|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| TEMPS CLIMAT EAU | A picture containing text, clipart, ceramic ware, porcelain  Description automatically generated**Organisation météorologique mondiale**  **COMMISSION DES SERVICES ET APPLICATIONS SE RAPPORTANT AU TEMPS, AU CLIMAT, À L’EAU ET À L’ENVIRONNEMENT**  **Deuxième session** 17-21 octobre 2022, Genève | **SERCOM-2/INF. 5.8(1)** |
| Présenté par:  Président du SC-MMO  12.IX.2022 |

*[Ce document a été traduit à titre indicatif à l’aide d’un système de traduction automatique associé à des mémoires de traduction. Si des efforts raisonnables ont été déployés par l’OMM pour améliorer la qualité de la traduction ainsi produite, aucune garantie, expresse ou implicite, n’est toutefois donnée quant à son exactitude, sa fiabilité ou sa précision. Les divergences ou différences ayant pu résulter de la traduction vers le français du contenu du document original ne créent aucune obligation et n’ont aucun effet juridique en termes de conformité, d’exécution ou à toute autre fin. Il se peut que certains contenus (tels que les images) n’aient pu être traduits en raison des limites techniques du système. En cas de doute sur l’exactitude des informations contenues dans la traduction, veuillez vous reporter à l’original anglais qui constitue la version officielle du document].*

**EXAMEN DES MEILLEURES PRATIQUES EN MATIÈRE D’INTERVENTION  
EN CAS D’URGENCE MARITIME**

# Objet du document

1. Le présent document passe en revue les meilleures pratiques en matière d’intervention d’urgence dans le domaine maritime, qui comprend à la fois les interventions en cas d’éco-urgence maritime et la recherche et le sauvetage en mer (SAR), ainsi que les procédures connexes. Il démontre une connaissance de ce qui existe, y compris les processus pour les déversements d’hydrocarbures, les rejets de radionucléides et les SAR, ainsi que les lacunes. Il explore les différences dans les interventions d’urgence qui se produisent dans les eaux nationales ou internationales. Les principales entités impliquées dans ces processus sont résumées. Dans l’ensemble, l’examen a mis en évidence la nécessité pour l’OMM de fournir aux Membres des orientations sur la manière dont ils peuvent, en particulier à travers leurs SMHN, soutenir et/ou aider à intervenir en cas d’urgences maritimes.
2. Cet examen constitue donc la justification d’une proposition à la SERCOM, visant à élaborer des documents d’orientation de l’OMM à l’intention des Membres impliqués ou souhaitant s’impliquer dans les interventions d’urgence en mer. Bien que ce rapport ne suive pas la mise en page du document d’orientation proposé, il contient les informations essentielles qui seraient envisagées, et reconnaît qu’un travail supplémentaire est nécessaire pour développer des documents d’orientation pour les Membres, qui seraient développés après l’accord de la SERCOM.
3. Le présent rapport décrit les principaux domaines de travail dans lesquels l’OMM collabore avec d’autres organismes pour fournir un soutien à divers organismes en cas d’urgence maritime. Cette aide est actuellement fournie pour trois types d’urgences dans le milieu marin: les déversements d’hydrocarbures et d’autres substances nocives ou dangereuses; les déversements de radionucléides; et les objets à la dérive (y compris les activités de recherche et sauvetage). Cela ajoute de la complexité à tout cadre de soutien, puisque toutes ces urgences sont gérées, globalement, dans des cadres différents. La recherche et le sauvetage, par exemple, sont gérés au sein de l’OMI par l’intermédiaire des régions de recherche et de sauvetage, tandis que la pollution pétrolière et radioactive est en grande partie gérée au niveau national ou régional. La variable commune fondamentale est la modélisation des substances/objets dérivants dans une masse d’eau, et généralement cette modélisation nécessite une attention urgente dans un délai raisonnable afin de fournir aux autorités compétentes des informations adéquates pour intervenir en cas d’urgence.
4. Comme indiqué ci-dessous, le cadre initial d’intervention en cas d’urgence marine par l’intermédiaire de l’OMM (via l’ancienne Commission de météorologie maritime de l’OMM en 1989) prévoyait la mise en place d’un réseau de centres d’intervention en cas de pollution marine, afin de fournir des informations météorologiques et océanographiques pour les opérations d’intervention d’urgence en cas de pollution marine en dehors des eaux sous juridiction nationale. En 1993, la Commission de météorologie maritime de l’OMM avait adopté, lors de sa onzième session, un système de soutien aux interventions d’urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM) pour la haute mer, dont les essais ont commencé en 1994. Le contexte et l’historique complets sont disponibles sur <https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background>. Les zones SIUPM sont désormais alignées sur les METAREA du Système mondial de détresse et de sécurité en mer (SMDSM) de l’OMI pour la fourniture d’informations sur la sécurité maritime. Cependant, il est loin d’être évident que ce cadre serait le plus efficace pour apporter un soutien aux urgences maritimes. Compte tenu de la reconnaissance ci-dessus des différentes structures d’intervention en place, il est nécessaire de décider si l’OMM doit élaborer des cadres distincts et globaux pour chaque type d’urgence, afin de s’aligner sur le réseau des intervenants, ou si l’on peut adopter un cadre unique qui tente d’englober tous les systèmes. Cette question sera étudiée dans le cadre du processus d’élaboration des documents d’orientation de l’OMM.
5. Afin de fournir un réseau d’intervention plus efficace, il est suggéré que tout cadre de l’OMM soit axé sur la capacité de modélisation, avec un nombre limité de centres ayant une responsabilité globale axée sur une capacité globale de modélisation de tous les types d’incidents environnementaux. Au-delà, un plus grand nombre de centres peuvent être responsables de bassins spécifiques, en sachant que tout bassin manquant actuellement de capacité ayant la possibilité d’être amélioré par les centres ayant une capacité globale. On peut considérer qu’il s’agit d’un cadre largement semblable à d’autres déjà adoptés, tels que le concept de Centre mondial de prévisions de zone (WAFC) dans le domaine de l’aviation; et conforme au cadre du Système mondial de traitement des données et de prévision.
6. À l’échelle opérationnelle, on considère qu’en ce qui concerne la réponse aux radionucléides, les centres disposant d’une capacité mondiale seraient les mieux placés pour répondre à l’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA), tandis que pour de nombreux autres types d’urgence, les centres au niveau du bassin seraient en mesure de répondre aux organismes d’intervention nationaux et régionaux, tels que le Centre régional méditerranéen pour l’intervention d’urgence contre la pollution marine accidentelle (REMPEC).
7. Il faudra accepter de s’engager beaucoup plus étroitement avec ces organismes en général, bien que dans le cas de l’AIEA, cela puisse être facilité par une collaboration étroite avec d’autres secteurs de l’OMM qui ont déjà des relations de travail efficaces avec eux. Au niveau du bassin, les centres d’intervention appropriés devront favoriser les relations avec les organismes d’intervention. Dans certains cas, comme le REMPEC, cela peut déjà exister, mais avec d’autres organismes, il peut être nécessaire de travailler avec l’OMI pour établir et favoriser ces relations. Cela aura des répercussions sur les ressources des Membres de l’OMM.
8. Sur la base de l’examen et de l’enquête menés par le Comité permanent des services de météorologie maritime de la Commission des services de l’OMM lors de l’élaboration du présent rapport, les recommandations suivantes devraient être prises en compte dans l’élaboration d’un document d’orientation de l’OMM:
9. Mettre en place des zones d’intervention qui correspondent davantage aux zones utilisées par les autorités d’intervention pour chaque type d’urgence, par exemple la région de recherche et de sauvetage utilisée par la communauté SAR;
10. Veiller à ce que les capacités correspondent à la réponse requise, par exemple en utilisant une approche à plusieurs niveaux de la capacité de modélisation, quelques centres mondiaux étant capables de fournir un soutien en matière de modélisation à tout Membre pour toutes les urgences environnementales;
11. Établir des relations avec les autorités mondiales afin de garantir un niveau de soutien cohérent et pertinent et, le cas échéant, s’appuyer sur les relations existantes telles que celles entre l’OMM, l’AIEA et l’OMI.

### **Remerciements**

1. Ce rapport s’appuie sur les travaux du projet (inachevé) de proposition sur les futures activités de la Commission technique mixte OMM/COI d’océanographie et de météorologie maritime (CMOM) en matière d’interventions en cas d’éco-urgence maritime, préparé en décembre 2016 par l’ancienne équipe spéciale de la CMOM de l’OMM et de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) sur le soutien aux interventions d’urgence en milieu marin (TT-MEER). En février 2017, le projet de proposition (incomplet) a été soumis à la treizième session du Comité de gestion de la CMOM, qui a estimé que les travaux justifiaient la nécessité pour la Commission technique de soutenir les futures activités d’interventions en cas d’éco-urgence maritime, et lors de la cinquième session de la CMOM (2017), une Équipe d’experts chargée des interventions en cas d’éco-urgence maritime a été créée. Cependant, la finalisation de la proposition décrivant les activités futures de soutien aux interventions en cas d’éco-urgence maritime n’a jamais été achevée.
2. Suite à la dissolution de la CMOM en 2019, l’accent mis par l’OMM sur ces activités d’intervention est désormais mis en œuvre par le biais du Comité permanent de la météorologie maritime et des services océanographiques (SC-MMO) relevant de la SERCOM. L’Équipe d’experts pour les interventions d’urgence et les interventions côtières (ET-CER) du SC-MMO et sa sous-équipe d’experts axée sur les interventions en cas d’éco-urgence maritime et le sauvetage et la recherche en mer ont examiné le travail (et le projet de rapport incomplet) entamé par la CMOM décrit ci-dessus. L’ET-CER s’est appuyé sur ce projet pour revoir et affiner le contenu du présent rapport, qui résume l’état actuel des interventions en cas d’éco-urgence maritime et du sauvetage et de la recherche en mer, et formule des recommandations à l’intention de l’OMM sur la meilleure façon d’aider ses Membres à renforcer leurs capacités dans ces domaines. Le rapport justifie la recommandation faite à la SERCOM, selon laquelle l’OMM devrait envisager de produire des documents d’orientation à l’avenir, afin d’aider les Membres dans ces domaines.
3. Les auteurs de ce rapport sont des membres de l’ET-CER et des experts invités, avec le soutien du Secrétariat de l’OMM:
4. Øyvind Breivik (Norvège) – Dirigeant de la TT-MEER/Vice-Président de l’ET-CER/SC-MMO
5. Bruce Hackett (Norvège) – Auteur principal
6. Arthur Allen (États-Unis d’Amérique)
7. Pierre Daniel (France)
8. Nadao Kohno (Japon)
9. Graigory Sutherland (Canada)
10. Alice Soares (Portugal)
11. Appui du secrétariat de l’OMM (Sarah Grimes et Nayeon Kim)

Ces auteurs et le Secrétariat reconnaissent pleinement le travail et les contributions de l’ancienne Équipe spéciale de la CMOM sur les interventions en cas d’éco-urgence maritime (2016-2017) qui a fourni le contexte du présent rapport.

**PROJET**

**Examen de l’état des interventions en cas d’urgence maritime, concernant les services météorologiques, et l’OMM**

**Pour soumission à la deuxième session de la SERCOM de l’OMM (octobre 2022)**

**Par le Comité permanent de la SERCOM des**

**services de météorologie marine et d’océanographie (SC-MMO)**

## **Résumé et recommandations**

Le présent document décrit les principaux domaines de travail dans lesquels l’OMM collabore afin d’apporter son soutien à diverses agences en cas d’urgences maritimes, notamment environnementales (appelées MEER – Interventions en cas d’éco-urgence maritime) et de recherche et sauvetage (SAR). Cette aide est fournie pour trois types d’urgences: les déversements d’hydrocarbures et d’autres substances nocives ou dangereuses; les déversements de radionucléides; et les objets à la dérive (y compris les activités de recherche et sauvetage). En soi, cela ajoute de la complexité à tout cadre de soutien, puisque ces urgences sont gérées, au niveau mondial, dans des cadres différents. Les activités de recherche et de sauvetage, par exemple, sont gérées au sein de l’OMI par le biais d’un certain nombre de régions de recherche et de sauvetage, tandis que la pollution pétrolière et radioactive est en grande partie gérée au niveau national ou régional.

En 1989, l’ancienne Commission de météorologie maritime de l’OMM a convenu d’établir un premier cadre d’intervention en cas de pollution marine par la mise en place d’un réseau de centres d’intervention chargés de fournir des informations météorologiques et océanographiques pour les opérations de lutte contre la pollution marine en dehors des eaux relevant de la juridiction nationale. En 1993, la Commission de météorologie maritime de l’OMM avait adopté, lors de sa onzième session, un système de soutien aux interventions d’urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM) pour la haute mer, dont les essais ont commencé en 1994. Le contexte et l’historique complets sont disponibles sur <https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background>. Les zones SIUPM sont soutenues par des coordonnateurs météorologiques et océanographiques de zone, qui sont alignés sur les METAREA du Système mondial de détresse et de sécurité en mer (SMDSM) de l’OMI pour la fourniture d’informations sur la sécurité maritime. Il est toutefois loin d’être évident que ce cadre serait le plus efficace pour apporter un soutien aux urgences maritimes. Compte tenu de la reconnaissance ci-dessus des différentes structures d’intervention en place, il est nécessaire de décider si l’OMM doit élaborer des cadres distincts et globaux pour chaque type d’urgence, afin de s’aligner sur le réseau des intervenants, ou si l’on peut adopter un cadre unique qui tente d’englober tous les systèmes.

Afin de fournir un réseau d’intervention plus efficace, il est suggéré que tout cadre de l’OMM soit axé sur la capacité de modélisation, avec un nombre limité de centres ayant une responsabilité globale axée sur une capacité globale de modélisation de tous les types d’incidents environnementaux. Au-delà, un plus grand nombre de centres peuvent être responsables de bassins spécifiques, en sachant que tout bassin manquant actuellement de capacité ayant la possibilité d’être amélioré par les centres ayant une capacité globale. On peut considérer qu’il s’agit d’un cadre largement semblable à d’autres déjà adoptés, tels que le concept de Centre mondial de prévisions de zone dans le domaine de l’aviation; et aligné sur le cadre du SMTDP.

Au niveau opérationnel, il est considéré comme approprié que, en ce qui concerne la réponse aux radionucléides, ces centres dotés d’une capacité mondiale soient les mieux placés pour répondre à l’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA), tandis que pour de nombreux autres types d’urgence, les centres au niveau du bassin seraient en mesure de répondre aux organismes d’intervention nationaux et régionaux, tels que le Centre régional méditerranéen pour l’intervention contre la pollution marine (REMPEC).

Il faudra accepter de s’engager beaucoup plus étroitement avec ces organismes en général. Dans le cas de l’AIEA, cela peut être facilité par une collaboration étroite avec d’autres domaines couverts par des organes de l’OMM (par exemple, l’intervention en cas d’urgence environnementale nucléaire et non nucléaire liée au SMTDP) qui ont déjà une relation de travail efficace avec eux.

À l’échelle du bassin, les centres appropriés de l’OMM pour les interventions d’urgence en mer devront favoriser les relations avec les organismes d’intervention. Dans certains cas, comme le REMPEC, cela peut déjà exister, mais pour d’autres organes, il peut être nécessaire de travailler avec l’OMI et d’autres organismes, pour établir et favoriser ces relations.

Cet examen présente un ensemble substantiel de preuves que le processus d’intervention en cas d’urgence maritime peut être complexe, avec de multiples éléments de dangers et de réponses, en plus des multiples rôles des agences nationales, régionales et internationales. Les services météorologiques jouent un rôle important dans la fourniture d’informations en temps opportun, pour appuyer les interventions en cas d’urgences maritimes. Le rôle de l’OMM dans le soutien des Membres dans cet effort, ainsi que dans la facilitation d’un engagement harmonieux avec les partenaires régionaux et internationaux pertinents, est souligné. En élaborant ce rapport, le SC-MMO propose à la Commission des services de l’OMM que les Membres de l’Organisation puissent recevoir des documents d’orientation pour les aider à comprendre et à mieux soutenir les interventions d’urgence en mer.

**Introduction**

Ce rapport présente un examen de l’intervention d’urgence en mer, qui couvre à la fois les urgences environnementales (connues sous le nom d’interventions en cas d’éco-urgence maritime) et la recherche et le sauvetage en mer, en rapport avec les services météorologiques et l’OMM, ainsi que leur rôle et leur statut dans la contribution à ces processus. Ces processus peuvent être complexes et/ou déroutants, leur fonctionnement se faisant à différentes échelles et dans différents cadres et instruments aux niveaux international, régional et national. Depuis près de 40 ans, l’OMM joue un rôle dans le soutien aux Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) pour qu’ils puissent intervenir en cas de besoin dans les situations d’urgence maritime, notamment en matière de recherche et de sauvetage (SAR) et des interventions en cas d’éco-urgence maritime. L’ancienne Commission de météorologie maritime de l’OMM, lors de sa neuvième session (1984), a discuté des contributions de l’Organisation et des services météorologiques pour la recherche et le sauvetage en mer, en se référant à la Convention de Hambourg de 1979. À l’époque, cette convention visait à élaborer un plan international de recherche et le sauvetage, afin que, lorsqu’un accident se produit, le sauvetage de personnes en mer soit coordonné par une organisation SAR et, si nécessaire, par une coopération entre organisations SAR voisines – voir https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Maritime-Search-and-Rescue-(SAR).aspx.

Lors de sa dixième session (1989), la Commission de météorologie maritime de l’OMM a reconnu que les Services météorologiques nationaux (SMN) pouvaient jouer un rôle important dans la santé des océans et a proposé l’élaboration d’une approche plus formelle de l’acheminement du soutien météorologique et océanographique dans les opérations de lutte contre la pollution marine (voir le contexte complet sur [https://commun](https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background)ity.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background). Aucune agence des Nations Unies n’est responsable à elle seule de l’avancement des interventions en cas d’éco-urgence maritime et de la recherche et du sauvetage, et en fait, les SMHN jouent souvent un rôle essentiel en fournissant des données, des modèles et des prévisions aux agences sœurs qui exécutent la réponse. Pour bien comprendre le rôle que les SMHN sont susceptibles de jouer dans l’intervention en cas d’urgence maritime et pour les guider dans le processus, il faut avoir une compréhension de base des interventions en cas d’éco-urgence maritime et de la recherche et du sauvetage, de l’état actuel, des lacunes identifiées dans le processus et de la connaissance des acteurs clés ou des collaborateurs, afin que les SMHN puissent remplir leurs fonctions au mieux, en vue de protéger et de sauvegarder la vie et les biens. Le rapport suit une structure qui explique les urgences marines, donne un aperçu des rôles (passés et présents) de l’OMM et des SMHN dans les processus, examine les diverses conventions, cadres, agences et programmes internationaux, régionaux et autres qui peuvent jouer un rôle clé ou de soutien, en soulignant certaines des lacunes qui nécessitent une attention particulière, et enfin recommande une voie à suivre.

### **Section 1.1: Aperçu de l’intervention d’urgence en mer – En quoi elle consiste, pourquoi est-ce important et quel est le rôle du service météorologique ?**

L’intervention en cas d’urgence maritime désigne le processus de réponse à une situation d’urgence liée à des substances ou des objets dérivants dans l’eau, généralement dans l’océan, dans les eaux nationales et internationales. L’intervention d’urgence peut être motivée par des raisons environnementales (éco-urgence) et est comprise comme une urgence due à la menace d’un dommage au milieu marin, par exemple une marée noire. L’urgence peut également concerner des objets ou des personnes à la dérive, qui menacent la vie et les biens, par exemple dans le cadre d’opérations de recherche et de sauvetage de personnes et/ou de navires perdus en mer. Tous deux ont une variable commune, à savoir que des substances, des objets, des animaux ou des personnes «dérivent» dans un environnement fluide et qu’il est nécessaire de localiser et/ou de surveiller la dérive, afin de minimiser les dommages causés à l’environnement et/ou aux biens et/ou les pertes de vies humaines.

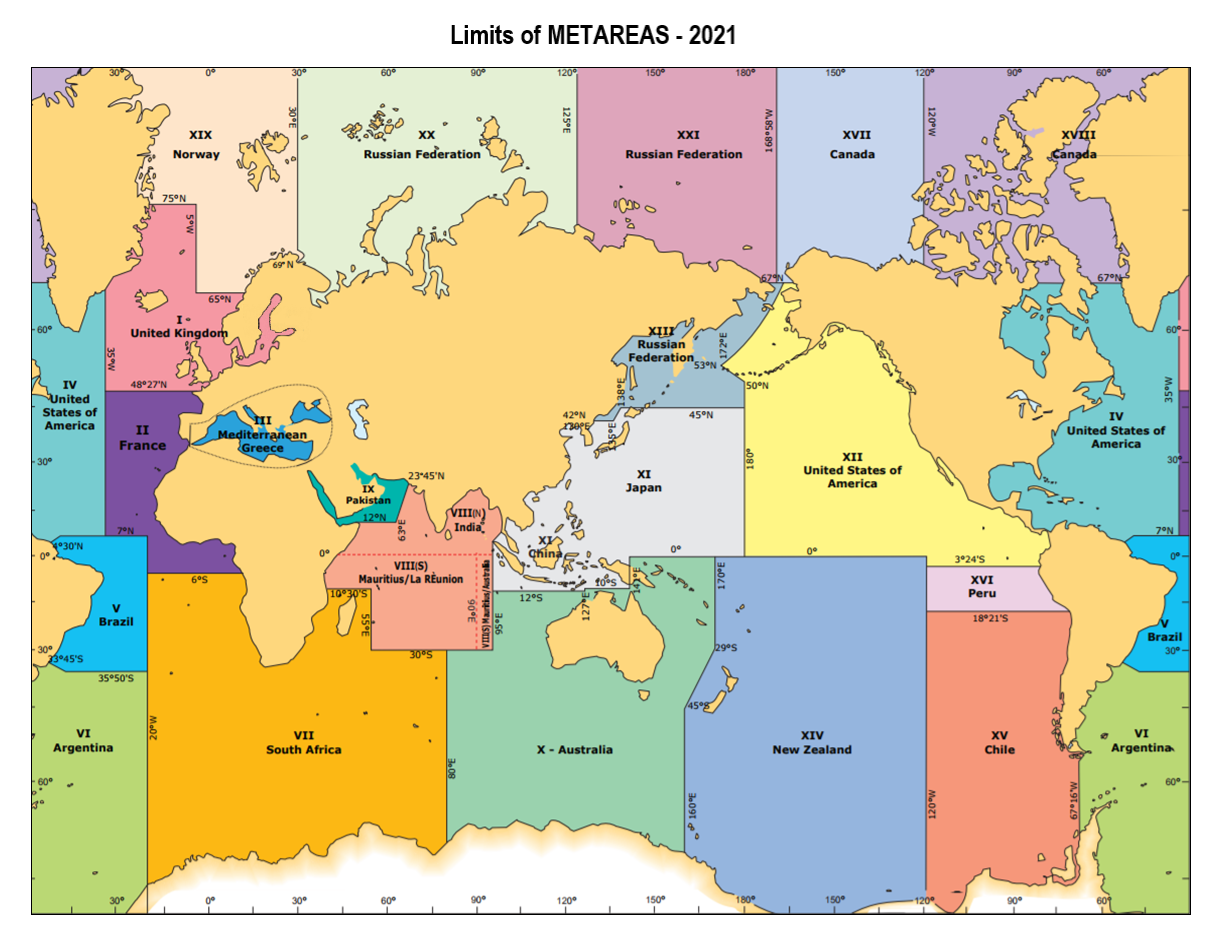
Dans le cas de la réponse d’urgence aux incidents de pollution marine, ceux-ci peuvent varier considérablement en termes d’échelle et de complexité. En cas d’incident de pollution marine, qui peut être provoqué, par exemple, par des déversements d’hydrocarbures et d’autres substances nocives, ou par des rejets de radionucléides, des éco-urgences peuvent survenir dans les eaux marines. Lorsque cela se produit, les autorités interviennent pour supprimer et/ou minimiser le danger. Les interventions en cas d’éco-urgence maritime sont un domaine dans lequel de multiples cadres législatifs ou politiques, ainsi que des agences, sont impliqués, que ce soit dans la prévention, la préparation et/ou la réponse à de telles urgences. L’efficacité d’une intervention dépend fortement de la préparation et de la capacité des personnes impliquées à entreprendre des tâches spécifiques de réponse à l’urgence et de sa gestion. Cela nécessite au minimum la désignation des rôles et des responsabilités des différentes parties prenantes, la définition des stratégies de réponse et des procédures à suivre en cas d’incident, ainsi que la formation pour fournir les connaissances et les compétences nécessaires.

