



Synthèse des connaissances sur la mise en place et l'évolution des observatoires côtiers et marins

LA PLACE DES OBSERVATOIRES DU QUÉBEC
ET DU CANADA DANS LES RÉSEAUX
D'OBSERVATION MONDIAUX

Équipe de réalisation

Rédaction

Audrey Chevarie^{1,2}, Marie Lionard^{1,3}, Robin Bénard^{1,3}, Joannie Ferland^{1,4} et Paschale Bégin^{1,4}

Révision scientifique

Philippe Archambault⁵, Ivan Calvez⁶, Peter Galbraith⁷, Virginie Galindo⁴, Anne Le Roux⁶, Martine Lizotte⁵

Coordination de la diffusion

¹ Centre d'expertise en gestion des risques d'incidents maritimes (CEGRIM)

² Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE)

³ Ministère de la Sécurité publique (MSP)

⁴ Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP)

⁵ Université Laval (UL)

⁶ Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (Cedre)

⁷ Institut Maurice-Lamontagne (IML), Pêches et Océans Canada

Pour tout renseignement

Centre d'expertise en gestion des risques d'incidents maritimes (CEGRIM)

Ministère de la Sécurité publique

120-C, chemin de Gros-Cap

Cap-aux-Meules (Québec) G4T 1K8

Tél. : 418 986-1603

Courriel : cegrim@misp.gouv.qc.ca

Site Internet : <https://www.quebec.ca/securite-situations-urgence/securite-civile/fonctionnement/roles-responsabilites/centre-expertise-gestion-risques-incident-maritimes>

Citation suggérée

CENTRE D'EXPERTISE EN GESTION DES RISQUES D'INCIDENTS MARITIMES (2024). *Synthèse des connaissances sur la mise en place et l'évolution des observatoires côtiers et marins : la place des observatoires du Québec et du Canada dans les réseaux d'observation mondiaux*, rapport produit par l'équipe du CEGRIM, piloté par le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, en collaboration avec le ministère de la Sécurité publique et le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 89 p. + annexes.

ISBN 978-2-550-98659-1 (en ligne)

Dépôt légal – 2024

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

SC-163-(2024-09)_v4

Tous droits réservés pour tous pays. La reproduction et la traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du ministère de la Sécurité publique.

© Ministère de la Sécurité publique – septembre 2024

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Contexte.....	1
1.2. Concept d’observatoire	3
1.3. Objectif et utilisation de cette synthèse	5
1.4. Méthodologie	7
1.5. Définition d’observatoire.....	7
1.6. Contenu	8
2. PARAMÈTRES MESURÉS	10
2.1. Paramètres physiques	12
2.2. Paramètres biogéochimiques.....	16
2.3. Paramètres biologiques	18
2.4. Contaminants et facteurs de stress environnementaux	20
3. INSTRUMENTS	22
3.1. Instruments de mesure aux fins de télédétection	22
3.2. Instruments de mesure in situ de paramètres physiques	23
3.3. Instruments de mesure in situ de propriétés biogéochimiques	24
3.4. Instruments de mesure in situ de propriétés biologiques	24
3.5. Instruments de prélèvement in situ	25
3.6. Instruments de mesure des hydrocarbures.....	26
3.7. Instruments de mesure des pollutions sonores.....	28
3.8. Organismes utilisés comme biomoniteurs.....	28
4. PLATEFORMES ET TECHNOLOGIES UTILISÉES	31
4.1. Télédétection	31
Plateformes spatiales (satellites).....	32
Plateformes aéroportées (avions, hélicoptères, drones)	33
4.2. Observations in situ	35
Plateformes pour mesures eulériennes.....	35
Plateformes pour mesures lagrangiennes	37
Navires de recherche.....	39
Plateformes autonomes.....	40
5. OBSERVATOIRES, RÉSEAUX ET PROGRAMMES.....	45
Fin des années 1800 : mise en place des premiers observatoires	47
 Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer, France.....	47

2		Institut de la mer de Villefranche, France.....	48	
1930 – 1990 : progrès technologiques				49
3		Woods Hole Oceanographic Institution, États-Unis	49	
4		Institut océanographique de Bedford, Canada.....	51	
5		Réseau d'observation de la contamination chimique (ROCCH), France	51	
6		Institut Maurice-Lamontagne, Canada.....	52	
1990-1999 : Étude de plus grandes étendues océaniques				53
7		Le Système mondial d'observation de l'océan (Global Ocean Observing System)	53	
8		Le Programme de monitoring de la zone atlantique, Canada.....	55	
Début des années 2000 : expansion des observatoires.....				56
Accords internationaux et observatoires globaux			56	
Observatoires régionaux.....			58	
Observatoires câblés			60	
Les années 2000 : pressions anthropiques croissantes et apparition de nouveaux observatoires thématiques				61
15		Le REBENT, France	62	
16		Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole	62	
17		Système méditerranéen d'observation de l'océan pour l'environnement, France	63	
2010-2021 : engagement des communautés locales.....				63
18		Observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles, Canada.....	63	
Observatoires communautaires d'Ocean Networks Canada (ONC)			64	
19		L'observatoire de Cambridge Bay, Canada	65	
20		Le Prince Rupert Community Observatory, Canada.....	66	
21		Kitamaat Village Community Observatory, Canada.....	66	
22		Campbell River Community Observatory, Canada	66	
23		L'observatoire communautaire de Gascoyne Inlet, Canada	67	
23		L'observatoire communautaire de Burrard Inlet, Canada	67	

25		L'observatoire communautaire de China Creek, Canada	67
26		L'observatoire communautaire de Hartley Bay, Canada.....	67
27		L'observatoire communautaire de Holyrood Bay, Canada.....	68
		Observatoires citoyens	68
6.	CENTRES DE DONNÉES		69
7.	ORGANISATIONS PRENANT PART À LA LUTTE CONTRE LES DÉVERSEMENTS D'HYDROCARBURES		72
8.	CONCLUSION		78
8.1.	Pertinence de l'implantation d'observatoires.....		78
8.2.	Accessibilité et partage de données		79
8.3.	Instruments et plateformes.....		80
8.4.	Évolution des technologies (R-D).....		81
8.5.	La contribution du Québec et du Canada.....		81
9.	PERSPECTIVES.....		84
9.1.	Initiatives gouvernementales pour la protection des écosystèmes côtiers, fluviaux et marins		84
9.2.	L'apport des observatoires au portrait global		85
10.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		87
11.	ANNEXES.....		90
	Annexe 1 : Exemples d'instruments utilisés par les observatoires		90
	Annexe 2 : TAR Code (Thickness Appearance Relationship Code)		92
	Annexe 3 : Exemples de plateformes utilisées par les observatoires.....		93
	Annexe 4 : Liste des observatoires présentés dans cette synthèse.....		94

Figures

Figure 1 : Vue d'ensemble des plateformes d'observation des océans	31
Figure 2 : Carte localisant les observatoires, réseaux, programmes, centres de données et centres de recherche axés sur les pollutions par hydrocarbures présentés dans cette synthèse.	46
Figure 3 : Carte des transects échantillonnés dans le cadre du PMZA (en rouge) et des stations d'échantillonnage à haute fréquence (en noir).....	56
Figure 4 : Carte des infrastructures du réseau ONC	61
Figure 5 : Carte des observatoires communautaires du réseau ONC.....	65
Figure 6 : Date de création des observatoires présentés dans cette synthèse selon leur vocation (telle qu'elle est décrite dans le texte).	78

Tableaux

Tableau 1 : Présentation des symboles utilisés dans le texte et les tableaux de cette synthèse	9
Tableau 2 : Présentation des paramètres mesurés dans chacun des observatoires, réseaux et programmes présentés dans la synthèse	11
Tableau 3 : Liste des variables océaniques essentielles retenues par le programme GOOS.	54
Tableau 4 : Liste des services offerts par les organisations impliquées dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures présentées dans cette synthèse.	72

Sigles, acronymes et abréviations¹

ACIA	Agence canadienne d'inspection des aliments
AIS	Automatic Identification System (<i>système d'identification automatique</i>)
AMOSC	Australian Marine Oil Spill Centre
Argo	Array for Real-Time Geostrophic Oceanography (<i>Réseau d'océanographie géostrophique en temps réel</i>)
AUV	Autonomous Underwater Vehicle (<i>véhicule autonome sous-marin</i>)
BSEE	Bureau of Safety and Environmental Enforcement
CEDRE	Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux
CEGRIM	Centre d'expertise en gestion des risques d'incidents maritimes
Chl <i>a</i>	Chlorophylle <i>a</i>
CHONe	Canadian Healthy Oceans Network
CLIVAR	Climate and Ocean - Variability, Predictability, and Change (<i>Climat et océan – variabilité, prévisibilité et changement</i>) CNRS Centre national de la recherche scientifique
CO ₂	Dioxyde de carbone
COD	Carbone organique dissous
CODAR	Coastal Ocean Dynamics Application Radar (<i>radar d'application de la dynamique des océans côtiers</i>)
CMO	Churchill Marine Observatory
COI	Commission océanographique intergouvernementale
CTD	Conductivity, Temperature, and Depth (<i>conductivité, température et profondeur</i>)
DBCP	Data Buoy Cooperation Panel
DBT	Dibutylétain
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ERMA	Environmental Response Management Application (<i>application de la gestion de l'intervention environnementale</i>)
FDOM	Fluorescent Dissolved Organic Matter (<i>matière organique dissoute fluorescente</i>)
GCC	Garde côtière canadienne
GCOS	Global Climate Observing System
GEOS	Geostationary Operational Environmental Satellite (<i>satellite géostationnaire opérationnel pour l'environnement</i>)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLOSS	Global Sea Level Observing System (<i>Système mondial d'observation du niveau de la mer</i>)
GOOS	Global Ocean Observing System (<i>Système mondial d'observation des océans</i>)
GO-SHIP	Global Ocean ship-based hydrographic investigations program (<i>Programme mondial de recherches hydrographiques par navire</i>)
GOSUD	Global Ocean Surface Underway Data (<i>Données mondiales sur la surface des océans</i>)
GPI	Granulés plastiques industriels
GTSP	Global Temperature and Salinity Profile Programme (<i>Programme mondial de profils de température et de salinité</i>)

¹ Une traduction libre en français est proposée.

HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
IML	Institut Maurice-Lamontagne
INREST	Institut nordique de recherche en environnement et en santé au travail
INSU-CNRS	Institut national des sciences de l'Univers du Centre national de la recherche scientifique
IOB	Institut océanographique de Bedford (<i>BIO : Bedford Institute of Oceanography</i>)
IOCCP	International Ocean Carbon Coordination Project
IRL-UMI	Laboratoire de recherche international (International Research Laboratory) – Unité mixte internationale
IRMP	Initiative de recherche multipartenaire (<i>MPRI : Multi-partners research initiative</i>)
ISC	International Science Council (<i>Conseil international pour la science</i>)
ISMER	Institut des sciences de la mer de Rimouski
ITOPF	International Tanker Owners Pollution Federation
LIDAR	Light Detection and Ranging
MAMH	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
MBT	Monobutylétain
MEIE	Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MEOP	Marine Mammals Exploring the Oceans-Pole to Pole
MEOPAR	Marine Environmental, Observation, Prediction and Response Network
MES	Matières en suspension
MOOSE	Mediterranean Ocean Observing System for the Environment
MPO	Pêches et Océans Canada
MSP	Ministère de la Sécurité publique
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable
NCCOS	National Centers for Coastal Ocean Science
NCEI	National Centers for Environmental Information
NEPTUNE	North-East Pacific Time-series Undersea Network
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NODC	National Oceanographic Data Center
OEB	Observatoire environnemental de base
OCLP	Ocean Climate Research Program
OD	Oxygène dissous
OGSL	Observatoire global du Saint-Laurent
ONC	Ocean Network Canada (<i>Réseau canadien des océans</i>)
OMM	Organisation météorologique mondiale
OOB	Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer
OSRI	Oil Spill Recovery Institute
PCCSM	Programme canadien de contrôle de la salubrité des mollusques
PMZA	Programme de monitoring de la zone atlantique
PNSA	Programme national de surveillance aérienne (<i>NASP : National Aerial Surveillance Program</i>)
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
RADAR	Radio Detection and Ranging (<i>détection et télémétrie radio</i>)
RDDC	Recherche et développement pour la défense Canada
ROCCH	Réseau d'Observation de la Contamination CHimique du littoral
ROMM	Réseau d'observation des mammifères marins

ROV	Remotely Operated Vehicles (<i>véhicules télécommandés</i>)
RQM	Réseau Québec maritime
SAR	Synthetic Aperture Radar (<i>RSO : radar à synthèse d'ouverture</i>)
SIOOC	Système intégré d'observation des océans du Canada (<i>CIOOS : Canadian Integrated Ocean Observing System</i>)
SLAR	Side-Looking Airborne Radar (<i>radar aéroporté à visée latérale</i>)
SNPD	Substances nocives et potentiellement dangereuses (<i>HNS : Hazardous and Noxious Substances</i>)
SOT	Ship Observations Team (<i>équipe d'observation des navires</i>)
TBT	Tributylétain
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
UQAR	Université du Québec à Rimouski
VENUS	Victoria Experimental Network Under the Sea
VOE	Variables océaniques essentielles
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution
Zones IP	Zones industrialo-portuaires

Glossaire

Acidification :

Réduction du pH de l'océan sur une période prolongée, causée principalement par l'absorption de dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère.

Anoxie :

État dans lequel il n'y a pas ou très peu d'oxygène dissous dans les systèmes marins ou d'eau douce, ce qui a des conséquences dramatiques sur le fonctionnement normal de l'écosystème.

Atmosphère :

Couche d'air qui entoure le globe terrestre. C'est entre autres dans la partie de l'atmosphère terrestre la plus proche du sol que se forment les nuages, la pluie et la neige.

Benthos :

Ensemble des organismes vivant en relation étroite avec les fonds subaquatiques. On distingue le benthos végétal, ou phytobenthos (algues et phanérogames), du benthos animal, ou zoobenthos (vers, mollusques, crustacés, poissons, etc.). Par ailleurs, la faune située en surface (ou épifaune) qui peut être fixée ou libre se différencie de celle qui vit à l'intérieur du sédiment (endofaune).

Bactérie :

Micro-organisme formé d'une seule cellule. Les bactéries présentent des formes très variées. Elles peuvent parasiter l'homme, les animaux et les plantes. On peut également en trouver dans l'eau. Il existe aussi des bactéries utiles et bénéfiques.

Boucle microbienne :

Action des communautés bactériennes planctoniques du milieu marin sur la matière organique. La boucle est un cycle qui permet à des communautés microbiennes de transformer la matière organique particulaire en matière dissoute organique et inorganique.

Changements climatiques :

Changements observés dans les caractéristiques du climat (température, précipitations, vent, etc.) attribuables à des causes d'origine naturelle (variation du soleil, volcans) et humaine (gaz à effet de serre, déboisement, agriculture, urbanisation).

Écosystème :

Ensemble comprenant les organismes et les milieux naturels dans lesquels ils vivent. Dans un écosystème, il y a des organismes vivants, comme des animaux, des végétaux et des bactéries, ainsi que des éléments non vivants. Chacune des unités de l'écosystème est en relation avec les autres unités présentes. Une forêt, un lac ou une rivière sont des exemples d'écosystèmes.

Eutrophisation :

Enrichissement des eaux par des nutriments, se traduisant par une prolifération des végétaux aquatiques ou du phytoplancton. Le phosphore et l'azote sont les principaux nutriments responsables de l'eutrophisation.

Épibenthos :

Qui vit sur le substrat.

Endobenthos :

Qui vit dans le substrat.

Hydrosphère :

Ensemble des eaux océaniques et continentales sous toutes ses phases, soit les cours d'eau, lacs, estuaires, mers et océans (liquides), les gaz aqueux et les glaciers (solides), qui enveloppe le globe terrestre.

Hypoxie :

Condition de faibles concentrations d'oxygène dissous dans les systèmes marins ou d'eau douce, qui a des conséquences négatives sur le fonctionnement normal de l'écosystème, allant d'une perturbation légère à une perturbation grave. (Le pourcentage d'oxygène auquel un milieu sera considéré comme anoxique dépend de la sensibilité des organismes ; sous 20 % pour certains, sous 30 % pour les plus sensibles). L'hypoxie se produit dans les eaux profondes lorsque l'oxygène est consommé plus rapidement qu'il n'est reconstitué par ventilation ou par photosynthèse. La respiration microbienne due à la décomposition de la matière organique dans les eaux profondes et les sédiments peut également contribuer à l'hypoxie.

Micromètre :

Unité de mesure de longueur (symbole μm) du Système international d'unités (SI) valant un millionième de mètre ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

Nanomètre :

Unité de mesure de longueur (symbole nm) du Système international (SI), valant un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Pédosphère :

Couche la plus externe de la Terre, composée de matériaux inorganiques (minéraux) et organiques et soumise à des processus de formation du sol (p. ex. décomposition de matière organique, accumulation de sédiments).

Production primaire :

Production de biomasse (matière organique) à la base de la chaîne ou du réseau trophique. Cette biomasse est générée par les producteurs primaires, c'est-à-dire les plantes, les algues bleu-vert et les bactéries autotrophes, qui utilisent l'énergie lumineuse ou chimique des substances inorganiques par le processus de photosynthèse.

Réseau trophique (ou chaîne alimentaire) :

Succession d'organismes vivants qui se nourrissent les uns des autres selon un ordre déterminé.

AVERTISSEMENT

Le CEGRIM a voulu explorer la démarche de mise en place d'observatoires de milieux marins et côtiers à l'aide d'une synthèse de connaissances relatives à des exemples concrets d'observatoires à travers le monde. Cette synthèse de connaissances **ne se veut pas exhaustive**, mais présente des exemples réussis d'implantation de différents types d'observatoires dans différents environnements, afin de broser un portrait des instruments et des plateformes qui permettent le suivi des milieux côtiers et marins à différentes échelles spatiales et temporelles en fonction d'objectifs variés.

Il est important de noter que les instruments présentés dans cette synthèse ne représentent qu'une sélection des technologies disponibles pour mesurer différents paramètres. Il existe en effet une grande variété de technologies et de capteurs pouvant être utilisés en fonction des besoins spécifiques de chaque observatoire.

Enfin, le domaine de la recherche sur les milieux côtiers et marins est extrêmement dynamique et évolue constamment. Ainsi, de nouveaux instruments, réseaux de recherche, observatoires et programmes voient le jour régulièrement. Les informations présentées dans cette synthèse reflètent, à notre connaissance, l'état de situation observé en avril 2024. Cependant, si vous constatez qu'un observatoire pertinent et unique en son genre a été oublié, que des erreurs se sont glissées dans le document ou que l'information livrée n'est pas à jour, merci de votre indulgence et d'accepter de contacter le CEGRIM afin que l'information puisse être corrigée et intégrée dans une prochaine mise à jour du document.

1. Introduction

1.1. Contexte

Le Québec bénéficie d'une situation géographique enviable puisqu'il est bordé à la fois par le fleuve, l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, la baie James, la baie d'Ungava et le détroit d'Hudson. Cet immense territoire côtier, de près de 24 000 km de côtes, représente un avantage stratégique sur le plan économique puisqu'il est lié aux marchés des États-Unis par les Grand Lacs et au marché international par les océans Atlantique et Arctique. En effet, il permet à la fois l'exploitation commerciale d'espèces pêchées et cultivées au Québec qui peuvent être vendues dans le monde entier, mais aussi le transport maritime de marchandises et de passagers, ainsi que le développement touristique (p. ex. bateaux de croisière et activités nautiques). Le vaste territoire maritime du Québec est également constitué d'écosystèmes riches, diversifiés et fragiles qui doivent être protégés. C'est aussi un lieu de pratiques sociales et culturelles variées. Le gouvernement du Québec doit concilier le développement durable du secteur maritime avec la préservation d'une nature exceptionnelle et la pérennité des usages. Ainsi, le Québec a adopté une vision maritime innovante avec sa Stratégie maritime (2015-2020) puis Avantage Saint-Laurent (2020-2031²) afin de doter le Saint-Laurent d'infrastructures portuaires modernes et compétitives, tout en assurant une navigation efficace, respectueuse des écosystèmes et préservant la qualité de vie des citoyens.

C'est dans le cadre de sa Stratégie maritime que le gouvernement du Québec a créé le Centre d'expertise en gestion des risques d'incidents maritimes (CEGRIM) en 2017, afin d'améliorer la gestion du risque de déversement de matières dangereuses sur le territoire maritime du Québec. Le CEGRIM agit à titre d'expert-conseil pour le gouvernement du Québec, les autorités municipales et l'industrie des pêches et de l'aquaculture commerciales dans le domaine de la prévention, de la préparation, de l'intervention et du rétablissement en situation d'incident maritime, particulièrement en cas de pollution.

Sous la gouverne du ministère de la Sécurité publique (MSP), le CEGRIM regroupe des représentants de cinq autres ministères provinciaux, soit le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH), le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE) et le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD).

Le CEGRIM vise à développer une gestion intégrée des risques d'incidents maritimes pour les communautés riveraines et côtières, l'industrie et les partenaires gouvernementaux concernés au Québec. Pour y parvenir, le CEGRIM s'emploie à réaliser ce qui suit :

- Acquérir les connaissances nécessaires à une gestion des risques d'incidents maritimes en fonction des particularités locales.
- Améliorer l'état de préparation des communautés, de l'industrie des pêches et de l'aquaculture commerciales à une situation d'urgence maritime liée à un déversement de matières dangereuses.
- Implanter les meilleures pratiques selon les approches et les principes de sécurité civile propres au Québec, et en complémentarité avec les initiatives du gouvernement fédéral.

² https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/avantage-st-laurent/Pages/avantage-st-laurent.aspx

- Assurer une veille technologique pour repérer les meilleures pratiques d'intervention en cas de déversement de matières dangereuses, les incidents maritimes et les retours d'expériences.
- Favoriser la concertation des divers intervenants concernés par la gestion des risques d'incidents maritimes au Québec.

Saviez-vous que?

Selon le Règlement sur le Bureau de la sécurité des transports du Canada (<https://www.tsb.gc.ca/fra/lois-acts/evenements-occurrences.html>), un incident maritime signifie un événement résultant directement de l'opération d'un navire, autre qu'une embarcation de plaisance, dans lequel :

- a. une personne passe par-dessus bord;
- b. un membre d'équipage dont les fonctions sont directement liées à l'opération sécuritaire du navire subit une incapacité physique qui le rend inapte à exercer ses fonctions et compromettant la sécurité des personnes, des biens ou de l'environnement;
- c. le navire :
 - i. est impliqué dans un risque de collision,
 - ii. talonne le fond de façon imprévue mais sans s'échouer,
 - iii. est ancré, échoué ou à l'échouage afin d'éviter un accident,
 - iv. accroche une conduite ou un câble d'utilité publique, ou un pipeline sous-marin,
 - v. fait l'objet d'une défaillance totale :
 - a. de ses appareils d'aide à la navigation, lorsque la défaillance compromet la sécurité des personnes, des biens ou de l'environnement,
 - b. de sa machine principale ou de ses auxiliaires,
 - c. de sa propulsion mécanique, du gouvernail ou des machineries du pont, lorsque la défaillance compromet la sécurité des personnes, des biens ou de l'environnement;
- d. toute ou une partie de la cargaison du navire se déplace ou passe par-dessus bord; ou
- e. il se produit un dégagement accidentel, à bord du navire ou à partir de celui-ci, qui entraîne l'un ou l'autre des événements énumérés au paragraphe 8.4(2) du Règlement sur le transport des marchandises dangereuses.

Le Québec concilie des écosystèmes exceptionnels avec un réseau portuaire de calibre mondial. Ainsi, selon la nouvelle vision maritime du Québec (*Avantage Saint-Laurent*, 2022), 12 zones industrialo-portuaires (zones IP) devraient se développer tout au long du système Saint-Laurent d'ici 2035. L'objectif de ces zones est de favoriser la réalisation de projets d'investissement manufacturier afin de créer des emplois et d'augmenter la valeur des exportations québécoises, et ce, dans une perspective de développement durable. Ces zones supporteront potentiellement un trafic maritime plus élevé qu'actuellement et de nombreuses activités industrielles connexes, ce qui pourrait avoir des incidences sur l'environnement et accroître le risque d'incidents maritimes.

Dans ce contexte et dans le cadre de ses mandats, le CEGRIM collabore notamment avec l'Institut nordique de recherche en environnement et en santé au travail (INREST, 2018) à la conceptualisation d'un observatoire environnemental de base (OEB) adaptable aux différentes régions et aux différents contextes socio-écologiques du territoire maritime québécois. Ce projet vise à définir le cadre opérationnel d'un OEB et à produire un guide d'implantation de façon à munir les zones IP d'outils de gestion basés sur la recherche scientifique pour protéger l'environnement en cas d'incidents. L'OEB permettra un suivi spatio-temporel de l'environnement et la détection précoce de contaminants potentiels afin de réduire leurs impacts³.

³ <https://inrest.ca/publications/>

1.2. Concept d'observatoire

Bien que la conceptualisation d'un OEB soit en cours au Québec, le concept d'observatoire océanographique n'est pas nouveau. Ces systèmes d'observation, qui visent à suivre l'état de santé des milieux côtiers et marins de plus en plus confrontés à des changements environnementaux, ont progressivement été mis en œuvre dans le monde à partir de 1882 (date de la création du Laboratoire Arago, renommé Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer [OOB] en 1985). Les observatoires sont essentiels pour l'étude et la surveillance des environnements côtiers et marins, car ils fournissent des données qui permettent de comprendre et de modéliser les phénomènes océaniques afin de soutenir la planification et la gestion des activités liées à la mer et au littoral. De nos jours, les organisations internationales et les gouvernements reconnaissent la pertinence et la nécessité des données océanographiques pour orienter et appuyer leurs décisions de façon à protéger l'intégrité des écosystèmes, tout en favorisant un développement économique responsable et une utilisation durable des ressources. D'importants budgets sont consacrés à ces observations afin de suivre plusieurs thématiques de portée locale et/ou mondiale comme l'accroissement des effets cumulatifs de la navigation ou l'évolution des changements climatiques et leurs répercussions sur les océans et les communautés côtières. Ces financements majeurs ont encouragé le développement d'initiatives à différentes échelles spatiales et temporelles. Ainsi tant des observatoires locaux, régionaux que mondiaux ont vu le jour, permettant de recueillir des données spécifiques de manière ponctuelle ou à une fréquence régulière à long terme, selon le cas.

Le terme « observatoire », bien qu'il soit d'usage courant en recherche astronomique, a été appliqué pour la première fois au secteur marin en 1921 (Okada, 1921). Il n'existe pas de définition unique du terme « observatoire côtier et marin » puisque cette infrastructure ne correspond pas à un concept unique clair, mais plutôt à un emplacement (côte, fond marin, etc.), à une fonction (opérationnelle, intégrée), à un mode de transmission de données, à des objectifs, à des thématiques prédominantes, à une échelle d'observation, etc. Néanmoins, il est communément admis qu'il s'agit d'installations instrumentées conçues pour l'acquisition et l'analyse de données environnementales.

Les observatoires, généralement en service pendant plusieurs années, permettent de décrire et de comprendre les tendances évolutives des phénomènes touchant les ressources aquatiques et marines et d'évaluer l'ampleur des changements, leur dynamique et leur portée spatiale grâce à des suivis (observations) réguliers. S'appuyant sur une instrumentation de plus en plus sophistiquée, ils recueillent des données de qualité sur les conditions environnementales, les populations animales et végétales, les interactions entre les différents organismes, la pollution, etc.

Les objectifs des observatoires sont naturellement en adéquation avec les grands enjeux actuels que sont, par exemple, les changements climatiques, les modifications de la productivité et de la biodiversité des écosystèmes et les différentes formes de pollution. Les sujets d'étude des observatoires sont donc très diversifiés et comprennent les grands phénomènes océanographiques, tels que l'hypoxie, l'anoxie, l'eutrophisation et l'acidification des océans, la qualité des eaux et les contaminations anthropiques. Ainsi, l'observation de ces milieux permet de recueillir des données pertinentes et cruciales pour conjuguer l'accroissement des activités anthropiques avec les objectifs de protection et de développement durable. De plus, l'acquisition de longues séries temporelles de données de terrain permet la production de modèles utiles pour prédire l'évolution de l'état des écosystèmes. L'acquisition de données peut avoir d'autres applications. Par exemple, lors d'un déversement d'hydrocarbures, la communication de données pertinentes aux

Intervenants responsables de la récupération du polluant permet de prédire la propagation de la nappe de polluant et d'éclairer la prise de décision opérationnelle. Les informations recueillies dans les observatoires sont donc précieuses pour l'avancement des connaissances fondamentales, mais également pour soutenir les gouvernements et les parties prenantes lors de la prise de décision. Les observatoires intègrent les besoins des partenaires et des utilisateurs dans leurs objectifs, ils facilitent et encouragent la collaboration entre les scientifiques et les autres acteurs et ils favorisent l'acquisition de connaissances, toutes essentielles pour soutenir les politiques gouvernementales.

Les activités d'observation des milieux côtiers et marins sont menées par un large éventail d'acteurs, qu'il s'agisse d'institutions (agences, ministères, instituts de recherche, laboratoires, organismes à but non lucratif, etc.) ou de programmes, et sont gérées d'une multitude de façons. Malgré l'hétérogénéité des acteurs, la gouvernance des observatoires comporte plusieurs aspects communs dont les suivants :

1. Rôles et responsabilités : Définition claire des responsabilités et des rôles des différentes parties prenantes dans la gouvernance. Cela peut inclure l'identification des acteurs clés et la désignation des responsabilités en matière de collecte, de traitement, de gestion et de diffusion des données. En établissant ces responsabilités, il devient plus facile de gérer les opérations quotidiennes et d'assurer la qualité et l'intégrité des données.
2. Politiques et réglementations : Élaboration et application de politiques et de réglementations appropriées pour soutenir les observatoires et garantir l'utilisation responsable des données et des ressources. Cela peut inclure des politiques sur la collecte et le partage des données, la protection de la confidentialité, l'accès équitable aux données, la gestion des risques, etc. La mise en place d'un tel cadre opérationnel permet d'établir des normes éthiques et opérationnelles solides.
3. Financement et soutien : Recherche et mobilisation de ressources financières et techniques pour soutenir la mise en place et le fonctionnement de l'observatoire. Cette démarche peut inclure la recherche de financements gouvernementaux, la mobilisation de partenariats public-privé, la recherche de subventions et la création de mécanismes durables pour assurer le financement continu.
4. Collaboration et coordination : Mise en place de mécanismes de collaboration et de coordination entre les différentes organisations, institutions et parties prenantes engagées dans la mise en place et l'exploitation des observatoires. Cette responsabilité peut inclure la coordination des efforts de recherche et de surveillance, des protocoles d'échange de données pour faciliter le partage et l'utilisation de celles-ci, des réseaux de communication pour favoriser la collaboration et l'échange d'expertise, etc. La collaboration et la coordination permettent de tirer parti des compétences et des ressources de chaque organisation, d'éviter les duplications d'efforts et de maximiser les effets positifs des observatoires.

La conception de l'observatoire variera en fonction de ses objectifs spécifiques et des conditions locales. Néanmoins, les étapes généralement suivies sont les suivantes :

1. Définition des objectifs : Il s'agit de la raison d'être de l'observatoire, de son but premier. L'intention peut être, par exemple, d'assurer un suivi des conditions environnementales, de surveiller des écosystèmes côtiers et marins particuliers, ou encore de détecter des polluants.
2. Localisation : L'emplacement de l'observatoire est choisi en fonction des objectifs de l'observatoire. De nombreux facteurs doivent être pris en compte à cette étape, tels que la profondeur de la colonne

d'eau, la distance de la côte, l'accessibilité et la faisabilité logistique, la sensibilité environnementale, les courants marins, les stress environnementaux et les conditions météorologiques.

3. Sélection des paramètres à suivre : Selon les objectifs de l'observatoire, les paramètres à étudier seront identifiés ainsi que leur fréquence de mesure ou d'échantillonnage. La section [Paramètres mesurés](#) de cette synthèse présente les principaux paramètres mesurés par les observatoires.
4. Sélection des instruments : Les instruments doivent être choisis et pensés en fonction des paramètres à suivre ou à surveiller, des objectifs de l'observatoire, de son emplacement et des conditions environnementales locales. La section [Instruments](#) de cette synthèse détaille les instruments généralement utilisés dans les observatoires.
5. Choix des plateformes : Une ou des plateformes doivent être sélectionnées afin d'accueillir les instruments précédemment retenus et de résister aux conditions côtières et marines. Les plateformes peuvent inclure des navires océanographiques, des submersibles, des plateformes aéroportées, etc. Les différents types de plateformes sont détaillés dans la section [Plateformes et technologies utilisées](#) de cette synthèse.
6. Mise sur pied du système de communication : Le système de communication doit pouvoir transmettre les données collectées par les instruments vers les centres de données à terre. Cela peut inclure des directives sur la manière de rapporter les données et de partager les résultats (plateformes de partage de données, systèmes de gestion des données, etc.). Ce faisant, les infrastructures et les technologies doivent être adaptées aux besoins spécifiques.
7. Mise en place et entretien de l'observatoire : L'observatoire doit être installé, maintenu et entretenu en fonction des conditions environnementales locales et selon des normes de sécurité. Des inspections régulières doivent être effectuées, les instruments doivent être calibrés pour assurer des mesures précises et nettoyés pour maintenir leur performance optimale. Il est donc essentiel de former le personnel responsable selon les protocoles de maintenance et être en mesure de résoudre d'éventuels problèmes techniques.
8. Analyse des données : Les données collectées doivent être analysées pour répondre aux objectifs de l'observatoire et pour fournir des informations utiles aux utilisateurs. L'analyse peut inclure des techniques telles que l'extraction de caractéristiques, la modélisation, l'apprentissage automatique et la visualisation des données. Ces techniques aident à déceler les tendances, les anomalies et les relations entre les différents paramètres océanographiques.
9. Diffusion des résultats : Il est attendu que les analyses de données soient diffusées aux différents utilisateurs en fonction des objectifs de l'observatoire. Ces résultats peuvent être rendus accessibles au public par l'intermédiaire de bases de données et faire l'objet de rapports, de revues, d'articles scientifiques, ainsi que servir à des programmes de sensibilisation et d'éducation. Ils doivent être utilisés pour l'avancement des connaissances ou pour la prise de décision.
10. Archivage des données : L'archivage de données est une partie essentielle du processus, car il permet de conserver les données collectées à long terme, de les rendre accessibles pour des analyses ultérieures, de vérifier les résultats et de faciliter la reproductibilité des études.

1.3. Objectif et utilisation de cette synthèse

Un grand nombre d'observatoires sont déployés et en service dans le monde entier, et des avancées technologiques dans des domaines connexes ouvrent constamment la voie à de nouveaux systèmes et

réseaux d'observation. Il n'est pas étonnant que l'intérêt croissant de la recherche scientifique pour l'observation des environnements côtiers et marins dans les deux dernières décennies ait conduit à la publication de dizaines de milliers d'articles sur le sujet.

