



**PROGRAMMATION
QUINQUENNALE DE
LA RECHERCHE ET
DE LA FORMATION
2024-2029**

CONCEPTION GRAPHIQUE

Nathalie Rioux, Réseau Québec maritime

PHOTO EN COUVERTURE - Navire de recherche *Coriolis II*

Dany Dumont





TABLE DES MATIÈRES

- 05 **Préambule**
- 06 **Le programme en un coup d'œil**
- 08 **L'ISMER**
- 11 **Vision et objectifs**
- 16 **Les thématiques de recherche**
 - 19 Dynamique des systèmes estuariens, côtiers et marins
 - 41 Santé, résilience et gestion durable des écosystèmes
 - 55 Innovation maritime et développement au service de la société
- 65 **Abréviations**





PRÉAMBULE

Ce document présente la programmation quinquennale de la recherche et de la formation que l'Institut des sciences de la mer (ISMER) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) entend mettre en œuvre pour la période 2024-2029. La vision et les objectifs de l'ISMER, les principaux défis à relever ainsi que les moyens préconisés pour atteindre ses objectifs précisent les intentions qui guideront le développement des programmes de recherche et de formation. La programmation de recherche se veut également un guide pour l'ensemble des décisions en matière de ressources matérielles et humaines. Les objectifs de développement de l'ISMER sont présentés par grandes thématiques de recherche arrimées aux enjeux mondiaux actuels.

EN UN COUP D'ŒIL

Une démarche interdisciplinaire de recherche qui vise à...

- *Explorer* les caractéristiques biotiques et abiotiques des environnements et des systèmes estuariens, côtiers et marins.
- *Comprendre* le fonctionnement des milieux estuariens et des systèmes de l'océan ouvert et côtier et l'effet des perturbations anthropiques multiples sur ce fonctionnement.
- *Anticiper* les changements qui vont se produire, notamment en raison des changements climatiques et de la pression anthropique croissante qui s'exerce sur les environnements estuariens, côtiers et marins.
- *Développer* des moyens d'observation et de prévision environnementale et d'atténuation des pressions anthropiques.
- *Innover* dans les systèmes de suivi environnementaux marins et les solutions d'adaptation face aux changements globaux.

Le savoir mis en valeur en...

- *Formant* les experts et les leaders en mesure de relever les défis de demain, grâce à ses programmes de diplôme d'études supérieures spécialisées, de maîtrise et de doctorat et à la formation de chercheuses et chercheurs postdoctoraux.
- *Informant* de façon libre et objective, sur des bases scientifiques solides, les gestionnaires, les décideurs et la société en général, sur les grands enjeux tels que les changements climatiques, le développement responsable de l'utilisation des ressources marines et la santé de l'océan, et ainsi soutenir les processus d'aide à la décision et l'adaptation.

Thématiques de recherche

/01 Dynamique des systèmes estuariens, côtiers et marins

- 1.1 Processus fondamentaux à la base du fonctionnement des systèmes marins
- 1.2 Rôle de l'océan dans l'évolution des changements climatiques
- 1.3 Désoxygénation et acidification des océans côtiers
- 1.4 Flux de matières et d'énergie aux interfaces océaniques
- 1.5 Comprendre le passé pour mieux prédire l'avenir
- 1.6 Dynamique sédimentaire et érosion côtière

/02 Santé, résilience et gestion durable des écosystèmes

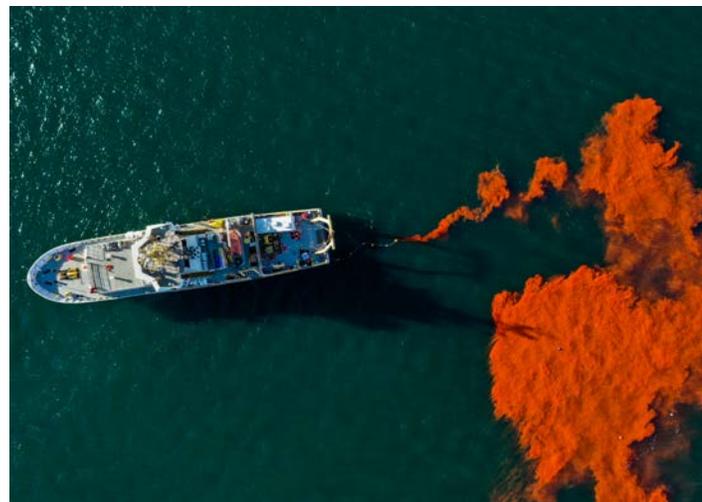
- 2.1 Évaluation et protection de la biodiversité
- 2.2 Perturbations locales et résilience des écosystèmes
- 2.3 Exploitation durable et valorisation des biomasses marines (aquaculture, pêche, biotechnologie)
- 2.4 Préparation au risque des pollutions émergentes