Étant donné la nature de la dynamique des océans fluides, les interventions en cas d’éco-urgence impliquent souvent la modélisation et le suivi du mouvement de la substance toxique sur ou dans l’eau. La même méthode de modélisation et de suivi s’applique aux objets à la dérive (par exemple, les personnes perdues, les navires et même les conteneurs en mer). De ce fait, la réponse et la préparation pour la recherche et le sauvetage utilisent souvent les mêmes outils de prévision et de réponse que pour les interventions en cas d’éco-urgence maritime. Les observations et prévisions météorologiques, océanographiques et de vagues constituent les données de forçage dans une telle modélisation de la dérive. Les SMHN sont donc l’une des parties prenantes des systèmes de préparation et de réponse aux urgences. En outre, les données et les informations météorologiques pourraient également être efficaces pour réduire le risque d’incidents et d’urgences si elles sont introduites dans les programmes de prévention des urgences environnementales. Les services opérationnels de la communauté météorologique sont importants pour la réduction des pertes et des risques dans l’atténuation de toutes sortes de catastrophes. De plus, les événements extrêmes d’origine naturelle sont perturbateurs et peuvent déclencher de nombreux types d’accidents qui peuvent, à leur tour, entraîner des déversements et des rejets de substances dangereuses dans l’air et dans l’eau, ce qui alourdit la charge des interventions d’urgence pour protéger et sécuriser les populations menacées et les environnements contaminés.

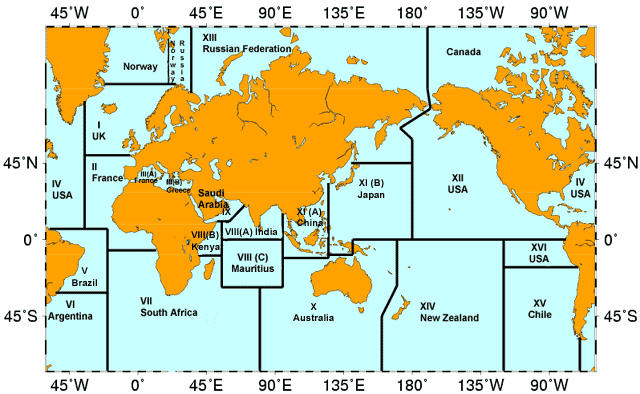
La section 2 ci-dessous décrit les différents types de dangers pour lesquels les SMHN jouent un rôle dans l’intervention d’urgence en mer.

### **Section 2: Intervenir en cas d’urgence maritime**

Cette section présente un examen des meilleures pratiques actuelles en matière de prévision du devenir des substances ou des objets qui sont à l’origine de l’urgence maritime. Actuellement, l’OMM coordonne un cadre permettant de fournir des analyses et des prévisions des conditions météorologiques (temps, état de la mer, état des glaces, etc.). Ce soutien est assuré par le Service mondial OMI/OMM d’information et d’alerte pour la météorologie maritime et l’océanographie (WWMIWS) et le SMDSM de l’OMI pour des régions océaniques définies en dehors des zones économiques nationales, appelées METAREAS. Au sein de ces METAREAS, les Membres de l’OMM désignés sont chargés de fournir des informations. En outre, les urgences en matière de pollution sont traitées dans le SIUPM avec des coordonnateurs météorologiques de zone chargés de fournir les informations météorologiques et océanographiques pertinentes, comme décrit dans l’introduction. Ces coordonnateurs météorologiques et océanographiques de zone correspondent largement aux limites des zones METAREA – voir les figures 2.1 et 2.2.



**Figure 2.1 Limites des METAREAS (depuis 2018) (OMM 2018a) pour la fourniture d’informations sur la sécurité maritime.**



**Figure 2.2 : Zones du coordinateur météorologique et océanographique de zone, pour la fourniture d’informations météorologiques et océanographiques à l’appui des incidents de pollution marine. Celles-ci correspondent largement aux limites des zones METAREA.**

La fourniture d’un appui météorologique et océanographique à la sécurité maritime ne sera pas abordée en détail dans le présent rapport, et le lecteur est invité à se reporter aux directives et manuels pertinents de l’OMM, notamment OMM (2018a), OMM (2018b), OMM (2018c), OMM (2021).

La section 2.1 donne un aperçu général des méthodes et des outils permettant de prédire la dérive des objets et des substances dans l’océan. Il sera démontré que les méthodes utilisées se fondent sur des systèmes de modélisation numérique opérationnels et peuvent, dans une large mesure, être identiques pour une large gamme d’objets. Les sections 2.2 à 2.4 décrivent ensuite les modèles et les services spécifiquement applicables à la prévision de la dérive et du devenir de trois catégories importantes d’urgences maritimes: les déversements d’hydrocarbures et d’autres substances nocives; les objets à la dérive (y compris la recherche et le sauvetage); et les rejets de radionucléides.

### **Section 2.1: Aspects communs des systèmes d’intervention d’urgence**

Dans cette section, nous allons d’abord donner un aperçu de l’objectif et de la fonction d’un système d’intervention d’urgence en mer. Ensuite, nous examinerons les éléments d’un système de prévision opérationnel, y compris une description des modèles utilisés pour estimer la dérive et le devenir des objets et des substances, ainsi que les sources des données d’entrée météorologiques et océanographiques nécessaires pour les alimenter. Des informations plus spécifiques et des exemples de systèmes de soutien pour les urgences maritimes sélectionnées pour ce rapport, à savoir la propagation de la radioactivité, les déversements d’hydrocarbures et les objets à la dérive, sont présentés dans les sections 2.2 à 2.4.

2.1.1 Bases de l’intervention en cas d’urgence maritime

Les autorités chargées de répondre aux urgences maritimes sont tenues de prendre des décisions rapides concernant le déploiement de ressources critiques et limitées pour atténuer l’urgence. Les éléments clés de la prise de décision de l’autorité d’intervention sont les prévisions de dérive et de devenir, ainsi que les conditions opérationnelles sur place. Les prévisions relatives à la dérive et au devenir devront porter sur la période allant du début le plus précoce possible de l’urgence jusqu’au départ de la prochaine série de moyens d’intervention. Les conditions océanographiques et météorologiques sur place à l’appui des opérations couvrent la période pendant laquelle les équipes d’intervention se rendent sur les lieux, procèdent aux opérations et retournent à une base sûre. Chaque situation d’urgence aura son propre calendrier qui dictera les périodes de prévision rétrospectives, immédiates et de prévision de la dérive et du devenir des urgences. Le type d’urgence et les ressources d’intervention associées détermineront le besoin d’informations sur l’état des lieux. Au fur et à mesure que l’émergence se déroule, les autorités d’intervention auront besoin que les prévisions et les conditions sur place soient mises à jour en temps utile.

Diagram

Description automatically generated

**Figure 2.1.1: Chronologie de l’urgence**

Les urgences maritimes ont une chronologie commune. Il y a quatre phases dans la chronologie: les conditions avant la situation d’urgence; les conditions initiales de l’urgence, les conditions pendant la période d’intervention, et la conclusion et l’analyse post-urgence, comme l’illustre la figure 2.1.1. Les conditions avant la situation d’urgence couvrent les événements et les conditions qui précèdent l’événement d’urgence réel. Il s’agit généralement des causes profondes de l’urgence maritime, qui peuvent notamment comprendre les éléments suivants: conditions météorologiques et vagues extrêmes, visibilité réduite, hauts-fonds et courants, givrage des superstructures, trafic maritime intense, fatigue ou défaillance mécanique, conception à sécurité intégrée inadéquate, fatigue humaine et prise de décision erronée. Les conditions initiales de l’urgence comprennent la zone probable où l’urgence s’est produite; la période pendant laquelle l’urgence a pu se produire ou se produit, et le type et la quantité de matériel ou d’objets impliqués dans l’urgence. Les conditions pendant la période d’intervention comprennent les trajectoires de dérive et le devenir des matériaux ou des objets depuis la zone de probabilité initiale et la période de temps jusqu’à la fin de l’époque d’intervention suivante. Les organismes d’intervention ont également besoin des conditions et des contraintes sur place pour leurs opérations. Au fur et à mesure que les opérations d’intervention se poursuivent, les conditions initiales sont susceptibles d’être mises à jour et affinées; la séquence suivante de réponses définies et mises en œuvre jusqu’à l’obtention de la dernière étape de la chronologie; la conclusion. Les mesures actives de réponse à la migration sont soit abandonnées, soit transformées en efforts à long terme de niveau inférieur. A ce stade, une analyse post-urgence peut être menée pour déterminer la cause profonde de l’urgence et évaluer l’effort d’intervention dans le but de réduire le risque de reproduction de ce type d’urgence ou d’améliorer les méthodes de gestion d’une telle urgence.

Diagram

Description automatically generated with medium confidence

**Figure 2.1.2: Échelles de temps et de profondeur pertinentes associées à diverses urgences maritimes.**

Bien que les composantes de la réponse aux urgences maritimes soient complexes, elles peuvent être décomposées en deux aspects essentiels: d’une part, des estimations précises des conditions océanographiques et météorologiques et, d’autre part, le modèle de dérive et de devenir spécifique au type d’urgence. Ce dernier aspect est propre à chaque type d’intervention d’urgence, par exemple les tableaux de marge de manœuvre en matière de recherche et de sauvetage ou d’altération des hydrocarbures ou de désintégration radioactive des radionucléides, et ils seront traités dans des sections spécifiques. Le premier aspect, qui concerne la qualité des estimations des conditions météorologiques et océanographiques, est nécessaire pour toute intervention d’urgence en mer. Il est important de garder à l’esprit que des urgences différentes nécessiteront des données à des échelles spatiales et temporelles différentes. La figure 2.1.2 illustre les échelles de temps et de profondeur associées à diverses urgences maritimes. Il est à noter que l’étendue spatiale des données requises sera linéairement liée aux échelles temporelles pertinentes. L’atténuation des déversements d’hydrocarbures et les restaurations sont généralement confinées à la couche de friction, tandis que leurs échelles de temps peuvent aller d’une demi-heure pour l’intervention à des années pour la restauration. En revanche, l’atténuation du pétrole lourd qui coule au fond est confinée à la couche limite du fond. Les survivants des opérations de recherche et de sauvetage et les embarcations de survivants occupent la couche de l’océan en constante évolution. La recherche et le sauvetage ont les délais d’intervention les plus immédiats, de l’ordre de quelques minutes, mais peuvent s’étendre jusqu’à plusieurs jours, et sont limités par la capacité de survie. Les objets ne relevant pas de la recherche et du sauvetage (par exemple, les conteneurs d’expédition ou leur contenu) peuvent s’étendre sur de plus grandes profondeurs que les objets en relevant et peuvent nécessiter des temps de réponse ou de prévision plus longs. Les prévisions météorologiques extrêmes et les prévisions météorologiques pour les navires doivent représenter les conditions à la surface de la mer et dans la partie inférieure de la couche limite atmosphérique (également appelée couche à flux constant) et la zone des vagues océaniques, tandis que les structures au large auront besoin de prévisions qui s’étendent plus profondément dans la couche mixte océanique (la couche d’Ekman) et dans les eaux peu profondes jusqu’aux zones benthiques directement au-dessus de la couche limite de fond. À l’extrémité plus longue et plus profonde des échelles de réponse et de prévision se trouve le transport des particules radioactives et des nucléides dissous.

2.1.2 Fourniture de renseignements météorologiques et océanographiques pour les interventions en cas d’urgence

Le succès des interventions en cas d’urgences maritimes dépend fortement de la connaissance précise des conditions météorologiques et océanographiques, dont l’étendue spatiale et temporelle est dictée par la nature de l’urgence. Cela nécessite la mise en place de systèmes capables de fournir ces informations en temps utile aux agences responsables de l’intervention en cas d’urgence maritime. Les principaux moyens d’estimation des conditions météorologiques et océanographiques pour les prévisions à court terme sont les systèmes de prévision opérationnelle, qui sont des modèles numériques pouvant être utilisés pour prévoir les conditions dans un délai de 2 à 10 jours. Pour les conditions en temps quasi réel, il peut également exister des modèles basés sur des données dans les régions où les observations sont suffisantes, par exemple si l’urgence se situe à proximité d’une station météorologique ou d’un radar côtier à haute résolution. Enfin, si l’urgence s’étend bien au-delà des échelles synoptiques, par exemple dans le cas de la radioactivité, la climatologie peut être utilisée pour fournir des prévisions à long terme.

2.1.2.1 Systèmes de prévision opérationnelle

Les Membres de l’OMM sont en mesure de fournir, grâce à leur propre production et/ou à la collaboration de l’ensemble de la communauté, les types d’observations et de prévisions qui peuvent appuyer les interventions d’urgence. En particulier, le réseau des SMHN recueille des observations presque en temps réel et applique des modèles opérationnels de prévision numérique de l’océan et de l’atmosphère à des échelles allant du local au régional et au mondial. Ces modèles sont opérationnels dans le sens où ils sont appliqués régulièrement (tous les jours ou plus) avec un support suffisant pour gérer les pannes et garantir que les prévisions sont disponibles publiquement dans un délai déterminé. Il est important que les résultats des modèles, ainsi que les données d’observation, puissent être fournis aux utilisateurs dans des formats standard et en utilisant des normes acceptées pour l’échange de données.

Trois types de modèles sont généralement utilisés pour décrire les conditions météorologiques et océanographiques pour les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations de recherche et sauvetage (SAR): les modèles de prévision numérique du temps (PNT) qui fournissent les conditions météorologiques, les modèles de circulation océanique qui fournissent les conditions océaniques telles que les courants, et les modèles de vagues qui fournissent des informations sur le champ de vagues de surface. Les modèles de PNT produisent les données de forçage et de conditions limites de base pour les modèles de circulation océanique et de vagues. Ils peuvent être exécutés dans une configuration couplée, ce qui permet aux modèles d’échanger rapidement des informations à travers leur frontière commune, ou être exécutés individuellement. Plus précisément, ces modèles fournissent les données de forçage géophysique, c’est-à-dire les données météorologiques et océanographiques, nécessaires aux modèles de dérive et de devenir.

Diagram

Description automatically generated

**Figure 2.1.3: Schéma d’un système générique de prévision numérique de la dérive   
et du devenir des objets et des substances dans l’océan.**

Les données de forçage géophysique sont généralement produites par des modèles numériques opérationnels, bien que des produits d’observation et des climatologies puissent être utilisés. Le concept modulaire permet une flexibilité dans la configuration du système. Par exemple, le modèle de dérive et de devenir peut être un modèle de marée noire, un modèle de radionucléide ou un modèle d’objet dérivant, sans altérer sérieusement les autres composants et les mécanismes de connexion. Le schéma direct est celui où tous les composants du modèle sont exécutés sur la même installation de calcul en utilisant des formats de données propriétaires.

La figure 2.1.3 est un schéma conceptuel d’un système de modélisation opérationnel générique pour la prévision de la dérive et du devenir. Il illustre la relation entre les modèles de circulation océanique, de vagues et de PNT qui fournissent des données de forçage géophysique et le modèle de dérive et de devenir d’un objet ou d’une substance spécifique. En outre, il montre la dépendance des conditions initiales de l’incident d’urgence et l’importance de la livraison et de l’archivage des données. Notez qu’il s’agit d’un dessin conceptuel et que la mise en œuvre réelle des systèmes de prévision actuellement actifs varie considérablement. Les éléments du système présentés dans la figure seront étudiés plus en détail dans les sous-sections suivantes.

2.1.2.2 Prévision numérique du temps (PNT)

Les produits de données opérationnelles de la PNT couvrent l’océan mondial de l’échelle globale à l’échelle très locale, à des résolutions horizontales de centaines de mètres à plusieurs kilomètres, et sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs jours (généralement 10). L’accès aux installations de calcul avancées, aux réseaux d’observation complets, ainsi qu’au développement technologique axé sur la recherche, est généralement assuré par une forte demande du public. La littérature scientifique liée à la PNT et la documentation des modèles de PNT sont volumineuses, et toute description exhaustive dépasse le cadre de ce rapport. Ce qui est important dans le contexte actuel, c’est que les modèles de circulation océanique et de vagues sont forcés par les champs de la PNT (vents, pression, flux de chaleur, etc.), surtout aux échelles synoptiques. C’est notamment le cas pour les vagues. En outre, les modèles de devenir dépendent aussi directement des paramètres météorologiques, par exemple la température de l’air pour la survie des objets issus et l’altération des hydrocarbures. Par conséquent, la précision des données de forçage de la PNT est déterminante pour la précision des autres modèles du système.

2.1.2.3 Modèles numériques de circulation océanique

Les modèles de circulation océanique sont également un élément clé de l’intervention d’urgence en mer, car ils fournissent les courants de surface indispensables, en plus d’autres paramètres importants tels que la température de surface de la mer. Dans les climats plus froids, il est également courant de coupler un modèle de glace de mer avec le modèle de circulation océanique pour fournir des estimations des conditions de glace de mer. Il existe également des détails techniques clés concernant l’application des données sur les courants de surface en océanographie opérationnelle, qui sont couverts en détail par un récent article de synthèse (Röhrs et al., 2021), et ne seront que brièvement évoqués ici.

La question de la précision est particulièrement sérieuse pour les modèles de circulation océanique, dans le contexte d’un système de prévision de la dérive et du destin. Comme indiqué ailleurs, la précision du modèle de PNT est fondamentale pour le système (cf. section 2.1.2.2). Alors que les prévisions du modèle de vagues sont étroitement liées aux données du modèle de PNT (cf. section 2.1.2.4), il existe des processus physiques dans l’océan qui peuvent contribuer de manière significative au champ de courant total. La direction topographique, les gradients de densité et les mécanismes d’instabilité qui les accompagnent, ainsi que les marées sont des processus qui modifient et génèrent des composantes de courant qui peuvent égaler, voire dépasser, la composante de courant due au vent. De plus, la moyenne échelle océanographique, c’est-à-dire l’échelle des tourbillons et des méandres, est à peine résolue par les résolutions actuelles des modèles et il existe peu d’observations qui la résolvent de manière fiable. Ces facteurs expliquent pourquoi les données du modèle de circulation océanique sont sans doute les moins précises des trois composantes du forçage géophysique. Il s’agit d’un problème grave pour les interventions d’urgence maritime à court terme, en particulier les opérations de recherche et de sauvetage et les marées noires, qui dépendent fortement de prévisions précises et à haute résolution des courants de surface.

L’utilisation de l’assimilation de données peut grandement améliorer la précision de l’état moyen de l’océan, mais il existe des limites quant à l’étendue de cette amélioration aux petites échelles. Elle dépend largement de la résolution des données assimilées ainsi que du modèle. Jacobs et al. (2021) ont démontré que l’assimilation d’observations à basse résolution n’améliore pas la prévision des caractéristiques de moyenne échelle, même dans un modèle à résolution de tourbillons. Il a été démontré dans le Golfe du Mexique que l’utilisation d’un filtre spatial avec une échelle de pliage électronique de 58 km sur les courants de surface du modèle réduit réellement les erreurs dans les trajectoires moyennes par rapport à l’utilisation des données du modèle à résolution complète de 1 km. Comme indiqué ci-dessus, la variabilité de ces petites échelles est primordiale pour les interventions d’urgence et les modèles et observations à plus haute résolution sont importants pour reproduire cette variabilité. Cela fait de la prévision à court terme dans l’océan un défi (Christensen et al., 2018).

Dans le contexte de la réponse côtière, les modèles sont ici principalement d’un domaine limité pour augmenter la résolution des côtes et de la bathymétrie. Ceux-ci partagent souvent une frontière ouverte avec un modèle global opérationnel et sont forcés par des produits de vent à haute résolution. Ces modèles côtiers peuvent être sensibles aux incertitudes sur les frontières ainsi que sur la bathymétrie. Certains progrès ont été réalisés pour assimiler les données radar à haute résolution (Breivik et Sætra, 2001; Sperrevik et al., 2015; Hernandez-Lasheras et al., 2021) ou l’imbrication bidirectionnelle dans les canaux étroits (Herzfield et Rizwi, 2019; Ding et al., 2021) pour améliorer la précision et la résolution dans les régions côtières. Les nouveaux produits altimétriques à haute résolution tels que SWOT (Carrier et al., 2016) (analyse des points forts, des points faibles, des possibilités et des risques) et le produit de la hauteur de la surface de la mer de 5 Hz du wave glider (Penna et al., 2018) (robot de surface transmettant des données) offrent un certain potentiel qui pourrait également permettre de limiter davantage la variabilité à petite échelle.

Si les observations océaniques sont accessibles presque en temps réel, il est alors possible d’utiliser des méthodes statistiques pour créer des prévisions à court terme de l’ordre de 24 à 48 heures. Ceux-ci ont traditionnellement été développés avec des installations radar à haute résolution (Barrick et al., 2012; Solabarrieta et al., 2021) car ces observations fournissent des courants de surface sur une grille. Il est également courant de déployer des bouées dérivantes lors des opérations d’intervention d’urgence, car ces données peuvent être utilisées pour «suivre» l’urgence maritime, étant donné que leurs caractéristiques de dérive sont semblables à l’objet ou au matériau que l’on souhaite suivre. Le déploiement de ces dériveurs fournit également une évaluation rapide de la sortie du modèle numérique dans la région qui peut être qualitativement liée à l’incertitude dans la prévision des courants de surface locaux.

Les courants de marée sont une autre source de variabilité des courants, notamment dans le contexte côtier, et ont parfois leur propre modèle inverse indépendant des modèles de circulation océanique (Egbert et Erofeeva, 2002; Carrière et al, 2016). Bien que le mouvement des marées soit présent dans les données altimétriques par satellite, ces signaux sont souvent faibles par rapport à la hauteur dynamique du niveau de la mer et sont souvent filtrés du signal. Cependant, étant donné que les constituants de la marée barotrope sont stationnaires, de nombreux passages peuvent être utilisés pour créer un modèle inverse pour les hauteurs de marée et les courants (Egbert et Erofeeva, 2002); Carrière et al, 2016). Ces modèles sont sensibles à la précision des lignes côtières et de la bathymétrie, mais une fois que les données constitutives sont calculées, créer une série chronologique pour n’importe quelle période est futile.

2.1.2.4 Modèles numériques des vagues

Les modèles de vagues sont intimement liés aux modèles météorologiques, mais le rôle des vagues dans l’intervention d’urgence en mer est vaste et nous allons donc en aborder brièvement certains aspects. Une connaissance précise du champ de vagues est très importante pour les opérations d’intervention, qu’il s’agisse d’opérations de recherche et de sauvetage ou d’atténuation des déversements d’hydrocarbures, car le champ de vagues influence grandement leur sécurité et leur succès. Comme indiqué dans la section 2.1.2.2, le forçage météorologique des modèles de PNT est dominant pour les modèles de vagues, ce qui signifie que la précision d’un modèle de vagues est largement déterminée par la précision du modèle de PNT qui le pilote. C’est notamment le cas pour les vagues de vent, qui sont très importantes dans les modèles de dérive et de devenir. D’autre part, la prévision de la houle est moins dépendante des vents de surface dans un modèle régional de vagues, et plus dépendante des conditions aux limites latérales.

Les vagues sont importantes pour le transport lagrangien des matériaux car elles introduisent une dérive lagrangienne supplémentaire, également connue sous le nom de dérive de Stokes, qui dépend de la raideur de la vague et qui est généralement d’environ 1 à 1,5 % de la vitesse du vent à 10 mètres à la surface et qui diminue rapidement avec la profondeur. Cette dérive de Stokes doit être ajoutée aux courants eulériens obtenus à partir de produits de données maillées pour obtenir la vitesse lagrangienne. Les vagues peuvent également avoir un impact direct sur de grands objets dont l’échelle est similaire à la longueur d’onde dominante, comme les porte-conteneurs, soit par rupture, soit par réflexion. C’est un facteur supplémentaire à prendre en compte pour certaines opérations de recherche et de sauvetage.

Les vagues, par le biais du déferlement, sont également importantes pour l’entraînement et le mélange vertical des hydrocarbures et d’autres matériaux à flottabilité faible ou neutre, tels que les plastiques marins (Reisser et al., 2015). Ce mélange vertical peut influencer le transport horizontal du pétrole (Röhrs et al., 2018) en raison du fort cisaillement près de la surface de l’océan. Le temps pendant lequel le matériau restera sous la surface dépendra de l’équilibre entre le flux de quantité de mouvement turbulent descendant depuis la surface, principalement par le biais des vagues déferlantes, et la flottabilité positive du matériau.

