour mesurer l'impact de ces politiques sur les concentrations globales de mercure dans les océans.
- Anticiper les niveaux de contamination future : En intégrant des données sur les émissions passées, actuelles et projetées, les modèles pourraient aider à prédire les niveaux de mercure dans les écosystèmes marins d'ici 2050 ou 2100.

### 3.5 réduire la pollution au mercure

La réduction de la pollution au mercure se fait par des actions à plusieurs niveaux.

- Réduire les émissions à la source : Dans les industries fortement émettrices certaines mesures permettent de réduire significativement les émissions de mercure. Par exemple, dans le secteur de l'énergie, réduire la combustion de charbon ou mettre en place des procédés de captation dans les centrales thermiques, et dans le secteur agricole, réduire l'usage des pesticides et engrais à forte teneur en mercure et les substituer par des produits plus responsables.

- Améliorer la gestion des déchets : notamment des effluents industriels qui peuvent avoir une forte teneur en mercure en investissant dans des technologies capables de filtrer et neutraliser le mercure avant qu'il n'atteigne les écosystèmes. Cela passe aussi par un meilleur traitement des déchets électroniques comme les batteries qui contiennent souvent du mercure, en mettant en place des filières de recyclage performantes on peut réduire les rejets dans l'environnement.
- Mettre en place de la recherche sur des solutions technologiques innovantes: on peut identifier plusieurs perspectives prometteuses comme le développement de matériaux absorbants comme des filtres à base de graphène. Il y aussi de la recherche en cours sur des solutions de détoxification des sols et des eaux contaminées basées sur l'action de microorganismes.

## 4 Conclusion

En bref, ces deux exemples montrent la complexité scientifique des enjeux liés aux océans et mènent à penser qu'il faudra, en premier lieu, pour les débats qui détermineront le futur de ces espaces, établir des connaissances scientifiques solides qui permettent ensuite des discussions nourries et constructives, telles que celles qui prendront place au cours de la troisième conférence des Nations unies pour l'océan à Nice en Juin 2025.