/03 Innovation maritime et développement au service de la société

- 3.1 Développement de modèles numériques
- 3.2 Applications multidisciplinaires et observations multicateurs
- 3.3 Adaptation des systèmes socio-écologiques aux changements climatiques et risques naturels



© Valérien Mazataud - Le Devoir



© Élie Dumas-Lefebvre - UQAR



© Stéphanie Lizotte

L'ISMER c'est :

Près de 30 *professeures* et *professeurs*.

10 personnes du *personnel technique*.

5 personnes en *soutien administratif*.

Plus d'une vingtaine de *professionnelles* et *professionnels de recherche*.

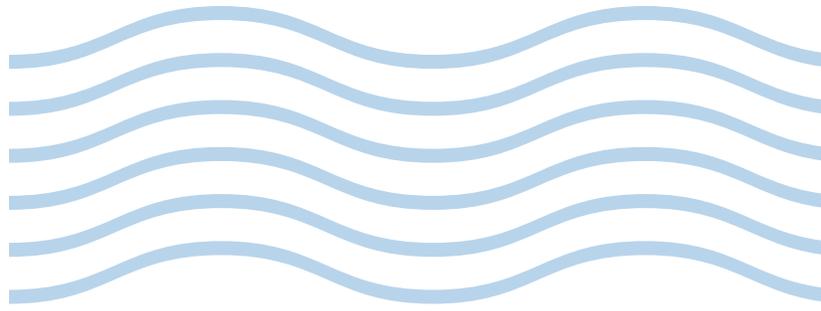
Plus d'une quarantaine de *professeures* et *professeurs associés*.

Près de 160 *étudiants* et *étudiantes* aux cycles supérieurs et *stagiaires au postdoctorat*.

L'Institut des sciences de la mer : une institution universitaire francophone vouée à l'avancement des connaissances multidisciplinaires en océanographie.

Au premier plan des unités de recherche en sciences marines de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), l'Institut des sciences de la mer (ISMER) est le seul institut universitaire francophone de recherche multidisciplinaire des Amériques dans ce domaine. Depuis sa création, en 1999, il s'est bâti une incontestable réputation internationale et entend continuer à maintenir et accroître son leadership en océanographie.

La mission fondamentale de l'ISMER est de répondre aux questions sur l'évolution passée, présente et future des systèmes marins, de leur complexité et de contribuer à la résolution des problèmes de gestion durable qui se posent.



La **démarche multidisciplinaire** adoptée par l'ISMER, et qui fait son originalité et sa force, vise premièrement à :

- *Explorer* les caractéristiques biotiques et abiotiques des environnements et des systèmes estuariens, côtiers et marins;
- *Comprendre* le fonctionnement des milieux estuariens et des systèmes de l'océan ouvert et côtier et l'effet des perturbations anthropiques multiples sur ce fonctionnement;
- *Anticiper* les changements qui vont se produire, notamment en raison des changements climatiques et de la pression anthropique croissante qui s'exerce sur les environnements estuariens, côtiers et marins;
- *Développer* des moyens d'observation et de prévision environnementale et d'atténuation des pressions anthropiques;
- *Innover* dans les systèmes de suivi environnementaux marins et les solutions d'adaptation face aux changements globaux.