2.1.2.5 Systèmes de données pour les interventions d’urgence en mer

L’avènement de modèles numériques opérationnels pour la circulation océanique et les vagues, pilotés par des modèles météorologiques opérationnels, a conduit à la première modélisation numérique de la trajectoire de dérive des objets de la marée noire et des opérations de recherche et de sauvetage. Dans ces premiers efforts, le module de trajectoire de dérive était intégré dans le modèle de circulation océanique. Le ou les océanographes responsables du modèle ont exécuté le module de trajectoire à la demande de l’organisme d’intervention, qui avait fourni un ensemble assez limité de conditions initiales aux modélisateurs. Une légère variante de ce système individualisé consistait à ce que les modélisateurs fournissent dans un format spécifique unique les champs de courant et de vent au modèle de trajectoire propre à l’organisme d’intervention. Dans ces deux schémas, la région de prévision de la dérive est limitée à la région du modèle de circulation océanique. Les prévisions immédiates et les prévisions sont limitées aux capacités des modèles, et les prévisions rétrospectives sont également limitées par les capacités des archives internes. Le schéma direct de la livraison des données du modèle est illustré à la figure 2.1.3.

**Diagram

Description automatically generated**

**Figure 2.1.4: Schéma d’un système de prévision numérique de la dérive et du devenir, le ou les modèles de dérive et de devenir étant indépendants des données de forçage géophysique. Ce dernier doit être livré dans un format spécifié.**

Avec l’augmentation de la disponibilité des modèles océanographiques opérationnels, un deuxième schéma a été mis en place. Dans ce schéma, les modèles de trajectoire et de devenir sont exécutés indépendamment des modèles océanographiques et météorologiques. Cependant, ces modèles d’entrée doivent fournir leurs sorties au modèle de trajectoire et de devenir dans un format spécifié, par exemple les formats de données GNOME (https://cordc.ucsd.edu/projects/mapping/documents/GNOME\_data\_formats.pdf), ou un ensemble limité de formats comme illustré à la figure 2.1.4. Dans ce schéma, le nombre de régions accessibles par le modèle opérationnel de destin et de trajectoire a augmenté par rapport au schéma direct. Cependant, les prévisions rétrospectives, les prévisions immédiates et les prévisions sont toujours limitées aux capacités des modèles océanographiques et météorologiques.

Diagram

Description automatically generated

**Figure 2.1.5: Schéma d’un système de prévision numérique de la dérive et du devenir, le ou les modèles de dérive et de devenir étant indépendants des données de forçage géophysique.**

Ces derniers sont ici gérés par un système d’acquisition de données qui maintient un référentiel de données actualisé, toujours prêt à fournir des données de prévision et de rétrodiffusion au(x) modèle(s) de dérive et de devenir.

Un troisième système a été mis au point pour pallier les insuffisances des deux systèmes précédents. Dans ce schéma, il existe un système d’accès, d’archivage et de récupération des données qui est totalement indépendant des modèles océanographiques et météorologiques et des modèles de devenir et de trajectoire, comme l’illustre la figure 2.1.5. Les fichiers de sortie des modèles océanographiques et météorologiques sont accessibles dans leurs formats natifs sur les calendriers des modèles, où les champs de prévision immédiate sont archivés et les champs de prévision les plus récents remplacent le champ de prévision actuelle. Par conséquent, les champs de vent et de courant nécessaires ne sont pas archivés par les producteurs mais par ce système d’acquisition de données. Le modèle opérationnel de devenir et de trajectoire, et si disponible le modèle de pré-détresse, fait ensuite des demandes de données au système d’acquisition de données pour un cube de données spécifié (type de produit / grille latitude-longitude / période de temps). Le système d’acquisition de données renvoie alors uniquement les données au format des modèles de destin et de trajectoire pour le cube de données spécifié. Les conditions sur place et certains modules de pré-détresse font des demandes de séries chronologiques à partir d’un emplacement spécifié.

Plus récemment, la mise en œuvre croissante de protocoles internationalement acceptés pour l’accès aux données, la gouvernance et la documentation dans les communautés atmosphériques et océanographiques rend plus de données de forçage géophysique disponibles. Ces protocoles tentent d’appliquer les principes FAIR: les données FAIR sont des données qui sont facilement trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables (Wilkinson et al., 2016). Le principe de base des données FAIR est de rendre les données facilement accessibles et de plus en plus utiles à un plus grand nombre d’utilisateurs, où qu’ils soient. Parallèlement à cette évolution, plusieurs centres de production nationaux, régionaux et mondiaux de données météorologiques et océanographiques sont devenus des services de données publics efficaces et mettent activement en œuvre des politiques de données et des installations de gestion des données conformes aux principes FAIR. Le système d’information de l’OMM (version 2.0 du SIO) en est un exemple pertinent; https://community.wmo.int/activity-areas/wis/wis2-implementation) pour les données opérationnelles sur la météorologie et les vagues fournies par le réseau des centres météorologiques régionaux spécialisés (CMRS); L’inclusion de produits de prévision numérique des océans à l’échelle mondiale est à l’étude. Pour les données opérationnelles sur la circulation océanique et les vagues, on peut citer le Copernicus Marine and Environmental Monitoring Service (https://marine.copernicus.eu) et certains participants à la collaboration OceanPredict (https://www.godae-oceanview.org/science/ocean-forecasting-systems/system-descriptions). En ce qui concerne les schémas de flux de données présentés dans les figures 2.1.4 et 2.1.5, ces services représentent des sources alternatives de données de forçage géophysique qui peuvent fournir des données aux dépôts locaux et, dans de nombreux cas, permettre le streaming de cubes de données sur demande, réduisant ainsi le besoin de stocker de grandes quantités de données localement.

2.1.3 Modèles de transport opérationnels – Comportement du devenir et de la dérive

Une approche numérique est également appliquée à la prévision opérationnelle de la dérive et du devenir des substances et des objets dans l’océan. Ces modèles sont formulés pour une classe spécifique de substances ou d’objets, mais tous dépendent de données d’entrée qui décrivent les conditions météorologiques et océanographiques, c’est-à-dire les données de forçage géophysique. Contrairement aux modèles opérationnels de prévision océanographique et météorologique, les modèles opérationnels de transport sont généralement exécutés à la demande en réponse à une demande spécifique. En outre, ces modèles de prévision sont souvent gérés par des fournisseurs privés ou publics dans les secteurs concernés, par exemple l’industrie pétrolière offshore ou les garde-côtes. Ces modèles peuvent généralement être exécutés à la fois en avant dans le temps, pour produire des prévisions en vue d’une action corrective, et en arrière dans le temps, afin de pouvoir prédire la source d’une urgence marine.

À l’origine, les modèles de transport opérationnels utilisaient un nombre très limité (entre 1 et 11) de particules simulées pour représenter les objets pétroliers ou les opérations de recherche et de sauvetage. Pour chaque particule, un cercle d’incertitude a été attribué, qui s’agrandit soit avec le temps, soit avec la distance en ligne droite ou en ligne droite depuis l’origine. Ensuite, la zone encerclée a été encadrée, et c’était l’emplacement de la réponse. Ces méthodes contenaient de nombreuses simplifications, notamment des courants ou des vents constants ou uniformes, un seul type d’objet ou d’hydrocarbure dérivant, aucune modélisation du devenir, et des procédures d’optimisation des ressources limitées. Toutefois, ces méthodes pourraient être mises en œuvre en utilisant des informations historiques ou environnementales simples avec des outils de navigation manuels de base sur des cartes de navigation en papier. Avec le développement des ordinateurs personnels, ces méthodes «manuelles» ont ensuite été programmées à l’aide de cartes électroniques.

La méthode de loin la plus courante pour le comportement de devenir et de dérive est basée sur le modèle de suivi des particules lagrangiennes (van Sebille et al, 2018, Dagestad et al, 2018), également appelé méthode de Monte Carlo. Ce type de modèle suppose que le matériau peut être décomposé en plusieurs centaines ou milliers de particules ou, dans le cas de la recherche et du sauvetage, qu’il représente une décomposition de la probabilité de l’objet recherché. Ces particules sont ensuite transportées à partir de leurs points individuels et de leur heure d’origine en utilisant les meilleures estimations pour les courants, les vents et les vagues jusqu’à l’heure concernée. Les paramètres météorologiques et océanographiques les mieux estimés sont interpolés à l’emplacement et au moment de la particule. Des erreurs sont inévitablement associées à l’interpolation, ces erreurs dépendant de l’échelle de la grille de données d’entrée. Cette erreur est particulièrement importante dans les zones côtières, en fonction de la précision et de la résolution du trait de côte dans le système de prévision. De même, le choix du schéma d’advection de la particule peut introduire des incertitudes; le choix le plus populaire, en raison de sa robustesse et de la faible erreur qu’il produit, est le schéma de Runge-Kutta du quatrième ordre (Nordam et Duran, 2020).

Il est également simple d’ajouter une composante stochastique au mouvement de chaque particule (Griffa, 1996) pour simuler la dispersion sous la grille et d’autres incertitudes du modèle. Une méthode de «marche aléatoire» avec une diffusivité constante est la méthode la plus courante pour simuler la dispersion à petite échelle, mais des méthodes stochastiques d’ordre supérieur, comme le modèle de «vol aléatoire», peuvent également être utilisées. Les deux modèles ajoutent une composante stochastique à chaque pas de temps d’advection.

Il existe une autre méthode lagrangienne dans laquelle les trajectoires sont calculées le long de lignes de courant, qui sont les contours de la vitesse instantanée, plutôt que le long de lignes de chemin. Des exemples de ce type de suivi des particules lagrangiennes se trouvent dans les codes ARIANE (Blanke et Raynaud, 1997) et TRACMASS (Döös et al., 2013). Cette approche est conçue pour fonctionner efficacement avec la sortie du modèle sur une grille C et ne dépend pas des schémas d’interpolation ou d’advection car elle calcule analytiquement la trajectoire des particules à travers les cellules de la grille. L’utilisation des lignes de courant suppose un état stable, ou du moins un état stable par morceaux, et les trajectoires sont calculées pour chaque sortie du modèle. Cette méthode nécessite également le champ de vitesse non divergent tridimensionnel complet et toute divergence de surface, qui est courante dans l’océan, peut conduire à une grande composante verticale de la ligne de courant. Cette approche complique également l’ajout de toute composante susceptible d’entraîner une divergence, comme l’ajout d’une composante de marge de manœuvre ou d’une diffusion stochastique. En raison de ces contraintes, ces modèles d’advection de lignes de courant ne sont généralement pas utilisés de manière opérationnelle pour les prévisions à court terme, mais restent utiles si des prévisions à plus grande échelle sont nécessaires.

En plus des deux approches lagrangiennes, une approche eulérienne, qui calcule l’équation d’advection-diffusion pour une concentration de traceur (Ivorra et al., 2021), est aussi parfois employée. Les modèles de transport eulériens sont bien adaptés aux simulations sur de longues périodes où la diffusion exigerait que les modèles de transport lagrangiens aient un nombre prohibitif de particules. Les modèles de transport eulériens souffrent également d’une diffusion numérique excessive, en particulier sur les bords de la nappe, bien que des progrès récents permettent de remédier à cette lacune (Ivorra et al., 2021).

2.1.4 Évolutions attendues pour l’amélioration des services

Dans les sous-sections précédentes, les meilleures pratiques actuelles en matière de construction de systèmes de prévision opérationnelle de la dérive et du devenir des objets et des substances dans l’océan ont été présentées. L’accent a été mis sur les éléments communs aux systèmes spécialisés dans les marées noires, les objets dérivants et la dispersion des radionucléides: les données de forçage géophysique et les modèles qui les produisent, et les modèles de transport qui estiment comment les objets et les substances se déplacent, se répandent et se diffusent. Il a été démontré qu’il existe des modèles et des services bien établis qui peuvent être déployés et utilisés par de nouveaux acteurs et pour de nouvelles catégories d’objets et de substances. Cette section présente quelques évolutions importantes qui visent à améliorer l’efficacité des services de prévision et la qualité de leurs produits.

1. Amélioration des données de forçage de la circulation océanique. L’amélioration de la précision des modèles de circulation océanique est sans aucun doute le facteur unique qui améliorerait le plus la qualité de tout système de modélisation du transport. Il s’agit d’un domaine majeur de la recherche et du développement océanographiques qui est activement poursuivi dans le monde entier. Elle englobe non seulement le développement de modèles, mais aussi le déploiement et la maintenance des systèmes d’observation et le développement des schémas d’assimilation de données qui les relient. En tant que telle, elle ne peut être portée uniquement par des services fournissant des prévisions sur la dérive et le devenir des objets et des substances. Ces services peuvent, en principe, trouver les meilleures données disponibles sur la circulation océanique pour leur zone particulière à partir d’une variété de sources, des modèles globaux aux modèles proches des côtes, le plus souvent en combinaison imbriquée. Dans la pratique, cependant, les services opérationnels individuels continueront à s’appuyer principalement sur leurs sources établies de données de forçage, pour des raisons de fiabilité. L’utilisation d’autres jeux de données de forçage fournira une alternative ou un complément à leurs jeux de données de forçage nominaux.

2. Collaboration multinationale pour le développement de modèles. Comme le développement de codes de modèles numériques et de schémas d’assimilation de données est très exigeant, non seulement pour la circulation océanique mais aussi pour l’atmosphère, les vagues et le transport, le développement de codes de modèles communautaires ouverts soutenus par des groupes de développement distribués est devenu bien établi. Plusieurs codes de modèles ont été mentionnés ci-dessus. Ceci est particulièrement avantageux dans le contexte du déploiement de systèmes de prévision de la dérive et du destin dans les nations maritimes en développement. Une exigence importante pour le développement de modèles est l’identification de tests et de cas de référence. Dans le contexte actuel, il est particulièrement utile d’établir quelques cas réels bien décrits pour lesquels des données géophysiques de forçage et de vérification sont facilement accessibles.

3. Accès aux données de forçage géophysique. Si les données de forçage alternatives doivent constituer un complément viable, elles doivent être facilement disponibles et raisonnablement fiables. Des solutions technologiques appropriées pour l’accès et le transfert des données sont disponibles (ftp, OpENDAP, API, etc.) et un nombre croissant de fournisseurs de données rendent leurs données opérationnelles accessibles en ligne et par des interfaces machine-machine, par exemple la version 2.0 du SIO. Il est désormais possible de télécharger gratuitement les données des modèles de prévision numérique de l’atmosphère, des vagues et de l’océan pour toute partie de l’océan mondial. Une mise en garde s’impose: le mélange de données sur la circulation océanique, les vagues et la météorologie provenant de sources différentes peut donner lieu à des données de forçage incohérentes; Les données cohérentes sont celles où les données météorologiques appliquées sont les mêmes que celles qui ont été utilisées pour forcer les modèles de vagues et de circulation océanique. Ce manque de cohérence est une source d’incertitude dans la prévision de la dérive qui est difficile à estimer.

Dans l’ensemble, la disponibilité de données de forçage géophysique utiles s’améliore et rend de plus en plus possible la mise en œuvre de services de dérive et de destin dans de nouveaux domaines ainsi que l’amélioration des services existants. Néanmoins, pour de nombreux intervenants d’urgence et SMHN, la fourniture fiable de données de forçage géophysique par le biais d’un réseau de type CMRS serait bénéfique.

4. Informations sur le degré d’incertitude. L’estimation de la précision des prévisions de dérive et de devenir est potentiellement utile pour les intervenants, mais difficile à fournir pour les producteurs. D’une part, il est difficile de quantifier la précision en chiffres, qu’ils proviennent d’une combinaison théorique de la précision des données de forçage ou de comparaisons directes des prévisions des modèles et des observations de dérive dans des événements réels. D’autre part, c’est un défi de transmettre les informations sur le degré d’incertitude aux utilisateurs d’une manière efficace.

Une approche courante du problème est l’utilisation de méthodes de prévision d’ensemble, dans lesquelles plusieurs simulations différentes mais également réalistes de la même situation sont effectuées. La distribution des résultats donne des informations sur la prévision la plus probable et sur son incertitude; une distribution étroite indique une plus grande certitude qu’une distribution plus large. En matière de PNT, de prévision des vagues et de la circulation océanique, deux voies de mise en œuvre sont actuellement suivies:

a) Ensembles générés par le même modèle en utilisant diverses perturbations du système du modèle (conditions initiales, conditions aux limites, paramètres du modèle, etc.). En général, 30 à 100 membres de l’ensemble sont exécutés afin d’atteindre une signification statistique suffisante. Par conséquent, ce type d’ensemble est coûteux en termes de calcul, et la production d’ensemble est généralement réalisée à une résolution légèrement inférieure à celle du modèle déterministe principal.

b) Les méthodes d’ensembles multi-modèles tentent de combiner les simulations effectuées avec différents codes de modèles, généralement en rassemblant les résultats de plusieurs systèmes de prévision existants qui couvrent la même zone. Le nombre de membres de l’ensemble étant beaucoup plus faible (inférieurs à 10), l’accent est davantage mis sur l’évaluation qualitative des différences que sur l’incertitude statistique. Le coût de calcul est moindre que pour le premier type, et il est distribué.

Les méthodes d’ensemble du premier type sont utilisées dans la PNT depuis plusieurs années. Plus récemment, ils ont été appliqués à la prévision des vagues et de la circulation océanique. Malgré cela, il reste difficile de traduire les probabilités en informations facilement compréhensibles pour les utilisateurs.

[5. Données à la surface de l’océan La réponse à la plupart des incidents maritimes d’urgence se concentre sur la surface de l’océan ou sur la couche proche de la surface (approximativement, le mètre supérieur). De nombreux systèmes de modélisation de la circulation océanique ne fournissent pas de données calculées spécifiquement pour cette couche. Généralement, on calcule une moyenne sur les quelques mètres supérieurs, soit un intervalle fixe sur toute la zone du modèle, soit un intervalle qui varie avec la profondeur du fond. Dans certaines formulations du modèle, la moyenne sur une épaisseur de couche supérieure variant dans le temps est calculée. Les modèles de dérive et de devenir pour les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations de recherche et de sauvetage dépendent de la connaissance précise de la couche proche de la surface, de préférence avec un profil finement résolu des courants. En l’absence de telles données dans la sortie du modèle numérique océanique, les variables proches de la surface peuvent être déterminées par post-traitement de la sortie du modèle, en utilisant des hypothèses a priori sur la distribution des variables dans la couche supérieure du modèle. Ces calculs peuvent être effectués dans le modèle de transport ou avant l’ingestion dans le modèle de transport. Les principaux fournisseurs de données sur la circulation mondiale et régionale devraient être encouragés à fournir des données sur la proximité de la surface et/ou à fournir des algorithmes de calcul des profils de proximité de la surface.](http://www.ntis.gov/)

### **Section 2.2: Déversements d’hydrocarbures et d’autres substances nocives**

Les substances nocives et dangereuses sont ici définies comme des substances potentiellement dangereuses pour les personnes ou pour l’environnement marin. Ils peuvent être d’origine naturelle (par exemple, le pétrole) ou artificielle (par exemple, les biphényles polychlorés). Les substances peuvent être nocives soit en raison de leurs caractéristiques chimiques toxiques, soit en raison des concentrations extrêmes qui se produisent lorsqu’elles sont déversées dans l’océan. Les accidents impliquant des produits pétroliers, qu’il s’agisse de pétrole brut ou raffiné, ont fait l’objet de la plus grande attention dans le contexte des déversements dommageables, et les procédures d’intervention d’urgence ont été élaborées principalement pour les déversements de pétrole. Les modèles de dérive et de devenir du pétrole dans l’océan, ainsi que les systèmes de prévision construits autour d’eux, sont décrits dans cette section.

Les leçons tirées du développement et de l’application des outils de prévision de la dérive et du devenir des déversements de pétrole ont encouragé l’application de ces outils à d’autres substances nocives, telles que les eaux usées. Il convient de noter que la distinction entre les substances nocives décrites ici et les objets dérivants décrits à la section 2.3 n’est pas toujours claire; par exemple, certains objets à la dérive, comme les plastiques, peuvent être considérés comme nocifs. Dans le contexte actuel, cependant, la distinction est fondée sur les outils jugés les plus applicables. Les fluides déversés et les très petits objets, tels que les cendres, seraient typiquement traités avec des outils de type déversement d’hydrocarbures, tandis que les objets flottants plus grands, dont les caractéristiques de dérive individuelles peuvent être estimées, pourraient être traités par des méthodes d’objets dérivants (cf. section 2.3).

Comme indiqué plus haut, la présente section traitera presque exclusivement des méthodes de lutte contre les déversements d’hydrocarbures, tout en gardant à l’esprit qu’elles servent de modèle pour d’autres substances nocives.

2.2.1 Contexte

Les déversements d’hydrocarbures sur l’océan se produisent depuis l’avènement des activités industrielles qui ont conduit à la construction de grandes installations le long des côtes (par exemple, les raffineries), en mer (par exemple, les plates-formes pétrolières offshore) et au transport maritime. Le besoin de mesures correctives s’est fait sentir dès les années 1960 et 1970, après d’importantes marées noires liées à l’essor du transport par pétroliers et de la production pétrolière offshore. Les préoccupations du public concernant les dommages environnementaux causés aux côtes, aux fonds marins et à la faune par les grandes marées noires (par exemple, les naufrages du Torrey Canyon en 1967 et de l’Amoco Cadiz en 1978, ou les rejets de la plate-forme Bravo d’Ekofisk en 1977) ont conduit au développement de capacités d’intervention d’urgence dans les principaux pays maritimes industrialisés.

Cependant, la mise en service de pétroliers toujours plus grands, l’ouverture de nouveaux champs pétrolifères et la pose de pipelines sur le fond marin ont augmenté le risque de déversement. De graves déversements d’hydrocarbures se sont produits à la fin des années 1980: Odyssey en 1988, Exxon Valdez en 1989, Khark 5 en 1989, et ABT Summer 1991. (En 1991, l’une des plus grandes marées noires a eu lieu dans le golfe Persique pendant la deuxième guerre du Golfe). Ces déversements ont conduit à la Convention internationale sur la préparation, la lutte et la coopération en matière de pollution par les hydrocarbures (OPRC) de l’OMI. Les parties sont tenues d’établir des mesures pour faire face aux incidents de pollution, soit au niveau national, soit en coopération avec d’autres pays. Même si le nombre d’incidents de déversement diminue, d’énormes déversements se produisent encore occasionnellement, comme le naufrage du Prestige en 2002, la marée noire de Deepwater Horizon en 2010 et la collision du pétrolier Sanchi en 2018. La marée noire du MV Wakashio en 2020, qui a causé de gros dégâts environnementaux à l’île Maurice, est un cas récent qui a été exposé par Daniel et Virasami en 2021, et qui explique bien les différents acteurs impliqués dans la réponse à une telle urgence. En 2019, le porte-conteneurs Grande America, qui voyageait entre Hambourg et Casablanca, a pris feu et chaviré[[1]](#footnote-2), ce qui a entraîné des marées noires et des substances chimiques dangereuses dans l’océan. De même, plusieurs services météorologiques ont été impliqués dans la fourniture d’informations aux autorités d’intervention. Plus récemment, l’éruption volcanique des Tonga en janvier 2022 a démontré un impact en cascade d’aléas multiples à partir de l’éruption initiale, déclenchant une vague de tsunami à l’échelle du bassin dans l’océan Pacifique, où les vagues s’approchant de la côte du Pérou ont endommagé une installation pétrolière, entraînant une marée noire[[2]](#footnote-3).

Bien que de tels déversements importants entraînent de graves dommages pour l’environnement local, ils ne se produisent pas souvent. En réalité, la plupart des déversements concernent de petites quantités d’hydrocarbures et ils se produisent fréquemment (presque quotidiennement). Bien que le montant de chaque déversement soit plutôt faible, le montant total et l’impact cumulatif sur les zones touchées sont importants, en particulier dans les zones à fort trafic. Il est difficile de détecter les petits déversements, ce qui complique l’intervention et l’établissement de statistiques fiables.

La réponse aux incidents de déversement d’hydrocarbures comprend: la découverte, la surveillance et l’évaluation du déversement; l’acquisition et le déploiement d’équipements permettant de réduire l’ampleur du déversement (par exemple, contention physique, traitement chimique); des mesures correctives telles que le nettoyage des côtes, des sédiments de fond et de la faune; et des répercussions juridiques et financières.