Cette synthèse des connaissances vise à mettre en lumière la place du Québec et du Canada dans ces réseaux d'observation. Elle présentera plusieurs initiatives concluantes et permettra de définir les besoins et les perspectives qui pourraient inspirer l'installation de nouveaux types d'observatoires, par exemple des OEB. Ce document contribue à remplir l'un des mandats du CEGRIM, soit l'amélioration de l'état de préparation du Québec face aux incidents maritimes, en décrivant les bonnes pratiques et les lacunes dans ce domaine et en permettant de mieux comprendre les écosystèmes côtiers et marins.

Portée :

Cette synthèse est destinée aux acteurs – professionnels, chercheurs, universitaires, etc. – qui s'intéressent aux systèmes d'observation côtiers et marins. Elle contient des informations détaillées sur les paramètres suivis, les instruments de mesure et les plateformes utilisées, ainsi que sur les meilleures pratiques en matière de collecte, d'analyse et de gestion des données, pour une compréhension approfondie du domaine.

Les exemples d'observatoires qui s'y trouvent permettent de se familiariser avec les approches et les défis auxquels les gestionnaires d'observatoires sont confrontés. Ils illustrent aussi la diversité des questions de recherche et des approches adoptées dans le domaine. Il est recommandé d'étudier les caractéristiques de chacun de ces observatoires pour en savoir plus sur leurs réalisations. Cette synthèse présente enfin divers types de partenariats et les ressources supplémentaires nécessaires à la mise en place et à la gestion d'un observatoire, comme celles assurant leur entretien et la gestion des données.

Mise en garde :

Les informations fournies dans le présent document ne remplacent en aucun cas les conseils de professionnels, que ce soit pour déterminer les paramètres ou choisir les instruments. Il est en effet judicieux de communiquer avec les équipementiers afin de sélectionner les instruments qui conviennent le mieux aux besoins définis pour chaque projet.

Ce document n'est pas non plus un guide d'implantation d'observatoire. Il est donc impératif que chaque professionnel mène une réflexion avertie quant aux objectifs de son projet, à la portée spatiale et temporelle souhaitée pour celui-ci ainsi qu'aux suivis environnementaux requis afin de sélectionner les paramètres pertinents à suivre et les équipements et plateformes nécessaires aux observations visées. En effet, il souligne l'importance d'adapter la fréquence et l'emplacement des observations aux échelles spatio-temporelles des phénomènes étudiés. Les paramètres qui y figurent varient selon que l'objectif de l'observatoire est l'étude de changements rapides dans l'environnement (p. ex. structure des communautés phytoplanctonique) ou l'étude de changements à long terme (p. ex. structure des communautés benthiques). Les instruments et plateformes présentés dans la synthèse pourront guider la réflexion sur les équipements nécessaires à l'installation de l'observatoire en tenant compte de facteurs tels que l'environnement étudié (estuaire, milieu côtier, haute mer), les conditions environnementales (profondeurs, glace, etc.), les conditions particulières (p. ex. rejets industriels), ainsi que la portée (locale, régionale, nationale, internationale) et la durée du projet (p. ex. mois, année, pérenne).

La réflexion sur la mise en place d'un observatoire peut faire l'objet d'ateliers de réflexion réunissant des scientifiques et les futures parties prenantes du projet afin de discuter des objectifs et des besoins du futur observatoire. Dans cette optique, l'utilisation de cette synthèse associée à un système de clés dichotomiques pourrait être une approche intéressante pour soutenir la réflexion des participants quant aux options possibles selon les objectifs visés.

1.4. Méthodologie

La collecte d'informations pertinentes sur les observatoires (contexte de création de l'observatoire, objectifs et thématiques traitées, informations sur les données recueillies, méthodes et techniques, et moyens de diffusion) a été réalisée à partir de différentes sources, telles que des sites Internet, des bases de données, ainsi que des rapports et articles scientifiques. La recherche des références a été réalisée au moyen des moteurs de recherche : Bibliothèque de l'Université Laval (Sofia), Web of Science, Érudit, ResearchGate, IEEE Xplore et Google Scholar.

Des études et des thèses doctorales portant sur les paramètres mesurés, les instruments et les plateformes utilisés ont également été consultées afin d'enrichir les connaissances sur le sujet et de soutenir les principales conclusions de cette synthèse.

Les informations extraites de chaque source de données ont été analysées et synthétisées de manière descriptive en utilisant une approche narrative. Cela a permis de présenter de manière structurée l'étendue de collecte, la diversité et la complexité des observatoires, offrant une vue d'ensemble sur les différents types d'observatoires et leur évolution. Les résultats ont été interprétés en les situant dans le contexte plus large de l'observatoire. Cette étape a permis de contextualiser les résultats de recherche en prenant en considération des événements, des politiques, des innovations technologiques et des avancées scientifiques spécifiques. L'utilisation de cette approche a permis de présenter une histoire cohérente des changements et des progrès réalisés dans le domaine tout en mettant en évidence les avancées les plus significatives, les défis à relever et les tendances émergentes. Enfin, une synthèse des informations a été réalisée pour mettre en évidence les points saillants de l'étude, y compris la place du Québec et du Canada dans le système mondial d'observations océanographiques et l'évolution de ces observations dans le temps.

1.5. Définition d'observatoire

Dans le cadre de cette synthèse des connaissances, le terme « observatoire » inclut toute structure qui prend en charge la collecte, l'organisation, l'archivage, l'analyse et/ou la publication de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques, et qui dispose de données fiables et répétées régulièrement. Cette synthèse met l'accent sur les paramètres aquatiques et ne prend pas en compte les observations spécifiques relatives à l'érosion côtière, à la pêche, à l'aquaculture, ainsi qu'aux suivis des espèces à statut précaire ou espèces envahissantes. Elle ne prend pas en compte non plus les paramètres de l'air qui sont parfois mesurés dans le cadre des observatoires côtiers et marins.

Face à la multiplication des observatoires, il ne s'agit pas d'effectuer une méta-analyse de ces structures, mais plutôt d'illustrer, à partir de quelques exemples contrastés, la diversité des fonctions et des outils qui permettent de répondre aux besoins énoncés par les différents acteurs œuvrant dans l'acquisition de connaissances sur les milieux côtiers et marins.

1.6. Contenu

Cette synthèse aborde différents aspects des observatoires des milieux marins et côtiers. Tout d'abord, la section *Paramètres mesurés* présente la liste, la description et la pertinence des paramètres mesurés par les différents observatoires retenus. Ensuite, la section *Instruments* s'attarde sur les instruments déjà commercialisés et largement utilisés pour le suivi de ces paramètres, en raison de leur robustesse, de leur facilité d'usage et de leur précision. La section *Plateformes et technologies utilisées* est consacrée aux plateformes où sont fixés les instruments, en décrivant les forces et faiblesses de chacune et en expliquant leur pertinence en fonction des objectifs visés. La section *Observatoires, réseaux et programmes* fournit une description des 27 observatoires, réseaux et programmes retenus (essentiellement basés en France, aux États-Unis et au Canada *Figure 2* en appuyant sur le contexte de leur création, leur vocation, leur utilité et les retombées de leurs activités. Ces éléments sont abordés de manière chronologique afin de mieux comprendre l'évolution des contraintes et des besoins auxquels les observatoires ont dû répondre au fil du temps. En complément, la section *Centres de données* présente quatre centres de données, leur vocation et leur utilité. Puis, en relation avec les mandats du CEGRIM, la section *Organisations prenant part à la lutte contre les déversements d'hydrocarbures* aborde spécifiquement les instruments qui permettent de détecter les hydrocarbures, ainsi que les organisations qui étudient leur comportement dans les milieux aquatiques et leurs impacts. Tout au long de cette synthèse, des initiatives et observatoires mis en place au Québec et au Canada sont aussi présentés afin que leurs particularités puissent être mises en perspective. La section *Conclusion* permet de discuter de la place du Québec et du Canada au sein du système d'observatoires de milieux marins et côtiers à travers le monde. Enfin, la section *Perspectives* permet de se tourner vers l'avenir en présentant de nouvelles préoccupations, mais aussi les avancées technologiques et scientifiques en voie d'y répondre en indiquant les futures initiatives dans ce domaine.

Tout au long du document, les symboles présentés au *Tableau 1* ci-dessous sont utilisés pour distinguer rapidement et visuellement le type d'observatoire, les programmes, les centres de données et les organisations prenant part à la lutte contre les déversements d'hydrocarbures.

Tableau 1 : Présentation des symboles utilisés dans le texte et les tableaux de cette synthèse

Symbole	Structure
	Observatoire marin ou côtier
	Observatoire international
	Observatoire de veille environnementale
	Observatoire câblé
	Réseau d'observations
	Observatoire communautaire
	Programme
	Centre de données
	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures

2. Paramètres mesurés

Les observatoires mesurent de nombreux paramètres afin de mieux comprendre la santé, la dynamique et l'évolution de la zone étudiée. Ils permettent d'effectuer des diagnostics sur l'état général de l'environnement, de mesurer les impacts des facteurs de stress environnementaux et des contaminants et de prédire les changements qui concernent à la fois des propriétés physiques, biogéochimiques et biologiques. En fonction de l'objectif d'implantation d'un observatoire et des thématiques étudiées dans ce dernier, le choix et la fréquence des paramètres mesurés peuvent différer. Par ailleurs, certains paramètres sont mesurés in situ alors que d'autres requièrent des analyses en laboratoire. Il convient également de noter que les paramètres peuvent s'influencer mutuellement puisque beaucoup sont liés entre eux par des relations de cause à effet. Les paramètres présentés dans cette synthèse ne couvrent que l'environnement aquatique, excluant de ce fait l'environnement atmosphérique. En effet, bien qu'ils ne soient pas présentés dans ce document, les paramètres atmosphériques tels que les données météorologiques (vitesse et direction du vent de surface, température de l'air, pression atmosphérique, humidité relative, rayonnement solaire et précipitations) peuvent interagir avec les processus océanographiques et influencer la dynamique, la circulation et les conditions environnementales de l'océan. Ils peuvent également jouer un rôle dans la dispersion, la dilution et la transformation des polluants déversés lors d'un incident maritime. Ces données atmosphériques sont souvent recueillies parallèlement à d'autres données au moyen d'autres instruments/observatoires spécialisés et ne seront, de ce fait, pas décrites en détail dans cette synthèse.

Les principaux paramètres étudiés dans les observatoires de cette synthèse ainsi que la pertinence de leur suivi sont décrits ci-après. Le [Tableau 2](#) présente les paramètres mesurés dans chacun des observatoires présentés dans cette synthèse.

Tableau 2 : Présentation des paramètres mesurés dans chacun des observatoires, réseaux et programmes présentés dans la synthèse

		Température	Salinité	Densité	Courants	Flux thermique	Épaisseur/surface de glace	État de la mer	Niveau d'eau	Couleur de l'océan	Turbidité	Irradiance /PAR	Nutriments	Oxygène dissous (OD)	Dioxyde de carbone (CO2)	Carbone organique dissous (COD)	pH	Matières en suspension (MES)	Abondance bactérienne	Chlorophylle a (Chl a)	Taxonomie et/ou abondance planctonique	Taxonomie et/ou abondance benthique	Hydrocarbures	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Métaux lourds et métalloïdes	Pollution sonore
1		OOB	x	x									x	x			x	x	x	x	x					
2		IMEV	x	x	x						x	x	x	x			x	x		x	x					
3		WHOI	x	x		x			x	x	x	x		x	x					x	x					x
4		IOB	x	x		x					x	x	x				x		x	x	x					
5		ROCCH																						x		x
6		IML	x	x	x	x	x		x	x			x	x			x			x	x			x		
7		GOOS	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x					x
8		PMZA	x	x	x	x	x		x	x			x	x			x			x	x			x		
9		ARGO	x	x	x				x			x	x	x			x			x						
10		GO-SHIP	x	x									x	x		x	x			x						x
11		Bonne Bay	x	x		x						x	x	x	x					x	x	x				x
12		MAREL Carnot	x	x					x		x	x	x	x						x						
13		SmartBay	x								x			x	x					x						x
14		VENUS et NEPTUNE (ONC)	x		x	x					x			x	x		x			x	x	x				x
15		REBENT																								x
16		MEOP	x									x														
17		MOOSE	x	x		x							x	x	x	x			x	x	x					x
18		Baie de Sept-Îles	x	x							x	x	x	x			x		x		x	x	x	x	x	x
19		Cambridge Bay (ONC)	x	x	x		x				x	x		x						x						
20		Prince Rupert (ONC)	x	x	x	x		x			x	x		x						x						x
21		Kitamaat Village (ONC)	x	x	x						x	x		x						x						
22		Campbell River (ONC)	x	x	x	x					x	x		x						x						x
23		Gascoyne Inlet (ONC)	x	x																	x					
24		Burrard Inlet (ONC)	x	x										x						x						x
25		China Creek (ONC)	x	x										x						x						
26		Hartley Bay (ONC)	x	x										x						x						
27		Holyrood Bay (ONC)	x	x																x						x

Note : Le numéro dans le cercle orange renvoie au numéro de l'observatoire, réseau ou programme dans le texte. Le symbole renvoie au type de structure présentée au tableau 1.

2.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques sont fréquemment utilisés pour contextualiser les variations des composantes biogéochimiques et biologiques. Ils sont donc essentiels à tout observatoire. Toutes les mesures physiques permettent de suivre l'évolution du climat, et la plupart permettent d'étudier la circulation des masses d'eau à différentes échelles.

Température : La température est un paramètre de base qui est mesuré dans la plupart des observatoires. Il s'agit d'une mesure rapide et facile à prendre qui apporte de nombreuses informations. Les mesures de température permettent par exemple de repérer et de suivre les masses d'eau, d'obtenir des informations sur les courants, d'expliquer les aires de répartition des espèces ou les efflorescences planctoniques. La température reflète aussi les modifications du climat et est donc une variable clé des études sur le réchauffement climatique.

Conductivité : La conductivité est également un paramètre largement mesuré dans les observatoires, du fait de la rapidité et de la facilité de la mesure. Il s'agit de la mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle varie en fonction de la nature et de la quantité d'ions en solution. Cette mesure est la base de la plupart des calculs de salinité et de solides dissous totaux. Elle permet de discriminer les masses d'eau selon leur composition chimique ou la présence d'une pollution, par exemple.

Salinité : Au même titre que la température et la conductivité, la salinité est un des paramètres de base mesurés dans la plupart des observatoires. Elle est généralement calculée à partir des données de conductivité. Elle désigne la quantité de sels dissous dans l'eau. Cette mesure permet elle aussi de repérer et de suivre les masses d'eau puisque la salinité joue un rôle déterminant dans la masse volumique de l'eau et donc dans les gradients de pression horizontaux qui forcent les courants marins (p. ex. circulation estuarienne). Elle joue, comme la température, un rôle majeur dans la compréhension de la circulation océanique. Cette mesure participe aussi de la compréhension des aires de répartition des espèces. Elle reflète les modifications du climat et est donc une variable clé des études portant sur l'intrusion des eaux salées dans les nappes phréatiques ou sur les apports d'eau douce accrus en raison de la fonte des glaciers, par exemple.

Pression relative : La pression relative est mesurée dans les observatoires qui étudient la colonne d'eau. La pression est une mesure de la force appliquée sur une unité de surface. La pression de l'eau augmente de 1 bar tous les 10 mètres et permet donc de calculer la profondeur. Il s'agit d'un paramètre fondamental pour l'étude de la dynamique des océans, qui joue un rôle clé dans la régulation du climat.

Densité : La densité est la quantité de masse par unité de volume. Elle est dépendante de la température, de la salinité, ainsi que de la pression. Elle permet conséquemment de repérer les masses d'eau et d'étudier la circulation océanique et ses changements.

Courant : Un courant est un déplacement horizontal ou vertical de l'eau produit par l'effet combiné du vent, de la force de Coriolis et des différences de densité. Les courants sont aussi structurés par la géomorphologie des bassins dans lesquels ils s'écoulent, soit les contours des continents et les reliefs sous-marins. Ils sont influencés en outre par l'interaction entre eux, générant des fronts. Qu'ils soient de nature permanente ou saisonnière, les courants sont observables sur de grandes distances, comme le courant de Gaspé sur la rive sud du Saint-Laurent ou encore les couches profondes qui remontent le Saint-Laurent du détroit de Cabot à

la tête du chenal Laurentien. Les mesures de courant sont composées de deux paramètres, soit la direction et la vitesse. Les courants jouent un rôle important dans la régulation du climat. Ils influencent grandement les patrons de dispersion de particules ou d'organismes et facilitent les trajectoires migratoires de certains organismes.

Flux thermique : Le flux thermique est le taux d'échange de chaleur, par unité de surface, à l'interface de deux masses d'eau ou, dans le cas du flux thermique de surface, de la masse d'eau et de l'atmosphère. Le flux thermique est étudié dans les observatoires océaniques qui couvrent de grandes échelles spatiales. Il n'est pas mesuré directement, mais calculé soit comme un flux associé à un courant, soit comme un flux turbulent si des mesures de turbulence ou de gradient thermique à micro-échelle sont disponibles. La variabilité de ce flux est en partie liée à la variabilité à grande échelle des régimes climatiques. Il est donc un indicateur des changements survenus dans le système climatique.

Épaisseur et superficie de glace : L'épaisseur et la superficie de la glace sont des paramètres de base étudiés dans les observatoires des zones nordiques. Ces mesures, enregistrées sur une longue période, permettent de mieux comprendre l'ampleur des changements climatiques et leurs conséquences sur les écosystèmes océaniques. La couverture de glace joue un rôle important dans la régulation du climat régional, mais aussi mondial. Elle agit sur les flux thermiques entre l'atmosphère et les mers et océans, incluant le Saint-Laurent. Elle influe grandement sur l'écologie marine en limitant la quantité de lumière qui permet la vie dans les océans, mais elle constitue aussi un habitat pour une flore et une faune particulières. La diminution du couvert de glace observée dans les dernières décennies peut aussi modifier le transport maritime et l'économie mondiale avec l'ouverture de nouveaux corridors de navigation, comme le passage du Nord-Ouest en Arctique. Dans les eaux navigables du Canada, le Service canadien des glaces⁴ d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) est l'autorité responsable de l'information sur les glaces et les icebergs.

État de la mer : L'état de la mer est un paramètre mesuré dans plusieurs observatoires océaniques bien qu'il s'applique également dans les grands lacs fluviaux du Saint-Laurent. L'état de la mer est la description statistique des propriétés des vagues causées par le vent, y compris leur hauteur, leur fréquence et leur direction (Arduin et coll., 2019 ; Gadjagbou, 2013). Deux échelles permettent d'effectuer cette caractérisation, soit l'**échelle de Douglas** pour la hauteur des vagues et l'**échelle de Beaufort** pour la vitesse moyenne du vent. Il est nécessaire de connaître ces propriétés calculées à partir des informations sur l'état de la mer, notamment pour assurer la sécurité de la navigation en zone côtière. C'est également une variable climatique importante pour l'étude des flux air-mer de quantité de mouvement et de chaleur. Il s'agit enfin d'un paramètre clé dans les prévisions météorologiques et les modèles climatiques.

⁴ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/a-propos-service-glaces.html>

Échelle de Douglas

Inventée par le météorologue et hydrographe Sir Percy Douglas, cette échelle indique la **hauteur de la houle**.

Source : Ifremer

Force	Descriptif officiel	Hauteur des vagues en mètres
0	Calme	0
1	Ridée	0 à 0,1
2	Belle	0,1 à 0,5
3	Peu agitée	0,5 à 1,25
4	Agitée	1,25 à 2,5
5	Forte	2,5 à 4
6	Très forte	4 à 6
7	Grosse	6 à 9
8	Très grosse	9 à 14
9	Énorme	14 et plus

Échelle de Beaufort

Inventée en 1805 par l'amiral britannique Francis Beaufort, cette échelle indique la **vitesse moyenne du vent** sur une durée de dix minutes. Elle est utilisée internationalement en mer et sur terre depuis 1946.

Source : Ifremer

Degré Beaufort	Descriptif officiel	Vitesse moyenne en nœuds	Vitesse moyenne en km/h
0	Calme	<1	<1
1	Très légère brise	1 à 3	1 à 5
2	Légère brise	4 à 6	6 à 11
3	Petite brise	7 à 10	12 à 19
4	Jolie brise	11 à 16	20 à 28
5	Bonne brise	17 à 21	29 à 38
6	Vent frais	22 à 27	39 à 49
7	Grand frais	28 à 33	50 à 61
8	Coup de vent	34 à 40	62 à 74
9	Fort coup de vent	41 à 47	75 à 88
10	Tempête	48 à 55	89 à 102
11	Violente tempête	56 à 63	103 à 117
12	Ouragan	64 et plus	118 et plus

Niveau d'eau : Le niveau d'eau est la hauteur moyenne de la surface d'un plan d'eau par rapport à la mesure de référence. Pour la mer, ce niveau de référence correspond à la ligne médiane entre la marée haute et la marée basse moyennes, hors influence des vagues. L'élévation du niveau de la mer est une préoccupation internationale depuis quelques années. Il s'agit d'un important paramètre dans le suivi des changements climatiques compte tenu que la première cause de l'élévation du niveau de la mer est la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique (voir encadré ci-dessous). La mesure du niveau d'eau est également importante pour le suivi des crues printanières et de l'étiage estival. Des enjeux de sécurité civile y sont rattachés, en ce qui concerne notamment les possibilités d'inondation. Il existe d'autres référentiels altimétriques en fonction des besoins (CGVD28⁵, CGVQ2013, repère local, etc.). Si une altitude (niveau d'eau) est présentée, il est impératif de préciser à partir de quel référentiel altimétrique elle est calculée. Par exemple, Service hydrographique Canada utilise la basse mer inférieure, la grande marée ou la marée normale la plus basse comme niveau de référence pour couvrir les eaux tidales. Dans les eaux non tidales, c'est le niveau des basses eaux qui est utilisé.

Changements climatiques et niveau d'eau

Le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** a récemment publié *Climate Change 2023*, un rapport synthèse basé notamment sur le rapport spécial L'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique, qui traite des impacts de l'élévation du niveau des océans.

Sources : <https://www.ipcc.srocc/> et <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Couleur de l'océan : La couleur de l'océan est une mesure optique du spectre lumineux rétrodiffusé par la surface de l'eau. Elle dépend donc des particules comprises dans l'eau de mer ainsi que des particules dissoutes. La couleur de l'océan est un indicateur de l'activité biologique de l'eau, paramètre généralement utilisé par les observatoires qui pratiquent la télédétection sur une grande superficie. La couleur de l'océan intervient notamment dans le suivi des populations phytoplanctoniques et l'étude des changements climatiques.

Turbidité : La turbidité est un paramètre de base rapide et facile à mesurer qui est suivi dans la plupart des observatoires. En tant qu'indicateur de la clarté et de la couleur de l'eau, la turbidité est une caractéristique optique de l'eau qui correspond à sa capacité de diffuser ou d'absorber la lumière incidente. La turbidité est fonction des matières en suspension ou dissoutes telles que le carbone organique dissous (DOC), les bactéries et le phytoplancton.

Rayonnement photosynthétique actif (*photosynthetically active radiation*, PAR) : Le PAR est la lumière visible (longueur d'onde entre 400 nm et 700 nm) utilisée par les végétaux pour la photosynthèse. Le PAR

⁵ Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28) et de 2013 (CGVD2013) : [https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/nrcan/files/files/pdf/Height_reference_system_modernization_\(FR\).pdf](https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/nrcan/files/files/pdf/Height_reference_system_modernization_(FR).pdf)

est généralement mesuré dans les cinq premiers mètres sous la surface de l'eau afin de mesurer la lumière disponible pour la photosynthèse. La mesure du PAR aide à mieux comprendre les mécanismes de la photosynthèse, des efflorescence algales et de l'eutrophisation.

2.2. Paramètres biogéochimiques

La biogéochimie est l'étude des cycles des éléments chimiques, de leurs interactions avec les êtres vivants et de leurs transformations dans l'espace et le temps. Elle porte notamment sur la transformation et les flux des molécules chimiques et des nutriments, tels que le cycle du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, du phosphore et du soufre, qui composent plus de 90 % de la matière vivante. La biogéochimie permet de mieux comprendre les flux des composés inorganiques ou organiques chez les organismes vivants (biosphère) et leur milieu physique (hydrosphère, atmosphère, lithosphère, cryosphère, pédosphère). Par exemple, les études biogéochimiques permettent de déterminer les conséquences de la disponibilité de la matière inorganique telle que les nutriments (p. ex. nitrate, phosphate, silicate) sur les producteurs primaires (p. ex. phytoplancton). En outre, la variabilité des concentrations de ces composés peut servir d'indicateur des changements climatiques et environnementaux, tels que l'eutrophisation et l'acidification.

Nutriments : Ce paramètre correspond à la concentration de certains éléments nutritifs tels que le nitrate, l'ammonium, le phosphate et les silicates, qui sont essentiels à la vie aquatique et qui supportent le réseau trophique. Le suivi des nutriments représente un bon indicateur de la qualité des eaux puisqu'il permet de surveiller l'enrichissement du milieu et le processus d'eutrophisation qui peut en découler. L'eutrophisation peut entraîner des proliférations d'espèces végétales nuisibles qui ont le potentiel d'affecter la biodiversité marine et la sécurité des ressources aquatiques consommées dans le cas d'une prolifération d'algues toxiques. Le suivi de l'évolution des apports en nutriments, de leurs sources ainsi que du devenir des nutriments dans le milieu marin est essentiel à la détermination des mesures à prendre pour réduire les apports d'origine anthropique et atténuer les impacts. La majorité des nutriments nécessitent des analyses en laboratoire, car leur concentration ne peut être mesurée précisément in situ.

Oxygène dissous (OD) : Ce paramètre correspond à la concentration de molécules d'oxygène (O_2) libres, non associées. Les mesures d'OD sont un indicateur clé de la qualité des eaux puisqu'elles sont utilisées pour surveiller les effets de l'hypoxie sur le métabolisme aérobie (croissance, reproduction, survie) d'espèces vulnérables et commerciales, mais aussi ses effets à l'échelle de l'écosystème (perte ou compression d'habitat, altération du réseau trophique, changement dans les patrons de distribution et de migration, changement dans la biodiversité etc.). La saturation en oxygène dissous est influencée principalement par la température de l'eau et par l'activité biologique. L'OD permet un diagnostic direct des conditions d'hypoxie ou d'anoxie, telles que celles observées dans la couche de fond de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (voir encadré ci-dessous). Ainsi, les mesures d'OD permettent de mieux comprendre les phénomènes d'eutrophisation, les efflorescences planctoniques et, à plus grande échelle, les changements climatiques.

Zones mortes

Lorsque la concentration d'OD est très faible, voire nulle, en raison des activités anthropiques, on parle alors de **zone morte**, et le milieu devient incompatible avec la vie pour de nombreux organismes marins (Diaz, 2016).

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, depuis 70 ans, la concentration d'oxygène a diminué de moitié dans les eaux sous 250 m de profondeur, et certaines zones présentent des niveaux d'oxygène aussi bas que 15 %.

On estime qu'environ les deux tiers de la diminution d'OD seraient associés à l'apport d'eaux chaudes et pauvres en OD de l'Atlantique et le tiers associé à la respiration (reminéralisation de la matière organique qui, elle, aurait augmenté à cause de l'augmentation de l'activité bactérienne à de plus hautes températures) (Gilbert et coll., 2005).

Dioxyde de carbone (CO₂) : Le CO₂ est le gaz à effet de serre le plus fréquemment mesuré par les observatoires océaniques. Les mesures des concentrations de CO₂, gazeux ou dissous, servent à établir les flux de ce gaz à différentes interfaces telles que : eau-atmosphère, eau-glace-atmosphère ou terre-atmosphère. Le CO₂ contribue également à l'acidification des océans puisque ses émissions atmosphériques sont en partie absorbées par les océans, où le CO₂ interagit avec les molécules d'eau pour former de l'acide carbonique, ce qui engendre une diminution du pH et une modification de la chimie et de la capacité tampon des océans (voir encadré ci-dessous). Plusieurs initiatives et articles de lois nationaux et internationaux utilisent cette mesure pour proposer des actions visant à réduire l'effet des activités anthropiques sur le climat (p. ex. *Plan pour une économie verte 2030 : politique-cadre d'électrification et de lutte contre les changements climatiques*⁶).

Carbone organique dissous (COD) : La mesure du COD correspond à une concentration de carbone, produit par des organismes vivants, qui se retrouve sous forme dissoute dans l'eau. Le COD nourrit la boucle microbienne, qui alimente à son tour le réseau trophique aquatique. Puisque les activités biologiques requièrent une consommation d'oxygène, parfois limitée, le COD permet indirectement de mieux comprendre les processus d'hypoxie ou d'anoxie de certaines zones comme la couche de fond de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Le COD influe ainsi directement et indirectement sur les habitats aquatiques, en particulier dans les régions côtières, où les apports terrigènes de tous types sont plus importants. Le terme « obscurcissement côtier » (*coastal darkening*) est apparu récemment (Dupont et Aksnes, 2013; McGovern et coll., 2019) et désigne notamment l'eutrophisation des eaux qui induit une prolifération de microalgues bloquant la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau.

pH : Le pH reflète la concentration d'ions hydrogène (H⁺) de l'eau. Le suivi du pH des eaux en association avec d'autres types de mesures (p. ex. alcalinité totale, carbone inorganique dissous, pression partielle du CO₂) permet de détecter les tendances à l'acidification des eaux (voir encadré ci-dessous). L'acidification représente un risque pour la biosphère puisque le métabolisme, la croissance et la reproduction de plusieurs organismes sont sensibles à de petites variations du pH. Au-delà de la diminution du pH, le processus

⁶ <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-economie-verte-2030.pdf>

d'acidification est accompagné d'une diminution de la disponibilité des carbonates. Ces derniers sont essentiels aux organismes qui sécrètent des coquilles, des squelettes ou des structures en carbonate de calcium (CaCO₃) tels que les coraux, mollusques, échinodermes, crustacés, foraminifères et coccolithophores.

Acidification des océans

L'acidification des océans est le terme utilisé pour décrire les changements de la chimie de la mer. Elle est principalement causée par l'absorption du CO₂ provenant de l'atmosphère. Quand le CO₂ est absorbé par l'eau de mer, une série de réactions chimiques se produisent, entraînant une augmentation des ions d'hydrogène et une diminution du pH de l'océan. L'acidification nuit aux organismes marins, notamment en réduisant la disponibilité des ions carbonatés qui sont essentiels à la formation des coquilles et des squelettes.

Pour plus d'information : <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/oceanography-oceanographie/accasp-psaccma/chemistry-chimie/index-fra.html>

Matières en suspension (MES) : Cette mesure nécessite également des analyses en laboratoire. Les MES sont des particules solides organiques et inorganiques de petite taille qui peuvent se maintenir un certain temps en suspension dans l'eau. Elles ont un effet sur la turbidité (opacité) et la coloration des eaux et peuvent servir d'indicateur de la qualité de celles-ci. Une concentration importante de MES peut avoir des effets négatifs sur les propriétés de l'eau et les organismes qui y vivent, tels que la limitation de la pénétration de la lumière utilisée par les végétaux ou l'obstruction des branchies de poissons. Une concentration importante de MES peut également indiquer une forte accumulation de biomasse (efflorescence) planctonique ou une décharge de sédiments importante lors de travaux de dragage par exemple.

2.3. Paramètres biologiques

La biologie est la science du vivant, depuis la cellule microscopique jusqu'aux écosystèmes. Ainsi, les paramètres biologiques contribuent à la caractérisation des écosystèmes, mais également à l'évaluation de leur état de santé à partir de diagnostics fondés sur l'observation du vivant. Les paramètres biologiques détaillés ci-dessous sont étudiés dans plusieurs observatoires et contribuent à divers sujets d'étude, tels que l'effet des changements climatiques et l'écologie des milieux aquatiques.

Communautés bactériennes : Bien que peu d'observatoires en fassent le suivi, c'est un paramètre qui peut être un indicateur de la qualité de l'eau. Les bactéries présentes dans les milieux marins et d'eau douce sont extrêmement diversifiées. Certaines peuvent être utilisées comme indicateurs de pollution microbiologique, notamment par la présence de bactéries pathogènes ou indicatrices de contamination fécale dans des échantillons. Par ailleurs, le dénombrement des bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies facultatives (BHAA) peut donner une appréciation globale de la salubrité générale d'une eau, sans toutefois préciser les sources de contamination. L'analyse de la structure de la communauté bactérienne par extraction d'ADN et d'ARN peut, de son côté, permettre de comprendre la biodiversité des bactéries, leur rôle dans les cycles biogéochimiques et leur réponse aux changements environnementaux tels que la pollution, le réchauffement climatique et l'acidification des océans. En mesurant la diversité et l'abondance bactériennes de même que

l'activité métabolique, il est possible d'évaluer la santé des écosystèmes et de prédire les effets des perturbations environnementales.

Chlorophylle a (Chl a) : La concentration en Chl a est largement suivie dans les observatoires, car sa mesure est rapide et facile à réaliser. La Chl a est un pigment photosynthétique et un indicateur de la biomasse de phytoplancton dans les milieux aquatiques. La mesure de sa concentration est essentielle au suivi de la production des populations phytoplanctoniques (c.-à-d. production primaire) et elle contribue à l'évaluation du niveau d'eutrophisation et de la qualité de l'eau.

Taxonomie et abondance du plancton : Cette mesure est coûteuse et requiert des analyses en laboratoire ainsi qu'une forte expertise en identification des espèces planctoniques. Le plancton vit en suspension dans la colonne d'eau et se divise en phytoplancton (végétal) et zooplancton (animal). Les organismes planctoniques constituent la base du réseau trophique aquatique et sont très sensibles aux variations des paramètres physiques et chimiques. Les suivis de la structure des communautés planctoniques ont pour objectif de mettre en évidence des changements temporels à diverses échelles de temps : variations ponctuelles, saisonnières, interannuelles et même décennales (voir encadré ci-dessous). Les communautés planctoniques ont un cycle de vie court et elles réagissent donc rapidement (de quelques heures à quelques jours) aux changements environnementaux. Les indicateurs basés sur le plancton permettent de suivre l'évolution de différentes masses d'eau (p. ex. boréalisation de l'océan Arctique) et l'état de santé d'un environnement. L'étude du plancton permet de mieux comprendre les effets des changements climatiques, de l'eutrophisation, ou encore de l'acidification des océans.

Le national centers for coastal ocean science (NCCOS)

En 2004 aux États-Unis, le NCCOS a développé un système de prévision des efflorescences algales potentiellement toxiques. Ce système, en soutien aux opérations de la NOAA, permet d'alerter les gestionnaires des côtes d'un risque potentiel avant l'événement et afin de limiter les dommages. Les autorités peuvent ainsi anticiper des décisions relatives à la fermeture de plages des zones coquillères mais aussi adapter le traitement des eaux. Ainsi trois zones géographiques sont suivies par NCCOS (golfe du Mexique et la Floride, le golfe du Maine, le lac Érié) ainsi que de deux autres zones par des partenaires externes (la Californie et le nord-ouest du Pacifique).