Par ailleurs, la mission de l'ISMER implique aussi de **mettre à profit les savoirs et valoriser les connaissances acquises**. À cet égard, il s'agit de :

- *Former* les experts et les leaders en mesure de relever les défis de demain, grâce à ses programmes de DESS, de maîtrise et de doctorat et à la formation de chercheuses et chercheurs postdoctoraux;
- *Informé*r de façon libre et objective, sur des bases scientifiques solides, les gestionnaires, les décideurs et la société en général, sur les grands enjeux tels que les changements climatiques, le développement responsable de l'utilisation des ressources marines et la santé de l'océan, et ainsi soutenir les processus d'aide à la décision et l'adaptation.

Pour répondre à cette mission, les équipes de recherche de l'ISMER ont accès à des infrastructures de recherche uniques au Canada et à des équipements à la fine pointe de la technologie. Elles peuvent également s'appuyer sur des réseaux scientifiques nationaux et internationaux réputés, auxquels elles participent activement en tant que leaders ou comme personnes participantes : on peut mentionner, par exemple, le Réseau Québec maritime (RQM), l'Institut France-Québec maritime (IFQM), Québec-Océan, Ressources Aquatiques Québec (RAQ), Geotop, ÉcotoQ, ArcticNet, MEOPAR et le programme de recherche Transformer l'action pour le climat du Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada. De plus, la programmation scientifique se réalise grâce aux collaborations nombreuses avec les équipes de recherche des ministères fédéraux, des ministères provinciaux, des centres collégiaux de transfert technologique, d'autres centres de recherche et en partenariat avec le secteur privé et les organismes à but non lucratif du secteur des sciences de la mer. Par ailleurs, afin de favoriser son efficacité, l'ISMER s'est doté d'une structure administrative et d'un mode de fonctionnement flexible, agile et créatif, adaptés aux besoins et aux contraintes de la recherche.



VISION ET OBJECTIFS

Par la production de connaissances et par la formation d'une nouvelle génération d'experts en sciences de la mer, l'ISMER entend contribuer à aider la société à mieux protéger les ressources et les environnements marins et à s'adapter aux changements causés par les perturbations anthropiques et naturelles.

Objectifs généraux de la programmation de l'ISMER

- *Continuer* à être un leader dans la recherche et la formation multidisciplinaires en sciences marines au Québec, au Canada, dans la francophonie et à l'échelle internationale. L'ISMER contribuera ainsi à la reconnaissance de la région de Rimouski, du Québec et du Canada comme pôle d'excellence en sciences de la mer;
- *Continuer* à développer l'excellence dans ses programmes de formation, notamment au DESS, à la maîtrise et au doctorat et les programmes en bi-diplomation internationale;
- *Développer* des programmes de recherche novateurs s'appliquant en particulier au Saint-Laurent, aux zones subarctiques et arctiques;
- *Multiplier* les échanges avec les scientifiques et les institutions de recherche étrangères et *participer* aux grands programmes nationaux et internationaux en relation avec les océans, les zones côtières et les marges continentales;
- *Contribuer* au maintien, ou à la restauration, des biens et des services fournis par les écosystèmes marins grâce à l'acquisition de nouvelles connaissances sur les causes et les effets cumulés des perturbations anthropiques;
- *Développer* des approches innovantes pour la valorisation des biomasses marines, le développement durable des ressources halieutiques et l'atténuation des pressions anthropiques en collaboration avec les utilisateurs et les décideurs;
- *Participer* à l'élaboration des modèles hydrodynamiques actuels et passés pour comprendre les bouleversements climatiques, les risques associés et prévoir les tendances futures;
- *Contribuer* au développement du système opérationnel canadien d'observation et de modélisation des conditions environnementales et prévoir leurs évolutions futures;
- *Contribuer* à éclairer la prise de décisions par la diffusion et le transfert des connaissances auprès des gestionnaires, des utilisateurs et du grand public.

Principaux défis à relever pour répondre à ces objectifs

- *Maintenir* le niveau d'excellence de l'ISMER de façon à ce que les expertises développées soient reconnues et recherchées, ce qui signifie :
 - *Maintenir* une production scientifique reconnue mondialement;
 - *Diversifier* les sources de financement afin de soutenir un niveau élevé de recherche;
 - *Augmenter* la diversité et le nombre de stagiaires et personnes étudiantes des cycles supérieurs.