Dès le départ, la prévision de la dérive des substances déversées dans l’océan s’est axée sur la connaissance locale des courants, des conditions de vent et de vagues, des cartes de marées et des cartes de courants statiques, selon les disponibilités. Dans de nombreux pays, c’est, en réalité, toujours le cas. Au cours des dernières décennies, des systèmes de prévision plus sophistiqués ont été développés, d’abord dans les principaux pays côtiers industrialisés. Comme décrit dans la section 2.1, ces systèmes se fondent sur des modèles numériques qui utilisent les prévisions numériques disponibles des vents, des courants et des vagues pour calculer la dérive et la propagation probables d’une substance déversée.

Après une poignée de services pionniers dans les années 1980, il existe aujourd’hui des services publics de prévision des déversements d’hydrocarbures dans la plupart des pays maritimes développés et d’autres sont en cours de développement. Les États-nations étant responsables de la protection de leurs côtes et des ressources de leurs zones économiques exclusives, la prévision des marées noires est principalement mise en œuvre en tant que service public national. Les services régionaux ou autres services transfrontaliers sont réalisables et sont activement explorés, par exemple le SIUPM et les exemples régionaux présentés dans la section 2.2.2.1 ci-dessous. Cependant, les services activement opérationnels pour le bien public à l’échelle mondiale sont peu nombreux: par exemple, MétéoFrance en gère un. D’autre part, il existe un certain nombre de prestataires commerciaux qui fournissent des services spéciaux, par exemple aux compagnies pétrolières, et certains ont une portée internationale (voir Hackett et al., 2009, pour un exemple).

2.2.2 Examen des capacités existantes

Il existe deux approches pour les modèles de marée noire, à savoir les modèles eulériens et lagrangiens. Le premier type calcule le comportement des nappes de pétrole en utilisant une équation d’advection-diffusion pour une concentration de traceur sur une grille de modèle de différence finie. Le second type suppose des nappes de pétrole représentées par un grand nombre de particules et calcule le comportement de ces dernières. La plupart des modèles de simulation de marée noire utilisent le modèle de suivi des particules lagrangiennes, car il est plus rentable que le modèle eulérien.

Les déversements de pétrole dans l’océan sont régis par une très grande variété de processus: advection, étalement, diffusion, mélange vertical, évaporation, émulsification, dispersion, dissolution du pétrole, photo-oxydation, biodégradation, etc. Dans la modélisation des marées noires, il est difficile d’inclure tous ces processus et, en général, seuls les processus dominants sont pris en compte. Le choix du processus dépend de la situation cible et des exigences locales, mais l’advection, la propagation, la diffusion, l’évaporation et l’émulsification sont considérées comme essentielles dans la plupart des modèles de dérive et de devenir des déversements d’hydrocarbures.

Les processus physiques qui déterminent l’évolution du pétrole dans l’océan, notamment l’advection, la diffusion et le mélange vertical, sont fondamentalement les mêmes que pour les autres substances et objets dérivants; Ces processus et la manière dont ils sont mis en œuvre dans la modélisation de la dérive et du devenir sont décrits dans la section 2.1.2.

Les processus spécifiques au pétrole sont traités dans le modèle de dérive et de devenir du pétrole. L’étalement est basé sur la théorie des trois phases de Fay (Fay, 1971), mais est souvent modifié pour inclure d’autres facteurs, comme la diffusion par cisaillement, dans les modèles récents. L’évaporation, l’émulsification et les autres processus d’altération dépendent des caractéristiques du pétrole et peuvent varier fortement d’un type de pétrole à l’autre. Il existe plusieurs façons d’estimer l’évaporation, de la formule empirique en vrac (par exemple, Stiver et Mackay, 1984; Fingas, 2015) à des modèles compliqués de pseudo-composants (par exemple, Jones, 1997). L’émulsification, en particulier l’émulsion eau dans l’huile, modifie radicalement les caractéristiques de l’huile, ce qui a une incidence sur les opérations d’enlèvement.

De nombreux efforts ont été consacrés au développement de modèles de marées noires, et les systèmes de modélisation les plus modernes sont capables de simuler le comportement de base des nappes de pétrole à un niveau tout à fait satisfaisant. Toutefois, il est encore possible d’améliorer certains processus spécifiques. Pour un aperçu complet de la science et de la technologie des déversements d’hydrocarbures en mer, le lecteur est invité à consulter Fingas (2017) et Davidson et al. (2008). Pour un aperçu plus détaillé des systèmes de modélisation et de prévision des marées noires (y compris leur historique), voir par exemple Spaulding (1988), Reed et al. (1999), Hackett et al. (2006), Jones et al. (2016), Zodiatis et al. (2017), et Keramea et al. (2021).

Dans les modèles de marée noire, les nappes de pétrole sont exprimées comme des traceurs passifs, dont le mouvement dépend essentiellement des conditions de l’environnement physique. Comme indiqué dans la section 2.1.2, les données de forçage géophysique, qui sont fournies par les modèles numériques de l’atmosphère, de la circulation océanique et des vagues, sont des facteurs clés pour la précision des simulations de déversements d’hydrocarbures. Par conséquent, l’amélioration de ces modèles, en particulier le modèle de circulation océanique (cf. section 2.1.2.3), est cruciale pour faire progresser les compétences en matière de prévision de la dérive et du devenir des marées noires.

Le réglage du modèle et les performances dépendent également de la cible. Si un grand déversement d’hydrocarbures se produit en mer, une région plus large est nécessaire pour la simulation, afin que toutes les zones potentiellement touchées soient incluses. Elle nécessitera également des prévisions à long terme, notamment en ce qui concerne l’altération chimique. D’autre part, une zone limitée pourrait être suffisante pour les déversements mineurs, même si des informations détaillées à haute résolution seront nécessaires. Dans ce cas, les processus d’altération peuvent même être inutiles si des mesures correctives peuvent être prises rapidement.

Comme indiqué dans la section 2.1, les modèles numériques pour le forçage géophysique produisent des données qui contiennent des erreurs, lesquelles se propagent à leur tour dans les résultats du modèle de dérive et de devenir des hydrocarbures, qui comporte également ses propres imprécisions. Pour les intervenants d’urgence, les informations sur les incertitudes des prévisions peuvent être précieuses. L’utilisation de méthodes de prévision d’ensemble est une approche qui gagne du terrain dans la prévision moderne des marées noires.

Diagram

Description automatically generated

**Figure 2.2.1: Schéma d’une opération de prévision d’une marée noire illustré  
par le système du JMA**.

Une opération typique de prévision d’un déversement d’hydrocarbures est indiquée à la figure 2.2.1. Une fois qu’un incident de déversement d’hydrocarbures est signalé, les informations pertinentes sur le déversement, nécessaires pour initialiser le modèle de déversement d’hydrocarbures, sont acquises ou estimées. La prévision de la marée noire est ensuite effectuée avec les données d’entrée disponibles, et les résultats prédits sont fournis aux autorités de réponse aux catastrophes.

Les caractéristiques des déversements varient d’un incident à l’autre, à savoir la quantité d’hydrocarbures, le fait qu’il s’agisse d’un déversement simultané ou continu, et le lieu (surface de la mer, eaux profondes, point fixe, navire flottant, etc.) La manière de définir les conditions initiales dépend du système et des informations fournies. Quant à la surveillance, les nappes de pétrole sont depuis longtemps détectées et suivies à partir d’avions et de navires. Au cours des deux dernières décennies, le radar à synthèse d’ouverture par satellite s’est révélé être un outil puissant pour analyser la situation de la marée noire, et les résultats peuvent être utilisés comme données d’entrée dans certains modèles avancés de marée noire (Klemas 2010); Zodiatis et al. 2012).

Un accès rapide et fiable aux données de forçage requises est essentiel pour un système opérationnel de prévision des déversements d’hydrocarbures. Il est donc courant que de tels systèmes soient gérés par les SMHN, ou une filiale proche, en utilisant des données de forçage opérationnelles internes. D’autre part, au cours de la dernière décennie, il est devenu plus facile d’accéder à des ensembles de données de forçage géophysique candidats sur Internet, en raison de l’amélioration des technologies et d’une tendance à une politique de données moins restrictive (cf. section 2.1.2.5).

Au début et à la fin de la chaîne de production se trouve la tâche importante de la communication avec les intervenants et les autres utilisateurs, y compris la diffusion des résultats. Dans la plupart des services nationaux, cette tâche est confiée à une équipe d’opérateurs de permanence, disponibles 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an. Ils exécutent les modèles de prévision, fournissent les résultats aux utilisateurs sous des formes convenues et consultent les experts internes pour l’interprétation et les avis. Dans certains cas, les utilisateurs se voient proposer un service en ligne basé sur le web afin qu’ils puissent effectuer leurs propres simulations et télécharger les résultats directement dans leur ECDIS de bord, par exemple.

2.2.2.1 Efforts multinationaux en matière de surveillance et de prévision des marées noires

Les meilleures pratiques de coordination et d’intégration au niveau multinational ont été développées dans plusieurs mers régionales pour soutenir la gestion de la prévision des marées noires. Voici quelques exemples actuellement actifs, mais la liste n’est pas exhaustive:

**Mer du Nord**

Dans la zone de la mer du Nord, le système d’océanographie opérationnelle du plateau continental du Nord-Ouest (NOOS; http://noos.cc), une alliance régionale, s’efforce de développer et d’employer les meilleures pratiques parmi les services nationaux de prévision des marées noires. À titre d’exemple, le système suédois de prévision des dérives pétrolières Seatrack Web (STW; Ambjorn, 2007) couvre les besoins non seulement des utilisateurs nationaux mais aussi des utilisateurs internationaux dans la mer Baltique et une partie de la mer du Nord. Il s’agit du modèle de dérive officiel de la Commission HELCOM, du système de prévision et de rétroprévision utilisé pour calculer le devenir des déversements d’hydrocarbures. Il est disponible en ligne pour les autorités nationales et certains organismes de recherche. Un autre exemple est l’OSERIT (*Oil Spill Evaluation and Response Integrated Tool* (Outil intégré d’évaluation et d’intervention en cas de déversement d’hydrocarbures), Legrand et Duliere, 2014), d’abord développé en Belgique, qui répond maintenant aux besoins de l’AESM-CSN (Agence européenne pour la sécurité maritime - CleanSeaNet) en mer du Nord. Le NOOS-Drift est un système d’ensembles multi-modèles transnational qui peut produire des prévisions de dérive à la demande. Il permet d’améliorer la confiance des utilisateurs finaux dans les résultats des modèles de dérive et de les guider dans leur processus de décision, un réel besoin exprimé par les utilisateurs. Il comprend un ensemble d’indicateurs quantifiés de la précision des trajectoires de dérive, estimés à partir de la dispersion des prévisions des modèles de dérive participants. Il permet de distinguer les différences dues aux différents modèles de trajectoire et celles dues aux différentes données de forçage. Il bénéficie des prévisions océanographiques opérationnelles fournies par le *Copernicus Marine Environmental Monitoring Service* (Service de surveillance éco-maritime Copernicus, CMEMS). Le domaine des services est l’ensemble des mers du plateau continental nord-ouest européen, avec un accent sur les eaux territoriales et les zones économiques exclusives de la Belgique, de la France et de la Norvège.

**Mer Méditerranée**

En Méditerranée, la communauté océanographique opérationnelle du MONGOOS (Réseau méditerranéen d’océanographie pour le Système mondial d’observation de l’océan (GOOS)) et les SMHN ont suivi un concept d’intégration des systèmes nationaux de prévision météorologique et océanographique existants et du CMEMS pour établir un dépôt de données en ligne dédié, facilitant ainsi l’accès à toutes ces données pour leur utilisation avec les modèles de déversement d’hydrocarbures bien établis dans la région. Un service de prévision des déversements d’hydrocarbures multi-modèles a été mis en place, appelé MEDESS-4MS (Système d’aide à la décision dans le domaine de la sécurité maritime dans la région méditerranéenne). Le MEDESS-4MS (Zodiatis et al., 2016) est également intégré aux données des plateformes de surveillance des déversements d’hydrocarbures, y compris les satellites, et offre une gamme de scénarios de service, un accès aux données multimodèles et des interactions pour répondre aux besoins du REMPEC (Centre régional méditerranéen pour l’intervention d’urgence contre la pollution marine accidentelle), de l’AESM-CSN et des utilisateurs nationaux tels que les garde-côtes. Le MEDESS-4MS n’a pas abouti à un système opérationnel, mais a servi de précurseur pour le développement de systèmes similaires tels que le NOOS-Drift.

**Océan Pacifique Nord occidental**

Dans le Pacifique Nord occidental, les interventions en cas de déversement d’hydrocarbures ont été principalement menées par des agences nationales telles que les garde-côtes dans de nombreux pays. Toutefois, le grave déversement de Nakhodka en 1997 a fait prendre conscience de l’importance de la prévision et de la réaction systématiques aux déversements. Les garde-côtes japonais et l’agence météorologique japonaise (JMA) ont contracté un cadre de coopération pour améliorer la capacité de réponse. Le JMA a développé un modèle de simulation de déversement d’hydrocarbures (JMA, 2002), qui fournit des prévisions de déversement aux pays membres dans le cadre du SIUPM également. Une fois qu’un déversement d’hydrocarbures est signalé, les garde-côtes japonais fournissent des données sur les conditions de l’accident (lieu, heure, type d’hydrocarbures et quantité déversée, etc.), et le JMA apporte des prévisions de déversement. Les prévisions sont transmises aux garde-côtes japonais, ainsi que les conditions météorologiques et océanographiques pour soutenir les activités d’intervention. Lors d’un récent incident de déversement en 2021, des prévisions comme celles présentées à la figure 2.2.2 ont été fournies aux garde-côtes. L’affaire du Nakhodka a également été un élément déclencheur du renforcement d’un cadre international: le Plan d’action du Pacifique du Nord-Ouest du Programme des Nations unies pour l’environnement (PNUE), dont les membres sont la Chine, le Japon, la République de Corée et la Russie. En 2000, le Plan d’action du Pacifique du Nord-Ouest a créé le Centre d’activités régionales pour la préparation et l’intervention en cas de situations d’urgence présentant un danger pour le milieu marin. Ses responsabilités comprennent le maintien et la mise à jour des coordonnées des pays membres du Plan d’action susmentionné impliqués dans la prévention et la réponse à la pollution marine et l’enregistrement des incidents de déversement de pétrole et de substances dangereuses et nocives.

A picture containing text

Description automatically generated

**Figure 2.2.2: Exemple de produit de prévision de déversement d’hydrocarbures produit par le JMA et livré aux garde-côtes japonais, responsables des interventions.**

La nappe de pétrole est représentée par un nuage de particules (points bleus).

2.2.3 Évolutions attendues pour l’amélioration des services

Dans les sous-sections précédentes, les meilleures pratiques actuelles en matière de prévision opérationnelle des déversements d’hydrocarbures ont été présentées. Il a été démontré qu’il existe des modèles et des services bien établis qui peuvent être déployés et utilisés par de nouveaux acteurs et régions. En référence aux évolutions d’ordre général énumérés dans la section 2.1.4, la présente section présente quelques développements importants qui visent à améliorer l’efficacité des services de prévision des marées noires et la qualité de leurs produits.

1. Collaboration internationale pour l’élaboration de modèles de marées noires. La modélisation opérationnelle des déversements d’hydrocarbures a commencé comme une industrie artisanale qui produisait des codes de modèles propriétaires destinés à être utilisés sur un marché commercial. Ce n’est qu’au cours de la dernière décennie que la collaboration en matière d’élaboration de modèles et le développement de codes ouverts, voire communautaires, ont réellement progressé. Le développement de codes de modèles communautaires ouverts est particulièrement avantageux dans le contexte du déploiement de modèles de déversement dans les pays à façade maritime en développement. Quelques efforts de collaboration de ce type ont été mis en place, mais il est possible d’élargir le cadre de renforcement des modèles.

Une exigence importante pour le développement de modèles est l’identification de tests et de cas de référence. Il serait particulièrement utile d’établir quelques cas réels de marée noire bien décrits pour lesquels des données de forçage et de validation sont facilement accessibles.

2. Collaboration internationale pour l’amélioration des services. L’avantage de la collaboration entre les services nationaux de prévision de la dérive a déjà été mentionné dans le contexte de la prévision d’ensemble multi-modèles. Au-delà de l’échange de résultats de modèles, la collaboration sur d’autres maillons de la chaîne de production présente potentiellement d’autres avantages. Par exemple, l’échange robuste de données de forçage, de conditions initiales (données de détection), de formats de fichiers convenus, de méthodes de visualisation ou d’archivage des données de cas d’essai.

Un autre aspect de la collaboration internationale est le soutien au développement dans les pays à façade maritime qui ne disposent pas actuellement de services adéquats de prévision des déversements. Par ailleurs, le partage des services au niveau régional est possible, étant donné l’amélioration de l’accès aux données de forçage et aux codes des modèles de dérive, et peut constituer une solution rentable. Si l’ensemble de l’océan peut être couvert par des systèmes mondiaux exploités dans quelques pays développés, la nécessité de disposer d’informations détaillées près des côtes implique qu’il existe en fin de compte un besoin de services de prévision de la dérive à l’échelle locale pour soutenir la réponse locale aux urgences.

3. Fonctionnalités spécifiques des modèles de marée noire. Des modèles du devenir des déversements ont été élaborés avec des fonctionnalités quelque peu différentes en fonction des exigences locales les plus importantes. Toutefois, on assiste à une évolution vers des capacités de modèles plus complètes. Voici une liste de capacités de modèles dont la mise en œuvre a été limitée, mais qui devraient être plus largement disponibles:

* Caractéristiques des substances nocives autres que les hydrocarbures;
* Pétrole dans la glace de mer;
* Couplage du modèle de dérive des substances avec le modèle de dérive des navires;
* Source souterraine (et modélisation tridimensionnelle);
* Réinitialisation de la géométrie du déversement en fonction des observations;
* Inclusion des courants de marée dans les zones où les données des modèles océaniques disponibles ne le permettent pas;
* Option de calcul inverse (retour dans le temps);
* Inclusion de l’accès aux données de forçage climatologique pour la prévision à long terme (de plusieurs semaines à plusieurs mois).

4. Cadre standard pour l’échange d’informations sur les déversements. Actuellement, il n’existe pas de normes concernant le formatage et l’échange d’informations sur les marées noires. Les programmes varient selon les services nationaux et les alliances régionales. Les différences peuvent provenir d’exigences spécifiques, mais il est souhaitable de définir une norme commune qui soit indépendante des systèmes de prévision spécifiques. Cela peut favoriser la coopération entre les fournisseurs et les utilisateurs d’informations, ainsi que faciliter la collaboration entre les fournisseurs de prévisions aux niveaux national, régional et international.

2.2.4 Examen des besoins des utilisateurs en matière d’informations météorologiques et océanographiques sur les déversements d’hydrocarbures et d’autres substances nocives

**Besoins des utilisateurs**

|  |  |
| --- | --- |
| Organisation internationale | OMI |
| Documentation internationale | La **CONVENTION INTERNATIONALE DE 1969 SUR L’INTERVENTION EN HAUTE MER EN CAS D’ACCIDENT ENTRAÎNANT OU POUVANT ENTRAÎNER UNE POLLUTION PAR LES HYDROCARBURES** et le **PROTOCOLE DE 1973 SUR L’INTERVENTION EN HAUTE MER EN CAS DE POLLUTION PAR DES SUBSTANCES AUTRES QUE LES HYDROCARBURES** visent à conférer à l’État côtier le pouvoir d’intervenir en haute mer en cas d’accident de pollution endommageant ou pouvant endommager son littoral ou ses intérêts connexes.  <http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-Relating-to-Intervention-on-the-High-Seas-in-Cases-of-Oil-Pollution-Casualties.aspx>  La **CONVENTION INTERNATIONALE DE 1973 POUR LA PRÉVENTION DE LA POLLUTION PAR LES NAVIRES, TELLE QUE MODIFIÉE PAR LE PROTOCOLE DE 1978 Y RELATIF (MARPOL)** vise à éliminer la pollution marine par les hydrocarbures et autres substances nocives, ainsi que par les eaux usées et les déchets. L’amélioration du contrôle des rejets opérationnels d’hydrocarbures et la réduction de la quantité d’hydrocarbures rejetés lors d’accidents sont les questions les plus importantes dans le domaine de la prévention, de la préparation et de l’intervention dans des situations d’urgence. Certaines zones précieuses sont désignées zones spéciales MARPOL. La zone arctique n’a pas encore été désignée ainsi.  La **CONVENTION INTERNATIONALE DE 1990 SUR LA PRÉPARATION, LA LUTTE ET LA COOPÉRATION EN MATIÈRE DE POLLUTION PAR LES HYDROCARBURES (OPRC)** et le **PROTOCOLE DE 2000 SUR LA PRÉPARATION, LA LUTTE ET LA COOPÉRATION CONTRE LES ÉVÉNEMENTS DE POLLUTION PAR LES SUBSTANCES NOCIVES ET POTENTIELLEMENT DANGEREUSES (Protocole OPRC-HNS 2000)** couvrent deux des domaines relevant de la compétence de la prévention, la préparation et l’intervention dans des situations d’urgence, mais traitent également de la planification d’urgence, de la formation et de la coopération dans les programmes de recherche. |
| Toute frontière de coordination internationale | Néant, délégué à l’État côtier. |
| Responsabilité en cas d’intervention | Nationale |
| Besoins d’intervention opérationnels | Sécurité et efficacité des équipes de nettoyage, évaluation de la durée de vie de la dispersion du pétrole, prévision du mouvement du pétrole. |
| Signalement de l’incident | Les navires sont tenus de signaler les déversements d’hydrocarbures à l’autorité nationale. |
| Méthode de coordination de l’intervention | L’autorité nationale est chargée de lancer son plan d’intervention et de prendre des dispositions pour obtenir des informations sur l’océan. |

### **Section 2.3: Accidents liés aux personnes et aux objets**

Les accidents impliquant des personnes et des objets flottant et dérivant à la surface de l’océan sont traités de manière similaire. En effet, les cibles sont souvent désignées collectivement comme des objets à la dérive. Cependant, la motivation première pour développer des procédures d’intervention pour les objets à la dérive a toujours été liée aux personnes, c’est-à-dire aux opérations de recherche et de sauvetage. Par conséquent, cette section traitera principalement des méthodes d’intervention dans ce domaine. Plus récemment, les leçons tirées du développement des outils de recherche et de sauvetage ont encouragé l’application de ces outils à d’autres catégories d’objets à la dérive, tels que les conteneurs de fret flottants perdus en mer.

2.3.1 Contexte

Introduction à la réponse et à la modélisation des opérations de recherche et de sauvetage

L’intervention de recherche et de sauvetage vise principalement à trouver les survivants en mer et les embarcations de sauvetage, et à secourir les survivants. La recherche et le sauvetage ont également des points communs avec la lutte contre les déversements d’hydrocarbures grâce aux prévisions de dérive d’objets flottants potentiellement dangereux tels que les conteneurs de transport et les navires désarmés.

Timeline

Description automatically generated with medium confidence

**Figure 2.3.1: Chronologie des opérations de recherche et de sauvetage**

Le temps d’intervention des autorités de recherche et de sauvetage pour permettre aux ressources d’arriver sur les lieux est le plus court de toutes les urgences maritimes. La figure 2.3.1 illustre un temps de recherche et sauvetage généralisé qui contient tous les principaux événements de la chronologie illustrée en figure 2.3.1, allant de quelques minutes à plusieurs jours (et parfois plus). Cependant, tous les incidents impliquant la recherche et le sauvetage ne contiennent pas l’intégralité de ces éléments, mais tous contiennent le moment de l’incident, la notification des autorités et l’intervention des ressources de SAR à l’incident. Souvent, l’incident est résolu avec succès lors de l’intervention initiale et des vies sont sauvées. Cependant, il existe des incidents qui couvrent tout le spectre de la chronologie de la recherche et du sauvetage en raison d’une association des éléments suivants: mouvement complexe avant le déploiement; incertitude au moment de l’incident; retards importants dans la notification; informations limitées fournies par des sources d’information tierces; zones éloignées des moyens d’intervention; et conditions de survie et embarcations difficiles à détecter mais favorables, qui entraînent de multiples cycles de planification et d’efforts de recherche ultérieurs jusqu’à ce que l’affaire soit résolue ou suspendue.