Source : <https://coastalscience.noaa.gov/science-areas/habs/hab-forecasts/>

Efflorescence du phytoplancton toxique

En 2008, le dinoflagellé *Alexandrium tamarense* a provoqué une marée rouge importante dans l'estuaire du Saint-Laurent. Cette microalgue produit des neurotoxines (PST) qui en s'accumulant peuvent conduire jusqu'à la mort des organismes marins qui les consomment. Ainsi, de nombreux poissons, oiseaux et même mammifères marins ont été retrouvés morts à la suite de cet événement.

Pour plus d'information : <https://www.qc.dfo-mpo.gc.ca/infoceans/fr/infocean/maree-rouge-de-2008-mortalite-massive-dorganismes-marins-liee-une-floraison-dalgues>

Taxonomie et abondance du benthos : Le benthos représente l'ensemble des organismes aquatiques qui vivent en relation avec le fond des écosystèmes aquatiques. Le benthos peut vivre à proximité du fond, soit directement sur le substrat (épibenthos) ou même dans celui-ci (endobenthos). Le benthos est peu mobile et capte tout ce qui sédimente à travers la colonne d'eau depuis la surface. La structure des communautés benthiques est reconnue pour être un bon indicateur de la santé des écosystèmes aquatiques. Ce paramètre est d'ailleurs essentiel dans le cadre d'évaluations environnementales préalables à l'implantation d'une industrie ou à la suite d'une pollution. Ces suivis contribuent aux mesures de gestion ou de protection des milieux naturels ainsi qu'à des suivis de biodiversité. L'étude du benthos est coûteuse puisqu'elle requiert des analyses d'identification spécialisée en laboratoire.

2.4. Contaminants et facteurs de stress environnementaux

Les milieux marins sont exposés à une grande variété de facteurs de stress potentiels allant des matériaux inertes comme le plastique jusqu'à la pollution organique (les hydrocarbures ou les particules de matières organiques). Ces facteurs, en fonction de leur nature toxique ou de leur concentration, peuvent porter atteinte à la vie marine. Les contaminants mesurés par les observatoires sont donc en général sélectionnés pour leur toxicité et/ou leur rémanence et sont analysés en laboratoire.

Les observatoires qui effectuent les suivis des contaminants et des facteurs de stress sont des observatoires spécialisés qui ont pour missions spécifiques la détection, l'identification et la mesure d'un contaminant ou d'un facteur de stress précis. L'objectif de ces observatoires est de documenter les impacts sur les écosystèmes pour informer le public et les autorités afin que des mesures préventives ou curatives soient mises en place.

Hydrocarbures : Un hydrocarbure est un composé organique constitué exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Les hydrocarbures sont présents à l'état naturel dans l'environnement et constituent la base du pétrole brut, du gaz naturel, du charbon et d'autres sources d'énergie importantes. Cependant, les produits pétroliers comportent aussi du soufre, de l'oxygène, de l'azote et des traces de multiples métaux. Les hydrocarbures représentent un risque de contamination de l'écosystème aquatique, tant lors d'opérations de routine de navigation ou portuaire que lors de déversements accidentels. Les mécanismes toxicologiques déclenchés par les hydrocarbures et leurs effets sur les organismes marins ont largement été étudiés (Abdel-Shafy et Mansour, 2016 ; Honda et Suzuki, 2020).

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : Les HAP font partie des hydrocarbures et comprennent au moins deux cycles aromatiques condensés. Ils sont présents dans tous les environnements et présentent une forte toxicité. Bien que les HAP existent à l'état naturel dans l'océan, leur principale source est anthropique et résulte de la combustion incomplète de la matière organique à haute température (p. ex. carburant automobile, combustion domestique, production industrielle, production d'énergie ou encore incinérateurs).

Métaux lourds et métalloïdes : Les métaux lourds sont des minéraux dont la densité est élevée. Ce sont des composés inorganiques. Les principaux métaux lourds sont le mercure, le cadmium, le plomb, le cuivre, le chrome, l'arsenic, le fer, le nickel, le sélénium et le zinc. Ils sont potentiellement toxiques pour les organismes aquatiques. Les métaux lourds sont préoccupants parce qu'ils participent à un phénomène d'accumulation appelé « bioaccumulation » qui apporte une toxicité chronique ayant parfois des effets irréversibles.

Plastiques : Ce sont des composés inorganiques provenant d'une transformation industrielle. La pollution plastique est donc uniquement d'origine anthropique. L'industrie utilise de plus en plus de granulés plastiques industriels (GPI) comme matière brute afin de produire des objets en plastique. Les déchets de plastique marins sont de plus en plus nombreux et peuvent se fragmenter en microplastiques et nanoplastiques. Ils contaminent alors l'environnement et les organismes des différents niveaux trophiques. Ils représentent une pollution émergente qui fait l'objet de nombreuses études.

Plastique : le 7^e continent

Cette zone, découverte en 1997 par l'américain Charles J. Moore au cœur de l'océan Pacifique (entre Hawaï et la Californie) contient un continent flottant composé de plastiques d'une superficie de près de 1,6 million de km². Au total, plus de 250 espèces marines seraient affectées par cet amas de déchets. Plusieurs projets visent la récupération et le recyclage d'une partie de ces plastiques.

Pollution sonore (de source anthropique) : La pollution sonore est une nuisance sonore provoquée par des activités humaines qui dépasse les seuils d'innocuité vis-à-vis de l'acuité auditive des êtres vivants. Cette pollution est un enjeu pour certaines espèces qui utilisent les ondes acoustiques pour se déplacer, socialiser et localiser leurs proies. Les activités maritimes telles que la navigation et les loisirs nautiques ont fortement élevé les niveaux sonores ambiants dans une grande partie des océans.

Substances nocives et potentiellement dangereuses (SNPD)⁷ : Les SNPD ou HNS (*Hazardous and noxious substances*) comprennent les marchandises et d'autres matières (à l'exception des hydrocarbures) qui, lorsqu'elles sont rejetées dans l'environnement, peuvent être nocives pour la santé humaine et la vie marine. Elles peuvent être inflammables, explosives, toxiques, corrosives ou réactives. Parmi les exemples de SNPD figurent les produits chimiques transportés en vrac par bateau sous forme liquide ou solide ou les marchandises dangereuses transportées dans des porte-conteneurs. L'étude des SNPD est relativement récente et, à notre connaissance, aucun observatoire n'est spécialisé dans leur suivi, bien que plusieurs centres de recherche, tels que le CEDRE et ITOPF, s'y intéressent de plus en plus. Il faut également noter que la très grande diversité des SNPD rend leur étude particulièrement complexe.

Pour conclure la section sur les paramètres, il est important de spécifier qu'en général il convient de présenter les résultats de chaque paramètre mesuré individuellement, en fournissant une analyse de ses caractéristiques et de ses variations dans le temps et l'espace. Ensuite, des corrélations peuvent être faites en décrivant les relations et les tendances qui existent entre les paramètres. Enfin, une interprétation globale des résultats doit être faite en tenant compte de différents facteurs tels que les potentiels effets cumulatifs des polluants et les interactions entre les paramètres, tout en la situant adéquatement dans le contexte plus large des processus océaniques et des changements environnementaux.

⁷ https://tc.canada.ca/sites/default/files/migrated/opp_factsheet_hns_fr_feb_21.pdf

3. Instruments

Des instruments de mesure ont été mis au point pour mener à bien le suivi des paramètres décrits précédemment. Les instruments sont des appareils composés de capteurs qui convertissent les paramètres physiques, chimiques ou biologiques en un signal électrique ultimement transmis à un système d'observation sous forme de données. Il existe généralement deux approches pour mesurer et surveiller les paramètres : les mesures de télédétection et les mesures in situ.

La télédétection désigne l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Elle permet, grâce à différents instruments de mesure embarqués sur des avions ou des satellites, d'enregistrer le rayonnement électromagnétique pour reconstituer les caractéristiques de la surface (terre ou océan) ou de l'atmosphère. La télédétection est principalement utilisée pour étudier la surface de l'océan.

Les observations in situ sont des mesures directes des propriétés de l'environnement effectuées à l'aide d'une combinaison d'instruments. Ces instruments de mesure permettent d'observer la variabilité des paramètres à la surface, mais également à différentes profondeurs de la colonne d'eau et sur le fond marin. Ils doivent être calibrés à partir de solutions de référence (solutions étalons). Les instruments de mesure in situ permettent de collecter des valeurs directes ou indirectes pour les paramètres. Ces valeurs peuvent être corrigées par des échantillons prélevés et mesurés en laboratoire, afin de tenir compte des erreurs de mesure qui peuvent survenir telles que les interférences avec d'autres composants de l'eau de mer ou les problèmes de calibration des instruments. Lors de l'utilisation d'un instrument, il est crucial de prendre en compte le fait que les instruments utilisés peuvent présenter des spécificités techniques propres à chaque fabricant. Il est donc essentiel de suivre attentivement les recommandations d'utilisation fournies par le fabricant pour assurer un déploiement et une utilisation appropriés de ces instruments, garantissant ainsi la qualité et la fiabilité des données collectées.

En fonction des objectifs spécifiques d'un observatoire, les fréquences d'enregistrement ou de prise de mesures sont ajustables. La fréquence d'enregistrement est très variable et peut aller de la milliseconde, jusqu'à l'année selon les cas. Certaines mesures sont également acquises de manière ponctuelle, alors que d'autres sont recueillies en continu. Des exemples d'instruments utilisés par les observatoires côtiers et marins sont présentés à l'[Annexe 1](#).

3.1. Instruments de mesure aux fins de télédétection

Radiomètres : Les radiomètres sont des instruments de mesure passive qui mesurent le rayonnement électromagnétique émis par l'atmosphère et la surface océanique et terrestre dans le spectre lumineux. Les radiomètres sont généralement installés à bord de satellites. Les données obtenues permettent de quantifier des paramètres relatifs aux eaux de surface, présentés préalablement, en particulier la température, les MES, l'évolution de la couverture de glace, la turbidité, la couleur de l'océan, les flux thermiques et la concentration de Chl *a*. En fonction des objectifs, il s'agit d'acquérir des mesures multispectrales (de 3 à 10 bandes) ou hyperspectrales (des centaines de milliers de bandes) qui seront représentées en pixels. Elles peuvent couvrir le spectre de l'ultraviolet (1 nm à 380 nm), du visible (380 nm à 780 nm) et de l'infrarouge (780 nm à 100 µm).

Les mesures ainsi acquises sont d'une grande utilité dans le suivi des courants, des changements climatiques, d'éventuelles pollutions et de la productivité biologique des eaux.

Radiomètres et suivi des océans

Depuis 1996, 95 % de la surface océanique de la Terre est sondée grâce à 3 à 6 radiomètres circulant sur des orbites polaires sous-équatoriales (Bourassa et coll., 2019).

Les lidars et les radars ont le même objectif de télédétection, soit la détection de la présence et l'estimation du volume d'un objet distant, mais ils utilisent des technologies différentes : la lumière pour le lidar et les ondes radio pour le radar.

Lidar (*Light Detection and Ranging*) : Les lidars sont utilisés en général depuis des avions. Ils émettent des impulsions de lumière infrarouge (longueur d'onde de 0,76 μm à 1 000 μm), puis mesurent le temps de retour après la réflexion des ondes sur un objet. Cette technologie de télédétection peut être utilisée pour l'altimétrie laser et la cartographie de contour. Le lidar est notamment utilisé pour effectuer la bathymétrie des fonds marins et pour surveiller les habitats aquatiques.

Radar (*Radio Detection and Ranging*) : Les radars produisent et émettent des ondes radio à partir d'une antenne rotative ou fixe et mesurent la durée du trajet aller-retour et l'angle du signal réfléchi par les objets. La longueur d'onde du radar est comprise entre 3 mm et 30 cm. Les radars permettent de détecter des objets à grande distance à travers le brouillard et les nuages. La résolution standard des radars est moins précise que celle des lidars. Les radars permettent, par exemple, de mesurer le type, la concentration (superficie en m^2) et la distribution de la glace ou encore la dispersion des polluants sur les masses d'eau (voir la section [Instruments de mesure des hydrocarbures](#)).

3.2. Instruments de mesure in situ de paramètres physiques

Sonde de lumière PAR : Cette sonde mesure la densité de photons par unité de surface qui se trouvent dans la gamme spectrale de la lumière visible (400 nm à 700 nm), la partie du spectre lumineux qui est utilisée par les plantes et les organismes photosynthétiques pour produire de l'énergie par le processus de photosynthèse. Ces mesures permettent d'étudier la productivité primaire de l'océan, c'est-à-dire la quantité de matière organique produite par les organismes, et ainsi de mieux comprendre des processus tels que les efflorescences de phytoplancton et l'eutrophisation.

Sonde CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) : Les sondes CTD agrègent des capteurs de conductivité, de température et de profondeur et sont des instruments couramment utilisés en océanographie. Ces instruments faciles d'utilisation sont conçus pour mesurer simultanément plusieurs paramètres en temps réel. Ces sondes sont utiles pour effectuer des profils verticaux de la colonne d'eau, mais peuvent aussi être installées sur des plateformes pour des durées prolongées. Sur les navires de recherche, il est courant d'utiliser des rosettes permettant de supporter plusieurs CTD et d'autres instruments de mesure ou de prélèvement.

Sonde de turbidité (turbidimètre) : Un turbidimètre permet d'envoyer un rayon lumineux à travers un échantillon d'eau et de mesurer la quantité de lumière qui passe à travers l'eau par rapport à la quantité de lumière qui est réfléchiée par les particules en suspension dans l'eau. La turbidité est donc une mesure indirecte des MES.

Courantomètre : Les courantomètres sont des instruments qui mesurent des phénomènes tels que la vitesse et la direction des courants dans la colonne d'eau, la hauteur des vagues, le spectre directionnel de la houle et les fluctuations d'énergie turbulente dans la colonne d'eau. Le traitement des signaux rétrodiffusés permet, par effet Doppler, de calculer les composantes du courant dans la colonne d'eau. Les courantomètres permettent notamment un suivi de l'état de la mer.

Marégraphe : Les marégraphes sont des appareils très utilisés en hydrographie. Généralement situés près des côtes, ils détectent les changements de la hauteur des eaux côtières par rapport au niveau zéro. Ces observatoires de marée sont importants pour la navigation (p. ex. niveau de marée basse), mais aussi pour étudier les variations des niveaux moyens des mers (niveau d'eau).

3.3. Instruments de mesure in situ de propriétés biogéochimiques

La plupart des paramètres biogéochimiques sont mesurés en laboratoire à la suite de prélèvements d'eau in situ (p. ex. le COD, les nutriments et les MES). Cependant, le pH, le CO₂ et l'OD présentés dans cette synthèse peuvent être mesurés directement in situ.

pH-mètre : Le pH-mètre est un capteur qui mesure la différence de potentiel électrochimique entre une membrane de verre sensible aux ions hydronium (H₃O⁺) et la concentration de ces derniers dans le milieu. Plus cette concentration est forte, plus le pH est faible et plus la solution est acide. Inversement, plus le pH est élevé, plus la solution est basique.

Sonde de CO₂ dissous : La sonde de CO₂ dissous est constituée d'une membrane spécifiquement perméable aux gaz. Une fois le capteur immergé, les pressions partielles de CO₂ s'égalisent entre le milieu et la sonde, et un capteur infrarouge mesure la pression partielle. Une formule tenant compte de la pression partielle mesurée et de la température permet de calculer la concentration de CO₂.

Sonde d'OD : La sonde d'OD est constituée de deux électrodes métalliques plongées dans une solution électrolytique contenue dans une membrane imperméable à l'eau, mais perméable aux gaz dissous. Le courant mesuré entre les deux électrodes est proportionnel à la concentration en oxygène dissous.

3.4. Instruments de mesure in situ de propriétés biologiques

Les prélèvements in situ doivent être suivis d'analyses en laboratoire pour mesurer les paramètres biologiques qui permettent d'identifier et de dénombrer les espèces.

Fluorimètre : Les fluorimètres sont des instruments de mesure optique et d'analyse des propriétés de fluorescence de composés chimiques. Ils excitent les molécules en les exposant à des longueurs d'onde spécifiques puis mesurent l'intensité lumineuse réémise par ces molécules à différentes longueurs d'onde. Les fluorimètres permettent de mesurer les concentrations de divers paramètres et variables tels que les bactéries, la Chl *a*, la matière organique dissoute fluorescente (FDOM) en milieu côtier et les HAP en cas d'incident maritime.

Caméra vidéo : En océanographie, la caméra est de plus en plus utilisée puisqu'elle est devenue plus performante, plus robuste et moins coûteuse qu'auparavant. La caméra vidéo permet d'obtenir des images aussi bien à la surface qu'en profondeur et dans des conditions environnementales variées (glace, turbidité, etc.). Les caméras fixes et en mouvement, accessibles à distance grâce aux câbles sous-marins ou aux véhicules sous-marins autonomes, sont maintenant utilisées dans un large éventail d'applications, y compris pour assurer des suivis spatio-temporels de la vie marine (phytoplancton, zooplancton et benthos), examiner les fonds marins et surveiller les niveaux de turbidité.

3.5. Instruments de prélèvement in situ

Il est parfois pertinent de prélever des échantillons pour effectuer des analyses plus poussées en laboratoire et/ou pour corriger les biais des valeurs des instruments de mesure in situ. Des équipements de prélèvement d'eau, d'organismes et de sédiments sont utilisés à cette fin.

Bouteille de prélèvement d'eau : Les bouteilles de prélèvement d'eau sont des dispositifs utilisés pour prélever de l'eau à une profondeur donnée. Les bouteilles Niskin, nommées d'après leur inventeur, sont des bouteilles de prélèvement opaques largement utilisées, car elles limitent la dégradation des pigments. Il existe également différents modèles conçus pour répondre à des besoins spécifiques. Par exemple, certaines bouteilles sont équipées de fermetures rotatives pour limiter les chocs de pression, tandis que d'autres sont transparentes pour limiter la fuite des organismes qui pourraient détecter la bouteille. Sur les petites embarcations ou depuis un quai, la bouteille de prélèvement, ouverte aux deux extrémités, est descendue à la profondeur souhaitée à l'aide d'un câble. Un poids, appelé messenger, est alors attaché à une extrémité du câble puis libéré afin qu'il coulisse jusqu'à la bouteille. Lorsqu'il frappe la bouteille, un mécanisme provoque la fermeture de celle-ci. Sur les plus gros navires, un système de rosette supportant plusieurs bouteilles de prélèvement d'eau peut être utilisé. Dans ce cas, la fermeture des bouteilles est automatisée à distance, au moyen d'un logiciel informatique, garantissant une précision accrue. L'eau ainsi échantillonnée peut être utilisée pour différentes analyses (COD, oxygène dissous, nutriments, Chl a, phytoplancton, MES, métaux lourds, plastiques, hydrocarbures, HAP, salinité, etc.).

Filet à plancton : Le filet à plancton est un équipement qui permet d'échantillonner les organismes planctoniques en les piégeant dans un filet. Le filet est mis à l'eau puis traîné horizontalement sur une distance donnée ou verticalement du fond vers la surface. L'eau s'échappe par les mailles du filet alors que les organismes plus grands que la taille des mailles du filet restent piégés à l'intérieur. Un contenant fixé à l'extrémité du filet, le godet, permet de récolter l'échantillon. La maille du filet utilisée est ciblée selon la taille des organismes visés (phytoplancton ou zooplancton) ou la pollution étudiée (plastiques).

Benne à sédiments : La benne est un compartiment de métal qui est ouvert lors de sa descente dans la colonne d'eau et qui se referme lorsqu'il entre en contact avec le fond marin. Il existe différents modèles de benne à sédiments selon les objectifs d'échantillonnage ou les types de substrat (vase, fond sableux, fond compact, etc.), mais le principe reste le même. La benne à sédiments permet de prélever les sédiments de la surface ainsi que les organismes y vivant. Ces échantillons servent notamment à l'analyse de la composition sédimentaire (granulométrie), des contaminants (métaux lourds, plastiques, hydrocarbures, HAP, etc.) et des communautés benthiques vivant en surface (épibenthos) et dans les sédiments (endobenthos).

Chalut épibenthique : Le chalut épibenthique est un filet raclant le fond marin et récoltant la faune benthique située à la surface des sédiments. L'épibenthos comprend des poissons démersaux, des invertébrés, des macroalgues et des plantes. Les mailles de ces filets sont généralement plus grandes (>2 cm) que celles du filet à plancton pour cibler les organismes benthiques qui sont généralement de plus grande taille et limiter la récolte de sédiments de surface.

3.6. Instruments de mesure des hydrocarbures

Les déversements d'hydrocarbures peuvent avoir de graves conséquences environnementales et socioéconomiques. La surveillance visant à éviter ou à limiter l'ampleur des incidents maritimes est une partie essentielle de la planification des mesures d'urgence. Il s'agit donc d'une application cruciale de l'opérationnalisation de l'océanographie.

Dans cette section, une approche par instrument spécifique sera adoptée. Ainsi, certains instruments présentés mettent en application des procédés et technologies de mesure décrits dans les sections précédentes qui font appel à des algorithmes de calcul convertissant la mesure directe aux fins d'identification et/ou de quantification du polluant visé.

Capteurs optiques : Les techniques de télédétection optique recueillent des informations dans différentes gammes spectrales (visible, ultraviolet et infrarouge) et peuvent fournir des informations utiles sur la pollution par les hydrocarbures.

Visible (400 nm à 700 nm) : Les techniques optiques, qui utilisent la même gamme de détection du spectre visible (appareils photo et vidéo), sont les moyens de télédétection les plus courants. Les hydrocarbures se manifestent généralement dans l'ensemble du spectre visible. Les reflets sont argentés et reflètent la lumière dans une large gamme spectrale, jusqu'au bleu. Toutefois, l'utilisation des techniques visibles dans la télédétection des déversements d'hydrocarbures est limitée à la documentation d'une marée noire, car elle ne permet pas d'interpréter les résultats de manière précise. De plus, elle peut induire des interférences ou de fausses alarmes. La brume, les reflets du soleil et le vent peuvent notamment avoir une incidence sur la visibilité ou être confondus avec des nappes d'hydrocarbures. C'est pourquoi des codes d'apparence existent pour standardiser la description visuelle des déversements d'hydrocarbures. Au Canada, le code TAR (*Thickness Appearance Relationship Code*), élaboré par la GCC et ECCO (*Annexe 2*) et inspiré du code d'apparence de l'Accord de Bonn (BAOAC, *Bonn Agreement Oil Appearance Code*)⁸, utilisé dans de nombreux pays, remplit cette fonction en fournissant des directives sur la manière de caractériser l'apparence des hydrocarbures en fonction de la couleur, de la brillance, de l'opacité, de la texture et de la consistance de la nappe. Les observateurs qualifiés possèdent donc la capacité de reconnaître et de décrire les nombreuses caractéristiques d'un hydrocarbure à la surface de l'eau ou échoué sur le littoral. En utilisant des prises de vues photographiques et vidéo, l'observateur peut enregistrer des données précises sur l'emplacement, la nature et l'apparence de l'hydrocarbure. Ces informations visuelles fournissent des éléments essentiels pour évaluer la situation et prendre les mesures de gestion appropriées.

Ultraviolet (UV, 100 nm à 400 nm) : Les capteurs ultraviolets peuvent être utilisés pour localiser les nappes d'hydrocarbures, car celles-ci présentent une forte réflectivité du rayonnement UV, même en couches très

⁸ <https://odnature.naturalsciences.be/mumm/fr/national/ba-oil-appearance-ode#:~:text=Le%20code%20d'apparence%20de,de%20l'Accord%20de%20Bonn>

minces (<1 µm). En revanche, ces instruments ne distinguent pas les différences d'épaisseur et ne peuvent pas être utilisés pendant la nuit. De plus, l'effet des conditions météorologiques telles que la pluie, le brouillard et les nuages doit être limité pour que la détection soit efficace. Il existe toutefois des algorithmes qui peuvent réduire les interférences. Les capteurs sont généralement de petite taille et peuvent être facilement montés sur les avions, ce qui facilite l'utilisation opérationnelle de ces instruments. De plus, leur coût moindre peut jouer un rôle important dans leur utilisation pour la surveillance des déversements d'hydrocarbures.

Infrarouge (IR, 700 nm à 2 000 nm) : La technologie infrarouge permet de détecter les hydrocarbures, car pour une nappe d'épaisseur supérieure à environ 10 µm, une partie du rayonnement solaire absorbé est réémise sous forme d'énergie thermique (*brightness temperature*). Ainsi, durant le jour, une nappe épaisse semble chaude, une nappe d'épaisseur intermédiaire apparaît froide et une nappe fine a une apparence brillante ou est simplement invisible. Une fois la nuit tombée, le phénomène s'inverse (Fingas et Brown, 1995, 2018; Lu et coll., 2016). La télédétection infrarouge est donc principalement utilisée pour déterminer l'épaisseur relative des nappes d'hydrocarbures.

Capteurs à micro-ondes : Dispositifs qui détectent le rayonnement dans la région micro-ondes (de 3 mm à 30 cm⁹) du spectre électromagnétique.

Les radiomètres et radars ont déjà été présentés plus haut à la section [Instruments de mesure aux fins de télédétection](#) traitant de la mesure des propriétés physiques et optiques de l'eau et de la glace. Leurs caractéristiques en font aussi d'excellents instruments de détection spécifique des hydrocarbures.

Radiomètres à micro-ondes (MWR) : Les radiomètres à micro-ondes détectent la présence de nappes d'hydrocarbures sur l'eau à partir d'une épaisseur de 100 µm en mesurant la réflexion (énergie électromagnétique) de la surface excitée par le rayonnement spatial. L'intérêt des micro-ondes est de permettre la mesure de l'épaisseur absolue de la nappe d'hydrocarbures donc de pouvoir rapidement en estimer le volume. Cependant, de nombreux pays (comme la France) ont abandonné leur utilisation en raison des difficultés de calibration.

Radar : Deux principaux types d'imagerie radar sont utilisés pour la détection et la surveillance des hydrocarbures, à savoir le radar à ouverture synthétique (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) et le radar aéroporté à visée latérale (*Side-Looking Airborne Radar*, SLAR). Le SAR (par satellite) et le SLAR (aéroporté) émettent/reçoivent des ondes radio rétrodiffusées. Les nappes d'hydrocarbures flottant à la surface de la mer sont détectables au-delà de 3 à 5 µm, car elles amortissent les courtes ondes de surface responsables de la rétrodiffusion radar. Les nappes apparaissent ainsi comme des zones sombres. Les capteurs SAR offrent une bonne couverture et ne sont pas limités par la couverture nuageuse ou les conditions météorologiques, ils sont donc idéaux pour la recherche de pollution sur de vastes surfaces. Cependant, les zones sombres peuvent être attribuables à d'autres phénomènes (appelés sosies), tels que des phénomènes océanographiques, p. ex. ombre des vagues, efflorescence de phytoplancton, ou météorologiques, p. ex. zone sans vent ou forte pluie (Carvalho et coll., 2020). Il existe des algorithmes de discrimination fondés sur différents critères pour distinguer les déversements d'hydrocarbures des « sosies ». Toutefois, ceux-ci peuvent parfois donner des résultats insatisfaisants (fausses alarmes). Les radars ne permettent pas non plus de déterminer l'épaisseur des nappes.

⁹ https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/

En outre, bien que différentes méthodes de surveillance existent pour acquérir l'information nécessaire en soutien à une intervention, la diversité des hydrocarbures présents dans les déversements ne permet pas de choisir une seule méthode comme la plus appropriée. Les méthodes optiques de détection par satellite présentent des limites en raison de la résolution et de l'état de la mer. En effet, la méthode utilisée à partir d'images SAR ou SLAR peut induire des confusions avec des sosies (signatures radar semblables à la pollution par les hydrocarbures). En bref, même une couverture satellite complète pourrait ne pas être en mesure de détecter tous les déversements d'hydrocarbures. Dans une mer agitée, les hydrocarbures peuvent se mélanger, se disperser, couler ou encore s'évaporer. Les hydrocarbures restent toutefois dans l'eau même une fois que le déversement n'est plus visible à la surface. En complément des observations aériennes et des images satellitaires, des capteurs peuvent donc être utilisés in situ pour valider les techniques de télédétection (et vice versa). Par exemple, l'utilisation de fluorimètres installés sur une plateforme appropriée pourrait représenter une méthode supplémentaire pour la notification précoce des déversements d'hydrocarbures en mer. De plus, des bouées suivies par satellite pourraient être déployées afin de suivre la dérive du polluant, si les conditions ne permettent pas les survols ou les observations directes (IPIECA, IMO et coll., 2015).

3.7. Instruments de mesure des pollutions sonores

L'augmentation du trafic maritime et de l'utilisation récréative des eaux ont rendu nécessaire l'étude de l'environnement sonore sous-marin et de son impact sur les populations aquatiques.

Hydrophone : Les hydrophones sont des enregistreurs d'ondes acoustiques converties en signal électrique. Les fréquences typiques de l'acoustique marine sont comprises entre 10 Hz et 1 MHz. Les hydrophones sont entre autres utilisés pour étudier les mammifères marins (bioacoustique) et surveiller la circulation des navires.

3.8. Organismes utilisés comme biomoniteurs

Bien qu'il ne s'agisse pas d'instruments, certains organismes permettent de mesurer des paramètres, d'où l'appellation « biomoniteurs ». Par le principe de bioaccumulation, ils peuvent révéler diverses formes de perturbations environnementales. Utilisés comme indicateurs quantitatifs de contamination, ils permettent de suivre l'évolution des substances chimiques issues de rejets principalement anthropiques, mais aussi naturels, dans le milieu marin.

Moules et huîtres

Les suivis mytilicoles et ostréicoles portent sur différents paramètres d'analyse de la chair, dont la bactériologie, les métaux lourds et les formes d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les mollusques jouent en effet un rôle de sentinelles du milieu marin, car ce sont des espèces sédentaires qui ont la capacité d'accumuler les contaminants chimiques dans leurs tissus. Les concentrations en contaminants traduisent l'état chimique chronique du milieu et son évolution temporelle. C'est pourquoi cette technique, développée dès 1986¹⁰ aux États-Unis, a été reprise par les réseaux de surveillance de nombreux pays sous le terme générique de *Mussel Watch* (voir encadré p. 69).

Les mollusques comme sentinelles

Une étude récente (Durier et coll., 2022) met en lumière le rôle des moules bleues (*Mytilus edulis*) en tant que sentinelles pour détecter les toxines du phytoplancton dans l'environnement. Grâce à la technique de **valvométrie**, les changements de comportement des bivalves ont pu être observés et enregistrés. Il a ainsi été démontré qu'elles peuvent servir de détecteurs précoces de la présence de ces toxines avant que les seuils critiques soient atteints.

Espèces piscicoles

Les poissons sont également utilisés pour le suivi des contaminants organiques et des métaux. Puisqu'ils sont motiles, les poissons suivis permettent d'étendre la zone étudiée et de documenter les variations spatiales et temporelles. Les espèces prédatrices et longévives sont idéales pour le suivi biologique des contaminants puisqu'elles accumulent les polluants de l'eau environnante (processus de bioaccumulation) et de leurs proies (processus de bioamplification).

Le choix du biomoniteur dépend des contaminants recherchés et des voies d'absorption de ces contaminants, ces voies étant variables. Une surveillance efficace repose sur une stratégie pensée sur plusieurs fronts qui tient compte à la fois du facteur temporel et du facteur spatial en multipliant les prélèvements dans l'environnement ou sur différents organismes marins.

En somme, la panoplie d'instruments et d'organismes biomoniteurs présentés dans cette section sont les yeux et les oreilles des chercheurs qui étudient les milieux marins. Que ce soit pour surveiller la qualité de l'eau, étudier une population ou détecter une pollution, ils sont de plus en plus utilisés pour sauvegarder l'environnement et anticiper les changements environnementaux. Ainsi, de nouvelles technologies se développent constamment afin de répondre aux besoins de suivi et de combler les lacunes dans la connaissance des océans.

Au Canada, le secteur des hautes technologies est très dynamique, et de nombreuses entreprises développent et commercialisent des instruments en collaboration avec les acteurs de la recherche côtière et marine. Le Canada se démarque particulièrement dans les produits et services d'ingénierie qui peuvent résister à des environnements difficiles (présence de glace, températures extrêmes).

¹⁰ <https://coastalscience.noaa.gov/science-areas/pollution/mussel-watch/>

Les entreprises du secteur ont notamment un large éventail de compétences technologiques dans les domaines des capteurs radar et acoustiques, des systèmes autonomes/intelligents, de la robotique et des nanotechnologies/microsystèmes. Plusieurs centres d'innovation regroupant plusieurs entreprises ont vu le jour à travers le pays ces dernières années comme le Centre for Ocean Ventures and Entrepreneurship (COVE¹¹) en Nouvelle-Écosse, le Centre for Ocean Applied Sustainable Technologies (COAST¹²) en Colombie-Britannique et The Launch¹³ à Terre-Neuve.

Les instruments développés et décrits précédemment doivent généralement être installés sur des plateformes (supports) qui permettent de les déployer dans le milieu à surveiller, de les localiser et de les récupérer au besoin (fin de mission, nettoyage, entretien, chargement de données, etc.). La prochaine section présente un éventail des plateformes couramment utilisées dans les observatoires.