- *Accueillir* des secrétariats ou des centres de gestion de grands programmes nationaux et internationaux de recherche sur les milieux côtiers et les océans;

- *Accroître* les activités intersectorielles et interdisciplinaires en s'associant à des acteurs œuvrant dans les domaines des sciences sociales et humaines, des arts et des sciences de la santé;

- *Accroître* les activités de transfert et de mobilisation de connaissances auprès des partenaires et encourager le développement de nouveaux outils de diffusion des connaissances;

- *Améliorer* de façon continue les programmes de formation afin qu'ils soient en phase avec les plus récents développements scientifiques et questions et défis de société.

Les moyens préconisés

Pour atteindre les objectifs énoncés, l'ISMER et ses équipes de recherche se donnent comme mandat, d'une part, d'utiliser de façon optimale tous les moyens et les outils déjà à leur portée et, d'autre part, de développer de nouvelles approches et compétences. Parmi les différentes actions à entreprendre, on note les suivantes :

- *Doter* l'ISMER d'outils qualitatifs et quantitatifs de mesure de sa performance;
- *Renforcer* l'action collective par l'intégration des activités des équipes de recherche à la programmation scientifique de l'Institut selon ses trois grands thèmes de recherche : (1) dynamique des systèmes marins; (2) santé, résilience et gestion durable des écosystèmes marins; et (3) innovation maritime et développement au service de la société;
- *Favoriser* la concertation entre les équipes de recherche de l'ISMER et de l'UQAR, et celles d'autres institutions et des industriels afin de permettre l'accès aux ressources financières et matérielles nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés;
- *Poursuivre* le développement du corps professoral de l'ISMER pour participer au développement de nouveaux domaines de recherche en sciences marines;



© Jean-Luc Théberge



© Dany Dumont

- *Maintenir, optimiser et développer* un réseau d'observation océanographique dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Ce réseau sera mis à profit par l'ISMER pour développer de nouvelles collaborations nationales et internationales, et pour permettre la diffusion, le partage et la comparaison de données avec des environnements similaires à ceux du Saint-Laurent;
- *Renforcer* la reconnaissance des membres de l'ISMER par une plus grande diffusion de leurs réalisations dans les médias scientifiques et auprès du grand public et par la diffusion d'information concernant leur participation aux grands programmes nationaux et internationaux auprès des entités régionales, nationales et internationales;
- *Doter* les équipes de recherche de l'ISMER des outils nécessaires pour maintenir leur leadership au sein de plusieurs programmes de recherche nationaux et internationaux dans les champs d'expertise de l'Institut comme les risques environnementaux, les changements climatiques, l'aquaculture, les pêches et la valorisation des bioressources et de la biodiversité génétique, et la paléoclimatologie;
- *Mettre à profit* les ressources de l'ISMER pour jouer un rôle d'avant-plan dans la réflexion et l'acquisition de connaissances touchant les environnements côtiers et marins. Ces connaissances sont nécessaires à la mise en place des orientations stratégiques et des grandes politiques publiques provinciales, fédérales et internationales;
- *Poursuivre et intensifier* le maillage transdisciplinaire et intersectoriel;
- *Poursuivre et développer* le soutien technique et professionnel aux équipes de recherche de l'ISMER dans la réalisation de leurs travaux de laboratoire, de terrain et de modélisation.

Et en formation :

- *Offrir* des formations en sciences marines qui sont en adéquation avec les besoins de la société;
- *Diversifier* l'origine et les parcours des étudiantes et étudiants recrutés dans les programmes de cycles supérieurs de l'ISMER.



© Marie Guilpin

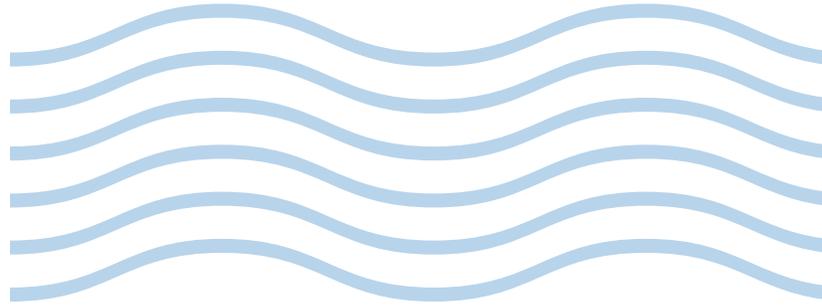
LES THÉMATIQUES DE RECHERCHE

Arrimage aux enjeux mondiaux et nationaux actuels et contribution au développement technologique.