L’initiation d’un cas de SAR commence par la notification des autorités compétentes qui doivent répondre à trois questions principales:

1. Quand l’incident s’est-il produit ?
2. Où l’incident s’est-il produit ?
3. Quels sont le nombre et les types d’objets nécessitant la recherche et le sauvetage ?

Ces trois questions combinées constituent les conditions initiales ou les scénarios possibles pour un cas particulier de SAR. Si la source de signalement provient du navire en détresse lui-même, l’incertitude quant au moment, à l’endroit et au contenu peut souvent être très précise ou limitée. Cependant, avec les sources de rapports de tiers, il peut y avoir une incertitude considérable dans le scénario ou les scénarios possibles. Il existe de nombreux scénarios, mais la plupart peuvent être capturés par un ensemble limité de types de scénarios. Le scénario de zone le plus important est une distribution normale bivariée sur la dernière position connue, où la distribution reflète l’incertitude du système de position et toute incertitude supplémentaire (par exemple, déclaration erronée, retard). Le deuxième scénario de base est un polygone bien formé couvert par une distribution uniforme (scénario de la zone). Le scénario de la zone fonctionne bien lorsque l’embarcation d’origine (par exemple, un bateau de pêche) fréquente une région connue (comme des lieux de pêche). Un scénario de voyage est le transit entre une série de points (dernières positions connues) ou de zones avec les périodes possibles d’activité au sein de ces zones (par exemple, flânerie, pêche). Les voyages peuvent être interactifs sur le plan environnemental (influencés par les conditions métocéaniques) ou non (aucune influence directe des conditions météorologiques et océanographiques). D’autres scénarios, plus spécialisés, sont utilisés pour l’observation des signaux lumineux; des lignes simples ou croisées à partir de sites de radiogoniométrie en hauteur; et le calcul à l’estime à partir de la dernière position connue. Dans ces scénarios, il existe également une incertitude quant au moment de l’incident. Là encore, s’il y a un rapport direct, cette incertitude est réduite. Dans d’autres cas, l’incertitude temporelle peut s’étendre du dernier moment où l’on sait que le navire était en sécurité jusqu’à ce qu’un tiers fasse un signalement. Cela peut durer de quelques heures à un jour ou plus. Dans certains cas d’opérations de recherche et de sauvetage, il y a une incertitude quant à l’objet recherché: radeau ou embarcation de sauvetage à l’endroit ou à l’envers, avec ou sans personnes à bord; personne à la mer dans un gilet de sauvetage, une combinaison de survie, décédée, ou nageant. Les scénarios interactifs sur le plan environnemental prennent en compte l’impact des conditions météorologiques et océanographiques sur le voyage lui-même, la probabilité qu’une embarcation d’origine devienne un objet soumis à la recherche et au sauvetage, la répartition d’un incident d’aéronef (rupture en vol ou perte de carburant entraînant un planage contrôlé), ou la modification de la trajectoire en raison d’une propulsion limitée (par exemple, un nageur ou un pagayeur actif). Un scénario de voyage imite le voyage de l’embarcation d’origine le long d’une série de trajectoires du début à la fin, où chaque trajectoire a une probabilité uniforme de se transformer en objet dérivant en détresse. Cependant, des «dangers» peuvent être introduits pour augmenter la probabilité de générer une particule d’objet de dérive de détresse lorsque le vaisseau d’origine traverse le moment et le lieu du danger. Un danger peut être permanent ou temporaire. Par exemple, trois prototypes de scénarios d’aéronefs ont été élaborés pour tenir compte des trois principaux types d’incidents d’aéronefs: une perte de contrôle en altitude qui génère une distribution de la dernière position connue en fonction de l’altitude à l’incident; une rupture en vol avec la dispersion des débris par la dynamique et le profil du champ de vent vers la surface de la mer; et un avion à court de carburant qui plane sur un cap ou vers une destination, mais qui est affecté par les vents de niveau supérieur. Le dernier type de scénario interactif est celui d’un nageur (généralement un plongeur en scaphandre autonome ou en apnée) en détresse qui nage activement vers une destination donnée. Le scénario du nageur actif comporte à la fois un vecteur de nage, qui subit l’impact des vagues, et un vecteur de dérive du courant; il peut revenir au statut de personne à la mer passive, par exemple la nuit. Tous ces scénarios nécessitent un accès aux données météorologiques et océanogrpahiques pour être mis en œuvre.

Une fois que les scénarios sont apportés au modèle de trajectoire et que les prévisions de probabilité de dérive sont renvoyées, les planificateurs de recherche et de sauvetage peuvent procéder à la planification des efforts de recherche de chacune des unités de recherche. Pour la première période de recherche, un planificateur est tout à fait capable de planifier un effort de recherche optimisé pour les ressources de recherche disponibles, en tenant compte des différentes capacités des unités de recherche et de leurs capteurs, des conditions sur place et des objets de recherche sur lesquels chaque unité pourrait concentrer ses efforts. Si, toutefois, l’effort de recherche initial est infructueux et que des efforts ultérieurs sont nécessaires, il faut alors un outil de planification pour tenir compte de l’effort initial infructueux et mettre à jour la distribution de probabilité, qui nécessitera une nouvelle mise à jour de la dérive. Afin de planifier et de prendre en compte l’effort de recherche, des données environnementales sont nécessaires en fonction des paramètres qui influencent les performances des capteurs. Ces paramètres de données comprennent, entre autres, la visibilité, les précipitations, les températures de surface de l’air et de la mer, la vitesse du vent, la hauteur des vagues, le pourcentage de couverture blanche, l’angle du soleil, la phase de la lune et la couverture nuageuse.

Les recherches ne sont pas toutes couronnées de succès, et le planificateur de SAR doit, à un moment donné, se demander s’il doit poursuivre ou suspendre la recherche («Recherche active suspendue en attendant d’autres développements» ou ACTSUS). Cette décision est un moment critique pour les victimes, leurs familles et les autorités de recherche et de sauvetage. Les prévisions de la détérioration de l’état physiologique du survivant et de son temps de survie futur sont essentielles pour le planificateur pendant la recherche. Le planificateur utilise ces prévisions pour optimiser les ressources de recherche, et pour les prendre en compte avec d’autres aspects de la recherche pour prendre la décision ACTSUS (Turner et al, 2009). Les modèles de devenir permettant d’estimer la survie en mer sont actuellement limités à la production physiologique de chaleur par rapport à la perte de chaleur. Ces modèles hypothermiques de capacité de survie reposent sur les températures de l’air et de la surface de la mer, ainsi que sur la vitesse du vent, l’humidité relative, les vagues et le rayonnement solaire comme paramètres d’entrée environnementaux, et sont nécessaires pendant cinq jours après l’incident (Tipton et al., 2022).

Étant donné que l’incident s’est produit avant la notification, les prévisions de dérive seront nécessaires le plus tôt possible jusqu’à ce que le prochain groupe de ressources termine ses efforts de recherche. Le modèle de trajectoire de dérive aura besoin des conditions initiales, c’est-à-dire des scénarios et des objets de dérive, et de la chronologie prévue des ressources.

Lorsque la notification d’un incident de recherche et de sauvetage parvient aux autorités compétentes, leur objectif immédiat est de déclencher les ressources y relatives le plus rapidement possible, avec une mission initiale ou préliminaire, qu’une prévision de dérive soit disponible et nécessaire ou non. Pour cela, il faut que le délai d’exécution entre la demande ou le besoin d’une prévision de dérive par les autorités de recherche et de sauvetage et la livraison de cette prévision de dérive soit acceptable sur le plan opérationnel pour les autorités. Parmi les trois schémas généraux des systèmes de données (section 2.1.2) pour les urgences de recherche et sauvetage, on utilise le premier ou le troisième système. Le système de données individuelles a été et est encore largement utilisé pour soutenir les calculs de trajectoire de dérive de SAR. La limite de cette approche est que les contrôleurs de SAR sont généralement limités dans la portée et la complexité des scénarios d’entrée.

2.3.2 Examen des capacités existantes

Dans ce qui suit, l’accent sera mis principalement sur les méthodes d’interventions de SAR car elles sont certainement les plus complètes et les mieux établies et constituent la base du traitement de tous les autres objets dérivants. Les réponses aux objets dérivants ne relevant pas de la recherche et du sauvetage sont plus spécifiques aux régions et aux industries et ne sont pas (encore) couvertes par des cadres mondiaux semblables à ceux de la recherche et du sauvetage. Cependant, ces objets sont de plus en plus connus du public et de plus en plus de catégories d’objets sont désormais prises en compte par les différents organismes d’intervention, par exemple les conteneurs de fret, les plastiques, la pierre ponce et les cendres. Les objets ne relevant pas de la recherche et du sauvetage sont brièvement abordés à la fin de cette section.

2.3.2.1 Recherche et sauvetage (SAR)

Avec l’avènement des modèles océaniques opérationnels à haute résolution et l’amélioration continue de la PNT, le potentiel pour faire des prévisions plus détaillées du sort des objets dérivants a énormément augmenté au cours des deux dernières décennies (Breivik et al., 2013). Cependant, bien que l’amélioration des prévisions météorologiques ait conduit à un meilleur forçage, les modèles de dérive sont restés quelque peu imperméables aux progrès de la modélisation océanique et des prévisions météorologiques numériques. Cela peut peut-être être mieux compris à la lumière des grandes incertitudes dans les propriétés de dérive des objets de SAR ainsi que de la précision des données de forçage utilisées.

Tout d’abord, sans une estimation correcte des propriétés de base de la dérive et de leurs incertitudes associées, la prévision de la dérive et de l’expansion d’une zone de recherche reste difficile. Un changement important est intervenu lorsque la méthode directe de mesure de la dérive d’un objet est devenue pratique courante (Allen et Plourde, 1999); Allan, 2005; Breivik et al., 2011; Hodgins et Mak, 1995; Hodgins et Hodgins, 1998). La méthode directe mesure le mouvement de l’objet par rapport à l’eau ambiante à l’aide d’un courantomètre. Les courantomètres suffisamment petits et flexibles pour être remorqués ou attachés directement à un objet de SAR ont commencé à être disponibles dans les années 1980, et depuis lors, presque toutes les expériences sur le terrain concernant ces objets ont utilisé une technique de mesure directe (Allen et Plourde, 1999); Breivik et al., 2011). La méthode directe, associée à une définition rigoureuse de la dérive comme le mouvement de l’objet induit par le vent (hauteur de référence de 10 m) et les vagues par rapport au courant ambiant (entre 0,3 et 1,0 m de profondeur), et enfin la décomposition des coefficients de dérive en composantes vent arrière et vent de travers, permet de suivre une procédure rigoureuse pour la réalisation d’expériences de dérive sur le terrain. Voir Allen et Plourde (1999); Breivik et Allen (2008); Breivik et al. (2011) pour plus de détails.

Deuxièmement, comme pour la modélisation de la prévision des marées noires, il existe une dépendance cruciale à l’égard de la précision des données sur les vents et les courants. Encore une fois, ce sont les courants qui sont les moins précis et qui représentent la plus grande source d’incertitude dans les prévisions de dérive. La compétence en matière de prévision des courants océaniques est examinée plus en détail dans la section 2.1.2.3.

Ce n’est que dans les années 2000 que tous les éléments nécessaires à une modélisation entièrement stochastique utilisant des coefficients de dérive de haute qualité et des prévisions détaillées de courant et de vent ont été mis en place. Le premier modèle de voie navigable opérationnel qui utilise la table des coefficients de dérive du Service des garde-côtes des États-Unis (USCG) (Allen et Plourde, 1999) avec les champs de courant à haute résolution du modèle océanique et les champs de vent près de la surface est devenu opérationnel en 2001 (voir Hackett et al. 2006); Breivik et Allen 2008; Davidson et al. 2009). L’ère moderne de la planification de la recherche et du sauvetage impliquant les mises à jour bayésiennes postérieures après la recherche a commencé en 2007 lorsque l’USCG a lancé le *Search and Rescue Optimal Planning System* (SAROPS, Système de planification optimale pour la recherche et le sauvetage), voir Kratzke et al. (2010). Le SAROPS utilise un serveur de données environnementales qui obtient des prévisions de vent et de courant à partir d’un certain nombre de sources. Il recommande des chemins de recherche pour plusieurs unités de recherche qui maximisent l’augmentation de la probabilité de détection à partir d’un incrément de recherche. Comme le CASP, il calcule des distributions bayésiennes postérieures sur l’emplacement de l’objet en tenant compte de l’échec de la recherche et du mouvement de l’objet. Des développements récents en mer Méditerranée (Coppini et al. 2016) ont démontré la capacité opérationnelle à soutenir les opérations de SAR par la mise en œuvre du modèle Leeway avec le Service de surveillance éco-maritime Copernicus. Le service «Ocean-SAR» est disponible pour les utilisateurs sur le site web <www.ocean-sar.com>.

Bien que le niveau de sophistication et de détail ait augmenté de façon spectaculaire au cours des deux dernières décennies, les incertitudes des prévisions de SAR restent obstinément élevées. Le défi fondamental de l’estimation et de la prévision des zones de recherche en présence de grandes incertitudes reste essentiellement le même, même si certaines sources d’erreur ont été diminuées. La lenteur des progrès réalisés au cours des dernières décennies dans la réduction du taux d’expansion des zones de recherche (peut-être la meilleure estimation de l’amélioration) est une conséquence inévitable du fait que la planification en SAR est affectée par une variété d’erreurs dans les champs de courant, les champs de vent, les processus physiques manquants (par exemple, les effets des vagues, voir Breivik et Allen 2008; Röhrs et al. 2012), de l’incertitude de la dernière position connue et surtout des mauvaises estimations des propriétés réelles de dérive de l’objet. En effet, il arrive que le type d’objet ne soit même pas connu, ce qui fait de l’exercice de modélisation une intégration d’ensemble couvrant toute une série de catégories d’objets. Toutes ces sources d’erreur s’accumulent et font de la planification de la recherche et du sauvetage autant un art qu’une science, où les sauveteurs se fient encore souvent autant à leur «intuitions» qu’aux résultats d’outils de prévision sophistiqués. Le fait que la plupart des cas de SAR se produisent près du littoral et dans des eaux partiellement abritées (Breivik et Allen, 2008) aggrave les difficultés, car la résolution des modèles océaniques opérationnels dans de nombreux endroits du monde est encore insuffisante pour résoudre les caractéristiques du littoral.

Au cours des deux dernières décennies, ces avancées et les obstacles à de nouveaux progrès ont été présentés principalement dans le cadre d’une série d’ateliers sur les «Technologies pour la recherche et le sauvetage et autres opérations maritimes d’urgence» (2004, 2006, 2008 et 2011) organisés par l’Institut français de recherche marine IFREMER avec le soutien de l’Institut météorologique norvégien, de l’USCG, de la Fondation franco-norvégienne et de la Commission technique mixte OMM/COI d’océanographie et de météorologie maritime (CMOM).

2.3.2.2 Débris marins et dangers pour la navigation

Tout comme les objets de SAR types et les marées noires, les débris marins flottants peuvent avoir besoin d’être suivis pour permettre le nettoyage ou pour atténuer le danger qu’ils représentent pour les navires[[3]](#footnote-4). Ces objets comprennent les conteneurs d’expédition perdus par-dessus bord, le contenu flottant des conteneurs d’expédition endommagés, les déchets plastiques transportés dans l’océan par les rivières ou jetés par-dessus bord, les débris de crashs d’avions et de navires en perdition, les sargasses excessives, ainsi que les débris naturels provenant d’inondations ou de rivières en crue (par exemple, les troncs d’arbres) et des volcans (pierre ponce et cendres). À l’exception des conteneurs d’expédition, la mesure directe des caractéristiques de la dérive des débris marins n’a pas été possible en raison de leur taille type (c’est-à-dire plus petite que la génération actuelle de compteurs de courant). Cependant, une technique suggérée par Sutherland et al. (2020) pourrait être appliquée dans des cas spécifiques pour reculer la marge de manœuvre des objets dérivants en question.

La réponse aux objets ne relevant pas de la recherche et du sauvetage est plus proche de la réponse aux marées noires que de la réponse aux embarcations de SAR et aux survivants. Ceci est dû à la diversité de ces objets et au manque de connaissance de leurs caractéristiques de dérive. En outre, l’objectif est d’atténuer les dommages et de se concentrer sur le nettoyage, plutôt que de sauver des vies. Beaucoup de ces objets ne se détériorent pas très vite, voire pas du tout, à l’exception des conteneurs maritimes qui finissent par couler et des baleines mortes qui se gonflent, se dégonflent ou sont consommées avant de couler ou de s’échouer. Comme pour la modélisation des marées noires, plusieurs milliers d’objets peuvent être impliqués dans un incident, générant ainsi une distribution des objets réels qui peut être comparée à la distribution des particules modélisées.

2.3.3 Évolutions attendues pour l’amélioration des services

Dans les sous-sections précédentes, les meilleures pratiques actuelles en matière de prévision opérationnelle des personnes et des objets à la dérive ont été présentées. Il a été démontré qu’il existe des modèles et des services bien établis qui peuvent être déployés ou accessibles et utilisés par de nouveaux acteurs et régions. En référence aux évolutions d’ordre général énumérées dans la section 2.1.4, la présente section présente quelques développements importants qui visent à améliorer l’efficacité des services de prévision et la qualité de leurs produits.

1. Il est essentiel de poursuivre les travaux de terrain afin d’élargir la taxonomie des objets de recherche et de réexaminer les objets qui n’ont été étudiés qu’avec des méthodes de terrain plus anciennes.
2. Les données de forçage à plus haute résolution horizontale restent un problème majeur étant donné que la plupart des cas de recherche et de sauvetage se produisent près des côtes (Breivik et al., 2013). L’augmentation de la résolution du modèle pour les données opérationnelles aide le système à obtenir plus de détails des eaux côtières (îles, fjords, etc.), et promet également de produire un mouvement plus réaliste des objets.
3. Déploiement de radars côtiers à haute résolution. Étant donné que les opérations de recherche et de sauvetage ont tendance à se dérouler près de la côte, l’utilisation des champs de courant observés par le radar à haute résolution peut également présenter des avantages. Ces observations peuvent être utilisées directement ou mélangées aux résultats des modèles océaniques pour donner une prévision à court terme, bien que leur horizon temporel soit limité à environ 24 heures (voir par exemple Barrick et al., 2012). De plus, les données peuvent être assimilées dans le modèle océanique pour améliorer les prévisions actuelles.
4. La modélisation d’ensemble des courants de surface est de plus en plus utilisée pour maîtriser l’incertitude associée aux champs de forçage. Son intérêt et ses avantages sont semblables à ceux décrits à la section 34.3. Comme la plupart des modèles de recherche et de sauvetage opérationnels se fondent sur des ensembles (particules), la propagation des membres de l’ensemble sur une variété de champs de forçage est simple. Les ensembles de champs de vent seraient également utiles, mais les incertitudes sont plus faibles dans les premières 48 heures, et la plupart des recherches nécessitent des prévisions relativement courtes.
5. Collaboration internationale pour l’amélioration des services. L’avantage d’une collaboration entre les services nationaux de prévision de la dérive a déjà été mentionné à propos de la marée noire (cf. section 2.2.3, paragraphe 2). Les mêmes avantages peuvent être obtenus pour les opérations de recherche et de sauvetage, en particulier au niveau régional, puisque la plupart d’entre elles ont lieu près des côtes.
6. Services d’analyse rétrospective – La trajectoire en arrière est importante pour les équipes de secours afin de déterminer le mouvement d’un objet entre sa dernière position connue et l’heure actuelle. La compilation des champs d’analyse des vents et des courants à intervalles réguliers peut aider les autorités à déterminer rapidement les zones de recherche les plus probables.

2.3.4 Examen des besoins des utilisateurs en matière d’informations météorologiques et océaniques pour les opérations de recherche et de sauvetage et les objets dérivants

**Besoins des utilisateurs**

|  |  |
| --- | --- |
| Organisation internationale | IMO |
| Documentation internationale | **Convention internationale de 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS)**  **Convention internationale de 1979 sur la recherche et le sauvetage maritimes (Convention SAR).**    Le **Manuel international de recherche et de sauvetage aéronautiques et maritimes (IAMSAR)** décrit les procédures de coordination des opérations de recherche et sauvetage. Le manuel définit les caractéristiques de dérive des objets en fonction des effets des vents et des courants. |
| Toute frontière de coordination internationale | L’OMI et l’Organisation de l’aviation civile internationale (OACI) parrainent toutes deux des plans mondiaux de SAR, attribuant des régions de recherche et de sauvetage aux nations.  Les régions de recherche et de sauvetage ont été élaborées par l’OACI et l’OMI en consultation avec les nations membres, et reflètent souvent les régions de vol existantes et la proximité des pays.  Une autorité de recherche et de sauvetage est responsable de la coordination de la recherche et du sauvetage lors d’une situation de détresse maritime ou aérienne dans la région de SAR qui lui est attribuée. |
| Responsabilité en cas d’intervention | Centre de coordination de sauvetage conjoint (JRCC) ou autorité nationale désignée. |
| Besoins d’intervention opérationnels | Sécurité et efficacité des équipes de recherche, évaluation du temps de survie des personnes, prévision du mouvement d’un objet ou d’une personne. |
| Signalement de l’incident | Les navires sont responsables du signalement des personnes à la mer aux autorités nationales. Les navires ou les personnes disparus peuvent être signalés au JRCC par le biais du Système mondial de détresse et de sécurité en mer (SMDSM). |
| Méthode de coordination de l’intervention | Le JRCC ou l’autorité nationale désignée est chargé de coordonner l’opération de recherche et de prendre des dispositions pour obtenir des informations sur l’état de l’océan à l’appui des évaluations de la dérive et de la planification des recherches. |

Diagram

Description automatically generated

**Figure 2.3.2: Exemple de sortie d’un modèle d’objet dérivant prévoyant la dérive d’un radeau de sauvetage à l’aide d’un ensemble de particules dérivantes.**

La photo montre un instantané après 102 heures de dérive. Les petits segments de ligne rouges et verts indiquent la position des particules de l’ensemble et leur trajectoire sur une période de 1 heure. Les couleurs rouge et verte indiquent les deux angles de dérive. Le cercle jaune représente la position initiale, et la ligne jaune montre la trajectoire du centroïde du nuage de particules sur toute la période de prévision (5 jours). Les polygones rouges et verts sont des estimations de la coque convexe des zones de recherche pour chaque angle de dérive.

### **Section 2.4: Rejets de radionucléides**

2.4.1 Contexte

L’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA) a créé le Centre des incidents et des urgences (IEC) en 2005 afin de fournir une assistance 24 heures sur 24 à ses États membres pour faire face aux événements nucléaires et radiologiques, y compris les menaces liées à la sécurité, en coordonnant les efforts, les contributions et les actions des experts de l’AIEA, des États membres et des organisations internationales. La CEI est l’organisme de référence mondial pour la préparation aux situations d’urgence, la communication et la réponse aux incidents et aux urgences nucléaires et radiologiques, qu’ils soient dus à un accident, à une négligence ou à un acte délibéré. Il s’agit du centre mondial de coordination de l’aide internationale en matière de préparation et de réponse aux urgences.

En 2012, la CEI a réalisé une analyse des lacunes des capacités identifiées en interne pour répondre, évaluer et prévoir lors d’événements ou d’urgences radiologiques ou nucléaires, en mettant l’accent sur les scénarios d’accident pour les centrales nucléaires. Durant la période qui a suivi l’accident de Fukushima, il est devenu évident qu’il serait avantageux de disposer de capacités de modélisation maritime accessibles dans la CEI dans le cadre des dispositions normales d’intervention d’urgence. Cette décision s’explique par les inquiétudes suscitées par les grandes quantités d’eau contaminée rejetées dans l’océan.

En 2013, la CEI a organisé une réunion de consultants intitulée «Modélisation maritime et aquatique en cas d’accidents de réacteurs nucléaires du 29 juillet au 31 juillet et réunion de l’Équipe spéciale de la CMOM le 1er août 2013». Cette consultation a invité des experts en modélisation maritime et aquatique à Vienne pour discuter de l’utilisation de ces capacités lors d’une réponse à un événement de rejet radiologique. Les consultants ont exploré les méthodes disponibles pour procéder à ce type de modélisation, ont discuté des groupes d’experts et des organisations existants dans le domaine, et ont rédigé des propositions d’actions futures pour que la CEI améliore ses capacités dans ce domaine (à court et à long terme). Les consultants ont discuté des caractéristiques des services et des types de résultats des modèles maritimes qui pourraient être fournis à une équipe technique de la CEI pendant un événement afin qu’elle puisse fournir une analyse et un aperçu utiles de l’évolution potentielle de la pollution marine. En outre, la réunion de consultation a discuté des types d’informations que la CEI pourrait fournir aux États membres à des fins de planification et de compréhension pendant un événement.