¹¹ <https://coveocean.com>

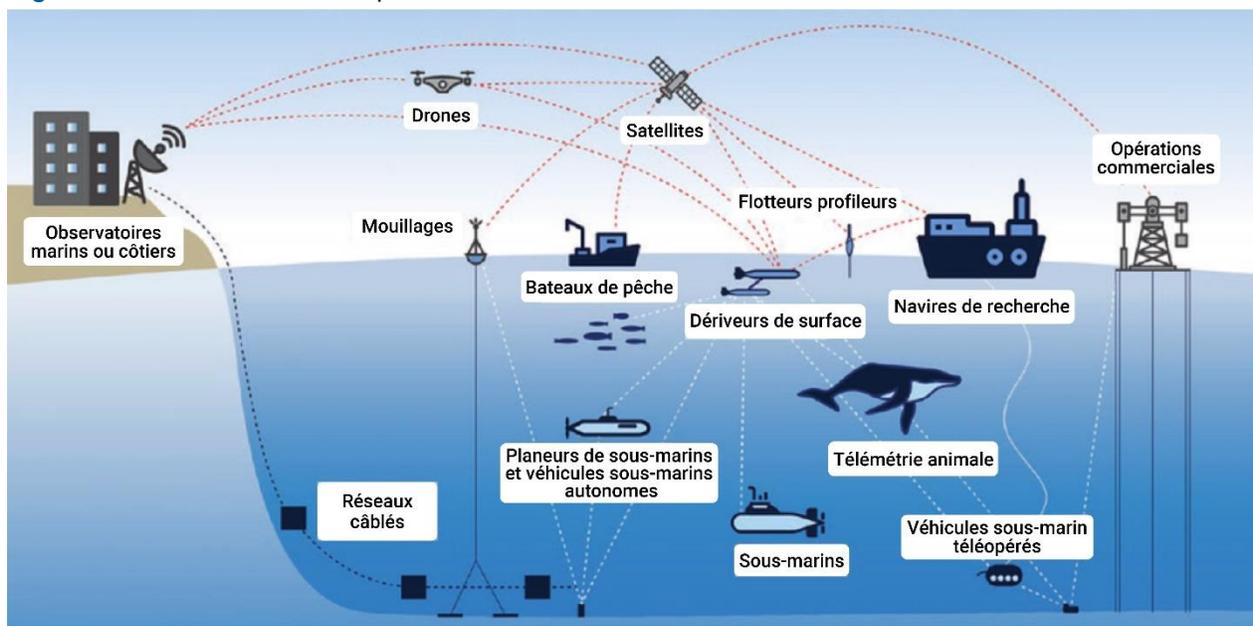
¹² <https://canadacoast.ca>

¹³ <https://thelaunch.mi.mun.ca>

4. Plateformes et technologies utilisées

Les plateformes fournissent une infrastructure pour supporter, transporter et alimenter les instruments, mais également pour stocker et transmettre les données. Chaque plateforme se caractérise par sa capacité d'échantillonnage dans le temps (durée de vie, autonomie, fréquence de transmission des données, etc.) et sa capacité de se déplacer dans l'espace (flottante fixe, à profils verticaux, de navigation autonome/contrôlée, etc.). Il existe un large éventail de plateformes pour observatoires. Elles varient selon les objectifs visés et l'environnement (côtier, hauturier) (Figure 1). Les avancées technologiques permettent d'effectuer des observations à distance, à l'aide de plateformes spatiales ou aéroportées, mais aussi des observations directes, à l'aide de plateformes pour mesures lagrangiennes (qui dérivent avec les courants), de plateformes pour mesures eulériennes (amarrées à un point fixe, stationnaires) et même de plateformes autonomes (dont les déplacements peuvent être contrôlés à distance ou directement sur place, comme les navires). Chacune présente des forces et des faiblesses qui seront détaillées ci-après. Des exemples de plateformes utilisées dans les observatoires côtiers et marins sont présentés à l'Annexe 3.

Figure 1 : Vue d'ensemble des plateformes d'observation des océans.



Adaptée et traduite de Jane Lubchenco, et Peter Haugan (2023).

4.1. Télédétection

Les plateformes de télédétection permettent l'observation de la surface de la Terre et des océans par la prise d'images à partir de satellites, d'avions, d'hélicoptères ou de drones. Les instruments de mesure généralement montés sur ces plateformes sont les radiomètres, les lidars ou les radars tels qu'ils sont présentés à la section *Instruments*.

Invention de la télédétection

L'invention de la télédétection remonte à 1960, lorsque la géographe **Evelyn Lord Pruitt** a introduit le terme anglais *remote sensing*, traduit en français par télédétection. Elle développa cette technique entre 1940 et 1970 au sein du Service géographique de l'armée américaine, en mettant l'accent sur l'étude des environnements côtiers.

Source : Earth observatory, NASA.

Plateformes spatiales (satellites)

Les satellites sont les principales plateformes utilisées en océanographie pour l'acquisition d'images de la surface de l'océan. Ils permettent l'acquisition de données de manière systématique et répétitive, facilitant la détection de changements dans le temps et l'espace. Les instruments installés sur les satellites acquièrent des données optiques à différentes bandes spectrales et à différentes résolutions en fonction des objectifs visés par le satellite. Les principales images satellites utilisées sont celles des satellites Landsat (pixels de 15 ou 30 m), Sentinel (pixels de 10 ou 20 m), RapidEye (pixels de 5 m), Quickbird (pixels de 60 cm) ou Pléiades (pixels de 50 cm). Ces images peuvent parfois engendrer des coûts qu'il convient de considérer dans le cadre d'une utilisation par un observatoire. L'utilisation de ces satellites a permis de révéler de nouveaux phénomènes à petite et à grande échelle qu'il était auparavant impossible d'observer. Les satellites couvrent de très grandes surfaces en peu de temps et permettent ainsi d'obtenir des mesures globales à l'échelle des océans ainsi que des climatologies à haute fréquence. Certains satellites permettent d'observer et d'acquérir en continu des données d'une même région (orbite géostationnaire) comme ceux utilisés pour la communication et l'observation des conditions météorologiques. D'autres satellites parcourent la presque totalité de la surface de la Terre en une période donnée (orbite quasi polaire) et permettent d'observer chaque région du globe, toujours à la même heure locale solaire. Ces satellites permettent ainsi de recueillir des données récurrentes (site Internet du gouvernement du Canada¹⁴).

Au Québec, le laboratoire de télédétection de l'Institut Maurice-Lamontagne (IML¹⁵) utilise trois stations de réception d'images satellitaires (situées à Mont-Joli, à Victoria et à Resolute Bay) qui lui permettent d'acquérir des données en provenance des satellites météorologiques géostationnaires GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA¹⁶) offrant une couverture complète des trois océans entourant le Canada (Pacifique, Arctique et Atlantique).

¹⁴ <https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledection/caracteristiques-dun-satellite-lorbite-et-sa-fauchee/caracteristiques-dun-satellite>

¹⁵ Les équipes de l'Institut Maurice-Lamontagne participent à plusieurs réseaux de surveillance et de recherche nationaux et internationaux de l'Atlantique Nord.

¹⁶ <https://www.noaa.gov/>

Forces :

- Acquisition de données systématique et répétitive pour étudier les changements dans le temps sur de longues périodes.
- Observations sur une portion beaucoup plus large que celle balayée par les capteurs placés à bord d'un avion.
- Imagerie haute résolution (pixels).

Faiblesses :

- Observation de la surface des océans uniquement, les profondeurs restent inaccessibles.
- Problématique en présence d'une couverture de glace.
- Corrections atmosphériques nécessaires.
- Validation des données nécessaires par des observations in situ.
- Moment et lieu d'acquisition de données tributaire de l'orbite et des angles de prise de vues prédéterminés.

Premiers satellites artificiels

Les premiers satellites artificiels ont été le fruit des rêves de pionniers de la science-fiction comme Edward Everett Hale (1869) et Jules Verne (1879), bien avant leur concrétisation avec le lancement du Spoutnik 1 par la Russie en 1957.

Le satellite américain Seasat lancé en 1978 a ensuite marqué une avancée majeure en devenant le premier satellite de télédétection océanographique destiné à l'étude des océans. Sa mission a malheureusement été interrompue après seulement 105 jours en raison d'un court-circuit massif.

Source : NASA <https://www.jpl.nasa.gov/missions/seasat>

Plateformes aéroportées (avions, hélicoptères, drones)

Les plateformes aéroportées permettent également l'acquisition d'images de la surface de la Terre (photographies aériennes, images altimétriques et hyperspectrales des océans). Les avions constituent le plus ancien système de télédétection utilisé pour observer la surface de la Terre. Ils peuvent prendre des images de grandes superficies et transporter différents instruments. Les hélicoptères, quant à eux, peuvent être utilisés pour des projets de moyenne à grande envergure. Ils sont capables d'atteindre des zones inaccessibles aux avions, et leur capacité à contrôler leur vitesse et leur altitude permet de mieux cibler la zone d'étude. Plus récemment, l'émergence des drones a ouvert de nouvelles possibilités puisque leur altitude de vol est inférieure à celle des avions et que leur maniabilité est supérieure. Les drones peuvent couvrir de petites et moyennes superficies, mais sont capables de survoler des zones inaccessibles aux avions et aux hélicoptères.

Au Canada, le Programme national de surveillance aérienne du Canada, PNSA¹⁷ (encadré ci-dessous) exploite quatre avions spécialisés, positionnés stratégiquement en Colombie-Britannique, au Nouveau-Brunswick et en Ontario, soutenus par quatre autres avions privés sous contrat. Ces avions surveillent

¹⁷ <https://tc.canada.ca/fr/programmes/programme-national-surveillance-aerienne>

l'activité maritime et sont en mesure de détecter les rejets d'hydrocarbures, intentionnels ou non, par l'observation humaine et diverses technologies de télédétection et de communication/suivi des navires, notamment au moyen de communications par satellite (INMARSAT), du Système d'identification automatique (*Automatic Identification System*, AIS), d'un radar aéroporté à balayage latéral (SLAR), de scanners infrarouges et ultraviolets et de caméras thermiques et infrarouges. Les aéronefs du PNSA surveillent également les eaux du Canada atlantique, y compris celles du golfe du Saint-Laurent, à la recherche de baleines noires de l'Atlantique Nord. Par ailleurs, en 2018, le Canada a commencé à mettre à l'essai la technologie des drones pour aider à la surveillance et à la protection des baleines, ainsi que pour cartographier et étudier les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique canadien (Transports Canada¹⁸). Depuis 2020, un nouveau drone a également été intégré aux opérations du PNSA, rendant ainsi les efforts de surveillance déployés par les équipes de la sécurité maritime plus robustes et variés.

Depuis 1996, le ministère des Pêches et des Océans (MPO) réalise des relevés hivernaux annuels dans les eaux du golfe du Saint-Laurent à l'aide d'hélicoptères de la GCC. L'objectif est de prendre des échantillons d'eaux de surface afin de mesurer les concentrations de sels nutritifs et d'identifier les espèces phytoplanctoniques, mais aussi de mesurer les conditions océanographiques physiques jusqu'à un maximum de 300 mètres de profondeur.

Forces :

- Possibilité d'accéder à des zones difficilement accessibles de la terre et documentation rapide de grandes superficies.
- Coûts possiblement intéressants selon le type de plateforme aéroportée choisi et la proximité d'un site d'atterrissage.

Faiblesses :

- Observation de la surface des océans uniquement, les profondeurs restent inaccessibles.
- Méthode nécessitant un pilote et des autorisations de vol.
- Disponibilité restreinte de certains types de plateformes aéroportées.
- Limitations météorologiques (vents forts, couverture nuageuse, etc.).
- Limite de poids maximal des instruments.

¹⁸ <https://tc.canada.ca/fr/programmes/programme-national-surveillance-aerienne/technologie-drones-programme-national-surveillance-aerienne>

Programme national de surveillance aérienne du Canada (PNSA)

Le PNSA joue un rôle essentiel dans la surveillance du trafic maritime et la détection des rejets d'hydrocarbures (intentionnels ou non). Grâce à ses nombreuses missions aériennes, il contribue à la protection des eaux canadiennes.



Source : Transports Canada, présentation du 14 novembre 2023 dans le cadre de la Formation sur les techniques d'intervention lors d'incidents maritimes.

4.2. Observations in situ

Les plateformes de télédétection sont des outils puissants, mais elles ont leurs limites lorsqu'il s'agit d'observer des phénomènes se déroulant sous la surface. C'est pourquoi il est nécessaire de valider ces observations en déployant in situ des instruments soutenus par d'autres types de plateformes. Ces plateformes permettent d'observer les milieux côtiers et marins en tenant compte de la caractérisation de l'écoulement des fluides et sont de trois types : eulériennes, lagrangiennes ou autonomes.

Plateformes pour mesures eulériennes

Les observations eulériennes reposent sur des mesures de champs de vitesses en un point donné (fixe). Ces dernières sont plus couramment favorisées, car plus facilement déployables logistiquement que les suivis lagrangiens.

Ces plateformes assurent une présence soutenue dans l'environnement et peuvent fournir des données en temps réel et en continu sur l'état de santé d'un milieu. Elles offrent la possibilité d'étudier des processus multiples et interdépendants en subsurface sur des échelles de temps allant de la seconde à la décennie.

Les mouillages (*moorings*)

Les mouillages sont des plateformes stationnaires ancrées au fond de l'océan et maintenues en surface ou en subsurface par des bouées qui assurent leur flottabilité. Ils supportent sur leur câble des instruments qui permettent une surveillance des processus se déroulant à différentes profondeurs dans la colonne d'eau. Les instruments transmettent les données récoltées à intervalles réguliers au moyen de connexions satellites. Les mouillages fournissent des données sur de longues périodes (mois, saisons, années) pour des endroits précis. Ces données in situ complètent ou valident les données collectées par d'autres types de plateformes, tels que les satellites ou les avions. Les mouillages constituent l'épine dorsale de nombreux réseaux d'observation mondiaux et représentent, par exemple, le fondement du réseau mondial de systèmes d'alerte aux tsunamis.

Il existe un système mondial de mouillages océaniques mis en place en 1999, OceanSites, qui surveille des dizaines de variables océaniques, des interactions air-mer couvrant jusqu'à 5 000 mètres de profondeur. Le système se compose aujourd'hui de 142 mouillages. Les données acquises s'ajoutent aux images satellitaires disponibles et à d'autres données in situ provenant des différents réseaux d'observation des océans mondiaux.

Au Québec, Pêches et Océans Canada possède dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent sept stations munies de bouées océanographiques automatiques élaborées par l'IML et déployées dans le cadre du Programme de monitoring de la zone atlantique (PMZA), détaillé plus bas à la section [Observatoires, réseaux et programmes](#). La première bouée Viking a été mise à l'eau par le NGCC Martha L. Black le 8 mai 2013 à la station Rimouski. Ces mouillages sont équipés de différents instruments de mesure de paramètres physiques, biologiques et météorologiques afin de valider et d'interpréter des données satellitaires et de suivre les conditions océanographiques en temps réel, mais également d'hydrophones détectant les mammifères marins de manière à brosser un portrait des espèces présentes dans l'écosystème du Saint-Laurent. Une innovation importante de cette bouée est la présence d'un capteur de vagues qui a été pensé et réalisé en partie à l'IML.

Forces :

- Possibilité de supporter de nombreux instruments multidisciplinaires.
- Acquisition de données en temps réel.
- Acquisition de longues séries temporelles de données.

Faiblesses :

- Acquisition de données à une seule station.
- Nécessité d'utiliser un navire pour le déploiement et la récupération du mouillage.
- Entretien régulier nécessaire à cause des impacts environnementaux sur les équipements (corrosion, bris dus à la glace, aux courants, aux vents et aux vagues, encrassement biologique, etc.).

Les réseaux câblés sous-marins

Les observatoires câblés sont des plateformes ayant comme infrastructure un câble sous-marin (anciens câbles de télécommunication, câbles dédiés ou câbles partagés consacrés à d'autres activités scientifiques). Ces câbles à fibres optiques fixés sur le fond marin permettent de fournir l'énergie et la connectivité Internet nécessaires aux instruments de mesure. La principale caractéristique d'un observatoire câblé est une

communication bidirectionnelle entre les plateformes et la côte permettant de charger les données, d'effectuer les mises à jour, de modifier les paramètres de prise de données, etc. Les câbles sont utilisés pour étudier un large éventail de sujets associés au fond marin, notamment la sismicité, les tsunamis, les remontées d'eau côtières, la productivité des écosystèmes benthiques, l'optique hydrologique, la turbulence, la remise en suspension des sédiments, les hydrates de gaz, la dynamique de la couche limite marine, la bioluminescence et le comportement de nage de certains animaux.

Le Canada possède des observatoires sous-marins câblés parmi les plus avancés au monde qui font partie de l'ONC (Ocean Networks Canada). Il s'agit des observatoires NEPTUNE (*North East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments*) et VENUS (*Victoria Experimental Network Under the Sea*) qui seront détaillés à la section [Observatoires, réseaux et programmes](#).

Forces :

- Possibilité de supporter de nombreux instruments multidisciplinaires.
- Acquisition de données en temps réel.
- Acquisition de longues séries de données temporelles.

Faiblesses :

- Possibilité d'acquérir des données uniquement aux stations du réseau câblé.
- Importants coûts de conception et de déploiement.
- Couverture géographique limitée.
- Entretien régulier nécessaire à cause des impacts environnementaux sur les équipements (corrosion, bris dus à la glace, aux courants, aux vents et aux vagues, encrassement biologique, etc.).

Plateformes pour mesures lagrangiennes

La deuxième technique de caractérisation de l'écoulement des fluides est l'observation lagrangienne. Cette technique consiste à suivre dans le temps les particules le long de leur trajectoire (dérive). Les mesures sont donc enregistrées non pas en un point fixe, mais sur tout le parcours de dérive de la plateforme. Ces suivis requièrent de pouvoir récupérer la plateforme qui dérive passivement, et ses instruments, au point final de la trajectoire à la fin de la mission. Les données sont généralement transmises en cours de dérive par des systèmes de communication. L'autonomie énergétique des systèmes de communication de la plateforme est importante pour être en mesure de récupérer cette dernière. Des limitations géopolitiques pourraient contraindre le parcours de dérive, la plateforme pourrait aussi s'échouer sur les côtes et devoir être récupérée avant d'être potentiellement redéployée.

Dériveurs de surface (*drifter*) et bouées dérivantes (*drifting buoys*)

Les dériveurs de surface, qui malgré leur nom peuvent aussi être utilisés en profondeur, sont des plateformes qui se déplacent passivement. Ils suivent l'écoulement horizontal à la surface de la colonne d'eau par l'intermédiaire d'une ancre flottante sans utilisation d'énergie. Ils sont constitués d'un flotteur de surface pour la flottabilité, d'une ancre sous-marine pour s'assurer que la bouée suit les mouvements de l'eau et non ceux du vent, ainsi que d'instruments de mesure pouvant être installés sur le flotteur (p. ex. des émetteurs pour transmettre les données collectées et des dispositifs GPS), sur le câble d'attache sous-jacent ou sur l'ancre flottante (p. ex. des sondes de température, de salinité, etc.). Ils permettent aux scientifiques de suivre les courants en temps quasi réel et peuvent être utilisés pour valider in situ des mesures de la surface de l'océan

prises par des satellites. À ce jour, des dériveurs sont déployés dans tous les océans du monde. Le site Internet du gouvernement du Canada¹⁹ fournit de nombreuses informations sur le sujet.

Les bouées dérivantes (à la différence des dériveurs de surface) ne possèdent pas d'ancre et sont conséquemment à la merci du mouvement des vents. Les bouées dérivantes sont généralement simples et visent à caractériser le mouvement des courants de surface. Les bouées dérivantes sont en quelque sorte les « bouteilles contenant un message » utilisées dans le passé comme premier type d'expérience de suivi des courants marins. Une expérience récente a d'ailleurs été réalisée au Québec par l'Institut des sciences de la mer (ISMER) qui consistait à déployer 244 de ces bouées dérivantes. Elles étaient équipées de balises GPS dans l'estuaire du Saint-Laurent au sein du projet TReX (Tracer Release Experiment, trexstlaurent.uqar.ca). L'objectif de ce projet était de mieux caractériser la dispersion des polluants.

Forces :

- Peu coûteux.
- Facilement fabricable.
- Facilité de déploiement.

Faiblesses :

- Taille relativement petite limitant le nombre d'équipements supportés.
- Autonomie limitée (à 18 mois environ).
- Équipement qui peut s'échouer et qui doit alors être récupéré.

Flotteurs profileurs (*float*)

Les flotteurs profileurs sont des plateformes autonomes dérivantes. Les profileurs exécutent des cycles préprogrammés de descente/remontée et de dérives, grâce à un changement de densité très peu énergivore (la plateforme passe d'une flottabilité positive à une flottabilité négative en « gonflant et dégonflant » une vessie d'huile extérieure). Les données sont recueillies par télémétrie satellite au cours des cycles d'émergence. Les profileurs remontent à la surface à une fréquence préprogrammée afin de transmettre leurs données au moyen de communications satellites. Depuis le début de leur utilisation, ils ont permis d'observer les océans avec une couverture et une résolution spatio-temporelle sans précédent : depuis la surface de l'océan jusqu'à une profondeur maximale de 6 000 m de profondeur, de l'échelle journalière à l'échelle interannuelle et de l'échelle locale à l'échelle mondiale. Ils sont l'une des plus grandes révolutions dans les systèmes autonomes marins. Ils ont conduit à la création du réseau mondial de surveillance autonome des océans *Array for Real-time Geostrophic Oceanography*, (Argo) » (section [Accords internationaux et observatoires globaux](#)), qui a déployé près de 4 000 flotteurs depuis sa création et qui permet entre autres d'étudier l'évolution de la température et de la salinité des océans.

Au Québec, le Laboratoire de recherche international – Unité mixte internationale Takuvik (IRL-UMI), créé en janvier 2011 grâce à un partenariat entre l'Université Laval (UL-Canada) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS-France), possède des flotteurs profileurs qui sont en fonction depuis 2013. Ces plateformes autonomes, dont le nombre actif varie selon la période de l'année, sont déployés en Arctique (principalement dans la baie de Baffin) et permettent de faire des acquisitions biogéochimiques (et

¹⁹ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/data-donnees/drib-bder/index-fra.html>

hydrographiques) sous la banquise et à grande échelle afin de comprendre et de caractériser la biomasse phytoplanctonique, surtout pendant l'hiver.

Forces :

- Large couverture spatiale.
- Données de la colonne d'eau jusqu'à de grandes profondeurs.

Faiblesses :

- Limitation du nombre d'instruments supportés.
- Risque que la remontée et le transfert des données soient limités par les glaces.
- Risque de perte de communication avec le flotteur, donc perte d'équipement.

Navires de recherche

Malgré les progrès significatifs accomplis grâce aux nouvelles technologies, les navires de recherche représentent la principale plateforme de suivi environnemental utilisée par les océanographes. Les navires de recherche sont utilisés comme des laboratoires mobiles et polyvalents qui s'adaptent à la diversité des thématiques de recherche. Ils sont essentiels pour soutenir des recherches complexes sollicitant plusieurs disciplines et de nombreux chercheurs. Ils peuvent être équipés de technologies et d'instruments de pointe pour répondre aux besoins de recherche dans tous les domaines de l'océanographie.

Au Québec, Reformar²⁰ contribue aux missions scientifiques en mettant à la disposition des chercheurs des navires de recherche, leur équipage et des équipements scientifiques. Reformar assure la gestion d'une flotte de trois navires : Le Coriolis II, le Lampsilis et le Louis-Edmond Hamelin. Depuis 2019, le Réseau Québec maritime travaille en collaboration avec Reformar pour faire le pont entre les chercheurs, assurer un soutien logistique et, lorsque possible, financer du temps de navigation.



Le [Coriolis II](https://reformar.ca/fr/coriolis-2/)²¹ est un navire de recherche de 49,95 m et d'un tirant d'eau de 5,5 m qui est équipé des dernières innovations technologiques. Il dispose d'espaces consacrés exclusivement aux travaux de recherche (un laboratoire sec et un laboratoire humide) et permet d'accueillir 14 scientifiques à bord. Le Coriolis II répond aux plus hautes normes de certification maritime et peut donc naviguer partout dans le monde. Le navire a été construit en 1990.



Le [Lampsilis](https://reformar.ca/fr/lampsilis/)²² est un bateau-laboratoire de 23,15 m et d'un tirant d'eau de 1,01 m consacré à l'étude de la portion d'eau douce du fleuve Saint-Laurent et de sa zone de transition estuarienne. Le *Lampsilis* possède deux laboratoires et peut accueillir jusqu'à sept scientifiques. Il s'agit d'un navire de type catamaran. Son très faible tirant d'eau lui permet d'échantillonner autant les habitats riverains que les zones profondes à fort courant. Le navire a été construit en 2004.

²⁰ <https://reformar.ca/fr/>

²¹ <https://reformar.ca/fr/coriolis-2/>

²² <https://reformar.ca/fr/lampsilis/>



Le [Louis-Edmond Hamelin](#)²³ est un bateau en aluminium de 7,93 m de long possédant un tirant d'eau de 0,70, qui peut accueillir quatre scientifiques (capacité maximale de sept personnes à bord). Il peut être transporté à son lieu de recherche à l'aide d'une remorque, il est autorisé à naviguer dans les zones à proximité du littoral, de classe II, et ne doit pas être exploité à plus de 25 milles marins de la rive. Le navire a été construit en 2011.

De plus, la Garde côtière canadienne (GCC) possède plusieurs navires affrétés pour des campagnes scientifiques, dont des navires hauturiers de science océanographique, des navires semi-hauturiers de recherche scientifique ainsi que des navires hauturiers ou semi-hauturiers de recherche halieutique. Certaines missions peuvent également s'effectuer sur le brise-glace [NGCC Amundsen](#)²⁴ qui mesure près de 100 m de long et consacre jusqu'à 150 jours par année à des missions de recherche dans l'Arctique. Le NGCC *Amundsen* se déplace également dans le Saint-Laurent et le fjord du Saguenay, notamment pour des missions hivernales lors desquelles ses capacités de brise-glace sont mises à profit, rendant ainsi ces eaux accessibles tout au long de l'année. Le NGCC *Amundsen* est équipé de 65 instruments scientifiques de mesure et de prélèvement, de 12 laboratoires et il peut accueillir jusqu'à 40 scientifiques à son bord. L'équipe Amundsen Science, basée à l'Université Laval, gère le parc d'équipements scientifiques du navire et coordonne le déploiement de missions scientifiques.

Forces :

- Possibilités presque infinies pour le déploiement d'instruments.

Faiblesses :

- Mesures ponctuelles limitées dans l'espace et le temps selon les missions scientifiques.
- Coûts importants (équipage, location du navire, etc.).
- Disponibilités limitées.
- Nombre de places à bord limité.

Plateformes autonomes

Les plateformes autonomes ont la capacité de faire des suivis eulériens ou lagrangiens ou de suivre une trajectoire préprogrammée en fonction des objectifs de chaque mission. Ces plateformes peuvent être pilotées directement ou à distance.

Véhicules sous-marins

Il existe de plus en plus de véhicules sous-marins qui ont chacun leurs particularités, avantages et inconvénients selon les usages ciblés. La synthèse de Whitt et coll. (2020) présente et compare ces différents types de véhicules, leurs usages ainsi que leurs avantages et limites respectifs. Les principaux véhicules sous-marins utilisés dans les observatoires sont décrits ci-après.

²³ <https://reformat.ca/fr/louis-edmond-hamelin/>

²⁴ <https://www.marinfo.gc.ca/fr/flotte/Amundsen.asp>

Véhicules sous-marins autonomes

Les véhicules sous-marins autonomes, communément appelés AUV (*autonomous underwater vehicles*) sont des plateformes autonomes dotées d'un système de propulsion continue qui permet le déplacement vers des coordonnées et des profondeurs prédéfinies par l'utilisateur pour effectuer des mesures. Les AUV sont dotés de systèmes de communication radio, satellite et/ou acoustique qui permettent au pilote d'effectuer un contrôle ponctuel pendant la navigation autonome, puisque le contrôle en temps réel n'est pas requis, caractéristique distinctive de ces véhicules. Il est cependant important de mentionner que le contrôle en temps réel est possible sur certains modèles, voire recommandé pour les plus gros AUV, car il permet de diminuer l'incertitude de positionnement du véhicule, qui peut être crucial dans certains cas, comme lors de l'acquisition de données de bathymétrie. De plus, si le contrôle en temps réel est activé, un sous-échantillon des données acquises est alors disponible en temps-réel, ce qui permet de réaliser un contrôle de qualité avant la remontée du véhicule, voire de modifier le plan de mission en cours de déploiement. Dans tous les cas, les AUV recueillent des données à haute résolution spatiale et temporelle qui sont archivées dans le véhicule. Les AUV sont généralement utilisés de manière ponctuelle et sur de moyennes distances pour effectuer diverses missions océanographiques, telles que l'exploration géologique, la détection de déversements d'hydrocarbures, la bathymétrie à très haute résolution et le suivi de la thermocline.

Au Québec, en 2019, le premier déploiement d'un AUV, le *Kongsberg Hugin 1000*, a permis de cartographier à très haute définition des structures et des dépôts sédimentaires au large de Pointe-des-Monts dans l'estuaire du Saint-Laurent. Cette étude portait sur la variabilité morphologique à échelle fine des formes de terrain associées au passage de courants de turbidité sur le fond marin (Normandeau et coll., 2022).

Forces :

- Possibilité de déplacement à une profondeur donnée et dans des courants marins assez forts.
- Équipement polyvalent : idéal tant pour la cartographie des fonds marins que pour l'étude de la colonne d'eau.
- Grande capacité énergétique disponible pour les capteurs embarqués.
- Possibilité de positionnement très précis.

Faiblesses :

- Couteux à l'achat et à l'entretien.
- Requièrent une expertise spécialisée de la part des pilotes.
- Risque que la distance maximale soit relativement courte entre l'AUV et son pilote, selon le modèle.
- Dépendent de communications à large bande passante ou de plateformes de soutien habitées proches pour un contrôle en temps quasi réel.

Planeurs sous-marins

Les planeurs sous-marins (*gliders*) sont un type d'AUV qui utilisent une propulsion à flottabilité variable au lieu d'hélices ou de propulseurs traditionnels. Ils fonctionnent comme les flotteurs profileurs, mais se distinguent par la contribution de leurs ailes et de leurs positions d'équilibre horizontal, ainsi que du déplacement de leurs batteries d'avant en arrière qui permettent aux planeurs de glisser vers l'avant tout en descendant dans l'eau. La profondeur de plongée maximale est prédéterminée et, une fois atteinte, le planeur passe en flottabilité positive pour remonter et avancer, et le cycle est répété. Les planeurs sous-marins requièrent très peu d'énergie pour se déplacer. En effet, lors de la descente, le vide qui règne dans le véhicule est mis à contribution pour diminuer son volume (et donc augmenter sa densité). Lors de la remontée, la principale dépense d'énergie est l'alimentation d'une pompe hydraulique qui augmente le volume du véhicule (et donc diminue sa densité). Une fois la densité souhaitée atteinte, une électrovanne est utilisée pour maintenir le changement de densité et ainsi éviter toute dépense énergétique supplémentaire. Ce système confère aux planeurs une autonomie de plusieurs semaines à plusieurs mois, dépendamment des batteries utilisées, mais aussi de la consommation des capteurs embarqués. Les planeurs peuvent obtenir de l'assistance à distance en cas de besoin. Ils peuvent ainsi effectuer des échantillonnages depuis la surface jusqu'à environ 1 000 m de profondeur. Lorsqu'ils refont surface, le positionnement GPS, les données collectées et les métriques permettant l'affinement de la mission et sont transmis/récupérés par satellite vers/ depuis la station de réception terrestre. Les planeurs sous-marins sont principalement utilisés pour effectuer des transects dans le cadre des observatoires globaux, mais ils peuvent également être déployés dans les zones côtières peu profondes ou même servir de mouillage artificiel (en les faisant « tourner en rond »). Ils pourraient également être utilisés pour suivre des événements de rejets spécifiques, tels que des rejets d'hydrocarbures (Liblik et coll., 2016). Les instruments installés sur les planeurs sont donc différents selon la mission.

Au Québec, l'IRL-UMI Takuvik effectue des déploiements de planeurs afin d'obtenir des mesures à haute résolution de paramètres physiques et biogéochimiques dans la zone de glace marginale de l'Arctique. Par ailleurs, dans le golfe du Saint-Laurent, l'Université Memorial de Terre-Neuve dispose d'une flotte de huit planeurs sous-marins et en déploie notamment dans le golfe du Saint-Laurent afin de comprendre les échanges d'oxygène. Ailleurs au Canada, l'Institut océanographique de Bedford possède de tels planeurs, principalement utilisés dans le cadre du PMZA. Ils parcourent le plateau néo-écossais et le plateau de Terre-Neuve afin d'étudier la chimie, la biologie et la physique de l'eau de la zone atlantique du Canada.

Forces :

- Endurance très supérieure à celle des AUV traditionnels.
- Autonomie permettant de couvrir une grande distance (certains planeurs ont traversé l'océan Atlantique).
- Résolution temporelle et spatiale élevée.
- Prix abordable.

Faiblesses :

- Faible vitesse, utilisation difficile dans des courants forts.
- Nécessité d'une intervention régulière du pilote.

Véhicules sous-marins télécommandés

Le terme *Remotely Operated Vehicles* (ROV) couvre un large éventail d'équipements. Par conséquent, il existe de nombreux modèles dont aucun n'est typique. Les ROV sont des submersibles télécommandés généralement reliés à la surface par un câble « ombilical » qui assure leur alimentation énergétique, le contrôle et le transfert des données nécessaires entre le ROV et le navire-mère. Ils sont largement utilisés par l'industrie pétrolière et gazière pour l'inspection, l'entretien et la réparation des infrastructures, mais sont de plus en plus utilisés dans le cadre de recherches scientifiques. La plupart des instruments dont l'installation est aisée sur un ROV pourraient être utilisés dans de nombreux domaines d'étude. Aujourd'hui, les ROV scientifiques peuvent même échantillonner des animaux, des microbes, des fluides de cheminées hydrothermales et des échantillons de roche. Ils permettent ainsi des échantillonnages dans des environnements difficilement accessibles ou potentiellement dangereux.

Forces :

- Capacité de prélèvement d'échantillons.
- Faible probabilité de perte d'équipements et de données.
- Plus grande durée de déploiement grâce à l'alimentation continue en énergie.

Faiblesses :

- Gestion du câble d'alimentation (p. ex. sous la glace).
- Coût élevé.
- Selon le modèle, la lumière et les sons produits du ROV peuvent biaiser l'observation du paysage et de la faune marine sonore naturelle (McLean et coll., 2020).

Téléométrie animale

Enregistreurs placés sur des mammifères marins

Les mammifères marins peuvent être utilisés comme des plateformes d'échantillonnage environnemental océaniques (McMahon et coll., 2021). Les phoques sont souvent retenus pour ce type de missions, car ils plongent à une grande profondeur lorsqu'ils se nourrissent. Les enregistreurs et les instruments de mesure (p. ex. sonde CTD, fluorimètres) attachés sur l'animal permettent d'obtenir des données telles que la position de l'animal, mais aussi sa profondeur, la salinité et la température de l'eau environnante.

Au Canada, le MPO a déployé des émetteurs satellites sur différents mammifères marins²⁵ tels que des phoques, des bélugas et des rorquals bleus. Ces émetteurs permettent de suivre les individus et d'obtenir des données sur les conditions océanographiques, par exemple des profils de température et de profondeur.

Forces :

- Étude du comportement des mammifères marins (déplacement, nourriture, etc.).
- Étude de l'environnement océanographique dans lequel évoluent les mammifères marins.
- Empreinte carbone limitée.
- Prise de données possibles à des endroits où les observatoires peuvent difficilement être installés (p. ex. en hiver, sous la glace ou dans de forts courants).

²⁵ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/mammals-mammiferes/satellites/index-fra.html>

Faiblesses :

- Impossibilité de prévoir les trajectoires.
- Capteurs de petite taille pour limiter le désagrément causé aux animaux et donc moins précis.
- Risque de perte des capteurs et des données.