Les objectifs de développement de l'ISMER s'arriment aux grands enjeux actuels que sont les effets des changements climatiques et les modifications du fonctionnement, de la productivité et de la biodiversité des écosystèmes causés par les activités humaines.

Globalement, la programmation scientifique de l'ISMER s'intéressera :

- ~ à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes estuariens, côtiers et marins et des grands systèmes océaniques ;
- ~ à l'étude de l'histoire géologique de ces environnements pour mieux en prédire le futur ;
- ~ aux nouveaux défis scientifiques et sociétaux que pose l'exploitation durable d'un espace maritime de plus en plus convoité pour ses ressources ;
- ~ à l'intégration de l'interdisciplinarité et du maillage entre sciences naturelles, sociales et de la santé pour l'adaptation aux changements climatiques.



La gestion durable des écosystèmes côtiers et des grands systèmes océaniques pose de nouveaux défis scientifiques et sociétaux auxquels s'intéressent activement les équipes de recherche de l'ISMER. Pour atteindre leurs objectifs, les équipes de recherche de l'ISMER élaborent de nouvelles approches conceptuelles, de nouvelles techniques et de nouveaux outils, qui en eux-mêmes constituent des apports essentiels à l'avancement des connaissances et à l'innovation. La reconnaissance de l'impact et de la portée de ces développements scientifiques sont cruciales tant pour la communauté scientifique que pour les partenaires de recherche et la société dans son ensemble.

La programmation scientifique de l'ISMER s'inscrit ainsi dans trois grands thèmes de recherche qui, loin d'être exclusifs, sont complémentaires et qui représentent une continuité entre la compréhension, la prévision de leur évolution et la protection des écosystèmes côtiers et océaniques et l'utilisation responsable des services qu'ils rendent à nos sociétés. Ces thèmes se définissent ainsi :

© Jérôme Lemelin



Dynamique des systèmes estuariens, côtiers et marins

© Lance Anderson



Santé, résilience et gestion durable des écosystèmes

© Charles Massicotte



Innovation maritime et développement au service de la société

01



© Jérôme Lemelin

DYNAMIQUE DES SYSTÈMES ESTUARIENS, CÔTIERS ET MARINS

L'étude concertée des changements climatiques à l'échelle planétaire a mis en évidence l'existence de liens étroits et complexes entre les différentes sphères du système climatique (hydrosphère, lithosphère, atmosphère, biosphère, cryosphère) et le rôle central de l'océan dans l'évolution du climat.

Les effets parfois brutaux des changements climatiques apportent aux milieux côtiers une panoplie de nouveaux stressés environnementaux. Ceux-ci s'ajoutent aux menaces qui pesaient déjà sur ces milieux à cause des intenses activités humaines depuis le transport maritime jusqu'aux rejets d'eaux usées toxiques. De leur côté, les écosystèmes côtiers, plus dynamiques, semblent être mieux adaptés et plus résilients face aux fluctuations physiques et chimiques que les écosystèmes océaniques. Il existe cependant dans ces écosystèmes des espèces plus sensibles et vulnérables dont les seuils de tolérances demandent à être évalués dans un contexte de changement climatique.

De nouvelles menaces émergentes telles que, par exemple, les microplastiques, les additifs industriels et de nombreux autres contaminants organiques émergents, ont été détectées dans l'environnement à l'échelle mondiale, y compris les régions polaires et les corps humains, avec peu d'informations sur les conséquences. Tous ces phénomènes ont des effets sur la biodiversité. Selon l'Union internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) et le *Census of Marine Life* (réseau de recherche auquel l'ISMER a participé activement), le rythme de disparitions des espèces est actuellement inquiétant. Au cours de la dernière décennie, ces disparitions se sont accentuées de telle sorte que le rythme auquel les espèces disparaissent est maintenant supérieur au rythme de découvertes de nouvelles espèces. La biodiversité, la protection, la conservation et la valorisation sont ainsi devenues des perspectives qui sous-tendent les activités de recherche dans le vaste domaine de connaissance que constituent l'écotoxicologie marine et le suivi des impacts cumulés des stressés environnementaux.