Les participants à la réunion ont discuté des options permettant d’accéder aux capacités de modélisation océanographique de la CEI lors d’un événement de rejet radioactif. Les participants ont convenu que l’option la plus idéale pour la CEI à ce stade est d’organiser une capacité d’expertise externe, hébergée à l’extérieur et disponible en cas de besoin. La mise en œuvre de cet accord peut être similaire à l’accord existant entre la CEI et l’OMM pour soutenir la modélisation météorologique. Ces protocoles peuvent être mis en œuvre par le biais de la radio et de l’Internet, en fonction des organisations d’experts en modélisation maritime identifiées.

Au cours de la réunion, le groupe d’experts a discuté des recommandations générales qui pourraient être fournies à la CEI pour servir de guide lors de toute coopération future avec des organisations ayant des capacités de modélisation maritime existantes afin d’établir des arrangements de travail. Les recommandations formulées sont présentées à l’annexe 1.

2.4.2 Examen des capacités existantes

Un système de modélisation maritime pour la simulation de la dispersion des matières radioactives se compose d’un modèle de circulation océanique et d’un modèle de dispersion des radionucléides. Le modèle de circulation océanique fournit la structure de l’océan, comme les courants, les tourbillons et les densités d’eau de la surface de la mer jusqu’au fond. Le modèle de dispersion des radionucléides calcule le mouvement des matériaux sur la base de la structure de l’océan par le modèle de circulation, en prenant les informations du terme source du rejet (moment du rejet, quantité et forme chimique du matériau) à la fois pour un rejet direct dans la mer et pour un dépôt atmosphérique.

Au Japon, plusieurs groupes ont réalisé des simulations de la dispersion océanique après l’accident de Fukushima. Bien que chaque groupe ait utilisé un ensemble différent de modèles et ait présenté des résultats différents, leur examen a permis de constater que le faible courant vers le sud le long de la côte de Fukushima a déterminé la direction initiale du transport, et que les structures mésoéchelles de type tourbillon et les systèmes de courants de surface ont contribué à la dispersion dans les zones situées au-delà du plateau continental. Parmi eux, l’Agence japonaise de l’énergie atomique (JAEA) a réalisé la simulation et la validation de la dispersion de Césium 137 pour décrire sa transition à moyen et long terme dans l’océan, en utilisant un modèle de dispersion nucléaire (GEARN) développé par la JAEA et un modèle de circulation océanique (MOVE/MRI.COM, 1/10◦ pour le Pacifique nord-ouest) développé par le Service météorologique japonais. Elle montre que le Césium 137 directement libéré progresse vers l’est le long de l’extension du Kuroshio, en étant mélangé et dilué par les tourbillons de moyenne échelle, et arrive à 170 ⁰W après un an.

Aux États-Unis, le Centre national de prévision environnementale (NCEP) du Service météorologique national des États-Unis a utilisé le traçage de particules pour prévoir le mouvement des radionucléides dans l’océan peu après l’accident nucléaire près de Fukushima. Les champs quotidiens nowcast/forecast du modèle océanique à coordonnées hybrides 1/12° (HYCOM), mis en œuvre au NCEP en tant que Système mondial de prévision océanique en temps réel, ont été utilisés pour suivre les particules inertes à la surface de l’océan, en supposant que le comportement de la surface est raisonnablement représenté par la couche de mélange de l’océan, et que les radionucléides sont principalement contenus dans et distribués par la couche de mélange supérieure de l’océan. L’objectif était de produire des informations exploitables pour un groupe de travail interinstitutions gouvernemental en temps quasi réel en utilisant les ressources disponibles.

Grâce aux informations sur le traçage des particules, le NCEP a produit des estimations du temps de rétention des radionucléides près de la côte, ainsi que de l’échelle de temps de dispersion de ces matériaux dans l’océan Pacifique, en particulier par les systèmes de courants persistants comme le Kuroshio et son extension, et l’Oyashio. Cela a permis d’identifier à la fois les zones potentiellement sûres dans le Pacifique, et les zones d’exposition potentielle sur des échelles de temps allant de quelques semaines à quelques mois. Le suivi des particules combiné au dépôt atmosphérique de radionucléides a permis d’obtenir une première estimation de la contamination de l’eau de surface de l’océan.

Les premiers produits de suivi des particules ont été systématiquement livrés au groupe de travail interinstitutions dans les quatre semaines suivant le premier rejet significatif de radionucléides Les premières estimations quantitatives de la contamination en mer ont été mises à la disposition du groupe de travail interinstitutions en six semaines environ (H. Tolman et al., 2013).

En France, le groupe SIROCCO (du CNRS et de l’Université de Toulouse) a réalisé, à la demande de l’AIEA, des simulations à l’aide du modèle de circulation océanique 3D SIROCCO pour étudier la dispersion dans l’eau de mer des radionucléides rejetés par l’accident nucléaire de Fukushima. Le modèle utilise une grille horizontale étirée avec une résolution horizontale variable, allant de 600m près de Fukushima, à 5 km au large. Les champs initiaux et les conditions aux limites ouvertes latérales sont fournis par le système global Mercator 1/12°. Le groupe SIROCCO a été le premier à publier sur le web des résultats sur la dispersion marine des radionucléides (Estournel et al., 2012).

De 2012 à 2014, le Conseil scientifique du Japon a organisé une intercomparaison des modèles de dispersion atmosphérique et océanique qui ont simulé l’avenir des rejets radioactifs de Fukushima. Les résultats ont été publiés fin 2014 (Conseil scientifique du Japon, 2014). Ils sont disponibles gratuitement sur <http://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/cesddb/scj_fukushima/index_j.html>.

Le rapport conclut que, bien qu’il existe des similitudes entre les différentes dispersions simulées, des différences significatives sont constatées entre les modèles concernant les distributions dans l’espace et dans le temps qui résultent des différentes approches et termes sources appliqués. Il n’est pas possible d’identifier le modèle qui produit les résultats les plus proches des mesures. La variabilité de la circulation marine dans la zone de mélange entre le Kuroshio et l’Oyashio à l’est de Fukushima explique en grande partie cette variabilité en raison de la présence de tourbillons instables.

Cette comparaison montre qu’il existe actuellement plusieurs modèles capables de réaliser des simulations de la dérive des radionucléides dans l’océan. Les différences entre les simulations sur une période de dispersion limitée (de mars à juin 2011) illustrent combien leur utilisation est hasardeuse pour évaluer la dispersion des rejets de radionucléides à moyen terme. Les mesures sur des échantillons en mer restent le seul moyen fiable d’estimer la dispersion dans cette zone.

Les estimations du terme source pour les simulations de Fukushima sont très variables. L’estimation du rejet direct à la mer en avril 2011 reste un sujet de débat entre les différents enquêteurs. De nombreuses évaluations ont été réalisées sur les apports de Césium 137. Les dépôts atmosphériques à la surface de la mer représentaient des quantités à peu près équivalentes, mais largement réparties dans le Pacifique Nord au cours des premiers mois suivant l’accident.

Le groupe de travail AIEA-MODARIA (Modélisation et données pour l’évaluation de l’impact radiologique) sur la modélisation de la dispersion et du transfert en mer des radionucléides rejetés accidentellement par des installations terrestres a publié un article sur les modèles appliqués pour simuler la dispersion marine du Césium 137 après des accidents nucléaires récents (Periáñez et al., 2014). Des modèles de dispersion de pointe ont été appliqués pour simuler la dispersion du Césium 137 provenant des retombées de la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl sur la mer Baltique et des rejets de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi dans l’océan Pacifique après le tsunami de 2011. Une grande variété de modèles a été utilisée, allant de modèles en boîte à des modèles entièrement tridimensionnels, et tous comprenaient des interactions eau/sédiments. La concordance entre les modèles était très bonne dans la Baltique. Dans le cas de Fukushima, les résultats des modèles n’ont pu être considérés comme étant en accord acceptable qu’après un processus d’harmonisation des modèles consistant à utiliser exactement le même forçage (circulation de l’eau et paramètres) dans tous les modèles. Il a été constaté que la dynamique du système considéré (magnitude et variabilité des courants) était essentielle pour obtenir un bon accord entre les modèles. Les difficultés à développer des modèles opérationnels pour l’aide à la décision dans ces environnements dynamiques ont été soulignées.

Ils ont défini trois étapes à prendre en compte après une urgence, chacune d’entre elles nécessitant des approches de modélisation spécifiques. Il s’agit de la phase d’urgence, de la phase post-urgence et de la phase à long terme.

1. Phase d’urgence: l’échelle temporelle de la simulation s’étend de quelques heures à quelques jours et l’échelle spatiale à résoudre de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres. Dans ce cas, une réponse très rapide (de quelques secondes à quelques minutes) doit être donnée par le modèle pour décider, par exemple, si la baignade doit être immédiatement interdite sur une plage, ou la zone où la pêche doit être interdite. Cette réponse rapide peut être obtenue en utilisant des données sur la prévision de la diffusivité des courants et des vagues provenant de modèles maritimes opérationnels et en utilisant des modèles lagrangiens pour prévoir le transport de la radioactivité. L’horizon temporel de ces prévisions de courants et de vagues est limité par l’échelle temporelle des prévisions météorologiques, qui est d’environ 7 à 10 jours. Des exemples de cette approche sont donnés par Periáñez et Pascual-Granged (2008), Estournel et al. (2012), Duffa et al. (2016), Garraffo et al. (2016), et Maderich et al. (2016). La contamination des produits marins peut également être estimée à l’aide de modèles dynamiques du biote, comme l’ont fait Duffa et al. (2016). Dans cette phase initiale, les résultats du modèle aideraient également à développer des stratégies d’échantillonnage pour la surveillance.

2. Phase de post-urgence: l’échelle temporelle s’étend à quelques semaines et l’échelle spatiale à l’ordre de 100 à 1000 km. On peut envisager une usine de dessalement qui produit de l’eau douce pour l’irrigation à quelques centaines de kilomètres de l’installation nucléaire. Il faut décider si la prise d’eau de mer doit être arrêtée. Dans cette phase, il y a plus de temps pour fournir une réponse que dans la première phase. Cependant, l’utilisation de prévisions océaniques à court terme n’est pas viable. La solution potentielle consiste à utiliser les données de périodes analogues des années précédentes et la formation d’un ensemble de prévisions de radioactivité pour estimer la contamination future de l’eau, des sédiments et du biote. En ce qui concerne le modèle de dispersion, des approches lagrangiennes et eulériennes peuvent être utilisées (par exemple Kawamura et al., 2011, Simonsen et al (2017) et Periáñez et al., 2012). Il a été démontré que les interactions avec les matières en suspension et les sédiments du fond marin affectent le schéma de transport après l’accident de Fukushima (Choi et al., 2013; Min et al, 2013).

3. Phase à long terme: cette phase impliquerait l’évaluation des conséquences à long terme de l’accident, y compris les transferts de radionucléides vers les sédiments et le biote, ainsi que l’évaluation du rôle potentiel des sédiments comme source de contamination une fois que les concentrations de radionucléides dans l’eau de mer auront diminué (Periáñez, 2003). Cette évaluation peut être réalisée avec des modèles eulériens, dans lesquels ces processus complexes sont plus facilement inclus que dans les systèmes lagrangiens et les modèles dynamiques couplés de biote (Vives i Batlle et al., 2016). Les champs de courants océaniques sont obtenus à partir de la moyenne temporelle des sorties des modèles de circulation océanique. Des simulations sur plusieurs mois peuvent être effectuées pour des échelles spatiales de quelques centaines de kilomètres. Pour des évaluations à encore plus long terme (années à décennies et milliers de km), certains auteurs recommandent l’utilisation de modèles en boîte (Lepicard et al., 2004); Iosjpe et al., 2009). Pour de telles échelles de temps, le coût de calcul de l’utilisation de modèles 3D devient prohibitif et les résultats ne sont pas meilleurs que les modèles boîte moins chers.

Dans tous les cas, pour les environnements hautement dynamiques, il a été constaté que les résultats des modèles sont extrêmement sensibles au modèle utilisé pour prédire la circulation océanique. Ainsi, le modèle de circulation océanique doit être sélectionné avec beaucoup de soin et après une comparaison détaillée avec les mesures locales des courants. En ce sens, Duffa et al. (2016) indiquent que les prévisions locales à haute résolution de la circulation marine devraient être utilisées pour la modélisation des situations d’urgence. Bien que les modèles globaux de circulation océanique produisent des images réalistes de la circulation générale dans l’océan, leurs sorties diffèrent à l’échelle locale dans les environnements dynamiques, en raison, du moins en partie, de leur résolution spatiale relativement faible.

Dans l’ensemble, les modèles à utiliser pour les situations d’urgence liées à des rejets de radionucléides dans le milieu marin doivent être soigneusement adaptés à chaque emplacement particulier, c’est-à-dire à chaque installation nucléaire pour laquelle il est décidé de disposer d’un outil de modélisation pour aider à la prise de décision après une situation d’urgence potentielle. En d’autres termes, nous ne pouvons pas faire confiance a priori aux modèles génériques qui importent les prévisions de courants océaniques si un environnement hautement dynamique est impliqué.

2.4.3 Développements pour l’amélioration des services

Comme nous l’avons montré ci-dessus, il existe des modèles utiles pour la dérive et le devenir de la radioactivité dans l’océan. Les services de prévision peuvent être facilement adaptés à partir des services de dérive et de devenir existants pour, par exemple, les marées noires, et peuvent être déployés et utilisés par de nouveaux acteurs et pour de nouvelles régions. En référence aux développements généraux énumérés dans la section 2.1.4, la présente section présente quelques développements importants qui visent à améliorer l’efficacité des services de prévision de la dispersion des radionucléides et la qualité de leurs produits.

1. Accès aux données sur les sources, mesures sur le terrain des radionucléides, et développement d’une technique inverse pour l’évaluation du terme source. Les informations sur le terme source du rejet (lieu et heure du rejet, durée et quantité du rejet, et forme chimique de la matière radioactive) tant pour un rejet direct dans la mer que pour un dépôt atmosphérique sont un élément clé. Cela implique que les résultats des simulations atmosphériques sont plus facilement disponibles.

2. Informations sur le degré d’incertitude. Pour la modélisation de la dérive et de la dispersion des matières radioactives, les méthodes d’ensemble de modèles uniques et d’ensembles multi-modèles sont toutes deux viables. Par exemple, compte tenu des améliorations de l’accès aux données décrites ci-dessus, il est tout à fait possible d’obtenir une série d’ensembles de données de forçage pour forcer le même modèle de dérive et de dispersion des matières radioactives. Inversement, dans certaines régions, il existe déjà un certain nombre de systèmes opérationnels de prévision de la dérive et de la dispersion des matières radioactives qui se chevauchent géographiquement; des accords doivent être passés concernant l’exécution des prévisions pour les événements dans la zone commune.

3. Collaboration internationale pour l’élaboration de modèles. Le développement de codes de modèles communautaires ouverts est particulièrement avantageux dans le contexte du déploiement de modèles de dérive et de dispersion de matières radioactives dans les pays à façade maritime en développement. Une exigence importante pour le développement de modèles est l’identification de tests et de cas de référence. Il serait particulièrement utile d’établir quelques cas réels bien décrits pour lesquels des données de forçage et de validation sont facilement accessibles.

4. Collaboration internationale pour l’amélioration des services. L’avantage de la collaboration entre les services nationaux de prévision de la dérive a déjà été mentionné ci-dessus en relation avec l’accident de Fukushima, et dans le contexte plus formel de la prévision d’ensemble multi-modèle ( cf. Section 2.1.4) Au-delà de l’échange de résultats de modèles, la collaboration sur d’autres maillons de la chaîne de production présente potentiellement d’autres avantages. Par exemple, l’échange robuste de données de forçage, de conditions initiales (données de détection), de formats de fichiers convenus, de méthodes de visualisation ou d’archivage des données de cas d’essai.

En ce qui concerne la section 2.1.4, un autre aspect de la collaboration internationale est le soutien au développement dans les pays à façade maritime qui ne disposent pas actuellement de services adéquats de prévision de la dérive et de la dispersion des matières radioactives. Le partage des services au niveau régional est une alternative possible, étant donné l’amélioration de l’accès aux données de forçage géophysique et aux codes des modèles de dérive, et peut être un moyen rentable de progresser. Si l’ensemble de l’océan peut être couvert par des systèmes globaux exploités dans quelques pays développés, la nécessité de disposer d’informations plus détaillées près des côtes implique qu’il existe en fin de compte un besoin de services de prévision de la dérive à des échelles locales pour soutenir la réponse locale aux urgences. Un système de soutien régionalisé, sur le modèle du réseau du CMRS, pourrait être un instrument efficace pour le soutien de l’OMM aux États membres en développement, notamment en ce qui concerne les interventions d’urgence liées aux radionucléides.

5. Fonctionnalités spécifiques du modèle. Les modèles de dérive et de dispersion des matières radioactives ont été développés avec des fonctionnalités quelque peu différentes en fonction des exigences locales les plus importantes. Toutefois, on assiste à une évolution vers des capacités de modèles plus complètes. Voici une liste de capacités de modèles qui ont été peu mises en œuvre, mais qui devraient être plus largement accessibles:

* Matières radioactives dans la glace de mer
* Combinaison d’un rejet direct dans la mer (surface ou sous la surface) et d’un dépôt atmosphérique
* Développement d’une base de données de radionucléides comprenant du Césium 137, du Césium 134, du strontium 90, de l’iode 131, du tritium, du technétium 99, etc., qui fournit les paramètres d’interaction avec les matières particulaires, le biote et les humains dans la colonne d’eau et les interfaces atmosphère/eau de mer/sédiments
* Réinitialisation du volume et de l’emplacement des matières radioactives en fonction des observations
* Transferts vers les compartiments biologique et sédimentaire
* Inclure les courants de marée dans les zones où les données disponibles du modèle océanique ne le permettent pas
* Inclure l’accès aux données de forçage géophysique climatologique pour les prévisions à long terme (de plusieurs semaines à plusieurs mois).
* Normes pour l’échange de données sur les modèles de dérive et de dispersion des matières radioactives

2.4.4 Examen des besoins des utilisateurs en matière d’informations météorologiques et océanographiques pour les interventions d’urgence en cas de dispersion de radionucléides

**Besoins des utilisateurs**

|  |  |
| --- | --- |
| **Organisation internationale** | **AIEA** |
| **Documentation internationale** | L’AIEA, l’OMM et l’OMI font partie du Plan de gestion des situations d’urgence radiologique commun aux organisations internationales (EPR-JPLAN). L’AIEA et l’OMM disposent d’un formulaire spécifique pour demander des informations à un CMRS pour des interventionx en cas d’urgence environnementale nucléaire. |
| **Toute frontière de coordination internationale** | Néant. Délégué aux États côtiers. |
| **Responsabilité en cas d’intervention** | AIEA ou autorités nationales désignées |
| **Besoins d’intervention opérationnels** | Sécurité et efficacité des équipes d’intervention, prévision du mouvement des particules. |
| **Signalement de l’incident** | Conformément à la Convention sur la notification rapide d’un accident nucléaire, l’AIEA doit indiquer au Secrétariat de l’OMM et au Centre de production ou de collecte de données d’Offenbach (Allemagne) quelle est la situation en ce qui concerne le sinistre. |
| **Méthode de coordination de l’intervention** | L’AIEA ou l’autorité nationale désignée est chargée de prendre des dispositions pour obtenir des informations à l’appui des évaluations de la dérive. |

### **Section 3: Activités et rôles de l’OMM à l’appui des interventions en cas d’urgence maritime**

L’OMM est une «institution spécialisée» des Nations Unies qui fait autorité pour les questions liées au climat, au temps, à l’eau et à l’environnement, notamment en ce qui concerne le développement durable et la sécurité des personnes et des biens.

Cette section décrit la manière dont l’OMM, avec son réseau de soutien aux activités d’intervention en cas d’urgence, est actuellement configurée et comment elle interagit avec les activités d’intervention existantes. Pour un aperçu complet de l’intervention en cas d’urgence maritime (y compris les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations de recherche et de sauvetage) à l’OMM depuis sa création, voir <https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER>.

### **Section 3.1 Interventions d’urgence en cas de pollution de la mer**

Les spécifications de l’OMM pour le SIUPM ont été approuvées par la Commission de météorologie maritime de l’OMM à sa onzième session (Lisbonne, avril 1993) et entérinées par la Commission à sa douzième session (La Havane, mars 1997). Voir [https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#MPERSS](https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER%23MPERSS).

Système d’intervention d’urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM)

Le SIUPM pour la haute mer a été créé avec pour objectif principal de mettre en place un système mondial coordonné pour la fourniture d’informations météorologiques et océanographiques pour les opérations d’intervention d’urgence en cas de pollution marine en dehors des eaux sous juridiction nationale. L’océan a été divisé en zones de pollution accidentelle de la mer (MPI), similaires aux METAREAS du Système mondial de détresse et de sécurité en mer de l’OMI (<http://weather.gmdss.org/>), et des coordinateurs météorologiques et océanographiques de zone (CMOZ) ont été identifiés pour chacune d’entre elles afin de fournir des produits et services liés à la pollution marine.

Un **CMOZ** est un service national qui a accepté de coordonner la fourniture des renseignements météorologiques régionaux et des renseignements océanographiques, selon qu’il convient, qui sont diffusés pour appuyer les opérations d’urgence en cas de pollution de la mer dans sa zone de responsabilité. Le CMOZ peut également procurer un appui et des conseils en ce qui concerne les eaux territoriales situées dans sa zone de responsabilité, si les pays concernés le lui demandent.

L’appui fourni par un CMOZ comprend**[[4]](#footnote-5)**:

a) Prévisions et avis météorologiques de base adaptés à la zone ou aux zones concernée(s);

L’appui fourni par un CMOZ peut également comprendre:

b) Des prévisions et des avis météorologiques de base adaptés à la zone ou aux zones concernée(s);

c) L’observation, l’analyse et la prévision des paramètres météorologiques et océanographiques destinés à alimenter les modèles qui décrivent le mouvement, la dispersion, la dissipation et la dissolution des polluants de la mer;

d) Dans certains cas, l’exploitation de ces modèles; et

e) Dans certains cas, l’accès aux moyens de télécommunications nationaux et internationaux;

f) D’autres formes d’appui opérationnel.

L’information diffusée peut avoir été préparée par le seul CMOZ ou par un autre Service d’appui, ou bien par une combinaison des deux, sur la base d’un accord conclu entre les Services concernés. Les coordonnées (adresse postale, adresse électronique, numéros de téléphone, de télex et de téléfax) de toute(s) autorité(s) chargée(s) des opérations d’urgence en cas de pollution de la mer dans la zone MPI déterminée doivent figurer sur le site Web du SIUPM (en cours de révision).

Rôle de la Commission des services relevant de l’OMM (SERCOM)

La SERCOM est l’organe intergouvernemental des experts de l’OMM habilités à travailler dans le cadre d’activités de services et d’applications répondant aux besoins des Membres et de l’OMM. Il comprend plusieurs comités permanents, dont l’un, le Comité permanent des services de météorologie marine et d’océanographie (SC-MMO), se concentre sur le soutien et l’habilitation des Membres en matière d’interventions en cas d’éco-urgence maritime et d’opérations de SAR. L’Équipe d’experts pour les interventions d’urgence et les interventions côtières est chargée de développer des conseils techniques et du matériel d’orientation sur les services d’information en matière d’interventions en cas d’éco-urgence maritime, et les systèmes de traitement des données et de prévision, ainsi que de surveiller les opérations des centres spécialisés relevant du SMTDP pour ces interventions, en établissant des normes et en maintenant le produit en collaboration avec l’équipe de la Commission des infrastructures (INFCOM) qui dirige le SMTDP. Une liaison étroite avec les partenaires concernés, tels que l’OMI et l’AIEA, est encouragée pour assurer le soutien coordonné de tous les principaux acteurs dans le processus de préparation et de réponse aux urgences.