En définitive, il existe différentes solutions de remplacement au déploiement d'instruments scientifiques afin de suivre l'état de l'océan. Les stratégies d'observation traditionnelles, souvent dépendantes des navires, se sont progressivement enrichies au fil du temps d'infrastructures d'observation complémentaire basées sur des réseaux de plateformes automatisées en temps réel. Ces avancées technologiques, tant à l'avantage des instruments que des plateformes qui les supportent, permettent d'acquérir des données complètes et à un rythme plus soutenu à travers l'espace et le temps. Le choix des plateformes dépend des objectifs définis par les observatoires, mais aussi des contraintes associées au budget, à la zone d'étude où ils doivent être déployés et à l'expertise disponible au sein des équipes de recherche. Il existe de plus en plus de petites plateformes autonomes, notamment des micro-AUV, qui ont certes des capacités réduites quant aux profondeurs possibles et à la capacité d'acquisition de données scientifiques, mais qui sont de plus en plus accessibles quant à leur coût d'acquisition et de maintenance de même qu'à leurs frais d'exploitation. Ces micro-AUV sont particulièrement utiles pour les études côtières.

La nécessité d'étudier les processus environnementaux, à leurs échelles temporelle et spatiale de production, a été reconnue dans toutes les disciplines. Cette prise de conscience a motivé la mise en place de nouveaux projets et conduit à la proposition de nombreux observatoires. La prochaine section présente des observatoires, réseaux et programmes qui ont mis à profit ces différentes solutions selon leurs objectifs.

5. Observatoires, réseaux et programmes

L'objectif principal d'un observatoire est d'assurer une surveillance à long terme pour étudier et comprendre les variabilités spatiales et temporelles des côtes ou océans afin de prévoir les répercussions des changements environnementaux. Les observatoires intègrent généralement toutes les étapes du processus, allant de l'acquisition des données jusqu'au transfert de l'information pertinente, pour la rendre accessible au plus grand nombre. Afin d'être conçus de façon appropriée et déployés efficacement, les observatoires nécessitent des capacités humaines importantes, des infrastructures matérielles complexes, ainsi que des systèmes d'information à la fine pointe de la technologie. Ils doivent donc bénéficier d'un financement important et continu. En l'absence d'observatoire, des suivis peuvent être menés dans le cadre d'évaluations environnementales, de projets de recherche universitaires, gouvernementaux ou industriels. C'est notamment le cas des évaluations environnementales menées sur le territoire québécois par le MELCCFP²⁶. Bien qu'elles soient intéressantes, celles-ci sont souvent ponctuelles et contextualisées, ce qui peut limiter l'interprétation et les possibilités de comparaison des données. Les différences fondamentales entre les projets de recherche et les observatoires sont le protocole d'acquisition, la durée et la fréquence d'acquisition ainsi que la finalité des données. La nécessité d'obtenir des données récurrentes pour des variables clés à différentes échelles de temps et d'espace, ainsi que l'évolution des technologies au profit d'instruments et de plateformes mieux adaptés ont mené à la production de plusieurs observatoires dans le monde entier. Les thématiques abordées dans les observatoires ont évidemment évolué au fil du temps en réponse aux enjeux changeants de la société et des préoccupations de générations successives. Les observatoires, réseaux et programmes recensés dans cette synthèse sont donc présentés de manière chronologique, du plus ancien au plus récent. Ils ont été choisis pour couvrir différents formats d'infrastructures et mettre en perspective la position du Québec et du Canada en ce qui concerne les observations côtières et marines. La [Figure 2](#) présente la carte des observatoires, réseaux, programmes, centres de données et organisations évoqués dans cette synthèse. De plus, le tableau présenté en [Annexe 4](#) indique leur pays de création, leur date d'ouverture, leur vocation ainsi que leur adresse Internet. Une [carte interactive](#) est aussi disponible.

Le [Tableau 2](#) de la section [Paramètres mesurés](#) présente les paramètres mesurés par chaque observatoire, réseau et programme décrit dans cette synthèse.

²⁶ <https://www.ree.environnement.gouv.qc.ca/indexCarte.asp>

Fin des années 1800 : mise en place des premiers observatoires

Au cours du 19^e siècle, les premières expéditions océanographiques permettent d'amorcer l'observation et l'étude des océans. Des stations de recherche côtières voient ensuite le jour, et certaines d'entre elles prennent le nom d'observatoire, soulignant l'aspect scientifique de leurs recherches et la durée prolongée de leur collecte de données. Le premier observatoire recensé dans cette synthèse se trouve en France, où la recherche et la formation en sciences de la mer occupent une place importante.

Expédition du HMS Challenger

La première grande campagne océanographique mondiale fut réalisée par une équipe de scientifiques à bord de la corvette britannique *HMS Challenger* entre décembre 1872 et mai 1876.

Cette expédition a notamment permis de sonder l'océan jusqu'à une profondeur de 8 200 m et de décrire plus de 1 500 nouvelles espèces.

Source : Encyclopédie Universalis.



Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer, France

Fondé en 1881 par Henri de Lacaze-Duthiers sous le nom de Laboratoire Arago, l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer (OOB) est connu pour être le lieu où la première photographie sous-marine fut prise (Jacques et Desdevises, 2021). L'observatoire est sous la tutelle conjointe de Sorbonne Université et du Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Il est implanté sur la côte rocheuse du Roussillon, à proximité de la frontière espagnole. Le but d'installer un laboratoire en bord de mer était que les scientifiques puissent travailler sur les organismes directement dans leur habitat naturel. Son premier champ de recherche était la zoologie expérimentale, marine et terrestre. Aujourd'hui, il s'agit d'un campus des sciences de la mer reconnu pour être pluridisciplinaire, puisqu'il s'intéresse à la biologie, mais aussi à la physique et à la chimie marines. Les anciennes infrastructures existantes en mer ont graduellement été remplacées par des équipements autonomes de pointe. Les plateformes utilisées sont dorénavant des bouées instrumentées innovantes, idéales pour l'étude des organismes marins, en particulier les microorganismes (procaryotes et eucaryotes), invertébrés et poissons. Le principal objectif de l'observatoire actuel est de comprendre la variabilité naturelle de l'écosystème marin et d'analyser les tendances à long terme résultant des changements climatiques et/ou de l'exposition à des perturbations extrêmes de courte durée. Cela est réalisé par le suivi à long terme des environnements côtiers et hauturiers. Les séries de données sont acquises chaque semaine depuis plus de 20 ans. Elles constituent l'une des bases de données les plus longues et les plus complètes disponibles en Méditerranée.

L'échantillonnage de routine a lieu à trois stations (SOLA, POLA, MOLA) situées dans le golfe du Lion (en Méditerranée occidentale). Les données sont disponibles gratuitement par l'entremise de la base de données nationale SOMLIT²⁷. Les paramètres physiques, chimiques et biologiques mesurés aux différentes stations sont présentés au [Tableau 1](#).

Premières photographies sous-marines

Les premières photographies sous-marines ont été prises en 1893 à Banyuls-sur-Mer. On peut y voir l'océanographe et biologiste Émile Racovitza équipé d'un scaphandre à casque, ainsi qu'un autoportrait du biologiste et photographe Louis Boutan.



Source : Wiki Commons.

2



Institut de la mer de Villefranche, France

Jules Barrois et Hermann Fol fondent en 1881 un laboratoire qui, après de multiples péripéties, le soutien de nombreux chercheurs et une vocation renouvelée²⁸, deviendra en 1989 l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer (OOV). Cet observatoire mondialement connu a permis des avancées significatives dans la compréhension de l'océan et de ses écosystèmes, notamment des populations phytoplanctoniques, grâce à l'utilisation de filets à plancton. Récemment, en 2019, l'OOV a pris le nom d'Institut de la mer de Villefranche (IMEV). Cet institut dispose aujourd'hui de navires de recherche, de bouées et de stations côtières. Ces plateformes sont équipées d'une variété d'instruments et de capteurs. Les scientifiques y étudient les interactions entre le phytoplancton et les autres organismes marins, ainsi que les effets des changements climatiques sur les écosystèmes marins.

²⁷ <https://www.somlit.fr/>

²⁸ https://www.imev-mer.fr/doc/livre/Livre_OOV_125_ans.pdf

Le Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer, qui fait partie de l'IMEV, collabore à plusieurs projets avec l'IRL-UMI Takuvik, basé à l'Université Laval, à Québec. Ce dernier a été créé en 2011 à la suite d'un partenariat entre l'Université Laval et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en France. L'objectif du programme de recherche Takuvik est d'améliorer la compréhension des impacts des perturbations environnementales actuelles d'origine climatique et anthropique sur les écosystèmes et les géosystèmes arctiques.

Les observatoires de Banyuls-sur-Mer et de Villefranche-sur-Mer possèdent des données historiques inestimables pour la compréhension des océans et de leurs écosystèmes au tournant du 20^e siècle. Ceux-ci n'ont pas eu d'équivalent avant les années 1930, alors que des scientifiques du monde entier ont progressivement mis en place des systèmes d'observation pérennes pour suivre l'évolution spatio-temporelle de phénomènes environnementaux.

1930 – 1990 : progrès technologiques

Une progression significative dans la mise en place des observatoires océanographiques a été observée grâce à des avancées technologiques telles que les satellites, les bouées, les flotteurs, les véhicules sous-marins et les différents instruments de mesure in situ. Ces avancées ont permis d'obtenir des données plus précises et plus complètes sur les caractéristiques et la variabilité des zones côtières et marines et ont aidé les scientifiques et les décideurs à mieux comprendre les processus et conditions de ces milieux, ainsi que les impacts des changements climatiques et des contaminants sur ceux-ci.



Woods Hole Oceanographic Institution, États-Unis

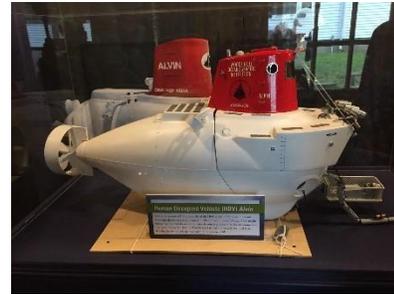
Fondé en 1930, un peu plus de 50 ans après les premiers efforts pour étudier l'océan, la Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) est considérée comme l'un des plus importants centres de recherche en océanographie au monde. Son emplacement à Woods Hole, au Massachusetts (États-Unis), a été choisi pour sa communauté de chercheurs scientifiques bien établie, sa proximité de plusieurs universités et sa localisation. En effet, elle permet un accès facile aux grands fonds marins, ainsi qu'aux conditions océanographiques contrastées au nord et au sud de Cape Cod. De plus, son port en eau profonde est adapté à l'accostage des navires océanographiques. Son objectif est de comprendre l'océan et ses interactions avec la terre, et d'élaborer des solutions aux problèmes environnementaux mondiaux tels que les changements climatiques, la pollution et la surpêche. De 1931 à 1966, *Atlantis*, son premier navire de recherche construit spécifiquement pour la recherche interdisciplinaire en biologie marine, a effectué 299 missions océanographiques et parcouru près de 1 300 000 km, étudiant ainsi différents aspects des sciences océaniques. Au cours de ces missions, les scientifiques collectaient des carottes de sédiments pour des études bactériologiques ainsi que du plancton, et sillonnaient le Gulf Stream en prélevant des échantillons d'eau et en effectuant des mesures hydrographiques. Au fil des ans²⁹, la WHOI a connu de nombreux changements depuis sa création et a développé de nouvelles technologies permettant

²⁹ <https://www.whoi.edu/who-we-are/about-us/history-legacy/>

d'explorer de nouveaux écosystèmes marins. Ainsi, dans les années 1950, des sous-marins ont été utilisés pour parcourir les profondeurs de l'océan, alors que dans les années 1980, de nouveaux instruments à déplacement autonome y ont été mis au point.

L'Alvin, le véhicule d'immersion profonde de la WHOI

Mis en service en 1964, l'*Alvin* a été l'un des premiers submersibles à explorer les profondeurs de l'océan. Encore opérationnel aujourd'hui, grâce à de nombreuses mises à jour, ce submersible peut recevoir à bord deux scientifiques et un pilote pour des plongées durant jusqu'à neuf heures et atteignant des profondeurs de 4 500 m. Parmi les missions les plus remarquables de l'*Alvin*, mentionnons la découverte des sources hydrothermales sous-marines sur la dorsale médio-atlantique en 1979, ainsi que l'exploration du Titanic en 1986.



De nos jours, Alvin continue de participer activement aux missions du WHOI.

Source : <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore-underwater-vehicles/hov-alvin/history-of-alvin/>

Quelques années plus tard, une autre percée technologique a marqué l'histoire des observatoires avec la transmission d'informations par satellite depuis une plateforme de mesures autonomes dans l'Arctique (ARAMP) enregistrant des données mesurées grâce à une variété d'instruments (MIT Sea Grant, 1986). La WHOI, avec l'Université Rutgers, a également établi en 1994 l'un des premiers observatoires sous-marins à long terme au monde (LEO-15, pour *Long-term Ecosystem Observatory in 15 meters of water*) au large de Tuckerton, dans le New Jersey. Au fil des ans, la WHOI a également élargi son champ d'activités pour inclure des domaines tels que la biologie marine, l'écologie, la géologie marine et la modélisation de l'océan et a étendu sa portée géographique pour inclure des études des océans dans le monde entier, y compris dans les régions polaires et les zones côtières. La WHOI utilise aujourd'hui une variété de plateformes de recherche, notamment des navires de recherche³⁰, des sous-marins télécommandés et des véhicules sous-marins autonomes. De nombreux paramètres sont suivis dans des environnements inaccessibles à l'époque de sa création. La WHOI mesure l'activité sismique, la profondeur de l'océan et les caractéristiques géologiques du fond marin grâce à ses observatoires câblés tels que l'Observatoire côtier de Martha's Vineyard, le Polar Remote Interactive Marine Observatory et le Panama Liquid Jungle Laboratory Underwater Tropical Observatory³¹.

³⁰ <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/ships/>

³¹ <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/ocean-observatories/about-ocean-observatories/types-of-observatories/coastal/>

4



Institut océanographique de Bedford, Canada

Comparable à la WHOI, l'Institut océanique de Bedford (IOB) est un des plus importants centres océanographiques du Canada et a été fondé en 1962 par le gouvernement du Canada à Dartmouth, en Nouvelle-Écosse. L'IOB fait partie du réseau des centres de recherche de Pêches et Océans Canada³², qui compte plus de 17 instituts scientifiques, laboratoires, centres expérimentaux et bureaux répartis dans sept régions du pays (dont l'IML décrit ci-après). Les activités de recherche de l'IOB portent sur une zone géographique très vaste : l'océan Atlantique Nord. Ses principaux objectifs sont de comprendre les processus océaniques et d'acquérir des connaissances sur les écosystèmes marins, les changements climatiques et les ressources océaniques. Les chercheurs de l'institut utilisent une grande variété de plateformes pour mener leurs recherches, notamment des navires, des sous-marins, des planeurs sous-marins, des satellites et des stations météorologiques. L'Institut utilise une large gamme d'instruments afin de recueillir des données qui permettent d'étudier les interactions entre l'océan et l'atmosphère, les cycles biogéochimiques, la dynamique des écosystèmes marins, la circulation océanique et les changements climatiques. Ses recherches visent à fournir au gouvernement canadien un soutien et des avis pour appuyer le processus décisionnel dans des domaines relatifs aux océans, dont la protection de l'environnement, la santé des océans, l'utilisation durable des ressources naturelles (aquatiques, minérales, gazières et pétrolières), ainsi que la gestion intégrée des océans.

Les données recueillies à l'IOB sont régulièrement rendues disponibles par l'entremise de bases de données en ligne, telles que le Système intégré d'observation des océans du Canada (SIOOC) ou le National Oceanographic Data Center (NODC) de la NOAA. De plus, l'IOB participe à des programmes internationaux de collecte de données océanographiques, tels que le Programme mondial d'observation de l'océan (*Global Ocean Observing System*, GOOS) décrit plus loin, et le Programme de recherche sur la climatologie de l'océan (*Ocean Climate Research Program*, OCLP), qui facilite la collaboration et le partage de données entre les scientifiques du monde entier.

5



Réseau d'observation de la contamination chimique (ROCCH), France

En France, le Réseau d'observation de la contamination chimique (ROCCH), anciennement Réseau national d'observation (RNO), est un programme de surveillance et de suivi des contaminants installé sur le littoral depuis 1974. Son objectif est d'évaluer la qualité du milieu en mesurant les niveaux et les tendances des concentrations en contaminants chimiques, ainsi que la surveillance des effets de ces contaminants à long terme. Suivant une nouvelle approche scientifique, les analyses de contaminants chimiques sont réalisées sur des huîtres ou des moules deux fois par an (février et novembre) à 150 stations de surveillance le long du littoral français. Les stations ont été sélectionnées en fonction de leur représentativité des différents types de cours d'eau et de l'utilisation qui en est faite (agriculture, industrie, zone urbaine, etc.) Le suivi ostréicole se fait au moyen de différents paramètres d'analyse interne de la chair : bactériologie, métaux

³² <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/organization/facilities-installations/index-fra.html#wb-auto-4>

lourds (cadmium, mercure et plomb), 16 formes d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (Ardhuin et coll., 2019), tributylétain (TBT) et ses deux formes décomposées (DBT et MBT). Des indices généraux, comme le taux de mortalité, la croissance pondérale et la biométrie, sont aussi mesurés. Les mollusques bivalves jouent un rôle de sentinelle du milieu marin, car ils sont sédentaires, ils filtrent les contaminants chimiques locaux et les accumulent dans leurs tissus. Les concentrations en contaminants chimiques dans la chair de ces mollusques sont alors beaucoup plus élevées que dans l'eau et traduisent l'état chimique chronique du milieu et son évolution d'année en année. L'analyse de ces concentrations permet d'établir des tendances et de déterminer des sources de pollution. Une partie des échantillons est également conservée pour des analyses ultérieures d'autres contaminants émergents qui pourraient être intégrés au suivi. Cette collection est alimentée depuis 1981. Enfin, les mêmes contaminants chimiques sont aussi analysés dans les sédiments marins pour avoir une évaluation à plus grande échelle spatiale et temporelle, déterminer les zones de fortes concentrations, ainsi que les sources potentielles des contaminations.

Mussel Watch

Une initiative similaire au ROCCH a été mise en place aux États-Unis par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en 1986 avec son programme Mussel Watch. Le Canada a emboîté le pas dans les années 1990 avec le Programme canadien de contrôle de la salubrité des mollusques (PCCSM). Le but premier de ce programme est de réduire au minimum les risques pour la santé associés à la consommation de mollusques bivalves contaminés. Cela comprend un programme de surveillance des biotoxines dans les secteurs coquilliers. De nos jours, ce programme est administré conjointement par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA), ECCC et Pêches et Océans Canada (Sloyan et coll., 2019).

Au Canada, plus de 2 000 sites coquilliers sont régulièrement échantillonnés, dont 434 au Québec.

Une carte interactive sur l'ouverture des zones de cueillette des mollusques peut être consultée au lien suivant : <https://www.dfo-mpo.gc.ca/shellfish-mollusques/cssp-map-fra.htm>



Institut Maurice-Lamontagne, Canada

L'IML est un des principaux centres francophones de recherche en sciences de la mer au monde. Il a été inauguré en 1987, à Mont-Joli, au Québec, en bordure de l'estuaire du Saint-Laurent. L'IML fait partie du réseau des centres de recherche de Pêches et Océans Canada (MPO), tout comme l'IOB, mentionné précédemment. La zone d'étude de l'IML englobe l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, le fjord du Saguenay ainsi que la baie et le détroit d'Hudson. L'IML concentre ses recherches sur les sciences des océans et la gestion des écosystèmes aquatiques dans l'objectif de fournir au gouvernement fédéral une base scientifique rigoureuse pour la conservation et la gestion durable des ressources marines et des écosystèmes aquatiques, la protection de l'environnement marin et une navigation

sécuritaire. Les quelque 300 chercheurs qui y travaillent mènent des études approfondies sur la biologie marine, l'océanographie, l'hydroacoustique, la modélisation des conditions physiques de l'océan, la modélisation biogéochimique et écosystémique et bien d'autres domaines connexes. Tout comme l'IOB, l'IML utilise de nombreuses plateformes et instruments de mesure tels que des navires de recherche, des hélicoptères, des bouées océanographiques, des capteurs sous-marins et des satellites pour mener à bien ses recherches. Il dispose également de plus de 70 laboratoires, ainsi que de salles de travail, d'une salle des bassins avec des équipements de haute technologie, de sept unités à atmosphère contrôlée et de quatre équipes de plongée subaquatique certifiées, ce qui lui permet de réaliser des études expérimentales dans différents domaines. Il est reconnu pour sa contribution importante aux sciences de la mer et participe à plusieurs réseaux de surveillance et de recherche nationaux et internationaux de l'Atlantique Nord, tel le Programme de monitoring de la zone atlantique (PMZA) (*1990-1999 : Étude de plus grandes étendues océaniques*), décrit plus bas.

1990-1999 : Étude de plus grandes étendues océaniques

Les années 1990 ont vu l'émergence d'observatoires créés par des autorités publiques à la suite d'une prise de conscience de la communauté internationale des impacts anthropiques sur les océans incluant les changements climatiques (montée du niveau de la mer, pollution marine, réchauffement des eaux, fonte des glaciers et de la calotte polaire, etc.). Ces années ont été marquées par un souci grandissant de protection des océans, de prévention des changements environnementaux, de détection et de suivi des événements extrêmes, mais aussi de recours aux nouvelles technologies, ainsi que de collaboration accrue entre les régions et les pays.

Journée mondiale des océans

Cette journée a été créée le 8 juin 1992 à Rio de Janeiro à l'occasion du Sommet de la Terre. Son objectif est de mobiliser et d'unir les populations du monde entier autour d'une gestion plus durable des océans, tout en rendant hommage à leur beauté et à leur richesse.



Le Système mondial d'observation de l'océan (Global Ocean Observing System)

Le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS) a été créé en 1991 par la Commission océanographique intergouvernementale (COI) en réponse à l'appel de la deuxième Conférence mondiale sur le climat (1990). Sa mission est de prendre les devants dans la coordination de la communauté d'observation des océans et de faciliter la création de partenariats pour établir un système d'observation océanique intégré, réactif et durable. Son objectif est de faciliter les opérations des réseaux nationaux et mondiaux sur les plans de la collecte, de l'analyse et du partage des données. Le programme a notamment établi une liste de 31 variables océaniques

essentielles (VOE)³³ qui ne cesse d'évoluer (Tableau 3) avec l'objectif commun de procurer une meilleure compréhension des océans. Ces variables sont sélectionnées sur la base de critères de pertinence, de faisabilité et de coût-efficacité qui sont d'une importance mondiale commune et utilisés par un large éventail d'intervenants. Elles visent à décrire l'état de l'océan, à prévoir ses conditions changeantes et à anticiper ses effets sur les changements climatiques.

Tableau 3 : Liste des variables océaniques essentielles retenues par le programme GOOS.

Physique	Biochimie	Biologie et écosystèmes
État de la mer	Oxygène	Biomasse et diversité du phytoplancton
Contraintes sur la surface océanique	Nutriments	Biomasse et diversité du zooplancton
Glace de mer	Carbone inorganique	Biomasse et diversité microbienne (*pilote)
Niveau d'eau	Traceurs transitoires	Abondance et distribution des poissons
Température de surface de la mer	Matières particulaires	Abondance et distribution des tortues marines, oiseaux et mammifères
Température sous la surface de la mer	Protoxyde d'azote	Abondance et distribution des invertébrés (*pilote)
Courants de surface	Isotopes stables du carbone	Couverture et composition des coraux durs
Salinité de surface de la mer	Carbone organique dissous	Couverture et composition des herbiers marins
Salinité sous la surface de la mer		Couverture et composition de la canopée de macroalgues
Flux de chaleur océanique de surface		Couverture et composition de la mangrove
Courants sous-marins		
Flux turbulents diapycnaux (*pilote)		
Interdisciplinaire (impact anthropique compris)		
	Couleur de l'océan	Acoustique sous-marine
	Déchets marins (*pilote)	

Le GOOS est structuré en 13 réseaux multidisciplinaires d'observation des océans qui agissent selon des principes de collaboration et de coordination. Chaque réseau a la responsabilité de collecter des données océanographiques dans des domaines spécifiques. Les six principaux programmes qui composent actuellement le Système mondial d'observation de l'océan sont le réseau Argo (détaillé plus bas), le Data Buoy Cooperation Panel (DBCP)³⁴, qui gère des bouées dérivantes et amarrées, OceanSites³⁵, qui utilise des mouillages, le *Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program* (GO-SHIP)³⁶, détaillé plus bas, le *Global Sea Level Observing System* (GLOSS)³⁷, qui effectue des observations du niveau de la mer, et le Ship Observations Team (SOT)³⁸, comprenant des navires d'observation volontaires et des navires d'opportunité. Plusieurs autres initiatives sont en cours pour combler des lacunes dans la capacité d'observation mondiale.

Les produits du GOOS comprennent des outils de surveillance et des cartes des sites d'observation, des documents sur les pratiques exemplaires, des rapports et des présentations qui répondent à des besoins plus larges.

³³ https://www.gooscean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=283:essential-ocean-variables&catid=9&Itemid=441

³⁴ <https://www.ocean-ops.org/DBCP/>

³⁵ <http://www.oceansites.org/>

³⁶ <https://www.go-ship.org/>

³⁷ <https://gloss-sealevel.org/>

³⁸ <https://community.wmo.int/en/ship-observations-team-sot>



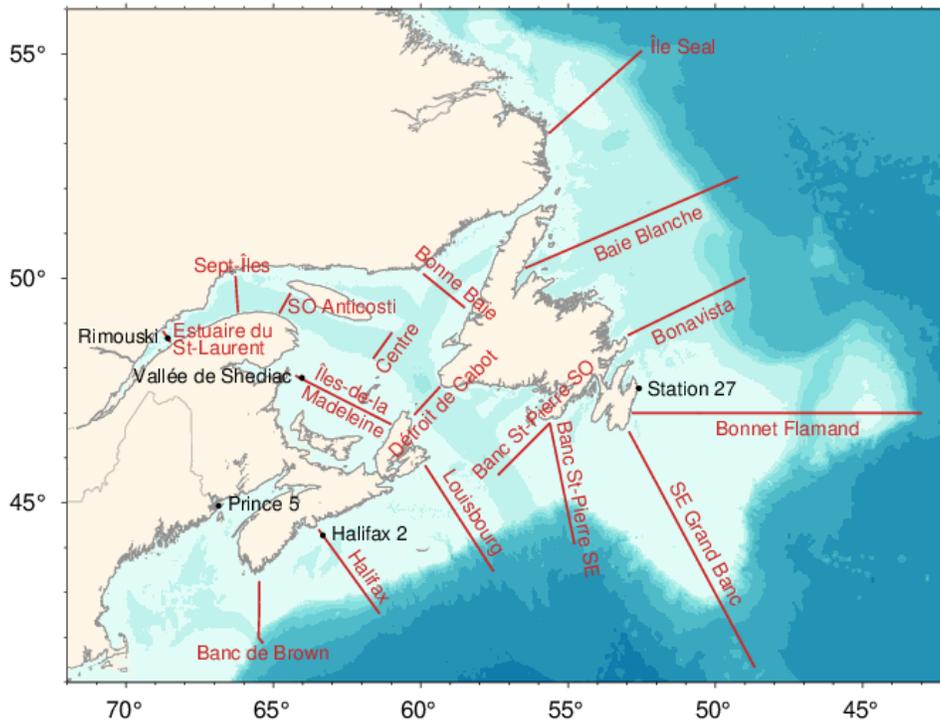
Le Programme de monitoring de la zone atlantique, Canada

Le PMZA est un observatoire canadien mis en place en 1998 par les quatre régions atlantiques ciblées par Pêches et Océans Canada. Ces régions comprennent le Québec, le Golfe, les Maritimes et Terre-Neuve-et-Labrador. Les instituts et laboratoires associés à ces régions sont L'IML, le Centre des pêches du Golfe, l'IOB et le Centre des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest.

Le programme a pour objectifs de caractériser et de comprendre les causes de la variabilité océanique aux échelles saisonnière, interannuelle et décennale, de fournir les ensembles de données pluridisciplinaires nécessaires à l'établissement de relations entre les variables biologiques, chimiques et physiques, enfin, de fournir des données adéquates pour le développement durable des activités océaniques. L'élément clé de la stratégie d'échantillonnage adoptée par le PMZA est l'échantillonnage saisonnier (le golfe du Saint-Laurent est échantillonné quatre fois par année) de stations positionnées le long de transects localisés dans des régions représentatives (Figure 3) afin de quantifier la variabilité biologique, chimique et physique observée dans ces régions, et l'échantillonnage de stations à haute fréquence pour suivre la dynamique à plus fine échelle de temps. De plus, un échantillonnage océanographique est pratiqué sur plusieurs autres relevés tels que ceux faits pour les évaluations de stocks. L'échantillonnage se fait à partir de navires scientifiques et principalement grâce à des bouteilles de prélèvement d'eau placées sur une rosette. Des traits de filet sont aussi effectués pour récolter du zooplancton dans le but d'en déterminer l'abondance par espèce. L'ensemble des données mène à la publication annuelle de bilans basés sur la construction de séries de données temporelles³⁹.

³⁹ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/data-donnees/azmp-pmza/index-fra.html>

Figure 3 : Carte des transects échantillonnés dans le cadre du PMZA (en rouge) et des stations d'échantillonnage à haute fréquence (en noir).



Source : MPO.

Programme de monitoring de la zone atlantique (PMZA)

- Les données brutes sont disponibles en consultant le Système de gestion des données environnementales (SGDE) : <https://sgde.osgl.ca/datatype>
- Les rapports annuels sont disponibles auprès du Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) : <https://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/index-fra.htm>

Début des années 2000 : expansion des observatoires

Accords internationaux et observatoires globaux

En 1999, la communauté océanographique organise la première conférence internationale consacrée exclusivement à l'observation durable des océans (conférence OceanObs'99). Cette conférence permet de dresser un bilan des dernières années d'observation, mais aussi de lancer les discussions sur la mise en place d'une stratégie mondiale visant à mettre sur pied un système d'observation global des océans intégré, coordonné et durable. Plusieurs réseaux d'observation ont été créés en réponse aux recommandations émises lors de cette conférence et les observations océanographiques sont devenues des sujets scientifiques

à l'origine de nombreuses coopérations internationales. De grands observatoires et réseaux mondiaux ont ainsi vu le jour, intégrant de plus en plus la dimension d'aide à la décision dans leurs objectifs afin de produire et de partager de nouvelles connaissances en appui aux politiques de développement durable.



Le programme international Array for Real-time Geostrophic Oceanography

Le programme international *Array for Real-time Geostrophic Oceanography* (Argo) a été lancé en 2000 et représente le premier réseau global d'observation in situ des océans en temps réel. Il s'agit d'un partenariat entre plus de 30 pays travaillant ensemble pour constituer un réseau mondial homogène de plus de 4 000 flotteurs profileurs. L'objectif principal du programme est d'étudier la variabilité à long terme des océans et de mieux comprendre leur rôle dans le climat de la Terre. En collectant des données sur des paramètres clés, Argo vise à estimer le plus précisément possible l'évolution future du climat. Avant le lancement du programme Argo, la surveillance sous la surface des océans se limitait à sonder quelques centaines de mètres le long des grandes routes maritimes, ce qui représentait moins de 1 % des océans. Le programme permet aujourd'hui l'observation de près de 50 % des océans avec la collecte de 12 000 profils chaque mois (400 par jour). Cela dépasse largement la quantité de données pouvant être collectée sous la surface de l'océan au moyen de toute autre méthode. Les flotteurs utilisés dans le cadre du programme se divisent en trois catégories principales, soit les flotteurs standard (*Core Argo Float*), les flotteurs biogéochimiques (*BGC-Argo Float*) et les flotteurs profonds (*Deep Argo Float*). Les flotteurs standard mesurent uniquement la température et la salinité des deux premiers kilomètres de l'océan, tandis que les flotteurs BGC-Argo peuvent également mesurer le pH, la concentration en OD, la Chl *a*, le PAR et le nitrate en plus de la température et de la salinité. Les flotteurs Argo profonds, quant à eux, sont capables d'atteindre des profondeurs de 4 000 à 6 000 m selon le modèle utilisé et mesurent la température, la salinité, la pression et la quantité d'oxygène gazeux.

En plus de collecter des données, le programme Argo joue un rôle important dans la validation des données océanographiques collectées par les satellites et dans la modélisation des conditions océanographiques et météorologiques. Le programme prévoit poursuivre la collecte de données aussi longtemps qu'elle restera un outil vital pour un large éventail d'applications océaniques, dont la compréhension et la prévision des changements climatiques. Le Canada, notamment grâce à l'ISMER, est un membre clé d'Argo. Depuis 2001, Pêches et Océans Canada a lancé plus de 400 flotteurs Argo, dont 88 sont toujours en service⁴⁰.



Le Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program

Créé en 2007 dans le cadre des initiatives de l'International Ocean Carbon Coordination Project (IOCCP) et Climate and Ocean - Variability, Predictability, and Change (CLIVAR), le programme GO-SHIP a pour but de développer une stratégie de développement d'un programme hydrographique répété à l'échelle mondiale. Il fait également partie des systèmes mondiaux d'observation de l'océan et du climat (*Global Climate Observing System*, GCOS, et GOOS). L'objectif du programme GO-SHIP est de fournir une évaluation de la séquestration océanique de la chaleur et du carbone dans les océans, un portrait de l'évolution des modèles de circulation

⁴⁰ <https://sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/argo/index-fra.html>

et de ventilation océaniques, ainsi qu'un compte rendu de leurs effets sur la santé des océans et le climat de la Terre. Le programme fournit un rapport approximativement décennal des changements survenus dans les inventaires de chaleur, d'eau douce, de carbone, d'oxygène, de nutriments et de traceurs transitoires. Actuellement, le réseau de référence compte 55 missions scientifiques échantillonnant les principaux bassins océaniques (Sloyan et coll., 2019). Les mesures couvrent toute la colonne d'eau pour les profondeurs océaniques inférieures à 2 000 m, avec un échantillonnage spatial et un espacement cible des stations d'échantillonnage de 50 km le long de la route du navire. Ces campagnes permettent de mesurer plusieurs paramètres physiques et variables biogéochimiques avec beaucoup de précision et potentiellement jusqu'au fond de l'océan.

Les observatoires globaux sont des initiatives de suivi de plusieurs variables océaniques à grande échelle spatiale, typiquement de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres. La collecte intégrée de données procure des avantages qui ne sont pas disponibles auprès des observatoires individuels. Cependant, ces initiatives de grande envergure nécessitent généralement des investissements importants.

Observatoires régionaux

Durant les années 2000, plusieurs observatoires régionaux se sont imposés comme des outils efficaces en complément des réseaux d'observatoires mondiaux, soutenant l'utilisation durable de l'océan et des zones côtières. Ces initiatives ont été motivées par une reconnaissance de la nécessité de faire face aux défis économiques, sociaux et environnementaux auxquels sont confrontées les régions.