C'est dans ce contexte que les équipes de recherche de l'ISMER travaillent à mieux comprendre l'évolution des environnements marins et à prédire les potentiels changements futurs dans leur fonctionnement. Leurs thématiques de recherche s'orientent sur différents niveaux organisationnels du vivant, depuis la cellule à l'écosystème, jusqu'à inclure l'humain comme composante des systèmes socio-écologiques marins. Les travaux développés à l'ISMER s'intéressent également à différentes échelles spatiales, depuis des problématiques très locales, touchant par exemple les communautés côtières du Québec à des enjeux internationaux comme la prédiction du couplage océan-atmosphère à la méso-échelle.

1.1 Processus fondamentaux à la base du fonctionnement des systèmes marins

OBJECTIFS

1. *Comprendre* la dynamique fondamentale des processus physiques
 2. *Évaluer* les processus photochimiques, leurs effets sur le fonctionnement des écosystèmes marins et sur le cycle du carbone océanique
 3. *Documenter* les principaux phénomènes qui influencent l'évolution de la zone littorale et des écosystèmes côtiers
-

Les équipes de recherche de l'ISMER favorisent une approche holistique multidisciplinaire, permettant l'intégration des composantes biologiques, géologiques et chimiques aux modèles régionaux et climatiques, incluant l'effet global de l'activité humaine sur les écosystèmes. La connaissance des variations des conditions physiques et dynamiques du milieu (température, stratification, courants, glace, éclaircissement, intensité de la lumière réfléchie), concentration du carbone organique dissous (COD), flux de CO₂, pénétration des rayons ultraviolets, fonte du pergélisol et remise en suspension des hydrates de méthane, entre autres, permettront de caractériser les couplages étroits qui existent entre les processus physiques et biologiques. La production des écosystèmes pélagiques et benthiques marins (structure et abondance de la biomasse) et des flux de carbone associés aux mers glacées de l'est du Canada (estuaire et golfe du Saint-Laurent, baie d'Hudson, baie de Baffin) est étudiée dans le contexte des changements climatiques à l'aide d'outils de modélisation, de prises de mesures *in situ*, de l'expérimentation avec des écosystèmes simulés (mésocosmes) et de l'expertise disponible à l'ISMER.

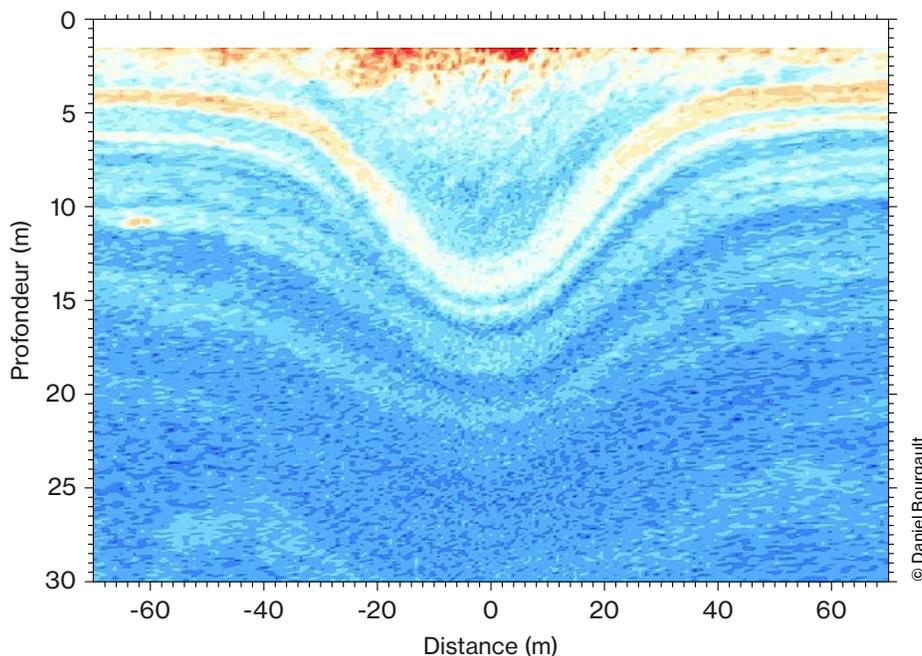
L'océan est un fluide turbulent en mouvement à différentes échelles spatiales et temporelles qui



Écosystèmes simulés à la station Aquicole de l'ISMER à Pointe-au-Père (Rimouski).