3.1.1 Intervention de l’OMM en cas d’éco-urgence nucléaire et non nucléaire

Les activités de l’OMM en matière d’intervention en cas d’éco-urgence nucléaire et non nucléaire comprennent, en termes généraux, le vaste domaine de l’application de techniques spécialisées de modélisation de la dispersion atmosphérique pour suivre et prévoir la propagation de substances dangereuses en suspension dans l’air en cas d’éco-urgence. Ce type d’application spécialisée dépend directement de l’infrastructure opérationnelle des systèmes de PNT qui sont mis en œuvre et maintenus dans de nombreux centres météorologiques mondiaux, régionaux et nationaux de l’OMM.

Ce cadre de centres relevant du SMTDP a été établi pour aider les SMHN, leurs agences nationales respectives, ainsi que les organisations internationales concernées (principalement l’AIEA), à répondre efficacement aux urgences environnementales avec dispersion à grande échelle de substances dangereuses en suspension dans l’air. À la suite de l’accident survenu à la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986, les activités de l’OMM ont concentré ses dispositions opérationnelles et son soutien sur les accidents nucléaires; et, plus récemment, l’OMM a élargi ses activités pour inclure également l’appui météorologique aux interventions d’urgence en cas de dispersion de la fumée provenant de grands incendies, de cendres et d’autres émissions provenant d’éruptions volcaniques, et de rejets chimiques provenant d’accidents industriels.

Interventions en cas d’urgence nucléaire

L’OMM a mis en place des arrangements internationaux opérationnels avec l’AIEA afin de déclencher un soutien météorologique spécialisé pour les interventions d’urgence environnementale liées aux accidents nucléaires et aux urgences radiologiques, en cas de besoin. L’OMM joue un rôle important à cet égard grâce à ses capacités uniques de PNT pour la simulation et la prévision du mouvement et de la dispersion des matières radioactives dans l’atmosphère.

L’OMM a mis en place et entretient un système de 10 centres de modélisation numérique spécialisés, appelés CMRS, qui sont prêts à tout moment à fournir des simulations informatiques hautement spécialisées de l’atmosphère permettant de prédire le mouvement à longue distance de la radioactivité en suspension dans l’air. Ces centres spécialisés, qui représentent une couverture mondiale complète 24 heures sur 24, tous les jours, sont situés dans les centres météorologiques nationaux d’Exeter (Royaume-Uni), de Toulouse (France), de Melbourne (Australie), de Montréal (Canada), de Washington (États-Unis), de Pékin (Chine), d’Obninsk (Fédération de Russie), d’Offenbach (Allemagne), de Vienne (Autriche) et de Tokyo (Japon). Le système comprend également une passerelle de télécommunication à Offenbach (Allemagne) pour assurer la notification et la liaison d’informations en temps réel entre le Centre des incidents et des urgences de l’AIEA et l’OMM. Sur demande, ces centres fournissent les produits spécialisés dans les trois heures aux centres météorologiques nationaux et à l’AIEA.

Une bonne planification en amont d’une urgence peut améliorer considérablement la réponse. À cette fin, le Plan de gestion des situations d’urgence radiologique commun aux organisations internationales a été créé. Il est tenu à jour par l’AIEA et comprend les organisations internationales qui sont parties à la Convention internationale sur la notification rapide d’un accident nucléaire et à la Convention sur l’assistance en cas d’accident nucléaire ou de situation d’urgence radiologique, ainsi que certaines organisations internationales qui participent aux activités du Comité interinstitutions sur les interventions en cas d’accidents nucléaires.

L’OMM est partie à ces conventions et participe à l’examen régulier et à la mise à jour du Plan commun susmentionné, y compris le programme d’exercices de la Convention.

Interventions en cas d’éco-urgence non nucléaire

L’OMM a élargi la portée et les capacités de ses activités d’intervention en cas d’urgence pour y inclure les éco-urgences non nucléaires. Le domaine des incidents et des urgences chimiques est en cours d’exploration et d’élaboration.

De nombreux SMHN ont la responsabilité nationale de fournir un soutien météorologique aux interventions d’urgence en cas d’accident chimique. Ces services vont des observations météorologiques, des prévisions et des avertissements fournis aux opérations sur le terrain, à la fourniture de produits spécialisés et de conseils d’experts sur la dispersion atmosphérique des polluants. Certains gouvernements investissent et coopèrent dans les domaines scientifiques et techniques et ont entrepris de revoir l’organisation des mesures visant à accroître leur niveau de sécurité respectif, notamment en ce qui concerne la surveillance et la modélisation d’environnements complexes et les simulations visant à détecter, évaluer et prévoir le transport atmosphérique de substances dangereuses. Tous ces aspects contribuent à la gestion des risques dans le cadre de la prévention et de l’atténuation des catastrophes.

Rôle de la Commission des infrastructures (INFCOM) relevant de l’OMM

L’INFCOM est l’organe intergouvernemental composé d’experts de l’OMM habilités à travailler dans le cadre d’activités liées aux infrastructures (y compris l’observation, l’instrumentation et les données), à l’appui des besoins des Membres. Il comprend plusieurs comités permanents, dont l’un, le Comité permanent du traitement des données pour la modélisation et la prévision appliquées au système Terre (SC-ESMP), se concentre sur le SMTDP. Leur Équipe d’experts pour les interventions d’urgence (ET-ERA) est chargée de veiller à ce que les procédures d’interventions d’urgence, tant nucléaires que non nucléaires, soient adéquates et répondent aux besoins des Membres et des organisations internationales (c’est-à-dire l’AIEA et l’Organisation du traité d’interdiction complète des essais nucléaires (OTICE)), ainsi qu’à une éventuelle mise à jour, le cas échéant, du Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision (OMM-N° 485). Ils apportent un appui à la formation théorique et professionnelle des utilisateurs sur l’utilisation et l’interprétation des produits liés aux activités des interventions en cas d’urgence, ainsi que sur leurs points forts et points faibles. De même, les SMHN sont aidés dans leurs activités de développement de leurs capacités dans le domaine de l’intervention en cas d’urgence pour appuyer les institutions nationales dans leurs activités de préparation, de planification, d’intervention et de relèvement. L’accent mis sur l’essai de nouveaux produits, notamment en ce qui concerne les méthodes de modélisation du transport atmosphérique et de la dispersion, favorise les améliorations. Mettre à l’épreuve et améliorer la capacité collective de tous les CMRS, de l’AIEA, de l’OTICE, du Centre régional de télécommunications d’Offenbach et des SMHN spécialisés dans les activités d’intervention en cas d’éco-urgence de répondre aux exigences opérationnelles conformément aux normes et procédures énoncées dans le Manuel sur le SMTDP.

### **RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS**

Le présent rapport a fait le point sur l’état de l’art de l’intervention d’urgence en mer, en reconnaissant que les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les objets à la dérive (notamment pour les opérations de SAR) reposent sur des méthodes similaires. Il a souligné les besoins multidimensionnels en données de forçage océanique et atmosphérique pour soutenir la modélisation métocéanique. Le rapport décrit également le rôle des SMHN et d’autres institutions –nationales, régionales et internationales, y compris l’OMM– qui ont toutes un intérêt dans le processus complexe mais très important de réponse à une urgence en mer ou le long de la côte.

L’examen démontre la complexité du paysage dans lequel il s’inscrit, avec la législation, les engagements internationaux et nationaux, ainsi que les différents rôles et responsabilités dans la chaîne de réponse. Les SMHN jouent un rôle important à cet égard, et l’OMM peut renforcer son rôle et celui des SMHN dans ce processus, en offrant des conseils sur les meilleures pratiques pour aider les Membres impliqués dans les urgences maritimes. Actuellement, il n’y a pas de matériel d’orientation disponible pour les Membres et, en tant que tel, ce rapport montre où l’OMM SERCOM pourrait ajouter de la valeur en développant un matériel d’orientation pertinent.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

# [Annexes: 3](#_Annexe_1)

## **Annexe 1**

## **Recommandations formulées lors de la réunion 2013 du Centre des incidents et des urgences**

(«Modélisation maritime et aquatique lors d’accidents de réacteurs nucléaires 29 juillet au 31 juillet et réunion de l’Équipe spéciale de la CMOM le 1er août 2013»)

* Le Centre devrait élaborer un concept d’opérations pour l’utilisation de la modélisation maritime pendant la couverture d’un incident radiologique ou nucléaire:
* L’utilisation envisagée de la modélisation maritime en cas d’urgence
* L’étendue de la capacité souhaitée des modèles maritimes au cours des 24 premières heures, de la première semaine et du premier mois (car les capacités peuvent augmenter au fil du temps pendant un événement)
* Présentation des modèles au public et aux audiences techniques
* Gestion de l’utilisation des modèles et des mesures maritimes pendant l’incident
* La sortie des modèles maritimes doit être dans un format simplifié, facile à comprendre par l’équipe technique du Centre des incidents et des urgences.
* L’équipe technique du Centre aura besoin d’une formation spécifique sur l’interprétation de ces modèles afin de transmettre correctement les incertitudes associées (ceci n’est pas différent de la formation actuelle sur les modèles de panache).
* Les modèles pourraient être réexécutés pendant un incident avec de nouvelles informations à intervalles fixes (par exemple deux fois par jour ou quotidiennement).
* Il a été noté que le mouvement des modèles maritimes est généralement plus lent que celui des modèles de panache et que, par conséquent, demander des données à une fréquence trop rapide peut ne pas fournir d’informations utiles (c’est-à-dire inférieur à quatre heures).
* Il est possible pour le Centre d’utiliser des modèles maritimes afin de fournir une information générale sur les endroits où le matériel peut aller pendant un incident (de la même manière dont les modèles météorologiques sont actuellement utilisés au sein du Centre).
* La configuration actuellement utilisée par le Centre pour recevoir un soutien météorologique des CMRS de l’OMM serait utile pour servir de base à l’établissement d’arrangements similaires en matière de modélisation maritime.
* Le niveau d’assistance supplémentaire que permet un contact 24/7 avec ces centres serait très utile au Centre des incidents et des urgences pour maintenir toute capacité de modélisation maritime et aider à l’interprétation de ces modèles.
* L’appui supplémentaire d’un contact 24h/24 et 7j/7 serait utile si le Centre a besoin d’une modélisation spécialisée pendant un incident.
* L’approche actuelle du Centre en matière de modélisation du panache (en utilisant un terme source illustratif d’un becquerel par heure) peut être appliquée avec succès à la modélisation maritime à des fins de connaissance de la situation.
* Des discussions avec des organisations externes susceptibles de fournir un tel soutien (par exemple, la CMOM) pourraient être utilisées pour aider à définir la portée de tout service futur de ce type.
* Les modèles qui traitent à la fois d’un point (directement vers la mer) et d’un dépôt (c’est-à-dire à partir d’un panache) doivent être disponibles pendant un événement, car le profil de dispersion peut être très sensible à la distance côtière.
* Les modèles maritimes sont très sensibles à la résolution des données; il est recommandé d’utiliser les capacités de modélisation à haute résolution lorsqu’elles sont disponibles.
* La résolution requise pour qu’un modèle soit utile dépend du scénario, comme c’est le cas pour la modélisation à proximité d’un littoral.
* Lorsque les effets de la marée sont importants, la fréquence d’entrée/sortie d’un modèle peut devoir être d’une heure.
* Le Centre devrait envisager l’utilisation potentielle de la cartographie des risques (par exemple, la fourniture d’une carte de probabilité de distribution future fondée sur des données historiques) comme produit à fournir lors d’un incident.
* La mise en œuvre d’une capacité de modélisation maritime au sein du Centre devrait aborder la manière dont les résultats sont archivés et éventuellement fournis à d’autres départements internes de l’Agence pour une analyse à plus long terme.
* Les capacités complètes de ces modèles devront être évaluées une fois mis en œuvre et mis à la disposition du Centre.
* Le Centre devra déterminer comment intégrer le plus efficacement possible dans le processus décisionnel existant l’utilisation de toute capacité de modélisation maritime.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

## **Annexe 2**

## **Cadres et programmes internationaux, mondiaux et régionaux relatifs aux interventions en cas d’éco-urgence maritime et aux opérations de SAR**

La présente annexe décrit le contexte dans lequel s’inscrivent les divers cadres et programmes susceptibles d’influer sur le soutien apporté par l’OMM aux interventions des Membres en cas d’urgence et de recherche et sauvetage dans le domaine maritime.

### **Conventions et activités associées concernant les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations de SAR**

1.1.1 Organisation maritime internationale (OMI) et Conventions liées

L’OMI est une agence spécialisée des Nations Unies qui se concentre sur la sécurité et la sûreté de la navigation internationale et sur la prévention de la pollution par les navires. Elle est responsable de deux conventions internationales qui concernent directement les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations de SAR. Pour l’un comme pour l’autre, l’OMM contribue aux travaux et aux réunions de l’OMI, et est coauteur de plusieurs documents obligatoires, notamment en matière de sécurité maritime.

Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL)

La Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL) est la principale convention internationale couvrant la prévention de la pollution du milieu marin par les navires, qu’elle soit d’origine opérationnelle ou accidentelle.

La Convention MARPOL a été adoptée le 2 novembre 1973 à l’OMI. Le protocole de 1978 a été adopté en réponse à une série d’accidents de pétroliers survenus en 1976-1977. Comme la Convention MARPOL de 1973 n’était pas encore entrée en vigueur, le Protocole MARPOL de 1978 a modifié la Convention d’origine. Le texte combiné est entré en vigueur le 2 octobre 1983. En 1997, un protocole a été adopté pour modifier la convention et une nouvelle annexe VI a été ajoutée, qui est entrée en vigueur le 19 mai 2005. La convention MARPOL a été mise à jour par des amendements au fil des ans.

La Convention comprend des règles visant à prévenir et à réduire au minimum la pollution par les navires, tant la pollution accidentelle que celle résultant des opérations de routine, et comprend actuellement six annexes techniques. La plupart des annexes comprennent des zones spéciales où les rejets opérationnels sont strictement contrôlés:

|  |  |
| --- | --- |
| **Annexe** | **Règles relatives à la:** |
| I | Prévention de la pollution par les hydrocarbures |
| II | Prévention de la pollution par les substances liquides nocives transportées en vrac |
| III | Prévention de la pollution par les substances nuisibles transportées par mer en colis |
| IV | Prévention de la pollution par les eaux usées des navires |
| V | Prévention de la pollution par les ordures des navires |
| VI | Prévention de la pollution de l’atmosphère par les navires |

Le Comité de la protection du milieu marin (MEPC) de l’OMI, qui se compose de tous les États membres de l’OMI, est habilité à examiner toute question relevant du champ d’application de l’OMI et concernant la prévention et la maîtrise de la pollution par les navires, couverte par la convention MARPOL. Cela comprend également le pétrole, les produits chimiques transportés en vrac, les eaux usées, les ordures et les émissions des navires (telles que les polluants atmosphériques et les émissions de gaz à effet de serre). La gestion des eaux de ballast, les systèmes antisalissure, le recyclage des navires, la préparation et la lutte contre la pollution et l’identification des zones spéciales et des zones maritimes sensibles sont également pris en compte. Elle s’occupe en particulier de l’adoption et de la modification des conventions et autres règlements et des mesures visant à assurer leur application.

Le MEPC a d’abord été établi en tant qu’organe subsidiaire de l’Assemblée de l’OMI et a été élevé au rang constitutionnel complet en 1985. Plusieurs sous-comités soutiennent le travail du MEPC, dont le sous-comité de la prévention de la pollution et de l’intervention, qui est le plus directement concerné par le programme d’interventions en cas d’éco-urgence maritime.

Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS)

La Convention SOLAS inclut tous les États membres de l’OMI ainsi que les pays qui sont parties à des conventions telles que la SOLAS, même s’ils ne sont pas membres de l’OMI.

Le Comité de la sécurité maritime (MSC) est l’organe technique suprême de l’OMI. Comme le MEPC, il est composé de tous les États membres de l’OMI. Les fonctions du MSC consistent à «examiner toutes les questions qui relèvent de la compétence de l’Organisation, telles que les aides à la navigation maritime, la construction et l’équipement des navires, les questions d’équipage dans la mesure où elles intéressent la sécurité, les règlements destinés à prévenir les abordages, la manipulation des cargaisons dangereuses, la réglementation de la sécurité en mer, les renseignements hydrographiques, les journaux de bord et les documents intéressant la navigation maritime, les enquêtes sur les accidents en mer, le sauvetage des biens et des personnes ainsi que toutes autres questions ayant un rapport direct avec la sécurité maritime».

Le MSC est également tenu de fournir des machines pour l’exécution de toute tâche qui lui est assignée par la convention de l’OMI ou de toute tâche relevant de son champ d’action qui pourrait lui être assignée par ou en vertu de tout instrument international et acceptée par l’OMI. Il est également chargé d’examiner et de soumettre à l’Assemblée des recommandations et des lignes directrices sur la sécurité pour adoption. Le MSC élargi adopte des amendements aux conventions, telles que la Convention SOLAS. Le MSC dispose de plusieurs sous-comités à l’appui de son mandat, dont celui de la navigation, des communications, de la recherche et du sauvetage, auquel l’OMM participe en tant qu’observateur. Il s’agit de l’organisme qui, parmi de nombreux sujets, s’occupe du Service mondial OMI/OMM d’information et d’alerte pour la météorologie maritime et l’océanographie (WWMIWS) et de ses informations sur la sécurité maritime fournies par les METAREAS relevant de l’OMM. Bien que les activités de SAR ne fassent pas directement partie des discussions sur les informations sur la sécurité maritime, leur champ d’application est toujours pris en compte pour répondre aux demandes de SAR, où les informations météorologiques sont essentielles au processus. Pour le rôle de l’OMM dans le WWMIWS et les opérations de SAR, voir (lien vers le site web de l’OMM).

1.1.2 Centre régional méditerranéen pour l’intervention d’urgence contre la pollution marine accidentelle (REMPEC)

L’objectif du REMPEC (<www.rempec.org>) est de contribuer à prévenir et à réduire la pollution par les navires et à lutter contre la pollution en cas d’urgence. A cet égard, la mission du REMPEC est d’aider les parties contractantes à remplir leurs obligations au titre des articles 4(1), 6 et 9 de la Convention de Barcelone; le Protocole d’urgence de 1976; le Protocole «Prévention et situations critiques» de 2002 et la mise en œuvre de la Stratégie régionale pour la prévention de la pollution marine par les navires et la lutte contre celle-ci, adoptée par les parties contractantes en 2005, dont les principaux objectifs et cibles sont reflétés dans la Stratégie méditerranéenne pour le développement durable. Le Centre aidera également les parties contractantes qui en font la demande à mobiliser l’assistance régionale et internationale en cas d’urgence au titre du protocole sur la haute mer, si cet instrument entre en vigueur.

Les principaux domaines d’action du REMPEC pour la prévention de la pollution du milieu marin par les navires et le développement de la préparation et de la réponse à la pollution marine accidentelle et de la coopération en cas d’urgence sont les suivants:

* Renforcer les capacités des États côtiers de la région en vue de prévenir la pollution du milieu marin par les navires et d’assurer l’application effective dans la région des règles généralement reconnues au niveau international en matière de prévention de la pollution par les navires, et en vue d’atténuer, de combattre et, dans toute la mesure possible, d’éliminer la pollution du milieu marin due aux activités de navigation, y compris les bateaux de plaisance;
* Développer la coopération régionale dans le domaine de la prévention de la pollution du milieu marin par les navires, et faciliter la coopération entre les États côtiers méditerranéens afin de répondre aux incidents de pollution qui entraînent ou peuvent entraîner un rejet d’hydrocarbures ou d’autres substances dangereuses et nocives, et qui nécessitent des mesures d’urgence ou d’autres interventions immédiates;
* Aider les États côtiers de la région méditerranéenne qui le demandent à développer leurs propres capacités nationales d’intervention en cas d’incidents de pollution entraînant ou pouvant entraîner un rejet d’hydrocarbures ou d’autres substances nocives et potentiellement dangereuses, et faciliter l’échange d’informations et la coopération et la formation en matière de technologie;
* Fournir un cadre pour l’échange d’informations sur les questions opérationnelles, techniques, scientifiques, juridiques et financières, et promouvoir le dialogue visant à mener une action coordonnée aux niveaux national, régional et mondial pour la mise en œuvre du Protocole de prévention et situations critiques; et
* Aider les Etats côtiers de la région qui, en cas d’urgence, en font la demande, soit directement, soit en obtenant une assistance des autres Parties, ou, lorsque les possibilités d’assistance n’existent pas dans la région, à obtenir une assistance internationale en dehors de la région.

1.1.3 Agence européenne pour la sécurité maritime (AESM).

L’Agence européenne pour la sécurité maritime est l’une des agences décentralisées de l’Union européenne (UE). Basée à Lisbonne, l’Agence fournit une assistance technique et un soutien à la Commission européenne et aux États membres dans l’élaboration et la mise en œuvre de la législation européenne sur la sécurité maritime, la pollution par les navires et la sûreté maritime. Il s’est également vu confier des tâches opérationnelles dans le domaine de la lutte contre la pollution pétrolière, de la surveillance des navires et de l’identification et du suivi des navires à longue distance.

Les retombées des accidents de l’Erika (1999) et du Prestige (2002) et les marées noires qui en ont résulté ont donné une impulsion politique majeure à la création de l’AESM en 2003. Ces incidents ont entraîné d’énormes dégâts environnementaux et économiques sur les côtes espagnoles et françaises. Ils ont également rappelé aux décideurs que l’Europe devait investir dans une meilleure préparation à une marée noire de grande ampleur, c’est-à-dire au-delà des ressources disponibles au niveau de chaque État membre.

L’AESM entreprend un certain nombre de tâches principalement préventives, mais aussi réactives, dans certains domaines clés afin d’atteindre ses objectifs.

Tout d’abord, l’Agence a été chargée d’aider la Commission à contrôler la **mise en œuvre de la législation de l’UE** relative, entre autres, à la construction et à l’entretien planifié des navires, à l’inspection des navires et à la réception des déchets des navires dans les ports de l’UE, à la certification des équipements marins, à la sûreté des navires, à la formation des gens de mer dans les pays tiers et au contrôle par l’État du port.

Deuxièmement, l’Agence exploite, entretient et développe des **capacités de renseignement maritime** au niveau de l’UE. Parmi les exemples significatifs, citons le système de suivi des navires SafeSeaNet, qui permet de suivre les navires et leurs cargaisons à l’échelle de l’UE; et le centre de données coopératif du Système d’identification et de suivi des navires à grande distance de l’UE, afin d’assurer l’identification et le suivi des navires battant pavillon européen dans le monde entier.

Parallèlement, une capacité de **préparation, de détection et de lutte contre la pollution marine** a été mise en place, notamment un réseau européen de navires de réserve pour la lutte contre les déversements d’hydrocarbures ainsi qu’un service européen de surveillance des déversements d’hydrocarbures par satellite et de détection des navires (CleanSeaNet), tous deux dans le but de contribuer à un système efficace de protection des côtes et des eaux de l’UE contre la pollution par les navires.

Enfin, l’Agence fournit des **conseils techniques et scientifiques** à la Commission dans le domaine de la sécurité maritime et de la prévention de la pollution par les navires, dans le cadre du processus continu d’évaluation de l’efficacité des mesures en place, ainsi que de la mise à jour et du développement de la nouvelle législation. Elle apporte également un soutien aux États membres, facilite la coopération entre eux et diffuse les meilleures pratiques. En tant qu’organe de l’Union européenne, l’Agence se trouve au cœur du réseau de sécurité maritime de l’UE et collabore avec de nombreuses parties prenantes du secteur et des organismes publics, en étroite collaboration avec la Commission et les États membres.

### **Programmes internationaux et/ou régionaux pertinents pour les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations SAR**

L’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA) et les activités d’intervention d’urgence de l’OMM

L’AIEA est une agence intergouvernementale axée sur la coopération scientifique et technique dans le domaine nucléaire. Il s’agit notamment d’œuvrer en faveur d’une utilisation sûre, sécurisée et pacifique de la technologie de la science nucléaire. Compte tenu du risque élevé de danger nucléaire, elle joue un rôle dans la réponse aux urgences environnementales, notamment par des mesures de sauvegarde et la surveillance des substances dangereuses. Il existe un lien direct avec les interventions en cas d’urgence de l’OMM, qui implique l’application de techniques spécialisées de modélisation de la dispersion atmosphérique pour suivre et prévoir la propagation de substances dangereuses en suspension dans l’air en cas d’urgence environnementale, comme indiqué à la section 1.2.

L’AIEA mène des activités de recherche et développement sur la pollution marine dans son laboratoire d’études du milieu maritime. Le travail du laboratoire se concentre sur le développement et la validation de méthodes analytiques pour la mesure des contaminants dans les échantillons maritimes. Il s’agit potentiellement d’un élément important de tout futur système d’intervention d’urgence en cas de radioactivité dans l’océan.