11 *L'observatoire de Bonne Bay, Canada*

Parmi les premières initiatives d'observatoires régionaux, il y a l'observatoire canadien déployé à Bonne Bay, un fjord de la côte ouest de Terre-Neuve, en 2004, par l'Université Memorial de Terre-Neuve. Le système consiste en un ensemble d'instruments reliés à la station marine par un câble électro-optique de 1,4 km. Il a pour objectif de comprendre l'influence de l'environnement physique sur la variabilité temporelle des écosystèmes marins. Le système est unique puisqu'il fournit des données continues en temps réel dans un système couvert de glace durant la période hivernale, alors qu'il ne pouvait auparavant être échantillonné que par intermittence (deYoung et coll., 2005). Sa conception est modulaire, de sorte que les composantes individuelles peuvent être facilement échangées ou entretenues. Un petit navire de recherche, permettant d'échantillonner les données in situ, complète le réseau de capteurs fixes de l'observatoire qui comprend une station météorologique.

12 *La station MAREL Carnot, France*

Installée à l'extrémité de la digue Carnot, sur la rive française de l'est de la Manche, près de la sortie du port de Boulogne-sur-Mer, la station MAREL Carnot est une station océanographique multi-capteurs construite et mise en œuvre par l'Ifremer en 2004. Depuis les années 1992-1995, l'Ifremer a soulevé l'importance de développer des systèmes de surveillance automatisée de l'environnement et des effets directs et indirects des activités humaines sur le milieu marin (Ghosn et Lefebvre, 2023). Depuis, le concept des stations MAREL a été validé et adapté en fonction des contraintes environnementales et des besoins des utilisateurs. L'objectif principal de la station

MAREL Carnot est d'évaluer la qualité du milieu marin et de reconnaître les phénomènes qui sont déterminants pour expliquer la dynamique de l'écosystème. Le système automatisé offre des observations à long terme et à haute fréquence permettant d'appuyer les décisions des autorités lors de la mise en place de plans de gestion. Une station terrestre reçoit et archive automatiquement les données, puis les rend disponibles pour les utilisateurs par Internet. Elle peut également recevoir des messages d'alerte. Des échantillons d'eau sont pompés à différentes profondeurs de la colonne d'eau et sont analysés par les instruments situés dans une cellule de mesure sur la structure flottante, capable de travailler de manière autonome. Cette structure permet également le nettoyage en continu des instruments et l'injection d'ions chlorés dans le circuit hydraulique pour éviter l'encrassement biologique, garantissant ainsi la qualité des mesures.

Une autre station MAREL est utilisée depuis 2000 dans la rade de Brest : la station MAREL-Iroise. Son objectif est d'observer et de comprendre l'évolution du milieu en réponse aux changements climatiques. Une bouée instrumentée et automatisée est placée à 2,5 m de profondeur et permet un suivi à haute fréquence de la qualité hydrologique du milieu.

13 *SmartBay, Canada*

SmartBay⁴¹ est un observatoire situé dans la baie Placentia, à Terre-Neuve-et-Labrador, dirigé par le Centre for Applied Ocean Technology (CTec) qui fait partie de l'Institute of Memorial University of Newfoundland. Cet observatoire a été mis en place en 2004 en tant que système d'observation des océans, afin de répondre aux besoins de divers utilisateurs, tels que les pêcheurs, l'industrie pétrolière, le transport maritime, les municipalités et les citoyens. Bordée par 60 communautés comptant environ 25 000 habitants, la baie Placentia est le lieu d'une importante activité industrielle. Dès 1991, la baie Placentia a été reconnue comme l'endroit au Canada où la probabilité d'occurrence d'une catastrophe maritime majeure est la plus élevée (MacIsaac et coll., 2023). L'observatoire vise donc à appuyer la prise de décisions, que ce soit du point de vue de la sécurité, de l'efficacité du transport maritime, des politiques ou de l'environnement. Les bouées de l'observatoire sont équipées d'instruments mesurant des paramètres météorologiques, océanographiques et de qualité de l'eau afin d'obtenir un synopsis météorologique général ainsi qu'une modélisation des déversements d'hydrocarbures et une prévision du vent, des vagues, de la température de l'air et de la mer, des précipitations, du potentiel de glace et des courants océaniques.

Ces paramètres représentent les besoins initiaux en données qui ont été déterminés par les différents groupes d'utilisateurs et les parties prenantes. Un autre aspect important de SmartBay est son effet d'accélérateur dans le secteur local des technologies océaniques. Il offre une solution de remplacement rentable aux fournisseurs de produits, qui peuvent profiter d'un environnement d'essai clés en main, plutôt que de devoir déployer une nouvelle infrastructure pour effectuer leurs tests. La taille des bouées ainsi que la puissance et la capacité des données de l'infrastructure de soutien ont été pensées pour supporter des équipements ponctuels. Ces équipements peuvent ainsi servir de démonstrateurs pour les personnes souhaitant mettre en place un observatoire. L'observatoire est ainsi rapidement devenu un service essentiel de la communauté et bien qu'ayant dû faire face à d'important défis financiers et techniques, il est

⁴¹ <https://smartbay.marine.ie/>

maintenu en activité 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par année (Carter et coll., 2008). Les données recueillies à l'aide des bouées sont librement accessibles au public en temps réel et sont utilisées par AMEC Earth & Environmental Limited pour élaborer des prévisions météo et sur l'état de la mer à haute résolution, qui sont également disponibles sur le portail Web SmartBay⁴². L'initiative SmartBay est en cours d'expansion à d'autres ports d'escale dans toute la province.

Observatoires câblés

Durant la décennie 2000, la communauté scientifique internationale se mobilise pour étudier les écosystèmes marins côtiers en continu et sur de longues échelles de temps. La mise en place d'observatoires câblés a alors pour objectifs d'apporter de nouvelles connaissances et de donner un nouvel élan à l'étude des océans (Martin Taylor, 2009). Des instruments interconnectés et approvisionnés en électricité sont ainsi déployés pour observer et mesurer en continu la variabilité temporelle des écosystèmes marins. De nombreux projets à l'échelle internationale prévoient ainsi d'établir des réseaux permanents dans les fonds marins. Le Canada, l'Europe, le Japon et les États-Unis en sont les principaux acteurs.



Ocean Networks Canada, Canada

Ocean Networks Canada (ONC) est un organisme d'observation de calibre mondial qui a été créé en 2007 et a fusionné avec des structures préexistantes. Il représente une capacité d'observation océanique scientifique importante pour le Canada avec ses réseaux d'observation câblés et ses observatoires communautaires dont il sera question plus loin (*Observatoires communautaires d'Ocean Networks Canada (ONC)*). Le réseau ONC couvre une vaste étendue géographique et dispose d'infrastructures technologiques de pointe, notamment des câbles sous-marins, des capteurs et des instruments d'observation avancés (Figure 4). L'observatoire NEPTUNE d'ONC, est d'ailleurs le premier observatoire océanique câblé à plusieurs nœuds au monde. Il est situé en Colombie Britannique proche de la ville de Victoria (ONC, 2014). NEPTUNE a été installé en 2006 et devrait avoir une durée de vie d'environ 25 ans (Barnes et Tunnicliffe, 2008). Il couvre près de 800 km dans des eaux de 100 à 2 660 m de profondeur. Son objectif fondamental est d'instrumenter la plaque tectonique Juan de Fuca. Toutefois, bien qu'il poursuive principalement des objectifs sismiques, c'est aussi un observatoire interdisciplinaire. Il sert l'intérêt public en appliquant ses résultats de recherche à d'importantes questions sociétales et à l'élaboration de politiques publiques. Les observations scientifiques rendues possibles par cet observatoire sont très diverses. De 30 à 50 laboratoires sous-marins situés aux nœuds de ce réseau permettent une surveillance en continu toute l'année. Cela comprend un réseau de caméras et d'enregistreurs vidéo, ainsi que des véhicules et des instruments pour mesurer les paramètres de base.

Les suivis en continu d'ONC permettent de soutenir une panoplie d'études concernant notamment les changements océaniques, les zones mortes en croissance, les populations de poissons, la pollution acoustique, la tectonique des plaques, les tsunamis, la géochimie de la croûte océanique, les écosystèmes des grands fonds et l'ingénierie océanique. Plusieurs robots sous-marins parcourent également la zone d'étude pour recueillir d'autres informations ou se rendre sur les lieux d'un événement (p. ex. une éruption sous-marine), tout en se rechargeant et en

⁴² <https://www.smartbay.ie/>

synchronisant leurs informations aux différentes stations du réseau. La diffusion de données se fait en temps réel sur des plateformes Web.

ONC possède un second observatoire câblé d'importance : VENUS. Une première ligne de 4 km a été installée au début de 2006 dans le passage de Saanich, avec un nœud à 100 m de profondeur, près de la zone de transition oxygène-anoxique du fjord de Patricia Bay. Une deuxième ligne de 40 km, qui comporte deux nœuds et s'étend du delta du Fraser à la majeure partie du détroit de Géorgie, a été achevée en 2008. L'objectif de VENUS est de fournir des informations pour faire progresser la compréhension de la mer des Salish, une zone de grande importance écologique pour de nombreuses espèces. L'observatoire vise à faire progresser la recherche océanique au Canada en transmettant des données au grand public et aux communautés scientifiques. Les instruments de VENUS ont envoyé plus d'un demi-milliard de mesures par Internet (Martin Taylor, 2009). Pour gérer cette quantité immense de données, un système d'archivage et de gestion des données a été mis au point. Il permet de lire et d'archiver les données et de les rendre accessibles pendant au moins 25 ans.

Figure 4 : Carte des infrastructures du réseau ONC.



Source : <https://www.oceannetworks.ca/multimedia/maps/>

Les années 2000 : pressions anthropiques croissantes et apparition de nouveaux observatoires thématiques

Au courant des années 2000, des observatoires se mettent en place dans certaines régions clés pour l'observation de la réponse du milieu marin aux effets des changements climatiques et aux impacts anthropiques qui s'intensifient. Ces observatoires allient des technologies de pointe et des méthodes classiques pour collecter des données à haute fréquence ou en continu sur une variété de paramètres

océanographiques et écologiques essentiels pour comprendre les écosystèmes et les variations à long terme dans leur région.

15



Le REBENT, France

Le REBENT (REseau BENThique) a été mis sur pied en 2000, à la suite du naufrage du pétrolier Erika qui a provoqué le déversement de plus de 30 000 tonnes de fioul lourd au large des côtes bretonnes en décembre 1999. Le REBENT ne sera cependant réellement opérationnel qu'en 2003 et il est depuis devenu une référence mondiale dans l'étude du benthos. Les objectifs de REBENT sont de recueillir et de mettre en forme des données relatives à la distribution des habitats et d'assurer le suivi de la biodiversité benthique (faune et flore) dans la zone côtière afin de détecter et de documenter les évolutions spatio-temporelles. Le benthos est en effet reconnu comme un excellent indicateur et intégrateur des changements à long terme. Les données recueillies sont largement diffusées aux scientifiques, aux gestionnaires ainsi qu'au public afin que des décisions éclairées puissent être prises. Dans le cadre du REBENT, seul le macrobenthos marin est étudié (organismes dont la taille est supérieure à 1 mm), dans la zone de balancement des marées et sur les petits fonds côtiers de la France métropolitaine. Le projet REBENT se concentrait initialement sur les côtes bretonnes de la France, mais il s'est peu à peu développé pour couvrir aujourd'hui la majorité des côtes françaises.

16



Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole

Le projet *Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole* (MEOP) voit le jour en 2008 dans le cadre de l'Année polaire internationale. Son objectif initial est de combler les lacunes de connaissances sur les écosystèmes marins polaires en effectuant des profils océanographiques en Arctique et en Antarctique. Ce type d'observatoire en réseau vise à produire une base de données complète, comprenant des données océanographiques obtenues à partir de mammifères marins instrumentés, et d'en assurer le contrôle de la qualité. Cet objectif s'est par la suite étendu aux océans entiers, d'un pôle à l'autre. Aujourd'hui, MEOP coordonne des programmes nationaux dans plus de 10 pays (Australie, Brésil, Canada, France, Allemagne, Groenland, Norvège, Afrique du Sud, Royaume-Uni, États-Unis). MEOP favorise la collaboration et invite tout autre pays où des chercheurs déploient des instruments sur des animaux marins à se joindre à cet effort de recherche. Parmi les mammifères marins, les éléphants de mer sont particulièrement intéressants pour assurer cette mission d'observation, car ils sont capables de plonger continuellement à de grandes profondeurs (590 m en moyenne et jusqu'à 2 000 m) durant longtemps (25 min en moyenne et jusqu'à 80 min). Les phoques, les otaries et les tortues sont également utilisés comme plateformes d'observation. Grâce au programme MEOP, plus de 600 000 profils verticaux de température et de salinité ont été collectés depuis 2004 dans l'océan mondial.

Ces informations sont disponibles dans des bases de données accessibles au public⁴³.

⁴³ <https://www.meop.net/database/>



Système méditerranéen d'observation de l'océan pour l'environnement, France

Le *Mediterranean Ocean Observing System for the Environment* (MOOSE), lancé par l'Institut national des sciences de l'Univers du Centre national de la recherche scientifique (INSU-CNRS), est inauguré dans le nord-ouest du bassin méditerranéen en 2010. Le principal objectif de cet observatoire est de documenter l'évolution à long terme du bassin dans le contexte des changements climatiques et des pressions anthropiques. Le MOOSE vise à mettre en évidence les tendances climatiques et à révéler les anomalies environnementales. Les conséquences attendues des changements climatiques en Méditerranée justifient pleinement un suivi accru du milieu marin côtier et hauturier. L'observatoire utilise une approche multiplateforme comptant à la fois des plateformes eulériennes (mouillages, radars, stations hydrologiques) et des plateformes lagrangiennes (planeurs, flotteurs profileurs). Il fournit des relevés annuels à l'échelle du bassin et des relevés mensuels fixes à partir de navires. Des flotteurs profileurs Argo effectuent également des observations à des échelles allant de saisonnière à décennale. Le système multisite collecte de nombreuses données, permet de détecter et décrire les anomalies environnementales et de définir des indicateurs de performance environnementale efficaces.

2010-2021 : engagement des communautés locales

Après la création des observatoires globaux et la mise en place de réseaux d'observation régionaux, il semble y avoir un intérêt croissant pour un nouveau type d'observatoire répondant à des besoins locaux : les observatoires communautaires. Ceux-ci sont personnalisés en fonction des besoins des communautés côtières et ils sont conçus et adaptés en collaboration avec les décideurs locaux. Les données recueillies auprès des observatoires communautaires (acquises en temps réel et en continu tout au long de l'année) permettent d'appuyer le développement d'activités économiques responsables et peuvent compléter d'autres activités de recherche en cours, ainsi que soutenir des activités éducatives. Parmi les observatoires communautaires, on retrouve notamment les suivants :



Observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles, Canada

L'Observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles (Québec, Canada) est créé en 2013 par l'Institut nordique de recherche en environnement et en santé au travail (INREST). Il s'agit du premier de ce genre sur le Saint-Laurent. Cet observatoire a pour objectif de concevoir une stratégie globale de surveillance à long terme de la baie de Sept-Îles, qui partage un milieu extrêmement riche d'un point de vue environnemental avec le plus important port minéralier en Amérique du Nord. C'est une baie profonde de 45 km² visitée par une biodiversité importante et qui s'ouvre sur un archipel composé de sept îles offrant un rempart naturel aux infrastructures de pointe et aux navires qui s'y ancrent toute l'année. Ce port assure la chaîne de transport d'entreprises de classe mondiale, accueille les plus grands vraquiers du monde et offre une capacité de chargement annuel de 100 Mt de marchandises. Le secteur d'étude de l'observatoire mis en place correspond aux limites de la zone portuaire (100 km²), et les données recueillies permettent à la municipalité et aux industries industrialo-portuaires de cibler certaines de ces données et d'intervenir pour prévenir ou atténuer d'éventuels impacts provenant d'activités anthropiques. L'observatoire a effectué des collectes de données environnementales au cours de ses 5 premières années d'implantation en couvrant 11 thématiques afin d'évaluer l'état de la baie

en regard des pressions anthropiques : qualité de l'eau, sédiments, communautés benthiques, herbiers de zostère, mammifères marins, macroalgues, zooplancton, courants marins et transport de sédiments, luminosité, couvert de glace et décharges municipales et industrielles (INREST, 2018). Un suivi de mesures en continu, relatives aux thématiques de la qualité de l'eau (physico-chimie, biologie et contaminants), est en cours de développement par l'instrumentalisation de la baie et la mise en place d'un système de gestion axé sur la prévention, plutôt que sur l'intervention.

Cet observatoire est un projet pilote qui permettra le développement de protocoles et de méthodologies qui pourraient par la suite être exportés dans d'autres zones industrielles et portuaires du Québec et du Canada.

Observatoires communautaires d'Ocean Networks Canada (ONC)

En 2014, le programme de contribution Ocean Networks Canada est mis en place par Transports Canada, ce qui permet le déploiement d'un nouveau type d'observatoire. Les neuf observatoires communautaires d'Ocean Networks Canada ([Figure 5](#)) (ONC, 2014) sont des versions réduites des principaux observatoires câblés existants (c'est-à-dire NEPTUNE et VENUS, voir section [Observatoires câblés](#)). Ils comprennent typiquement une plateforme d'instruments sous-marins au fond de l'océan reliée par câble à une station côtière à proximité, une caméra vidéo HD et des lumières, un microphone sous-marin et des capteurs pour mesurer les propriétés océanographiques de base de l'eau de mer (température, salinité, CO₂, O₂, Chl *a*, etc.). Les observatoires câblés sont bien adaptés à une collecte de données à haute résolution temporelle qui permet de détecter les changements environnementaux sur des échelles de temps très courtes (Macoun et coll., 2017). La station côtière comprend, quant à elle, une petite station météorologique. Les deux infrastructures reliées peuvent disposer d'autres capteurs d'intérêt local. Ils présentent l'avantage de permettre une surveillance sous-marine continue sans arrêt saisonnier. La création de ces observatoires communautaires donne l'occasion de créer de nouvelles collaborations avec des communautés côtières allochtones et autochtones et de répondre à leurs interrogations tout en faisant progresser les connaissances scientifiques. On observe ainsi une implication grandissante des communautés qui vont parfois jusqu'à devenir propriétaires de l'observatoire, en tout ou en partie.

Figure 5 : Carte des observatoires communautaires du réseau ONC.



Source : <https://www.oceannetworks.ca/multimedia/maps/>

19  **L'observatoire de Cambridge Bay, Canada**

L'observatoire de Cambridge Bay, premier observatoire de type communautaire du réseau ONC, a été installé en 2012. Il est situé sur l'île Victoria, dans le territoire inuit du Nunavut. La plateforme d'instruments sous-marins est située à une profondeur d'environ 6 m et est reliée par câble à une connexion de quai. L'observatoire a pour objectif de recueillir des données à long terme afin de mieux comprendre l'évolution rapide de l'environnement côtier de l'océan Arctique dans le contexte des changements climatiques. Cet observatoire se distingue par sa conception relativement simple pensée spécifiquement pour répondre aux besoins de la communauté. Il est constitué d'une plateforme légère, mais robuste, qui peut être abaissée à la main depuis un quai ou un petit navire.

En plus des capteurs typiques, la plateforme héberge un récepteur d'étiquettes à poissons pour leur suivi géographique, ainsi qu'un instrument pour mesurer l'épaisseur de la glace. Sur le quai, une caméra terrestre surveille la formation de glace de surface en plus de la station météorologique qui fournit des informations sur les conditions atmosphériques actuelles. Les données sont transmises depuis le quai vers un portail Internet au moyen d'une liaison sans fil permettant aux membres de la communauté d'accéder facilement à des informations sur leur environnement local (ONC, 2014).

20



Le Prince Rupert Community Observatory, Canada

Mis en place en 2016 au nord de la Colombie-Britannique sur le territoire Ts'msyen, l'observatoire de Prince Rupert est un câble sous-marin de 60 km situé à une profondeur de 28 m. L'objectif principal de l'observatoire communautaire est de disposer d'une base de référence de l'environnement marin local documentant le volume existant du trafic maritime, préalable à l'accroissement des activités portuaires. Les systèmes d'observation ont été élaborés en collaboration avec les membres des communautés et les dirigeants des nations Metlakatla, Lax Kw'alaams, Kitselas, Kitsumkalum et Gitxaala, ainsi qu'avec les administrateurs du port de Prince Rupert. Les données scientifiques provenant de l'observatoire, qui sont accessibles au public, doivent contribuer à l'évaluation de tout impact à long terme, cumulatif ou lié à un potentiel accident.

L'observatoire est équipé d'une station côtière comprenant une station météorologique et une caméra côtière. De plus, un système radar (CODAR Ocean Sensors) à haute fréquence (HF) mesure la vitesse et la direction des courants de surface, et une antenne AIS permet de suivre les déplacements des grands navires dans la région.

21



Kitamaat Village Community Observatory, Canada

Le Kitamaat Village Community Observatory est lui aussi créé en 2016. Cet observatoire communautaire est situé à la tête du chenal Douglas dans le bras de mer de Kitimat, près de la communauté de Kitamaat en Colombie-Britannique. La plateforme câblée est située à 65 m sur le plancher de l'océan et s'étend sur environ 300 m. Elle est gérée par la communauté autochtone Haisla. Son objectif est de disposer d'une base de référence sur l'environnement marin local avant de commencer à aménager le front de mer et d'augmenter le trafic maritime dans la région. La région connaît une augmentation substantielle du développement industriel qui accroît le potentiel de développement de ports d'exportation d'énergie supplémentaires. Cette situation entraînera de nouvelles possibilités économiques et des effets potentiels sur l'environnement local dans le village de Kitamaat et ses environs y compris la rivière et le bras de mer de Kitimat. On y retrouve les équipements standard des observatoires communautaires d'ONC sans ajout de capteurs d'intérêt local.

La biodiversité est surveillée à l'aide de relevés réguliers de la faune et de la flore locales, y compris les poissons, les invertébrés, les mammifères et les oiseaux. La qualité de l'air (dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, ozone et particules fines) est également surveillée, ainsi que les changements climatiques, à travers des mesures de la température de l'air et de l'eau, de la quantité de précipitations et du niveau de la mer.

22



Campbell River Community Observatory, Canada

Le Campbell River Community Observatory est, quant à lui, installé en 2016 dans la rivière Campbell qui s'ouvre sur le détroit de Georgia en Colombie-Britannique, sur le territoire des nations autochtones Kwakwaka'wakw et Salish de la côte. La plateforme câblée est située juste au-dessous du quai à environ 10 m de profondeur sur le fond marin. Le passage Discovery a connu une croissance progressive du trafic maritime ces dernières années, et le nombre et la taille des navires pourraient augmenter si le terminal d'Elk Falls est réaménagé. Il est donc

primordial d'évaluer les conditions marines locales. On y mesure les paramètres standard des observatoires communautaires d'ONC, qui sont présentés au [Tableau 1](#). Cet observatoire communautaire est équipé d'une station côtière qui comporte une station météorologique, d'une caméra côtière et est bonifié d'une antenne AIS. Par ailleurs, le phare de Cape Mudge a été équipé d'un système radar WaMoS afin de mesurer les courants de surface, la hauteur des vagues et leur direction.

23



L'observatoire communautaire de Gascoyne Inlet, Canada

L'observatoire de Gascoyne Inlet est installé en 2017. Il est situé à Gascoyne Inlet, sur l'île Devon, au Nunavut, dans l'aire marine nationale de conservation de Tallurutiup Imanga. La plateforme câblée est située à 120 m de profondeur. Bien que cet observatoire soit situé dans une zone inhabitée, il est utilisé par de nombreux chercheurs d'où son appellation communautaire. Il a pour objectif d'étudier la formation et la fonte des glaces, ainsi que de documenter l'environnement sonore de cette zone. L'observatoire est aussi utilisé en collaboration avec Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC) afin de tester des équipements de recherche dans des conditions extrêmes (température de l'air de - 40 °C et température de l'eau de - 2°C), mais aussi par le MPO afin d'acquérir des données pour développer des modèles de prédiction du couvert de glace.

23



L'observatoire communautaire de Burrard Inlet, Canada

L'observatoire de Burrard Inlet est installé en 2019 sur le territoire de la première nation Tseil-Waututh dans la région de Vancouver en Colombie Britannique. L'observatoire se situe à 34 m de profondeur. Il s'agit du premier observatoire qui appartient à part entière à une communauté des Premières Nations et dont ONC assure uniquement la maintenance. L'observatoire a pour objectifs de faire un suivi de la pollution sonore et du transport maritime dans la zone, ainsi que de documenter leurs effets sur les sources de nourriture.

25



L'observatoire communautaire de China Creek, Canada

L'observatoire de China Creek est installé en 2019 en partenariat avec la Première Nation Hupacasath. Il se situe à 111 m de profondeur.

26



L'observatoire communautaire de Hartley Bay, Canada

L'observatoire de Hartley Bay est installé en 2020 à environ 630 km au nord de la ville de Vancouver en Colombie-Britannique, sur le territoire de la Première Nation Gitga'at, dans un village uniquement accessible par bateau. Cet observatoire appartient pour moitié à la Première Nation Gitga'at et à ONC pour l'autre moitié. L'observatoire communautaire a pour objectif le suivi du trafic maritime, de ses effets sur les mammifères marins ainsi que sur les sources de nourriture de la communauté. L'observatoire comprend une station météorologique sur terre et une plateforme située à 96 m de profondeur.



L'observatoire communautaire de Holyrood Bay, Canada

L'observatoire communautaire de Holyrood Bay est installé en 2021 sur le territoire traditionnel de la Première Nation Qalipu Mi'kmaq, à Terre-Neuve. Il s'agit d'une collaboration avec le Marine Institute de l'Université Memorial de Terre-Neuve. L'observatoire comprend une plateforme multi-paramètres située à 84 m de profondeur. L'objectif de cet observatoire est de documenter l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes subarctiques. Ainsi, l'observatoire permet d'établir un état de référence de la composition des écosystèmes et de leurs réactions face aux efflorescences printanières de phytoplancton de plus en plus fréquentes, notamment en ce qui concerne la disponibilité de nourriture.

Le Canada se démarque dans le domaine des observatoires, et ONC est souvent cité comme exemple de bonnes pratiques et de collaboration entre les scientifiques et les communautés locales. Ce type d'observatoire n'est toutefois pas un concept unique au Canada. Il existe d'autres initiatives similaires dans le monde, où des communautés locales sont impliquées dans la collecte de données scientifiques. La mise en place d'un observatoire est une tâche complexe et coûteuse qui implique la présence d'équipes de scientifiques et d'équipements sophistiqués. À travers l'évolution de ceux-ci, les scientifiques ont réalisé l'importance de collaborer au moyen de réseaux et l'avantage de la participation du public, non seulement dans la conception d'observatoires, mais également dans la collecte de données afin de mieux cibler les objectifs à atteindre et conséquemment les capteurs à installer sur les plateformes sélectionnées.

Observatoires citoyens

De plus en plus de programmes de science participative (ou observatoires citoyens) sont mis en place pour compléter les données collectées par les autres systèmes d'observation. La participation des citoyens à la démarche permet d'accélérer la recherche tout en leur permettant de se réapproprier leur environnement.

En France, il existe plusieurs observatoires citoyens portant sur les océans. Depuis plus de 10 ans, le programme BioLit⁴⁴, un réseau de suivi de la biodiversité marine sur les côtes françaises, permet aux citoyens de participer à la démarche scientifique en effectuant des observations et des prélèvements d'organismes marins, et de transmettre leurs données à des chercheurs. Aux États-Unis, le programme Ocean Observers⁴⁵ permet de surveiller les conditions météorologiques et la qualité de l'eau des océans. Les citoyens peuvent y participer en installant des instruments de mesure dans les zones côtières et en transmettant les données collectées à des scientifiques.

Au Québec, les observatoires citoyens axés sur les océans actuellement en place se concentrent principalement sur les suivis de populations animales, que ce soient les baleines avec le Réseau d'observation des mammifères marins (ROMM)⁴⁶, les capelans⁴⁷ ou les espèces envahissantes avec le programme sentinelle du MELCCFP⁴⁸.

⁴⁴ <https://www.biolit.fr/>

⁴⁵ <https://www.oceanobservers.org/>

⁴⁶ <https://observation.navigationsbaleines.ca>

⁴⁷ <https://www.ecapelan.ca/>

⁴⁸ <https://www.pub.enviroweb.gouv.qc.ca/scc/#no-back-button>

6. Centres de données

Au fil des ans, face à la quantité croissante de données provenant de diverses sources, des centres de données voient le jour afin de contribuer aux observatoires. Ceux-ci travaillent à la normalisation et à la standardisation des flux importants de données et permettent de les rendre disponibles grâce à des portails interopérables facilitant le partage entre les producteurs et les utilisateurs.



CORIOLIS, France

En France, le centre de données CORIOLIS est une initiative des sept instituts impliqués dans l'opérationnalisation de l'océanographie (le Centre national d'études spatiales (CNES), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), l'Ifremer, l'Institut polaire français Paul-Émile Victor, l'Institut de recherche pour le développement, Météo-France et le Service hydrographique et océanographique de la Marine), qui se sont associés en 2001. Le CORIOLIS a très vite pris une dimension internationale avec la prise en charge des données des systèmes d'observation globaux dont Argo, OceanSites, Global Ocean Surface Underway Data (GOSUD)⁴⁹, DBCP et Global Temperature and Salinity Profile Programme (GTSP) dans sa base de données. L'objectif est d'organiser et de maintenir l'acquisition de données, en temps réel et en mode différé, à partir des mesures in situ. Les observations sont collectées sur les portails de données des réseaux mondiaux et à travers des collaborations. Des contrôles automatiques sont effectués afin de s'assurer de la cohérence des jeux de données. La distribution des données se fait au moyen de protocoles FTP et de différentes plateformes Web. Les paramètres actuellement diffusés par CORIOLIS sont principalement les mesures de paramètres physiques tels que la température, la salinité, le courant et le niveau de la mer. Puisque les flux de données sont importants, tant pour la couverture spatiale que relativement à la fréquence d'enregistrement des mesures, CORIOLIS diffuse les résultats sous forme de séries temporelles et de profils ou sections à haute résolution verticale ou horizontale. Le centre CORIOLIS fournit aux utilisateurs des données sous forme de produits en temps réel journalier (24 h à 48 h) ou en temps différé (compilation annuelle).



L'Observatoire global du Saint-Laurent, Canada

Au Québec, l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL), mis sur pied par le MPO, a été mis en place en 2005 par plusieurs organisations des milieux de l'enseignement supérieur, gouvernementaux, privés et communautaires, afin d'assurer une gestion durable de l'écosystème du Saint-Laurent, des Grands Lacs jusqu'au golfe. Cette gestion durable passe par l'accessibilité des données collectées par plusieurs organisations. L'OGSL est une plateforme ouverte, intégrant les données et les informations nécessaires à la compréhension et gestion efficace des écosystèmes côtiers, fluviaux et marins du Saint-Laurent. L'OGSL offre un accompagnement à ses membres, de la gestion des données à leur diffusion, dans des outils de visualisation spécialisés. Il a permis de centraliser plus de 20 variables environnementales. Les jeux de données partagés sur le site Internet de l'OGSL sont soumis à un contrôle de qualité et sont ensuite archivés, partageables et réutilisables. Enfin, ces données sont encodées selon des

⁴⁹ <https://www.gosud.org/>

normes et des standards internationaux de façon à ce qu'elles soient utilisables par d'autres systèmes informatiques. La clientèle visée est très large et comprend à la fois les producteurs d'informations eux-mêmes, le grand public, les tables de concertation du milieu, l'industrie, les clientèles spécialisées comme les chercheurs, les bureaux d'études ou encore diverses communautés de pratique tels le transport maritime ou l'évaluation environnementale. Les données de conditions maritimes (paramètres physicochimiques et météorologiques) et de navigation (incluant les courants et les marées) sont fournies en temps réel, alors que les relevés de biodiversité et données environnementales des missions océanographiques de l'ISMER, ainsi que les jeux de données provenant des différentes organisations sont compilés et disponibles en différé.

30



National Centers for Environmental Information, États-Unis

Aux États-Unis, le National Centers for Environmental Information (NCEI) de la NOAA a été créé en 2015 et gère l'une des collections de données environnementales les plus importantes et les plus diversifiées au monde. Il comprend des données atmosphériques, côtières, géophysiques et océaniques. Les principaux paramètres océanographiques, mesurés dans différents océans et disponibles au sein du NCEI, comprennent les paramètres physiques, tels que la température, la salinité, la pression, la densité, la hauteur des vagues, la direction et la vitesse du vent au-dessus de l'océan, et les paramètres biogéochimiques, tels que la concentration de CO₂ et les niveaux de pH. Ces données sont acquises par de nombreuses sources et projets ainsi que par des scientifiques indépendants. Le NCEI gère ces données à travers la base de données mondiale sur les océans (World Ocean Database) (plus de 20 000 ensembles de données) qui s'étendent des explorations du capitaine James Cook en 1772 jusqu'à nos jours, y compris les informations recueillies par le programme Argo. Ces données océanographiques sont utilisées pour comprendre les processus océaniques, évaluer les changements climatiques et atmosphériques, surveiller les écosystèmes marins et fournir des informations vitales pour la pêche, la navigation et la sécurité maritime. Elles peuvent être consultées par éléments spécifiques (date, zone géographique, type de sonde, etc.) et variables mesurées.

Le NCEI convertit les connaissances scientifiques en informations dynamiques et utilisables afin d'éclairer la prise de décision au sein du gouvernement, du milieu universitaire et du secteur privé. Il organise les données de manière cohérente dans un format uniforme. Les métadonnées enrichies améliorent la capacité du public à trouver les collections de données archivées et à les consulter.

31



Système canadien d'observation des océans, Canada

À Halifax, en Nouvelle-Écosse, en 2019, le MPO et le réseau Marine Environmental, Observation, Prediction and Response Network (MEOPAR)⁵⁰ lancent le Système canadien d'observation des océans (SIOCC), qui représente le point de convergence de l'océanographie et des activités d'observation océanique au Canada. Le SIOCC vise à rassembler des données fragmentées et isolées au sein d'une plateforme nationale accessible. Ces données proviennent de différentes sources telles que les satellites, les avions, les bouées et les navires pour fournir une image

⁵⁰ <https://meopar.ca/>

complète de l'état de l'océan. Le SIOOC relie les régions entre elles et les coordonne nationalement afin d'élever l'observation des océans canadiens aux standards internationaux. Le SIOOC s'assure que les besoins locaux sont comblés et conséquemment établit des associations régionales pour soutenir les multiples utilisateurs des océans. Ainsi, les données de l'OGSL, des Grands Lacs jusqu'au golfe du Saint-Laurent, qui est un des membres fondateurs du SIOOC, y sont partagées, aux côtés des données du SIOOC de l'Atlantique (côte est canadienne du Labrador jusqu'à la baie de Fundy) et du Pacifique (entrée de Dixon jusqu'au détroit de Juan de Fuca). Le SIOOC présente une sélection de VOE harmonisées avec le programme du Système global d'observation des océans (GOOS). Ces partenariats génèrent de l'information et facilitent des solutions adaptées aux milieux afin d'améliorer la compréhension des océans. Ils permettent aux utilisateurs de découvrir, d'accéder et de visualiser des données de grande qualité en ligne. Treize paramètres sont disponibles pour la visualisation⁵¹ : les courants, le carbone inorganique, les nutriments, la couleur de l'océan, la pollution sonore, les échanges à l'interface air-eau de l'océan, l'oxygène, les matières particulaires et le phytoplancton.