Cette infrastructure (mésocosmes) vise à simuler des conditions de réchauffement climatique et d'acidification de l'océan. Des mesures en continu de la chlorophylle a, de la température, du pH et de la concentration en oxygène dissous permettent l'étude des effets des différents facteurs de stress environnemental (acidification, hausse de la température, polluants, etc.) sur la communauté planctonique naturelle.

interagissent entre elles, allant de la circulation à l'échelle des bassins océaniques jusqu'aux plus petits tourbillons de l'ordre du centimètre. Cependant, les modèles numériques de la circulation océanique globale utilisés pour prédire les changements climatiques ne peuvent résoudre les échelles horizontales inférieures à quelques dizaines de kilomètres. Même les modèles numériques régionaux sont limités à des échelles supérieures à quelques centaines de mètres. Les effets collectifs des échelles non résolues sur les plus grandes échelles sont représentés par des paramétrages assez crus, qui souvent ne prennent pas en compte la dynamique des mouvements non résolus. Les équipes de recherche de l'ISMER tentent donc de comprendre la dynamique fondamentale des processus physiques tels que les vagues et leurs interactions avec la glace de mer et le niveau marin, la turbulence quasi-géostrophique à méso- et subméso-échelles, la turbulence à petites échelles, les ondes internes et la convection dans les milieux côtiers et océaniques. Les moyens mis en œuvre incluent les mesures en mer, la télédétection, les expériences de laboratoire et de modélisations numériques, et le développement de nouvelles théories.



Échographie de la colonne d'eau montrant une grosse vague sous-marine en forme de cloche inversée telle qu'observée dans le fjord du Saguenay. Cette vague, d'une hauteur de presque 10 m, se propage à l'interface qui sépare la couche d'eau de surface saumâtre, qui fait environ 5 m d'épaisseur, de la couche d'eau salée sous-jacente.

Une composante essentielle de la dynamique complexe du carbone organique marin et des éléments nutritifs est la photochimie du carbone organique chromophorique (« la matière organique colorée ») dissous et particulaire (CDOM et CPOM). Les systèmes marins nordiques, incluant l'océan Arctique et le système estuarien du Saint-Laurent, sont des environnements propices pour étudier la photochimie de la matière organique en relation avec les changements climatiques. Ceux-ci provoquent, entre autres, un accroissement des apports en eau douce et en matière organique à la surface des mers nordiques, augmentant ainsi la stratification de la colonne d'eau et la concentration des substrats organiques. L'accroissement combiné des rayons ultraviolets (UV), de l'apport de matière organique et de la stratification de la colonne d'eau amplifie de façon synergique la possibilité d'oxydation photochimique de la matière organique colorée. L'objectif des recherches à l'ISMER dans ce domaine est d'évaluer comment la photochimie de la matière organique peut affecter le fonctionnement des écosystèmes marins nordiques dans un contexte de changements climatiques. Entre autres, on cherchera à comprendre l'influence de la photochimie du CDOM et du CPOM sur le cycle des gaz à effet de serre (comme le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et le méthane) et sur le cycle de l'azote. On examinera aussi les implications de l'activité photochimique dans la glace de mer sur le cycle du carbone océanique. On suivra également la distribution des concentrations de méthane à la fois dans l'eau et l'air des régions arctiques et subarctiques canadiennes, y compris l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, afin d'identifier des « points chauds » associés à la fonte du permafrost, à la déstabilisation des hydrates de méthane et l'infiltration d'hydrocarbures sous-marins et l'émission des marais salés.