Système mondial d’observation de l’océan (GOOS)

Le GOOS est une plateforme collaborative comportant six composantes clés qui aident à définir les besoins en matière d’observation des océans, à coordonner les réseaux d’observation et à assurer le flux de données et de prévisions. Coparrainé par la Commission océanographique intergouvernementale, l’OMM, le PNUE et le Conseil scientifique international (CSI), il soutient une communauté englobant tous ceux qui jouent un rôle dans le système d’observation: programmes d’observation internationaux, régionaux et nationaux, gouvernements, agences des Nations Unies, organismes de recherche et scientifiques individuels. En travaillant ensemble sur les outils et les technologies d’observation des océans, la libre circulation des données, les systèmes d’information, les prévisions et l’analyse scientifique, cette communauté mondiale peut tirer parti de la valeur de tous ces investissements.

Des groupes d’experts synthétisent les exigences et fournissent des conseils sur la conception du système d’observation dans le but de renforcer et d’étendre la mise en œuvre, en promouvant les meilleures pratiques. Une équipe chargée des systèmes de prévision se concentre également sur l’amélioration de la capacité et de la qualité des prévisions océaniques, ce qui a une incidence directe sur les services de modélisation et de production liés à la dérive océanique et aux objets flottants, et donc sur les interventions en cas d’éco-urgence maritime et les opérations de SAR. Outre le fait que l’OMM est un coparrain du GOOS, la communauté du GOOS collabore également à des activités mutuelles avec l’INFCOM et la SERCOM respectivement), notamment pour faire progresser les capacités de prévision océanique pour les services météorologiques. Le Conseil collaboratif mixte OMM-COI fournit des conseils stratégiques à la fois à la COI et à l’OMM pour encourager la coordination croisée de ces activités.

Autres éléments pertinents pour l’intervention d’urgence en mer

Il existe un certain nombre d’alliances régionales qui ont été créées pour prévenir, réagir et gérer les urgences maritimes, notamment environnementales. Ils ont généralement une base géographique, allant des Caraïbes à l’Asie et à l’Extrême-Orient. En général, ils travaillent en étroite collaboration avec la division de l’environnement de l’OMI. La meilleure utilisation des ressources pour s’engager auprès d’eux, et pour fournir un mécanisme de réponse plus cohérent, pourrait être de travailler directement avec l’OMI.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

## **Annexe 3**

## **Références**

Allen, A. A. (2005), «Leeway divergence», CENTRE DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT DES GARDE-CÔTES, GROTON CT.

Allen, A., Plourde, J. V., 1999, «Review of Leeway: Field Experiments and Implementation», Tech. Rep. CG-D-08-99, US Coast Guard Research and Development Center, 1082 Shennecossett Road, Groton, CT, USA, disponible sur <http://www.ntis.gov>.

Ambjorn, C. (2007), «SeatrackWeb, forecasts of oil spills, a new version», Environ. *Res.* *Eng.* *Manage.*, 3: 60–66.

Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, A.B. et Bertin, X., (2009), «Application of an Eulerian-Lagrangian oil spill modeling system to the Prestige accident: trajectory analysis», Journal of Coastal Research, 777–781.

Barrick, D., Fernandez, V., Ferrer, M. I., Whelan, C., Breivik, Ø., 2012. «A short-term predictive system for surface currents from a rapidly deployed coastal HF radar network», Ocean Dynam 62, 725-740, doi:10.1007/s10236-012-0521-0.

Blanke, B., et Raynaud, S. (1997), «Kinematics of the Pacific equatorial undercurrent: An Eulerian and Lagrangian approach from GCM results», Journal of Physical Oceanography, 31: 1698–1711

Breivik, Ø., A Allen, C Maisondieu, M Olagnon, 2013, «Advances in Search and Rescue at Sea, Ocean Dynam», 63(1), 83-88, doi:10.1007/s10236, arXiv:1211.0805.

Breivik, Ø., Allen, A., Maisondieu, C., Roth, J.-C., Forest, B. (2012a), «The Leeway of Shipping Containers at Different Immersion Levels», Ocean Dynam 62, 741-752, doi:10.1007/s10236-012-0522-z, arXiv:1201.0603.

Breivik, Ø., Allen, A. A. (2008), «An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea», J Marine Syst 69 (1-2), 99-113, doi:10.1016/j.jmarsys.2007.02.010, arXiv:1111.1102.

Breivik, Ø., Allen, A. A., Maisondieu, C., Roth, J. C. (2011), «Wind-induced drift of objects at sea: The leeway field method», Appl Ocean Res 33, 10 pp, doi:10.1016/j.apor.2011.01.005, arXiv:1111.0750.

Breivik, Ø., Bekkvik, T. C., Ommundsen, A., Wettre, C. (2012b), «BAKTRAK: Backtracking drifting objects using an iterative algorithm with a forward trajectory model», Ocean Dynam 62, 239-252, doi:10.1007/s10236-011-0496-2, arXiv:1111.0756.

Carrier, M. J., Ngodock, H. E., Smith, S. R., Souopgui, I., et Bartels, B. (2016), «Examining the Potential Impact of SWOT Observations in an Ocean Analysis–Forecasting System, Monthly Weather Review», 144(10), 3767-3782. Consulté le 4 juillet 2022 à l’adresse https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/144/10/mwr-d-15-0361.1.xml.

Choi, Y., S. Kida et K. Takahashi, 2013, «The impact of oceanic circulation and phase transfer on the dispersion of radionuclides released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant», Biogeosciences, 10, 4911-4925, 2013, doi:10.5194/bg-10-4911-2013.

Christensen, K. H., Breivik, Ø., Dagestad, K. F., Röhrs, J., & Ward, B. (2018), «Short-term predictions of oceanic drift», Océanographie, 31(3): 59–67.

Coppini, G., Jansen, E., Turrisi, G., Creti, S., Shchekinova, E.Y., Pinardi, N., Lecci, R., Carluccio, I., Kumkar, Y.V., D’Anca, A. et Mannarini, G. (2016), «A new search-and-rescue service in the Mediterranean Sea: a demonstration of the operational capability and an evaluation of its performance using real case scenarios», Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(12):2713–2727.

Dagestad, K-F, J Röhrs, Ø Breivik, et B Ådlandsvik (2018), «OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modeling», Geosci Model Dev, 11(4):1405–1420, doi:10.5194/gmd-11-1405-2018

Daling, P. S., Moldestad, M. Ø., Johansen, Ø., Lewis, A., et Rødal, J. (2003), Nor-

wegian testing of emulsion properties at sea – the importance of oil type and release

conditions», Spill Science & Technology Bulletin, 8(2):123–136.

Daniel, P., et R. Virasami (2021), «Oil spill management and salvage in the Indian Ocean», dans le Bulletin Vol. 70 (1), Organisation météorologique mondiale, Genève.

Davidson, W. F., K. Lee et A. Cogswell (Eds.) (2008), «Oil Spill Response: A Global Perspective», «Proceedings of the NATO CCMS Workshop on Oil Spill Response, Dartmouth, Nova Scotia, Canada, 11-13 October 2006», Springer Science and Business, Dordecht, 365 p.

Davidson, F. J. M., Allen, A., Brassington, G. B., Breivik, Ø., Daniel, P., Kamachi, M., Sato, S., King, B., Lefevre, F., Sutton, M., Kaneko, H., 2009, «Applications of GODAE ocean current forecasts to search and rescue and ship routing», Oceanography 22 (3):176–181, doi:10.5670/oceanog.2009.76

Duffa, C., Bailly du Bois, P., Caillaud, M., Charmasson, S., Couvez, C., Didier, D., Dumas, F., Fievet, B., Morillon, M., Renaud, P., Thebault, H., 2016, «Development of emergency response tools for accidental radiological contamination of French coastal areas», J. Environ. Radioact. 151, 487–494.

Döös, K., Kjellsson, J., & Jönsson, B. (2013), «TRACMASS—A Lagrangian trajectory model», dans *Preventive methods for coastal protection* (pp. 225–249). Springer, Heidelberg.

Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002), «Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides», Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19(2):183–204.

Estournel, C., Bosc, E., Bocquet, M., Ulses, C., Marsaleix, P., Winiarek, V., Osvath, I., Nguyen, C., Duhaut, T., Lyard, F., Michaud, E., Auclair, F., 2012, «Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters», J. Geophys. *Res.* Oceans. 117 (C11014).

Fay, J. A. (1971), «Physical processes in the spread of oil on a water surface», dans *Proceedings of the International Oil Spill Conference*, vol. 1971. Washington, DC: American Petroleum Institute, pp. 463–467. doi: 10.7901/2169-3358-1971-1-463

Fingas M. (Ed.) (2015), «Oil and petroleum evaporation», Ch. 7. dans *Handbook of oil spill science and technology*, 207. John Wiley and Sons Inc.

Fingas, M. (Ed.) (2017). «Oil spill science and technology», 2e édition. Publication professionnelle du Golfe.

Garraffo, Z., Kim, H., Mehra, A., Spindler, T., Rivin, I., Tolman, H.L., 2016, «Modeling of 137Cs as a tracer in a regional model for the Western Pacific, after the Fukushima–Daiichi nuclear power plant accident of March 2011», *Weather* *Forecasting*. 31:553–579.

Griffa, A. (1996), «Applications of stochastic particle models to oceanographic problems», dans *Stochastic modelling in physical oceanography* (pp. 113-140). Birkhäuser Boston.

Hackett, B., Breivik, Ø., Wettre, C., 2006, «Forecasting the drift of objects and substances in the oceans», dans Chassignet, E. P., Verron, J. (Eds.), «Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography». Springer, pp. 507–524.

Hackett, B., E. Comerma, P. Daniel et H. Ichikawa, 2009, «Marine oil pollution prediction»,

Oceanography, 22 (3):168–175.

Hernandez-Lasheras, J., Mourre, B., Orfila, A., Santana, A., Reyes, E., & Tintoré, J. (2021). «Evaluating high-frequency radar data assimilation impact in coastal ocean operational modelling», Ocean Science, 17(4):1157–1175.

Hodgins, D.O. et R.Y. Mak, 1995, «Leeway Dynamic Study Phase I Development and Verification of a Mathematical Drift Model for Four-person Liferafts.» préparé pour le Transportation Development Centre, Transport Canada Report # TP 12309E.

Hodgins, D. O., Hodgins, S. L. M., 1998, «Phase II Leeway Dynamics Program: Development and Verification of a Mathematical Drift Model for Liferafts and Small Boats», Tech. Rep., Garde côtière canadienne, Nouvelle-Écosse, Canada.

Iosjpe, M., Karcher, M., Gwynn, J., Harms, I., Gerdes, R., Kauker, F., 2009, «Improvement of the dose assessment tools on the basis of dispersion of the 99 Tc in the Nordic Seas and the Arctic Ocean», Radioprotection 44 (5):531–536.

Ivorra, B., S. Gomez, J. Carrera, A. Ramos (2021), «A compositional Eulerian approach for modeling oil spills in the sea», Ocean Engineering, Volume 242, 110096, ISSN 0029-8018. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110096.

Jacobs, G., D’Addezio, J. M., Ngodock, H., & Souopgui, I. (2021), «Observation and model resolution implications to ocean prediction», Ocean Modelling, 159, 101760.

JMA (2002) «Marine Pollution transport model», dans *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency,*

https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/246209/www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-nwp/pdf/ol6\_7.pdf

JMA (2021) «Oil Spill Prediction Model», dans *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency,*

https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/pdf/outline2022\_05.pdf

Jones, R. K. (1997), «A simplified pseudo-component oil evaporation model»,

Jones, C, K-F Dagestad, O Breivik, B Holt, J Rohrs, K Christensen, M Espeseth, C Brekke, S Skrunes (2016), «Measurement and Modeling of Oil Slick Transport», J Geophys Res: Oceans, 121(10), pp 7759-7775, doi:10.1002/2016JC012113

Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S., Awaji, T., 2011, «Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of 131 I and 137 Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster», J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1349-1356.

Klemas,V. 2010, «Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the sea Princess and Deepwater Horizon oil spills», J. Coast. Res., 26(5):789-797.

Kratzke, T. M., Stone, L. D., Frost, J. R., 2010, «Search and Rescue Optimal Planning System», dans *Proceedings of the 13 International Conference on Information Fusion,* IEEE, p. 8

Legrand, S., and V. Duliere, 2014, «OSERIT: a downstream service dedicated to the Belgian Coast Guard Agencies», dans *Proceedings of the Sixth International Conference on EuroGOOS*, 4-6 octobre 2011, Sopot, Poland, eds. H. Dahlin, N.C. Flemming and S.E. Petersson, 181-188. EuroGOOS AISBL, Bruxelles, Belgique.

Lepicard, S., Heling, R., Maderich, V., 2004, «POSEIDON/RODOS model for radiological assessment of marine environment after accidental releases: application to coastal areas of the Baltic, Black and North seas», J. Environ. Radioact. 72 (1-2):153-161.

Maderich, V., Brovchenko, I., Dvorzhak, A., Ievdin, Y., Koshebutsky, V., Periañez, R., 2016, «Integration of 3D model THREETOX in JRODOS-HDM, implementation studies and model validation on marine Fukushima scenarios», Radioprotection (numéro spécial)

Min et al, 2013, «Marine dispersion assessment of 137Cs released from the Fukushima nuclear accident», Marine Pollution Bulletin 72 (2013):22-33, http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.008.

Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., Sylaios, G. (2021), «Oil Spill Modeling : A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges», J. Mar. Sci. *Eng.* 9, 181. https://doi.org/10.3390/

Nordam, T., et Duran, R. (2020), «Numerical integrators for Lagrangian oceanography», Geoscientific Model Development, 13(12):5935–5957.

Penna, N. T., Morales Maqueda, M. A., Martin, I., Guo, J., et Foden, P. R. (2018), «Sea surface height measurement using a GNSS wave glider», Geophysical Research Letters, 45(11):5609–5616.

Periáñez, R., 2003, «Redissolution and long-term transport of radionuclides released from a contaminated sediment: a numerical modelling study», Estuar. Coast. Shelf Sci. 56:5–14.

Periáñez, R., Pascual-Granged, A., 2008, «Modelling surface radioactive, chemical and oil spills in the strait of Gibraltar», Comput. Geosci. 34:163–180.

Periáñez, R., Suh, K.-S., Min, B.-I., 2012, «Local scale marine modelling of Fukushima releases. Assessment of water and sediment contamination and sensitivity to water circulation description», Mar. Pollut. Bull. 64, 2333–2339.

Periáñez R., R. Bezhenar, M. Iosjpe, V. Maderich, H. Nies, I. Osvath, I. Outola, G. de With (2014), «A comparison of marine radionuclide dispersion models for the Baltic Sea in the frame of IAEA MODARIA program», Journal of Environmental Radioactivity 139, 66-77.

Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P. J., Daling, P. S., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay,

D., et Prentki, R. (1999), «Oil spill modeling towards the close of the 20th century»,

Spill Science & Technology Bulletin, 5(1):3-16.

Reisser, J., Slat, B., Noble, K., du Plessis, K., Epp, M., Proietti, M., de Sonneville, J., Becker, T., et Pattiaratchi, C. (2015), «The vertical distribution of buoyant plastics at sea : an observational study in the North Atlantic Gyre», Biogeosciences, 12:1249–1256, https://doi.org/10.5194/bg-12-1249-2015.

Röhrs, J., Christensen, K., Hole, L., Broström, G., Drivdal, M., Sundby, S., 2012. «Observation based evaluation of surface wave effects on currents and trajectory forecasts», à paraître dans *Ocean Dynam*, 14 pp, doi:10.1007/s10236-012-0576-y.

Röhrs, J., Dagestad, K.-F., Asbjørnsen, H., Nordam, T., Skancke, J., Jones, C. E., et Brekke, C. (2018). «The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills», Ocean Sci., 14, 1581-1601, https://doi.org/10.5194/os-14-1581-2018.

Röhrs, J., Sutherland, G., Jeans, G., Bedington, M., Sperrevik, A. K., Dagestad, K. F., Gusdal, Y., Mauritzen, C., Dale, A. et LaCasce, J.H (2021). «Surface currents in operational oceanography: Key applications, mechanisms, and methods», Journal of Operational Oceanography, 1-29.

Schwab, D. J., Bennett, J. R., & Lynn, E. W. (1984). «" PATHFINDER": A Trajectory Prediction System for the Great Lakes» (No. 414). National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Great Lakes Environmental Research Laboratory.

Shibata T., T. Nakajima, Y. Igarashi, H. Tsuruta, M. Ebihara, T. Hattori, M. Hoshi, T. Ishimaru, K. Masumoto, P. Bailly du Bois, M. Bocquet, D. Boust, I. Brovchenko, I. Choe, T. Christoudias, D. Didier, H. Dietze, P. Garreau, H. Higashi, K. T. Jung, S. Kida, P. Le Sager, J Lelieveld, V. Maderich, Y. Miyazawa, S. U. Park, D. Quélo, K. Saito, T. Shimbori, Y. Uchiyama, P. van Velthoven, V. Winiarek, et S. Yoshida. «A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident», Rapport technique, Sectional Committee on Nuclear Accident Committee on Comprehensive Synthetic Engineering, Science Council of Japan, septembre 2014.

Spaulding M.L. (1988), «A state-of-art review of oil spill trajectory and fate modeling», Oils & Chemical pollution, 4:39-55.

Sperrevik, A. K., Christensen, K. H., & Röhrs, J. (2015), «Constraining energetic slope currents through assimilation of high-frequency radar observations», Ocean Science, 11(2):237–249.

Stiver, W, et Mackay, D. (1984), «Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures», Environmental Science & Technology, 834.

Sutherland, G., Soontiens, N., Davidson, F., Smith, G.C., Bernier, N., Blanken, H., Schillinger, D., Marcotte, G., Röhrs, J., Dagestad, K.F. et Christensen, K.H. (2020), «Evaluating the leeway coefficient of ocean drifters using operational marine environmental prediction systems», Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 37(11):1943–1954.

Tipton, M., McCormack, E., Elliott, G., Cisternelli, M., Allen, A., et Turner, A. C., (2022), «Survival Time and Search Time in Water: Past, Present and Future», TB-D-21-00612, disponible sur le SSRN: https://ssrn.com/abstract=3986715 ou http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3986715.

Tolman H., Z. Garaffo, A. Mehra, I. Rivin et T. Spindler, 2013, «Ocean Plume Modeling for the Fukushima Dai’ichi Event: Particle tracing», Note technique NOAA/NWS/NCEP.

Solabarrieta, L., Hernández-Carrasco, I., Rubio, A., Campbell, M., Esnaola, G., Mader, J., Jones, B.H. et Orfila, A. (2021), «A new Lagrangian-based short-term prediction methodology for high-frequency (HF) radar currents», Ocean Science, 17(3):755–768.

Turner, A.C., Lewandowski, M., Parker, J., McClay, T. (2009), «Recommendations for the U.S. Coast Guard Survival Prediction Tool», Garde côtière américaine, New London CT, USA.

van Sebille. E., S. M. Griffies, R. Abernathey, T. P. Adams, P. Berloff, A. Biastoch, B. Blanke, E. P. Chassignet, Y. Cheng, C. J. Cotter, E. Deleersnijder, K. Döös, H. F. Drake, S. Drijfhout, S. F. Gary, A. W. Heemink, J. Kjellsson, I. M. Koszalka, M. Lange, C. Lique, G. A. MacGilchrist, R. Marsh, C. G. M, Adame, R. McAdam, F. Nencioli, C. B. Paris, M. D. Piggott, J. A. Polton, S. Rühs, S. H.A.M. Shah, M. D. Thomas, J. Wang, P. J. Wolfram, L. Zanna, J. D. Zika (2018), «Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices», Ocean Modelling, Volume 121, 49-75, ISSN 1463-5003, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.11.008.

Vives i Batlle, J., Beresford, N., Beaugelin-Seiller, K., Bezhenar, R., Brown, J., Cheng, J.J., Cujic, M., Dragovic, S.S., Duffa, C., Fievet, B., Hosseini, A., Jung, K.T., Kamboj, S., Keum, D.K., Kryshev, A., Le Poire, D., Maderich, V., Min, B.I., Periáñez, R., Sazykina, T., Suh, K.S., Yu, C., Wang, C., Heling, R., 2016. «Inter-comparison of dynamic models for radionuclide transfer to marine biota in a Fukushima accident scenario», J. Environ. Radioact. 153, 31-50.

Wilkinson, M., Dumontier, M., Aalbersberg, I. et al. (2016), «The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship», Sci Data, 3, 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

OMM (1984), Commission de météorologie maritime – Rapport final abrégé de la neuvième session, Organisation météorologique mondiale, Genève.

OMM (2006), Commission technique mixte OMM/COI d’océanographie et de météorologie maritime (CMOM) - Deuxième session: rapport final abrégé, résolutions et recommandations (OMM-N° 995), Organisation météorologique mondiale, Genève.

OMM (2018a), Manuel de l’assistance météorologique aux activités maritimes (OMM-N° 558), Volume I – Aspects mondiaux, Organisation météorologique mondiale, Genève.

OMM (2018b), Guide de l’assistance météorologique aux activités maritimes (OMM-N° 471), Organisation météorologique mondiale, Genève.

OMM (2018c), Guide de l’analyse et de la prévision des vagues (OMM-N° 702), Organisation météorologique mondiale, Genève.

OMM (2021), *Sea-ice Information and Services* (WMO-No. 574), Organisation météorologique mondiale, Genève.

Zodiatis, G., R. Lardner, D. Solovyov, X. Panayidou, et M. De Dominicis. 2012. «Predictions for oil slicks detected from satellite images using MyOcean forecasting data», Ocean Sci., 8, 1105-1115. doi: 10.5194/os-8-1105-2012.

Zodiatis, G., De Dominicis, M., Perivoliotis, L., Radhakrishnan, H., Georgoudis, E., Sotillo, M., Lardner, R.W., Krokos, G., Bruciaferri, D., Clementi, E., Guarnieri, A., Ribotti, A., Drago, A., Bourma, E., Padorno, E., Daniel, P., Gonzalez, G., Chazot, C., Gouriou, V., Kremer, X., Sofianos, S., Tintore, J., Garreau, P., Pinardi, N., Coppini, G., Lecci, R., Pisano, A., Sorgente, R., Fazioli, L., Soloviev, D., Stylianou, S., Nikolaidis, A., Panayidou, X., Karaolia, A., Gauci, A., Marcati, A., Caiazzo, L., and Mancini, M. (2016), «The Mediterranean Decision Support System for Marine Safety dedicated to oil slicks predictions», Deep-Sea Research Part II, http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.07.014.

Zodiatis, G., R. Lardner, T.M. Alves, Y. Krestenitis, L. Perivoliotis, S. Sofianos, et K. Spanoudaki (2017), «Oil Spill forecasting (prediction)», dans *THE SEA: THE SCIENCE OF OCEAN PREDICTION*, J. Mar. Res., 75:923–953, 2017.

### **Annexe 3.1 Sites web pertinents**

<https://www.imo.org/>

<https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx>

<https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/SOLAS.aspx>

<https://www.rempec.org/fr>

<https://www.emsa.europa.eu/>

<https://www.iaea.org/>

<https://www.goosocean.org/>

[https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background](https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER" \l "Background)

<http://weather.gmdss.org/>

<https://hab.ioc-unesco.org/>

<https://data.hais.ioc-unesco.org/>

[https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#MPERSS](https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER" \l "MPERSS)

<http://weather.gmdss.org/>

<https://public.wmo.int/en/governance-reform/infrastructure-commission>

<https://public.wmo.int/en/governance-reform/services-commission>

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. <https://www.bbc.com/news/world-europe-47574143> [↑](#footnote-ref-2)
2. <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-60180226> [↑](#footnote-ref-3)
3. Il convient de noter que la prolifération nuisible d’algues n’est pas prise en compte dans cette étude, car sa prévision est abordée différemment de la localisation/modélisation des urgences marines. En effet, la prévision de la prolifération nuisible d’algues utilise un modèle couplé circulation océanique-écosystème, qui est moins mature (et moins précis) que les modèles d’interventions en cas d’éco-urgence maritime et de recherche et de sauvetage actuels. [↑](#footnote-ref-4)
4. Voir page 114, Rapport final de la deuxième session de la CMOM: résolutions et recommandations, OMM-N° 995. [↑](#footnote-ref-5)