En résumé, les centres de données sont essentiels pour assurer l'accessibilité, la découvrabilité et l'utilisation efficace des données océanographiques à l'échelle mondiale. Ils facilitent la collaboration entre les scientifiques et permettent une analyse approfondie des données.

Cet aperçu de quelques observatoires et centres de données montre une évolution marquée des préoccupations en matière de surveillance de la qualité des milieux côtiers et marins, le tout en un peu plus d'un siècle. L'océan, qui pouvait initialement être vu comme un milieu d'usage, est aujourd'hui davantage considéré comme un système rendant des services écologiques qu'il convient de préserver dans sa fonctionnalité globale. De nos jours, l'observation et l'étude des océans ne sont plus seulement destinés à un groupe restreint de scientifiques. Les résultats obtenus sont consultés par un nombre croissant de personnes afin de discuter d'enjeux locaux, mais aussi globaux. De plus, les données recueillies sont généralement accessibles au moyen de plateformes en ligne et mises à jour en continu, ce qui les rend accessibles au grand public. La mission des observatoires a donc grandement évolué au cours du temps, et les nouveaux observatoires visent de plus en plus à agir comme des sentinelles devant les modifications des océans ou des environnements côtiers afin d'anticiper les catastrophes naturelles ou les impacts environnementaux découlant d'activités anthropiques. À leurs débuts, les observatoires étaient presque exclusivement destinés à des scientifiques passionnés qui avaient pour uniques buts la découverte des océans et la compréhension des processus qui les gouvernent. Au fil du temps, avec les bouleversements environnementaux, ce besoin a évolué vers une volonté collective de mieux comprendre et protéger ces milieux essentiels. Il est devenu primordial de comprendre comment les océans interagissent entre eux, ainsi que leur lien avec le climat et les impacts que peuvent avoir les activités humaines.

⁵¹ <https://explore.cioos/?lang=en>

7. Organisations prenant part à la lutte contre les déversements d'hydrocarbures

L'augmentation croissante des activités anthropiques en milieu maritime induit une augmentation des risques d'incidents maritimes tels que les déversements d'hydrocarbures. Ainsi, de plus en plus d'instituts de recherche et de programmes de financement axés sur les déversements d'hydrocarbures voient le jour. Bien que ces organisations n'aient pas pour mission première d'observer les océans, leur mandat vise à étudier le comportement des polluants en milieux marins et dans les eaux intérieures afin de développer des équipements et des méthodes de détection et de récupération efficaces pour protéger et restaurer la qualité des environnements marins à la suite d'un incident maritime. Quelques exemples de ces organisations sont présentés ci-après, et le [Tableau 4](#) présente les types de services proposés par chacune de ces organisations.

Tableau 4 : Liste des services offerts par les organisations impliquées dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures présentées dans cette synthèse.

N°	Organisation	Pays	Type polluant	Services offerts									
				Services-conseils	Formations	Documentations et guides	Récupération du polluant	Estimation des dommages	Développement d'équipements	Tests d'équipements	Comportement des polluants	Projets de recherche	
32	 SINTEF	Norvège	Hydrocarbures	x	x	x				x		x	x
33	 ITOPF	Angleterre	Hydrocarbures et SNPD	x	x	x		x					
34	 CEDRE	France	Hydrocarbures, SNPD et plastiques	x	x	x		x			x	x	x
35	 Ohmsett	États-Unis	Hydrocarbures et SNPD		x						x	x	x
36	 OSRI	États-Unis	Hydrocarbures			x		x	x			x	x
37	 AMOSC	Australie	Hydrocarbures	x	x		x				x		x
38	 CMO	Canada	Hydrocarbures et SNPD			x						x	x
39	 IRMP	Canada	Hydrocarbures			x			x	x	x	x	x

Note : Substances nocives et potentiellement dangereuses (SNPD).

Une fois de plus, la liste des organisations présentées dans cette synthèse n'est pas exhaustive. Toutefois, les organisations présentées ici sont très bien établies, reconnues et elles ont tissé au fil du temps de nombreuses collaborations avec le Québec et le Canada.

32



SINTEF, Norvège

Le SINTEF (en norvégien : Stiftelsen for industriell og teknisk forskning, « La Fondation pour la recherche industrielle et technique ») est un institut de recherche et développement indépendant qui a été créé en 1950 et qui est basé en Norvège. Il œuvre dans de nombreux secteurs et a développé une expertise considérable dans le domaine de la lutte contre les déversements d'hydrocarbures. Le SINTEF possède de nombreux laboratoires et mène notamment des projets de recherche sur la compréhension des propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures, leur comportement en mer et l'efficacité des différentes options d'intervention. Il travaille aussi au développement d'équipements pour récupérer les hydrocarbures à la suite d'un déversement. Le SINTEF a mis au point un système de gestion des déversements à la fine pointe de la technologie : le *Oil Spill Contingency And Response* (OSCAR). OSCAR est un outil de simulation dynamique tridimensionnel pour la planification et la réponse aux marées noires. L'outil permet, à partir d'une plateforme ou d'un navire, de fournir des informations sur le comportement de l'hydrocarbure, de prédire le devenir et les effets de la nappe et de planifier les mesures adaptées grâce à des analyses des facteurs de contingence.

33



International Tanker Owners Pollution Federation

L'International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) est une organisation internationale à but non lucratif ayant des bureaux à Londres et à Singapour et qui a été fondée en 1968 à la suite du déversement du Torrey Canyon par des compagnies pétrolières du monde entier. Sa mission est d'offrir des services techniques pour la préparation et la réponse à des incidents maritimes impliquant des hydrocarbures et tout autre type de polluants afin d'en limiter les impacts sur l'environnement et les communautés touchées. L'ITOPF fournit aujourd'hui une gamme de services techniques, notamment en intervention d'urgence, des conseils sur les techniques de nettoyage, l'évaluation des dommages causés par la pollution, l'aide à la planification de la lutte contre les déversements et de la formation. L'ITOPF dispose aussi d'une importante documentation sur les substances dangereuses et potentiellement nocives (SNPD) et soutient des recherches sur les nouveaux carburants. L'ITOPF investit également dans la recherche et le développement qui puissent l'aider à remplir sa mission et est reconnu dans le monde entier comme une source d'expertise technique objective dans le domaine du transport maritime et des déversements accidentels d'hydrocarbures et de produits chimiques par les navires.

34



Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux, France

Créé en 1979 dans le cadre des mesures prises à la suite du naufrage du navire pétrolier Amoco Cadiz pour améliorer la préparation à la lutte contre les pollutions accidentelles des eaux et renforcer le dispositif d'intervention français, le Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (Cedre) est responsable, à l'échelle nationale, de la documentation, de la recherche et des expérimentations concernant les produits polluants (hydrocarbures, produits chimiques ainsi que conteneurs et plus récemment déchets aquatiques), leurs effets et les méthodes et moyens spécialisés utilisés pour les combattre. Le Cedre cherche, développe et teste des outils et produits de lutte contre les pollutions marines

accidentelles et s'intéresse aux autres aspects de l'intervention tels que la détection des pollutions, leur suivi, leur modélisation, les banques de données et les systèmes d'aide à la décision. Sa mission de conseil et d'expertise englobe aussi bien les eaux marines que les eaux intérieures de surface. Les travaux poursuivis portent sur les démarches de dépollution menées sur l'eau et le littoral et couvrent l'ensemble des techniques, de la collecte des hydrocarbures à l'élimination des déchets. Le Cedre dispose de nombreux équipements et installations pour mener des formations et des essais sans mettre en danger l'environnement. Parmi ces équipements, on trouve une plage artificielle, un canal d'essais appelé le polludrome, une colonne d'expérimentation pour étudier le comportement des substances dans l'eau, un banc de brûlage et un banc de chimie. Le centre dispose en outre d'une serre d'expérimentation sur les organismes aquatiques, d'un banc d'écotoxicologie et d'un laboratoire équipé d'appareils d'analyse avancés pour étudier le comportement des produits pétroliers et évaluer l'efficacité des produits d'intervention. Depuis sa création, le Cedre a établi de nombreux partenariats internationaux avec des acteurs majeurs de la lutte contre les pollutions accidentelles des eaux : des organisations internationales, des organisations régionales, des administrations étrangères, des instituts de recherche et le secteur privé. L'expertise du Cedre est reconnue internationalement, et le centre est régulièrement interpellé pour intervenir sur des pollutions marines partout sur la planète. Le Cedre est à la disposition des autorités nationales et locales 24 h/24 et les représentants de l'État peuvent le solliciter en cas d'incident pour l'envoi de spécialistes à leur poste de commandement de lutte.

35



Oil Spill Response Research & Renewable Energy Test Facility, États-Unis

Au New Jersey, le *Oil Spill Response Research & Renewable Energy Test Facility* (Ohmsett) permet de mener des recherches sur le comportement des polluants en milieu marin et d'améliorer les technologies et les interventions lors d'un déversement. Ohmsett a été créé en 1974 et est géré par le Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE). Il offre un environnement de test pour des utilisateurs du monde entier sous forme de bassin d'essai permettant de simuler des conditions marines parmi les plus grands d'Amérique du Nord (203 m de long sur 20 m de large sur 2,4 m de profondeur). Il est équipé de nombreux instruments de mesure afin de caractériser le comportement des polluants ainsi que de tester tant les instruments de mesure déployés en mer que les techniques de récupération. Le centre offre des formations aux intervenants en leur permettant de mettre en pratique la théorie apprise dans des conditions réelles et de se familiariser avec les techniques et technologies de lutte contre les déversements. À titre d'exemple, la plupart des intervenants qui ont été mobilisés lors du déversement du Deep Water Horizon (2010) avaient reçu leur formation à Ohmsett, et la majorité des équipements qui ont alors été utilisés pour récupérer le polluant avaient été testés et/ou évalués à Ohmsett alors qu'ils étaient soit au stade de prototype, soit déjà commercialisés. Enfin, le dispersant utilisé lors de cette catastrophe avait aussi été testé à Ohmsett sur différents types de polluants, de même que les équipements permettant de suivre ses effets et la formation portant sur leur utilisation. D'ailleurs, bon nombre des produits d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures disponibles aujourd'hui sur le marché ont été mis à l'essai à Ohmsett. À ce jour, plus de 22 pays ont utilisé les installations d'Ohmsett pour de la formation ou des tests de méthodes et d'équipements.



Oil Spill Recovery Institute, États-Unis

Le Oil Spill Recovery Institute (OSRI), basé en Alaska, est créé en 1990, à la suite du déversement d'hydrocarbures de l'Exxon Valdez et dans le cadre du *Oil Pollution Act* de 1990 (OPA 90⁵²). La mission de l'institut est alors de désigner les meilleurs équipements, techniques et matériaux disponibles pour faire face aux déversements d'hydrocarbures et de déterminer, de documenter, d'évaluer et de comprendre les effets à long terme du déversement de pétrole de l'Exxon Valdez sur les ressources naturelles du détroit Prince William (OSRI, 2021). La mission de l'OSRI évolue au fil du temps et, en 1996, la zone d'intérêt de l'institut s'étend aux environnements marins arctiques et subarctiques. Plusieurs outils utiles aux intervenants sont développés au cours des dernières années, dont l'*Environmental Response Management Application* (ERMA). Il s'agit d'un outil géographique qui contient des informations historiques et en temps réel destinées aux intervenants en cas de déversement. En termes de surveillance et de détection, l'OSRI se concentre sur l'adaptation et la mise à l'essai de technologies existantes conçues pour une variété de navires et d'aéronefs qui pourraient être mobilisés lors d'interventions liées à des déversements en Alaska. L'OSRI prévoit notamment de déployer un grand nombre d'équipements pour le suivi et l'étude des glaces et de leur dérive sur une longue période. L'OSRI appuie donc des projets de recherche et de démonstration qui améliorent la compréhension et l'intervention en cas de déversements d'hydrocarbures dans des environnements marins arctiques et subarctiques, où la présence de glace complexifie les interventions.



Australian Marine Oil Spill Centre, Australie

L'Australian Marine Oil Spill Centre (AMOSC) est un organisme à but non lucratif créé en 1991 par des compagnies pétrolières. Il s'agit d'un centre industriel mis en place pour une intervention rapide en cas de déversement d'hydrocarbures. La mission de l'AMOSC est d'accompagner ses clients dans la préparation de plans d'intervention, d'exercices, de formation des intervenants, de maintenance et de location d'équipements. L'éventail d'outils disponibles comprend des dispersants et des équipements de confinement, de récupération, de nettoyage, d'absorption et de communication. L'AMOSC dispose d'une équipe permanente de treize personnes et coordonne de plus le personnel issu de l'industrie formé pour intervenir. Le centre agit donc aussi bien aux étapes de préparation que d'intervention.

⁵² https://www.uscg.mil/Mariners/National-Pollution-Funds-Center/about_npfc/opa/

Organisme d'intervention du Québec

Au Québec, l'organisme d'intervention agréé par Transports Canada est la Société d'intervention maritime, est du Canada (SIMEC). Elle a été fondée en 1995 par plusieurs grandes sociétés pétrolières canadiennes, afin de répondre aux exigences des lois canadiennes. La SIMEC possède une accréditation qui doit être renouvelée tous les trois ans. Son mandat consiste à intervenir rapidement en cas de déversement d'hydrocarbures en milieu marin dans l'est du Canada et au sud du 60^e parallèle.

38



L'observatoire marin de Churchill (The Churchill Marine Observatory), Canada

L'observatoire marin de Churchill (CMO) fait partie de l'Université du Manitoba et est une installation de recherche multidisciplinaire qui a entrepris ses activités en 2021. L'observatoire est situé au seul port en eau profonde de l'Arctique canadien, à Churchill, au Manitoba, ce qui permet aux chercheurs d'accéder facilement à la vie marine arctique. Le CMO fournit notamment des installations pour des études de pointe sur la détection, l'impact et l'atténuation des déversements d'hydrocarbures et de contaminants connexes dans des environnements marins et d'eau douce, mais également dans des eaux couvertes de glace de mer. Il comprend des mésocosmes recréant l'interface océan-glace de mer, composés de deux bassins extérieurs conçus pour accueillir simultanément des expériences avec des contaminants et des expériences de contrôle selon divers scénarios de déversement. L'eau est puisée directement de l'estuaire du Churchill et offre la possibilité d'utiliser de l'eau de mer ou de l'eau douce. Les bassins permettent également d'étudier les processus des interfaces océan-glace-atmosphère ainsi que le couplage eau marine-eau douce. L'observatoire comprend également un système d'observation environnementale qui se compose d'une série de mouillages situés le long des voies navigables depuis et vers le port de Churchill. Ce système permet de recueillir des données sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du milieu. Par ailleurs, le CMO bénéficie d'un navire de recherche exploité en partenariat avec l'Arctic Research Foundation, le *William Kennedy*, un ancien navire de pêche de 19,8 m qui a été modernisé pour des expéditions scientifiques dans l'Arctique. Il dispose de 40 m² d'espace de laboratoire et d'une série d'instruments pour le prélèvement et l'analyse d'eau et de sédiments. De plus, il peut effectuer des traits de chalut benthique et pélagique ainsi que de filet à plancton.

La plupart des centres de recherche et des organisations actifs dans la recherche sur les hydrocarbures et leurs impacts sur l'environnement ont pu bénéficier ces dernières années d'importants financements gouvernementaux. L'exemple de l'initiative de recherche multipartenaire canadienne présenté ci-après est un bel exemple de collaboration internationale soutenue par le gouvernement canadien.



L'Initiative de recherche multipartenaire (Multi-Partner Research Initiative)

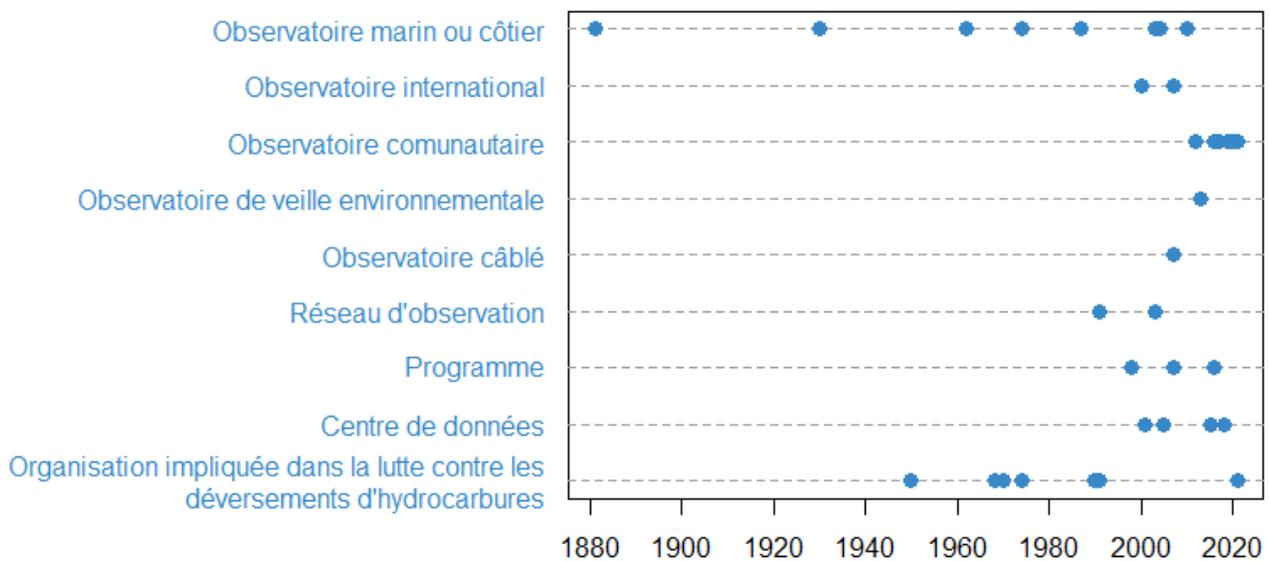
L'Initiative de recherche multipartenaire (IRMP, MPRI en anglais) est un programme de recherche fédéral qui fait partie du Plan de protection de océans (PPO) amorcé en 2016 et renouvelé en 2022 par le gouvernement du Canada. L'objectif de cette initiative est d'améliorer les protocoles d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures et de guider le processus décisionnel afin d'en limiter les impacts environnementaux. L'IRMP se concentre sur six domaines : les agents de traitement des déversements, le brûlage in situ, la translocation de pétrole, la décantation et l'élimination des déchets huileux, l'atténuation naturelle et les domaines de recherche transversaux (National Academies of Sciences, 2022). L'IRMP a permis d'établir un réseau de recherche national et international intégré comptant des organismes gouvernementaux, des universités, des organismes d'intervention, l'industrie pétrolière, des communautés autochtones et d'autres experts scientifiques. Ce réseau bénéficie des apports de plus de 300 chercheurs issus de plus de 80 institutions et de 14 pays menant des projets de recherche pour améliorer la compréhension de l'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures dans les environnements extracôtiers, côtiers et terrestres. Les activités menées dans le cadre du programme de l'IRMP visent à améliorer les technologies d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures et leur efficacité afin de s'assurer que le Canada est bien équipé pour prendre des décisions éclairées afin d'en atténuer les répercussions environnementales et de favoriser le rétablissement de l'habitat.

Avec l'augmentation du trafic maritime, la communauté internationale reconnaît de plus en plus l'importance de la lutte contre la pollution causée par les déversements d'hydrocarbures. Dans l'éventualité de tels incidents, il est nécessaire de veiller à ce que des mesures de prévention et de préparation performantes soient mises en place afin de garantir une intervention rapide et efficace. Cela implique une bonne connaissance de l'environnement touché par l'acquisition de données historiques, mais aussi le développement de nouveaux instruments aptes à détecter instantanément de faibles quantités d'hydrocarbures dans des conditions climatiques difficiles et d'établir rapidement la composition chimique de la pollution. Le développement de ces solutions innovantes permet ainsi de limiter le temps écoulé entre le début d'un déversement d'hydrocarbures et le début de l'intervention. Obtenir rapidement un maximum d'informations permet aussi aux personnes impliquées de mieux diriger les interventions initiales et les opérations de nettoyage qui suivront en choisissant des techniques adaptées ayant pour objectif de limiter les impacts de la pollution sur l'environnement et de favoriser son rétablissement.

8. Conclusion

Alors que les observatoires, réseaux et programmes ont accès à de nouvelles technologies qui font progresser les connaissances sur les environnements marins et côtiers, les activités humaines font peser de nouvelles menaces sur ceux-ci et engendrent des préoccupations croissantes. Les chercheurs issus de diverses disciplines sont donc de plus en plus sollicités pour fournir des données scientifiques qui permettent de mieux comprendre ces milieux à travers le monde afin d'appuyer les actions qui sont mises en place pour les protéger. Cette synthèse permet de présenter une description de quelques observatoires, réseaux et programmes qui se sont développés de manière modérée tout au long du 19^e et du 20^e siècle, puis de manière exponentielle à partir du 21^e siècle, tout en s'adaptant à l'évolution des besoins (Figure 6). La mission des observatoires dépasse maintenant la simple recherche scientifique et inclut l'exercice de fonctions clés tant à l'échelle de l'océan mondial qu'à celle des milieux côtiers.

Figure 6 : Date de création des observatoires présentés dans cette synthèse selon leur vocation (telle qu'elle est décrite dans le texte).



8.1. Pertinence de l'implantation d'observatoires

La création d'un observatoire répond généralement à un besoin d'informations liées au contexte particulier d'un territoire qui est soumis à des pressions anthropiques importantes. Le projet d'implantation d'un observatoire environnemental de base (OEB) à Sept-Îles en est un exemple. La création d'un observatoire peut également faire partie d'une démarche plus vaste de surveillance globale des océans. Certains observatoires ont un objectif applicatif direct, c'est-à-dire qu'ils couplent leurs observations à des actions de recherche servant à répondre à un besoin précis et dont les connaissances sont efficacement transférables. Ils peuvent permettre d'entreprendre certaines mesures d'atténuation, de poser des actions ou d'émettre des recommandations, comme le GOOS, dont les données appuient les politiques mondiales qui seront adoptées. D'autres observatoires sont au contraire plutôt utilisés comme des outils de recherche et d'évaluation ; leur

objectif est davantage d'acquérir de nouvelles connaissances pour établir un état de référence, tel que l'observatoire câblé NEPTUNE d'ONC, pour documenter une plaque tectonique. Enfin, certaines organisations impliquées dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures mentionnées dans cette synthèse ont été créées à la suite d'un déversement majeur d'hydrocarbures ayant eu d'importantes conséquences à court, moyen et long terme. Lors de leur création, elles avaient généralement pour principal objectif de documenter les impacts des hydrocarbures sur l'environnement. Toutefois, leur mission a évolué avec le temps et elles s'intéressent maintenant de plus en plus à la prévention des incidents maritimes et à la préparation des acteurs de l'industrie maritime et des communautés côtières, afin de mieux gérer les risques inhérents au trafic maritime et de limiter les conséquences d'un déversement. Ces organisations sont ainsi soutenues par la mise en place de programmes tel que le programme IRMP pour les déversements d'hydrocarbures. Ces derniers permettent notamment, grâce à des équipements et techniques de pointe, des algorithmes d'analyse de données et des modèles, de fournir des informations utiles aux intervenants mobilisés.

8.2. Accessibilité et partage de données

Les données obtenues par les observatoires, les publications ou les outils qui en découlent sont utiles à un large éventail de parties prenantes, depuis les autorités nationales et locales jusqu'à la population générale. Les décideurs, les gestionnaires et le grand public s'intéressant à la « santé des océans » à différents niveaux doivent pouvoir facilement accéder aux données ou à leur interprétation à l'aide d'outils d'aide à la décision. L'implication des citoyens dans la recherche (science participative) et la construction d'observatoires favorisent le partage d'informations aux usagers du territoire et, plus globalement, à l'ensemble des acteurs du secteur. De plus en plus de centres de données sont mis en place afin de faciliter l'archivage, la visualisation, le contrôle de la qualité des données et leur accessibilité. Les données des divers centres présentés peuvent provenir d'un ou de plusieurs observatoires. Afin de les rendre accessibles et interchangeables, notamment avec les données d'autres observatoires, les données devraient idéalement être publiées dans des formats simples, standardisés et accessibles à tous. Les pratiques de partage de l'information restent toutefois inégales d'un observatoire à l'autre, notamment en raison des défis que comporte la gestion simultanée d'un grand nombre de données, de l'évolution constante des technologies et des différents formats utilisés qui ne sont pas toujours compatibles. Les données, dont le format varie souvent, par leur nature ou selon leur échelle spatiale et temporelle, doivent conséquemment faire l'objet d'analyses pour être exploitées. Cela est particulièrement vrai dans le cas des mesures satellitaires, car celles-ci ne sont pas directement liées aux variables du milieu qui font l'objet des études. Les chercheurs doivent donc mettre au point différentes méthodes pour faire ressortir les informations pertinentes qui pourraient être utilisées pour calibrer et valider les modèles, par exemple. La modélisation numérique, qui pourrait faire l'objet d'une étude à elle seule, est un aspect primordial qui permet non seulement de combler les intervalles entre les observations ponctuelles, mais également d'élaborer des scénarios de l'état futur de l'océan compte tenu des différentes perturbations anthropiques. La modélisation nécessite toutefois de longues séries de données que la durée de vie limitée de certains observatoires, faute de financement, ne permet pas de fournir. Plusieurs observatoires sont conçus pour l'acquisition de nouvelles connaissances sans toutefois permettre la continuité de la collecte d'informations. Il existe également plusieurs enjeux, dont l'accès à la donnée, la complexité de certains sujets comme la biodiversité ou encore la rareté de données statistiques anciennes nécessaires pour valider les modèles. De plus, les observatoires dépendent de la disponibilité des technologies de pointe ou de plateformes pour mener des missions scientifiques. Cela

démontre bien que la question de l'importance des moyens techniques, matériels, humains et financiers est primordiale dans la conception d'un observatoire.

8.3. Instruments et plateformes

En ce qui concerne les besoins matériels, les principaux instruments et plateformes disponibles ont été décrits dans cette synthèse. À l'heure actuelle, les outils d'observation sont extrêmement variés et s'appuient sur une vaste gamme d'instruments aux caractéristiques diversifiées. De nouveaux instruments in situ et des dispositifs d'échantillonnage peuvent être installés sur des plateformes autonomes se déplaçant dans l'océan pendant des mois sans intervention humaine. De nouvelles générations de véhicules télécommandés permettent des observations dans des zones auparavant inaccessibles, à un coût inférieur à celui d'autres plateformes. Ces appareils transmettent des données par satellite et permettent d'accroître considérablement la fréquence et la densité des observations. Les réseaux câblés ont pour leur part créé une nouvelle forme de téléprésence humaine dans l'océan qui permet de prendre des mesures en continu et simultanées, et d'observer des événements de courte durée. En bref, l'autonomie des plateformes, la miniaturisation des instruments et l'acquisition des données à haute fréquence modifient l'étude des milieux côtiers et marins ainsi que la compréhension des échelles de temps associées à certains processus. Les déploiements d'instruments en temps réel sont maintenant courants, et les changements dans les océans peuvent être étudiés en continu grâce au suivi de nombreux paramètres. Évidemment, bien que la collecte de données à distance et les systèmes automatisés soient en croissance, les observatoires dépendent encore d'une flotte de navires et d'instruments traditionnels.

Au sein des observatoires, de nombreux types d'instruments et de plateformes d'observation co-existent pour la surveillance d'un même site. Il existe donc une grande variété de technologies disponibles pour la conception d'un observatoire, et leur choix varie selon un grand nombre de facteurs tels que l'emplacement de l'observatoire, l'étendue de la zone d'étude visée, l'expertise des chercheurs impliqués, les moyens financiers à leur disposition, le public auquel les données sont destinées et les objectifs scientifiques de l'observatoire. La fréquence des mesures lors des suivis peut aussi varier selon la nature des paramètres mesurés et les thématiques étudiées. En effet, certains paramètres varient lentement avec le temps (p. ex. la structure des communautés benthiques) ; une fréquence de mesure trop élevée serait inutile. En revanche, d'autres varient en continu (p. ex. la température) ; la fréquence de mesure doit alors être plus soutenue. Enfin, puisque certains paramètres nécessitent des analyses en laboratoire, les observatoires doivent s'adapter aux conditions humaines et matérielles de la collecte d'échantillons et mettre en place une logistique conséquente. Toutes ces considérations doivent être prises en compte lors de la conception d'un observatoire afin de pouvoir remplir pleinement ses objectifs

8.4. Évolution des technologies (R-D)

Bien que certains instruments disponibles sur le marché réunissent toutes les caractéristiques recherchées, il arrive régulièrement qu'un observatoire ait des besoins particuliers. Ces besoins peuvent être très variés et aller d'une résistance accrue aux chocs, à la pression, aux températures extrêmes, jusqu'à une contrainte de poids, en passant par des exigences de transmission ou de stockage des données. Les observatoires travaillent ainsi souvent en collaboration étroite avec les équipementiers (recherche et développement) pour développer leurs propres instruments répondant à leurs besoins spécifiques. On retrouve d'ailleurs partout au Canada des équipementiers de premier plan et des centres d'incubation technologique à la pointe de l'innovation (COVE, COAST, the Launch).

Les avancées technologiques ont également favorisé l'émergence de nouveaux domaines d'étude. Les observatoires couvrent ainsi des thématiques à portée spatiale et temporelle plus grande comme les risques naturels et les grandes tendances observées dans les changements climatiques. Par ailleurs, les activités humaines entraînent l'apparition de nouveaux phénomènes, mais également de nouvelles substances dans les environnements aquatiques (p. ex. le plastique ou les carburants alternatifs). Plusieurs domaines restent donc à explorer. Les observatoires doivent s'adapter et revoir constamment la liste des paramètres et, notamment, des contaminants à surveiller.

8.5. La contribution du Québec et du Canada

Cette synthèse des connaissances a mis en évidence la place du Canada comme chef de file en matière d'observations et de recherche sur les océans et les milieux côtiers, et le fait qu'il possède un nombre important d'observatoires. Sur la côte du Pacifique, ONC dirige plusieurs observatoires en Colombie-Britannique et au Nunavut. Le Canada occupe d'ailleurs une position de premier plan dans le monde en matière de recherche avec les projets d'observatoires câblés NEPTUNE et VENUS, qui ont été parmi les premiers réseaux sous-marins multinoœuds au monde, reliés par des câbles, à fibre optique, hébergeant un large éventail d'instruments et de nouvelles technologies, et couvrant les environnements côtiers et profonds. Sur la côte de l'Atlantique, le PMZA du MPO constitue l'un des programmes qui fournit les bases des contributions canadiennes aux réseaux d'observation et de surveillance nationaux et internationaux. Le PMZA construit des séries de données temporelles qui seront nécessaires pour réagir aux problèmes futurs. SmartBay est également un bon exemple d'observatoire qui fournit de l'information en temps réel pour le bénéfice des activités de l'industrie du transport maritime. Dans le nord-est du golfe du Saint-Laurent, l'observatoire de Bonne Bay de l'Université Memorial, unique en son genre, fournit des données en temps réel dans un système couvert de glace qui ne pouvait auparavant être échantillonné que par intermittence. Enfin, le SIOOC permet aux utilisateurs de découvrir, de consulter, de visualiser et de télécharger des données océanographiques. Sa conception lui permet de s'adapter aux besoins des utilisateurs. Ce système, coordonné à l'échelle nationale, vise à appuyer les sciences océanographiques et la gestion de ses données. Il promeut une approche collaborative entre les différents secteurs rattachés aux océans à travers le Canada.

Le Canada est reconnu dans le monde entier pour son expertise en sciences océaniques, en gestion durable et en intervention d'urgence⁵³. Comme évoqué plus haut, le Canada fait appel à l'expertise des universités, des experts gouvernementaux, ainsi que du secteur privé pour favoriser une mise en valeur responsable des

⁵³ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/campaign-campagne/oceans/index-fra.html>

ressources, souvent en collaboration avec des innovateurs des secteurs public et privé, pour mettre au point des technologies et des outils qui ouvrent la voie à de nouvelles façons de faire de la recherche. Le Canada a accès à plusieurs infrastructures essentielles, telles que des navires, des satellites, des laboratoires spécialisés, des bases de données et des infrastructures de traitement des données et de communication. Il dispose d'une flotte de navires de recherche importante. La GCC compte en effet plusieurs navires océanographiques et des brise-glaces donc la mission se partage entre des activités de recherche et sauvetage et la recherche scientifique, donnant ainsi accès à l'Arctique. Des satellites fournissent des données très utiles pour la surveillance et la protection des écosystèmes (RADARSAT et RADARSAT-2, SMOS, SWOT). Le Canada bénéficie également des données provenant du programme Argo, auquel il contribue et dans le cadre duquel les instruments de mesure ne cessent d'évoluer (André et coll., 2020). Selon le rapport mondial de l'UNESCO sur les sciences océaniques, le Canada figure d'ailleurs parmi les principaux producteurs d'articles scientifiques dans le domaine des sciences océaniques (UNESCO, 2017 ; UNESCO, 2020).

Le Québec, de son côté, est doté de plusieurs observatoires actifs dans la surveillance des environnements aquatiques. Une quantité importante d'informations sur l'ensemble de l'écosystème Saint-Laurent est produite en continu par diverses organisations qui ont été présentées dans cette synthèse et exerçant des activités sur le territoire québécois. C'est le cas de nombreuses organisations qui ne portent pas nécessairement le nom d'observatoire (ministères, centres, instituts et laboratoires de recherche). L'OGSL fournit un accès intégré et rapide à une grande quantité de données et d'informations afin de mieux comprendre les écosystèmes complexes des océans. L'OEB de la baie de Sept-Îles est une démarche novatrice et importante de caractérisation et de suivi d'un écosystème. Les informations recueillies dans la baie offrent une vision globale de cet écosystème et pourront être mises à profit pour l'évaluation des impacts environnementaux des futurs développements économiques. L'exemple de l'OEB démontre l'utilité des projets pilotes en ceci qu'ils ont le potentiel d'être reproduits et adaptés pour répondre aux besoins et demandes futurs des utilisateurs.

Les universités sont aussi des acteurs importants pour les observatoires puisqu'elles collaborent étroitement avec l'industrie et les ministères par l'intermédiaire de réseaux de recherche. Québec-Océan, qui réunit l'expertise des chercheurs de haut calibre dans les différentes disciplines de l'océanographie, et le Réseau Québec maritime (RQM), qui anime la recherche et l'innovation dans les différents domaines liés au secteur maritime, en sont de bons exemples. Le Québec abrite de plus d'importants instituts de recherche universitaire, notamment l'ISMER, qui regroupe un important bassin de chercheurs et d'étudiants d'horizons disciplinaires variés. Rattaché à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), l'ISMER comprend de nombreuses infrastructures de recherche lui permettant de se positionner comme chef de file dans le domaine des sciences de la mer. L'UQAR détient la Chaire UNESCO en analyse intégrée des systèmes marins qui a, entre autres, comme objectifs de mettre en place des observatoires de l'environnement marin dans les pays partenaires et de développer des approches expérimentales pour étudier les réponses des écosystèmes côtiers aux changements climatiques (réchauffement climatique, acidification des océans). On retrouve également au Québec l'un des principaux centres gouvernementaux de recherche francophone en sciences de la mer et l'un des principaux dans le monde, l'IML. Situé dans la municipalité de Mont-Joli, il travaille dans deux grands secteurs d'activité : les sciences des océans et la gestion des écosystèmes aquatiques. Par ailleurs, les chercheurs québécois participent activement à des initiatives telles que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le North Atlantic Right Whale Consortium (NARWC) en

Nouvelle-Angleterre, ainsi que le Canadian Healthy Oceans Network (CHONe). Tous ces projets collaboratifs viennent appuyer les efforts de surveillance des milieux marins et côtiers.

Le Québec possède d'excellents chercheurs en intelligence artificielle qui peuvent soutenir les études océanographiques en traitant une quantité de données importante. Certains observatoires utilisent notamment la technologie *deep learning* qui est de plus en plus souvent associée aux suivis océanographiques pour l'identification et le suivi de populations marines à partir d'images satellitaires, vidéos ou photos. Cette technologie permet de traiter un grand nombre de données en un temps record, mais contribue aussi au perfectionnement des algorithmes d'identification des espèces, limitant ainsi les risques d'identification erronée.

9. Perspectives

La science des milieux aquatiques, comprenant les océans, les zones côtières et les eaux douces, est un domaine relativement récent. Malgré les efforts déployés pour étudier ces environnements et la mise en place de nombreux observatoires, il reste encore beaucoup à explorer dans cette discipline. Cela s'explique aussi bien par l'étendue des plans d'eau que par les conditions logistiques complexes qui entourent leur étude, comme les conditions météorologiques et les caractéristiques physico-chimiques particulières (p. ex. salinité, pression, température, encrassement biologique). Il s'agit d'une activité complexe qui nécessite des moyens humains et techniques spécialisés et imposants. De plus, les environnements côtiers et marins sont régis par des processus physiques, biogéochimiques et biologiques influents et interreliés, auxquels il faut ajouter les perturbations anthropiques qui peuvent générer de multiples facteurs de stress simultanément. Pendant longtemps, en raison des limitations technologiques, les observations ne permettaient malheureusement pas toujours de combler les réels besoins de recherche. C'est pourquoi le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS) a défini des variables océaniques essentielles afin d'établir les paramètres prioritaires et de promouvoir leur utilisation, ce qui a stimulé le développement technologique dans ce domaine (Lindstrom et coll., 2012). Ainsi, au cours des dernières années, la technologie utilisée pour l'acquisition, la transmission et la diffusion des données a progressé à un rythme effréné. Les observatoires doivent continuer d'évoluer en testant en permanence de nouveaux instruments et capteurs pour mesurer ces variables océaniques essentielles tout en développant leur capacité de stocker et de traiter une quantité croissante de données.

9.1. Initiatives gouvernementales pour la protection des écosystèmes côtiers, fluviaux et marins

Au Québec et au Canada, comme ailleurs dans le monde, les écosystèmes aquatiques sont de plus en plus touchés par les activités humaines et les pressions qui en découlent (changements climatiques, pollution, eutrophisation, etc.). Afin de limiter les dommages possibles et de maintenir ainsi les services écosystémiques fournis par les océans, les décideurs et les gestionnaires doivent pouvoir s'appuyer sur des connaissances et des avis scientifiques.

Le Canada possède le plus long littoral au monde, mesurant plus de 243 000 kilomètres. Près de sept millions de Canadiens vivent dans des collectivités côtières⁵⁴ qui dépendent fortement des industries océaniques. Il est primordial de surveiller les changements qui s'y déroulent. Le Canada travaille actuellement à la mise en place d'une stratégie pour l'économie bleue⁵⁵ qui permettra d'orienter les futurs investissements et mesures politiques visant à protéger et à revitaliser la santé des océans, tout en tirant parti des nouvelles possibilités de croissance économique dans l'ensemble des secteurs océaniques. Ces investissements dans le domaine de la protection des océans ont d'ailleurs augmenté au cours des dernières années. Par exemple, en 2016, le gouvernement du Canada a investi 1,5 milliard de dollars dans le Plan de protection des océans, qui comprend des initiatives visant à améliorer la surveillance et la collecte de données océanographiques. Par ailleurs, afin de répondre aux objectifs de la Convention sur la biodiversité marine des Nations Unies (COP15) de 2022⁵⁶, le Canada pourrait avoir besoin de mettre en place des systèmes d'observation des océans plus

⁵⁴ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/campaign-campagne/oceans/index-fra.html>

⁵⁵ <https://www.dfo-mpo.gc.ca/campaign-campagne/bes-seb/index-fra.html>

⁵⁶ <https://www.cbd.int/conferences/2021-2022>

avancés pour surveiller l'état de la biodiversité marine. Le Canada s'est engagé à protéger 25 % de ses zones marines et côtières d'ici 2025, ce qui nécessitera la création de nouvelles aires marines protégées (Sloyan et coll., 2019).

Le gouvernement du Québec a franchi de grandes étapes, entre autres avec la mise en place de la Stratégie maritime du Québec en 2015, d'Avantage Saint-Laurent en 2021 et l'adoption de la *Loi instituant le Fonds bleu et modifiant d'autres dispositions*⁵⁷ en 2023. Ce fonds, prévu sur cinq ans, permettra de soutenir les initiatives pour la protection, la restauration et la mise en valeur de l'eau. Concernant les aires marines protégées (la *Loi sur la conservation du patrimoine naturel*⁵⁸ adoptée en 2002 et modifiée en 2021⁵⁹), plusieurs secteurs sont à l'étude dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. La mise en place de plateformes d'observation pourrait être une mesure cruciale pour acquérir une meilleure compréhension des impacts des activités humaines et prendre des décisions éclairées en matière de protection et de conservation des écosystèmes marins. C'est dans ce contexte que le CEGRIM a été créé en 2017 avec notamment le mandat d'acquérir les connaissances nécessaires à une gestion des risques d'incidents maritimes en fonction des particularités locales. Une des missions du CEGRIM est de fournir les informations cruciales concernant ces spécificités locales aux intervenants de première ligne lors d'un incident maritime, agissant ainsi à titre de conseiller pour favoriser une intervention efficace. Pour ce faire, le CEGRIM, collabore étroitement avec les universités, les centres de recherche, les municipalités, les communautés autochtones et les ministères provinciaux et fédéraux afin de centraliser les informations et les rendre accessibles rapidement et sous une forme facilement transposable au contexte opérationnel d'une intervention d'urgence environnementale en milieu maritime.

Ces initiatives et les prochaines à venir apporteront des changements significatifs pour garantir un environnement aquatique plus sain et plus durable aux générations à venir. L'avenir des observatoires océanographiques au Québec et au Canada dépendra de l'engagement des gouvernements, de la communauté scientifique et des organismes de financement pour soutenir ces importantes initiatives de recherche.

9.2. L'apport des observatoires au portrait global

Les milieux côtiers et marins étant complexes et subissant de nombreuses influences en continu, une approche favorisant des études ponctuelles indépendantes n'est pas adaptée à une compréhension fine de leur dynamique à long terme. Malgré les efforts consentis au cours des dernières années, certaines lacunes persistent en matière d'information environnementale, et plusieurs étendues d'eau restent largement méconnues.

Les régions polaires de l'Arctique et de l'Antarctique sont de plus en plus préoccupantes, étant particulièrement vulnérables aux changements climatiques. Dans l'Arctique, la diminution de la couverture de glace et l'augmentation du trafic maritime créent un besoin croissant de prévisions océanographiques opérationnelles. Celles-ci sont également d'une grande importance en Antarctique, à la fois pour soutenir les opérations sur le continent et mieux comprendre les processus qui régissent la stabilité de la glace de mer et

⁵⁷ https://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/fileadmin/Fichiers_client/lois_et_reglements/LoisAnnuelles/fr/2023/2023C17F.PDF

⁵⁸ <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/c-61.01>

⁵⁹ https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/aires_quebec.htm

de la plate-forme de glace. Le Canada et le Québec soutiennent des programmes internationaux et sont des chefs de file mondiaux dans le domaine de la recherche en milieux polaires. Ils ont ainsi un rôle particulier à jouer dans l'amélioration des connaissances sur les écosystèmes polaires et la compréhension des processus qu'ils soutiennent.

Certaines zones d'activité humaine intense et sujette à des pressions anthropiques telles que les zones IP sont également des endroits qui pourraient bénéficier d'observatoires suivant les paramètres environnementaux à long terme. L'observatoire environnemental de base (OEB) pourrait offrir de nouvelles capacités d'observation. En améliorant la compréhension des effets des activités portuaires sur l'environnement, ce projet appuierait les administrations portuaires dans leur prise de décision, tant sur le plan de la planification des activités que sur celui de la prévention. Cette initiative pourrait être une source d'inspiration pour d'autres provinces et pays. Chaque nouvel OEB devra faire l'objet d'une évaluation afin d'être complémentaire aux infrastructures existantes et aux programmes de développement prévus.

Les observatoires doivent avoir une portée temporelle significative pour pouvoir s'adapter, rester en adéquation avec les grandes tendances du développement et permettre ainsi d'assurer une meilleure gestion des milieux à long terme afin de contribuer à la protection et à la conservation des océans pour les futures générations. Les observatoires devront aussi maintenir leur collaboration pour offrir une vision globale et soutenir efficacement les décisions. Une collaboration aux échelles locale, régionale, nationale et internationale est indispensable aussi bien entre les disciplines qu'entre les secteurs. Les programmes de collaboration interdisciplinaire et intersectorielle sont d'ailleurs de plus en plus encouragés dans les recherches des sciences de la mer afin d'y inclure des aspects économiques et sociaux.

De nombreux acteurs travaillent actuellement à s'attaquer aux problématiques environnementales de plus en plus complexes auxquelles ils font et devront faire face. Des observatoires de nouvelle génération voient le jour afin de rendre les données plus abordables et plus rapidement disponibles. Les innovations en matière de surveillance devraient également conduire à une plus grande variété de types de données, à des fréquences temporelles et spatiales plus élevées. Par ailleurs, les observatoires nommés dans cette synthèse évoluent en continu et se dotent régulièrement de nouveaux moyens ou de nouveaux services.

En somme, le potentiel d'acquisition de données augmente sans cesse. Dans cette optique, la mise en place d'une veille scientifique est indispensable pour maintenir les connaissances à jour. Dans le domaine des sciences des milieux aquatiques, les projets innovants sont nombreux, débouchant sur de nouvelles technologies appliquées aux instruments et aux plateformes de mesure. Conséquemment, le CEGRIM souhaite continuer d'approfondir ses recherches sur les observatoires et leurs applications afin de se maintenir à l'affût des données disponibles, et ainsi de pouvoir conseiller efficacement les autorités et intervenants de première ligne dans l'éventualité d'un incident maritime.

10. Références bibliographiques

- Abdel-Shafy, H. I., et Mansour, M. S. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian journal of petroleum*, 25(1), 107-123.
- André, X., Le Traon, P.-Y., Le Reste, S., Dutreuil, V., Leymarie, E., Malardé, D., Marec, C., Sagot, J., Amice, M., Babin, M., Claustre, H., David, A., D'Ortenzio, F., Kolodziejczyk, N., Lagunas, J. L., Le Menn, M., Moreau, B., Nogré, D., Penkerch, C., Poteau, A., Renaut, C., Schaeffer, C., Taillandier, V., et Thierry, V. (2020). Preparing the New Phase of Argo: Technological Developments on Profiling Floats in the NAOS Project. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.577446>
- Ardhuin, F., Stopa, J. E., Chapron, B., Collard, F., Husson, R., Jensen, R. E., Johannessen, J., Mouche, A., Passaro, M., Quartly, G. D., Swail, V., et Young, I. (2019). Observing Sea States. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00124>
- Association internationale de l'industrie pétrolière pour la sauvegarde de l'environnement et les questions sociales, IPIECA, Organisation maritime internationale, IMO, Association internationale des producteurs d'hydrocarbures et de gaz, IOGP, et Cedre (2015). *Observation aérienne des déversements d'hydrocarbures en mer : guide de bonnes pratiques en matière de gestion des incidents et de personnel d'intervention d'urgence* (publication n° 518). IPIECA-IOGP.
- Barnes, C. R., et Tunnicliffe, V. (2008). Building the World's First Multi-node Cabled Ocean Observatories (NEPTUNE Canada and VENUS, Canada): Science, Realities, Challenges and Opportunities. Dans *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*.
- Bourassa, M. A., Meissner, T., Cerovecki, I., Chang, P. S., Dong, X., De Chiara, G., Donlon, C., Dukhovskoy, D. S., Elya, J., Fore, A., Fewings, M. R., Foster, R. C., Gille, S. T., Haus, B. K., Hristova-Veleva, S., Holbach, H. M., Jelenak, Z., Knaff, J. A., Kranz, S. A., Manaster, A., Mazloff, M., Mears, C., Mouche, A., Portabella, M., Reul, N., Ricciardulli, L., Rodriguez, E., Sampson, C., Solis, D., Stoffelen, A., Stukel, M. R., Stiles, B., Weissman, D., et Wentz, F. (2019). Remotely Sensed Winds and Wind Stresses for Marine Forecasting and Ocean Modeling. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00443>
- Carter, B., Green, S., Leeman, R., et Chaulk, N. (2008). Smartbay: Better information-better decisions. Dans *OCEANS 2008*.
- Carvalho, G. d. A., Minnett, P. J., Ebecken, N. F. F., et Landau, L. (2020). Classification of Oil Slicks and Look-Alike Slicks: A Linear Discriminant Analysis of Microwave, Infrared, and Optical Satellite Measurements. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132078>
- deYoung, B., Brown, K. M., Adams, R. S., et McLean, S. D. (2005). Design and deployment of the Bonne Bay Observatory (B20). Dans <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1639862/authors#authors>. OCEANS 2005 MTS/IEEE, Washington, DC, USA.
- Diaz, R. G. (2016). Anoxia, hypoxia and dead zones. Dans Kennish, M. J. (dir.) *Encyclopedia of estuaries. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_82
- Dupont, N., et Aksnes, D. L. (2013). Centennial changes in water clarity of the Baltic Sea and the North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 131, 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.08.010>
- Durier, G., Nadalini, J.-B., Comeau, L. A., Starr, M., Michaud, S., Tran, D., St-Louis, R., Babarro, J. M. F., Clements, J. C., et Tremblay, R. (2022). Use of valvometry as an alert tool to signal the presence of toxic algae *Alexandrium catenella* by *Mytilus edulis*. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.987872>

- Fingas, M., et Brown, C. (1995). Survol des techniques de télédétection des nappes d'hydrocarbures. *Bulletin de la lutte contre les déversements*, 20, 1-4.
- Fingas, M., et Brown, C. (2018). Review of oil spill remote sensing [Article]. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 9-23. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.059>
- Gadjagboui, B. B. I. (2013). Étude critique et validation de représentations spectrales directionnelles de houles, mémoire de maîtrise, Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
- Ghosn, H., et Lefebvre, A. (2023). Report of the MAREL Carnot station, a high frequency monitoring station in an anthropogenically influenced coastal zone (Boulogne-sur-Mer) - Period 2020-2022. IFREMER.
- Gilbert, D., Sundby, B., Gobeil, C., Mucci, A., et Tremblay, G.-H. (2005). A seventy-two-year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence Estuary: The Northwest Atlantic connection, *Limnology and Oceanography*, 50, 1654-1666, <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.5.1654>
- Honda, M., et Suzuki, N. (2020). Toxicities of polycyclic aromatic hydrocarbons for aquatic animals. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1363.
- Institut nordique de recherche en environnement et en santé au travail, INREST (2018). *Observatoire environnemental de la baie de Sept-Îles*.
- Jacques, G., et Desdevises, Y. (2021). Du laboratoire Arago à l'observatoire océanologique de Banyuls ; une épopée humaine et scientifique. Sorbonne Université Presses.
- Liblik, T., Karstensen, J., Testor, P., Alenius, P., Hayes, D., Ruiz, S., Heywood, K. J., Pouliquen, S., Mortier, L., et Mauri, E. (2016). Potential for an underwater glider component as part of the Global Ocean Observing System. *Methods in Oceanography*, 17, 50-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.05.001>
- Lindstrom, E., Gunn, J., Fischer, A., McCurdy, A., Glover, L. K., et Members, T. T. (2012). A framework for ocean observing. By the Task Team for an Integrated Framework for Sustained Ocean Observing. UNESCO.
- Lu, Y., Zhan, W., et Hu, C. (2016). Detecting and quantifying oil slick thickness by thermal remote sensing: a ground-based experiment. *Remote sensing of environment*, 181, 207-217. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.007>
- Lubchenco, J., et Haugan, P. (2023). *Technology, Data and New Models for Sustainably Managing Ocean Resources*. 10.1007/978-3-031-16277-0_6.
- Maclsaac, B. I., King, T. L., et Ortmann, A. C. (2023). *State of knowledge on fate and behaviour of ship-source petroleum product spills: volume 7, St John's & Placentia Bay, Newfoundland & Labrador* (publication n° 3253), Pêches et Océans Canada.
- Macoun, P., Bartlett, K., et Little, J. (2017). *Implementation of community based ocean observatories on the West Coast of Canada*. Dans <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8232195/metrics#metrics>. OCEANS 2017 - Anorage, Anorage, AK, USA.
- Martin Taylor, S. (2009). Transformative ocean science through the VENUS and NEPTUNE Canada ocean observing systems. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, 602(1), 63-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.019>

- McGovern, M., Evenset, A., Borga, K., de Wit, H. A., Braaten, H. F. V., Hessen, D. O., Schultze, S., Ruus, A., et Poste, A. (2019). Implications of Coastal Darkening for Contaminant Transport, Bioavailability, and Trophic Transfer in Northern Coastal Waters. *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7180-7182. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03093>
- McLean, D. L., Parsons, M. J. G., Gates, A. R., Benfield, M. C., Bond, T., Booth, D. J., Bunce, M., Fowler, A. M., Harvey, E. S., Macreadie, P. I., Pattiaratchi, C. B., Rouse, S., Partridge, J. C., Thomson, P. G., Todd, V. L. G., et Jones, D. O. B. (2020). Enhancing the Scientific Value of Industry Remotely Operated Vehicles (ROVs) in Our Oceans. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00220>
- McMahon, C. R., Roquet, F., Baudel, S., Belbeoch, M., Bestley, S., Blight, C., Boehme, L., Carse, F., Costa, D. P., Fedak, M. A., Guinet, C., Harcourt, R., Heslop, E., Hindell, M. A., Hoenner, X., Holland, K., Holland, M., Jaime, F. R. A., Jeanniard du Dot, T., Jonsen, I., Keates, T. R., Kovacs, K. M., Labrousse, S., Lovell, P., Lydersen, C., March, D., Mazloff, M., McKinzie, M. K., Muelbert, M. M. C., O'Brien, K., Phillips, L., Portela, E., Pye, J., Rintoul, S., Sato, K., Sequeira, A. M. M., Simmons, S. E., Tsontos, V. M., Turpin, V., van Wijk, E., Vo, D., Wege, M., Whoriskey, F. G., Wilson, K., et Woodward, B. (2021). Animal Borne Ocean Sensors – AniBOS – An Essential Component of the Global Ocean Observing System. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.751840>
- Massachusetts Institute of Technology Sea Grant, MIT Sea Grant (1986). *Oceanographic instrumentation at Woods Hole oceanographic institution* (publication n° MITSG -86-15). Marine Industry Advisory Services.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2022). Oil in the Sea IV : inputs, fates and effects. *The National Academies Press*. <https://doi.org/10.17226/26410>
- Normandeau, A., Lajeunesse, P., Ghienne, J. F., et Dietrich, P. (2022). Detailed Seafloor Imagery of Turbidity Current Bedforms Reveals New Insight Into Fine-Scale Near-Bed Processes. *Geophysical Research Letters*, 49(11). <https://doi.org/10.1029/2021gl097389>
- Okada, T. (1921). Imperial Marine Observatory at Kobe, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 26(1-2), 25-25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TE026i001p00025-01>
- Ocean Network Canada, ONC (2014). *Cambridge Bay Observatory*. <https://www.uvic.ca/assets2012/docs/pdfs/announcements/ONC-CBay-MEDIAbkgrd2-Aug23-2014.pdf>
- Oil Spill Recovery Institute, OSRI (2021). *Research plan 2021-2025*. <https://osri.us/wp-content/uploads/2021/09/OSRI-Research-Plan-2021-2025.pdf>
- Sloyan, B. M., Wanninkhof, R., Kramp, M., Johnson, G. C., Talley, L. D., Tanhua, T., McDonagh, E., Cusack, C., O'Rourke, E., McGovern, E., Katsumata, K., Diggs, S., Hummon, J., Ishii, M., Azetsu-Scott, K., Boss, E., Ansong, I., Perez, F. F., Mercier, H., Williams, M. J. M., Anderson, L., Lee, J. H., Murata, A., Kouketsu, S., Jeansson, E., Hoppema, M., et Campos, E. (2019). The Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP): A Platform for Integrated Multidisciplinary Ocean Science. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00445>
- UNESCO. (2017). *Global ocean science report: the current status of ocean science*. UNESCO Publishing, Paris.
- UNESCO. (2020). *Global ocean science report 2020: charting capacity for ocean sustainability*. UNESCO Publishing, Paris.
- Whitt, C., Pearlman, J., Polagye, B., Caimi, F., Muller-Karger, F., Copping, A., Spence, H., Madhusudhana, S., Kirkwood, W., Grosjean, L., Fiaz, B. M., Singh, S., Singh, S., Manalang, D., Gupta, A. S., Maguer, A., Buck, J. J. H., Marouchos, A., Atmanand, M. A., Venkatesan, R., Narayanaswamy, V., Testor, P., Douglas, E., de Halleux, S., et Khalsa, S. J. (2020). Future Vision for Autonomous Ocean Observations. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00697>

11. Annexes

Annexe 1 : Exemples d'instruments utilisés par les observatoires

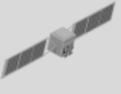
Instrument	Paramètres mesurés	Plateforme
Radiomètre 	Température, MES, couverture de glace, turbidité, couleur de l'océan, flux thermiques, concentration en Chl a	Spatiale, aéroportée, navire
Lidar 	Bathymétrie des fonds marins, habitats aquatiques	Spatiale, aéroportée, navire
Radar 	Concentration et distribution de la glace, dispersion des polluants	Spatiale, aéroportée, navire
Sonde CTD / Rosette 	Température (°C), conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$), profondeur (dBar), salinité	Navire, mouillage, réseau câblé
Sonde de lumière (PAR) 	Rayonnement photosynthétique actif (PAR)	Navire
Sonde de turbidité (turbidimètre) 	Turbidité	Toute plateforme d'observation in situ
Courantomètre 	Vitesse et direction des courants, hauteur des vagues	Fixe
Marégraphe 	Hauteur des eaux	Fixe
pH-mètre 	pH	Toute plateforme d'observation <i>in situ</i>
Sonde de CO₂ dissous 	Concentration en CO ₂	Toute plateforme d'observation in situ
Sonde d'OD dissous 	Concentration en OD	Toute plateforme d'observation in situ

Fluorimètre 	Composants bactériens, Chl <i>a</i> , matière organique dissoute fluorescente (FDOM), HAP	Toute plateforme d'observation <i>in situ</i>
Caméra vidéo 	Phytoplancton, zooplancton et benthos, niveaux de turbidité	Réseau câblé sous-marin, aéroportée
Bouteille de prélèvement d'eau 	COD, OD, nutriments, Chl <i>a</i> , phytoplancton, MES, métaux lourds, plastiques, hydrocarbures, HAP, salinité, etc.	Navire
Filet à plancton 	Phytoplancton, zooplancton	Navire
Benne à sédiments 	Granulométrie, communauté du benthique vivant en surface (apibenthos) et dans les sédiments (endobenthos), contaminants (métaux lourds, plastiques, hydrocarbures, HAP, etc.),	Navire
Chalut épibenthique 	Épibenthos	Navire
Hydrophone 	Pollution sonore sous-marine, bioacoustique (mammifères marins)	Mouillage, réseau câblé, navire

Annexe 2 : TAR Code (Thickness Appearance Relationship Code)

Catégorie	Description et apparence	Épaisseur (µm)	Quantité approximative (litres/km ²)
Film incolore (à peine visible)	À peine visible dans les conditions de lumière les plus favorables et sous différents angles. Les films reflètent plus la lumière que l'eau et apparaissent plus brillants. Peu nécessiter une eau adjacente pour la comparer. La luminosité apparente augmente avec l'épaisseur.	0,040	40
Reflets argentés	Présence de reflets argentés à la surface de l'eau. Un lustre nacré ou métallique est généralement apparent.	0,075	75
Trace de couleur	On peut observer la première trace de couleur. La première couleur observée est d'un ton chaud, généralement plus bronze que jaune. À mesure que la pellicule s'épaissit, un violet pourpre foncé apparaît ; ces couleurs amorcent les premières bandes de l'arc-en-ciel.	0,15	150
Bande de couleurs vives	Bande de couleurs vives. La série de bandes suit l'ordre bronze, violet, bleu, vert, par ordre d'épaisseur croissante. Les couleurs sont pures et intenses. À mesure que l'épaisseur augmente, l'ensemble des bandes est légèrement moins intense et la séquence de couleurs est modifiée : jaune magenta (violacé tirant sur le rouge), bleu, vert. Toutes ces couleurs sont très pures.	0,3	300
Couleurs ternes	Les couleurs commencent à se ternir. On constate une réduction du nombre et de la pureté des couleurs. Les couleurs deviennent terre cuite riche (rouge brique) et turquoise (bleu-vert assez vif). À mesure que l'épaisseur augmente, ces couleurs sont progressivement plus ternes ou d'apparence moins pure. Ces ensembles de bandes peuvent également contenir une trace de blanc ou de jaune pâle. Lorsque l'épaisseur augmente, toute couleur présente n'est qu'une teinte dans les bandes claires et sombres alternées. Le contraste entre les bandes claires et sombres reste fort mais s'affaiblit à mesure que l'épaisseur augmente.	1	1 000
Couleurs sombres	Les couleurs sont beaucoup plus sombres (brun très foncé ou noir). Il est évident que les effets d'interférence sont faibles et qu'ils disparaîtront rapidement à mesure que l'épaisseur augmentera.	3	3 000
Brun jaunâtre	Le code TAR original est étendu pour inclure les épaisseurs d'hydrocarbures figurant dans le guide d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures de la GCC.	10	10 000
Marron clair ou noir		100	100 000
Épais brun foncé ou noir		1 000	1 000 000
Pétrole lourd près d'une source d'un déversement de brut ou de mazout lourd		10 000	10 000 000

Annexe 3 : Exemples de plateformes utilisées par les observatoires

Plateformes	Profondeur	Distance d'action	Période/mission typique
Satellite 	Surface	Surface de la Terre (tous les océans)	~15 ans (variable selon le type de mission)
Plateforme aéroportée 	Surface	Varie en fonction des spécifications techniques des aéronefs utilisés (autonomie, capacité, etc.).	Quelques heures à quelques jours
Mouillage instrumenté 	Profondeur déterminée en fonction de la profondeur du milieu * Les instruments fixés sur la ligne de mouillage enregistrent à différentes profondeurs de la colonne d'eau.	Point géographique fixe (profil vertical)	Plusieurs mois à plusieurs années
Câble sous-marin intelligent (nœuds) 	Profondeur déterminée en fonction de la profondeur du milieu	Varie en fonction de plusieurs facteurs (objectifs, technologies, contraintes techniques, etc.).	~20 ans
Dériveur de surface / Bouée dérivante 	Surface	Dépend du courant (écoulement).	~18 mois
Flotteur profileur 	Surface à ~2 000 m pour les flotteurs standard Surface à ~6 000 m pour les flotteurs profonds	Dépend du courant (dérive de 8 à 10 jours).	~5 ans
Navire scientifique 	Dépend des instruments déployés	~10 km à 10 000 km	Quelques jours à quelques mois (dépendamment des besoins)
AUV 	Surface à ~6 000 m (selon le modèle)	Quelques kilomètres (trajet programmé selon les besoins de la mission).	Dépend des objectifs, des capacités de l'AUV (charge utile) et des contraintes opérationnelles.
Planneur sous-marin 	Surface à ~1 000 m	~1 km (trajectoire en dents de scie)	2 à 4 mois
ROV 	Dépend de la longueur du câble d'alimentation	Dépend de la longueur du câble d'alimentation.	Plongées allant de quelques heures à quelques jours (dépendamment du modèle et de la capacité)
Enregistreur placé sur un mammifère marin 	Dépend du comportement de l'animal et de l'environnement dans lequel il évolue	Impossibilité de prévoir les trajectoires	Quelques jours à plusieurs mois (selon les objectifs, l'autonomie de la batterie et la capacité de stockage des capteurs)

Annexe 4 : Liste des observatoires présentés dans cette synthèse

Le tableau présente le nom complet des observatoires, le pays à l'origine de leur création, l'année de leur mise en service et le lien vers leur site Internet.

N°	Observatoire		Année d'ouverture	Vocation	Lien internet
1	 Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer (OOB)	France	1881	Observatoire marin ou côtier	https://www.obs-banyuls.fr/fr/
2	 Institut de la mer de Villefranche (IMEV)	France	1881	Observatoire marin ou côtier	https://www.imev-mer.fr/web/
3	 Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)	États-Unis	1930	Observatoire marin ou côtier	https://www.whoi.edu/
4	 Institut Océanographique de Bedford (IOB)	Canada	1962	Observatoire marin ou côtier	https://www.iob.gc.ca/index-fr.php
5	 Réseau d'Observation de la Contamination Chimique du littoral (ROCCH)	France	1974	Observatoire marin ou côtier	https://littoral.ifremer.fr/Reseaux-de-surveillance/Environnement/ROCCH-Reseau-d-Observation-de-la-Contamination-Chimique-du-littoral
6	 Institut Maurice-Lamontagne (IML)	Canada	1987	Observatoire marin ou côtier	https://www.gc.dfo-mpo.gc.ca/fr/institut-maurice-lamontagne
7	 Global Ocean Observing System : GOOS	International	1991	Réseau d'observation	https://www.gooscean.org/
8	 Le Programme de monitoring de la zone atlantique (PMZA)	Canada	1998	Programme	https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/data-donnees/azmp-pmza/index-fra.html
9	 Le programme international ARGO	International	2000	Observatoire international	https://argo.ucsd.edu/
10	 Le Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP)	International	2007	Programme	https://www.go-ship.org/About.html
11	 Observatoire de Bonne Bay	Canada	2003	Observatoire marin ou côtier	https://grenfell.mun.ca/academics-and-research/Pages/Bonne-Bay-Marine-Station.aspx
12	 Station de Mesure MAREL Carnot	France	2004	Observatoire marin ou côtier	https://manchemerduNord.ifremer.fr/Environnement/LER-Boulogne-sur-Mer/Surveillance-et-Observation/MAREL-Carnot
13	 Observatoire SmartBay	Canada	2004	Observatoire marin ou côtier	https://www.smartbay.ie/
14	 VENUS et NEPTUNE Networks Canada (ONC)	Océan Canada	2007	Observatoire câblé	https://www.oceannetworks.ca/observatories/physical-infrastructure/cabled-networks/
15	 Réseau benthique (REBENT)	France	2003	Réseau d'observation	https://rebent.ifremer.fr/
16	 Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole (MEOP)	Régions polaires	2007	Observatoire international	https://www.meop.net/
17	 Mediterranean Ocean Observing System for the Environment (MOOSE)	France	2010	Observatoire marin ou côtier	https://www.moose-network.fr/fr/
18	 Observatoire de veille environnementale de Sept-Îles	Canada	2013	Observatoire de veille environnementale	https://inrest.ca/environnement/observatoire/
19	 Cambridge Bay Community Observatory (ONC)	Canada	2012	Observatoire communautaire	https://www-static01.oceannetworks.ca/learning/ocean-sense/community-observatories/cambridge-bay.html
20	 Prince Rupert Community Observatory (ONC)	Canada	2016	Observatoire communautaire	https://www-static01.oceannetworks.ca/learning/ocean-sense/community-observatories/prince-rupert.html
21	 Kitamaat Village community observatory (ONC)	Canada	2016	Observatoire communautaire	https://www-static01.oceannetworks.ca/learning/ocean-sense/community-observatories/kitamaat-village.html
22	 Campbell River Community Observatory (ONC)	Canada	2016	Observatoire communautaire	https://www-static01.oceannetworks.ca/learning/ocean-sense/community-observatories/campbell-river.html
23	 Gascoyne Inlet Community Observatory (ONC)	Canada	2017	Observatoire communautaire	
24	 Burrard Inlet Community Observatory (ONC)	Canada	2019	Observatoire communautaire	https://www.oceannetworks.ca/data/data-dashboards/community-observatory-data/
25	 China Creek Community Observatory (ONC)	Canada	2019	Observatoire communautaire	https://www.oceannetworks.ca/data/data-dashboards/community-observatory-data/
26	 Holyrood Bay Community Observatory (ONC)	Canada	2021	Observatoire communautaire	https://www.oceannetworks.ca/data/data-dashboards/community-observatory-data/
27	 Hartley Bay Community Observatory (ONC)	Canada	2020	Observatoire communautaire	https://www.oceannetworks.ca/data/data-dashboards/community-observatory-data/
28	 CORIOLIS	France	2001	Centre de données	https://www.coriolis.eu.org/
29	 L'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL)	Canada	2005	Centre de données	https://ogsl.ca/fr/accueil/
30	 National Centers for Environmental Information (NCEI)	États-Unis	2015	Centre de données	https://www.ncei.noaa.gov/
31	 Système canadien d'observation des océans (SIOOC)	Canada	2018	Centre de données	https://www.cioos.ca/fr/accueil/
32	 SINTEF	Norvège	1950	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://www.sintef.no/en/expertise/ocean/oil-spill-research/
33	 International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF)	Angleterre	1968	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://www.itopf.org/
34	 Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (Cedre)	France	1970	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://www.cedre.fr/
35	 Oil Spill Response Research & Renewable Energy Test Facility (Ohmsett)	États-Unis	1974	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://ohmsett.bsee.gov/
36	 Oil Spill Recovery Institute (OSRI)	États-Unis	1990	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://osri.us/
37	 Australian Marine Oil Spill Centre (AMOSOC)	Australie	1991	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://amosc.com.au/
38	 The Churchill Marine Observatory (CMO)	Canada	2021	Organisation impliquée dans la lutte contre les déversements d'hydrocarbures	https://umanitoba.ca/earth-observation-science/facilities-labs-vessels/churchill-marine-observatory
39	 IRMP	Canada	2016	Programme	https://natural-resources.canada.ca/energy/energy-offices-and-labs/canmetenergy/canmetenergy-devon/multi-partner-research-initiative/24679