Une étude exhaustive des processus océanographiques fondamentaux implique l'observation de différents types d'écosystèmes à partir des systèmes côtiers tempérés jusqu'aux environnements polaires (estuaire et golfe du Saint-Laurent, fjord du Saguenay, baie d'Hudson, baie de Baffin, détroit de Nares, Patagonie), avec une attention particulière portée sur les milieux critiques (p. ex. : marais côtiers, lagunes et zones de protection marine). Un regard attentif est porté à l'évolution de la zone côtière, en particulier l'érosion littorale et l'effet des glaces hivernales, afin de pouvoir prédire leurs impacts sur les écosystèmes et les infrastructures littorales. L'évaluation qui sera réalisée de la fréquence de certains risques naturels comme les crues, les tempêtes, les glissements sous-marins et les tremblements de terre au cours des derniers millénaires est cruciale pour une modélisation juste de leurs impacts.

1.2 Rôle de l'océan dans l'évolution des changements climatiques

OBJECTIFS

1. *Approfondir* notre compréhension de la réponse transitoire de la circulation de renversement globale aux changements des flux atmosphériques
 2. *Élucider* les mécanismes physiques régissant le stockage de chaleur atmosphérique dans l'océan
 3. *Clarifier* le couplage entre les mécanismes physiques et biogéochimiques contrôlant le stockage de carbone atmosphérique dans l'océan
-

La circulation de renversement de l'océan global joue un rôle essentiel dans le système climatique en régulant la quantité de chaleur stockée dans les profondeurs océaniques et en influençant les niveaux de CO₂ atmosphérique. On estime que cette circulation explique une part significative de la variabilité climatique à basse fréquence. Les avancées récentes dans notre compréhension théorique de cette circulation ont principalement porté sur des solutions d'équilibre à très long terme sous une contrainte externe constante. Cependant, il est peu probable que l'océan n'ait jamais été en équilibre. Ainsi, malgré son importance cruciale pour le climat mondial, la réponse transitoire de l'océan aux changements des conditions aux limites, tels que les flux de densité et de quantité de mouvement, reste mal comprise.

Les équipes de recherche de l'ISMER s'efforcent donc d'élucider le rôle de l'océan dans le cadre du changement



© Annie Spratt

1.2

climatique transitoire en examinant les processus physiques et biogéochimiques. Cela implique d'améliorer notre compréhension des processus clés régissant la stratification et la circulation abyssale profonde, à la fois pour les climats passés et futurs. Notre recherche se concentre sur les mécanismes physiques sous-jacents qui ont été négligés ou demeurent flous quant à leur influence sur la circulation, ainsi que le stockage de chaleur et de carbone.

Un exemple de mécanisme souvent négligé est le rôle de la circulation forcée par le vent à la surface des bassins océaniques dans l'absorption de chaleur et de carbone par la circulation profonde. Ainsi, nos recherches visent à comprendre le couplage entre cette région des couches supérieures de l'océan, appelée thermocline ventilée, et la circulation de renversement de l'océan global profond. Un autre exemple de recherche consiste à évaluer ce qui contrôle le flux d'eaux chaudes de l'Atlantique vers le bassin Arctique en diagnostiquant une circulation de renversement à travers l'Arctique. Les projections climatiques indiquent une augmentation du transport de chaleur vers l'Arctique en raison du réchauffement, malgré le ralentissement observé de la circulation de renversement de l'Atlantique. Nous nous intéressons ici à la dynamique impliquée dans le bilan thermique de l'océan Arctique, en clarifiant l'interaction couplée entre un mode de circulation de type estuarien et un mode de circulation forcée par le vent. En outre, nos recherches visent également à préciser le rôle de l'interaction entre l'atmosphère, la glace de mer et la circulation de renversement pour les cycles Dansgaard-Oeschger de la dernière période glaciaire, caractérisés par des fluctuations de température dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

Enfin, l'interaction complexe entre la physique, la biologie et la chimie des océans dans le cycle du carbone océanique rend difficile l'identification des principaux processus expliquant les cycles glaciaires. Nos recherches visent donc à mieux comprendre le rôle des changements de circulation et de couverture de glace sur le stockage de carbone d'origine biologique dans les profondeurs de l'océan en utilisant des modèles de circulation globaux couplés à des modèles biogéochimiques.



1.3 Désoxygénation et acidification des océans côtiers

OBJECTIFS

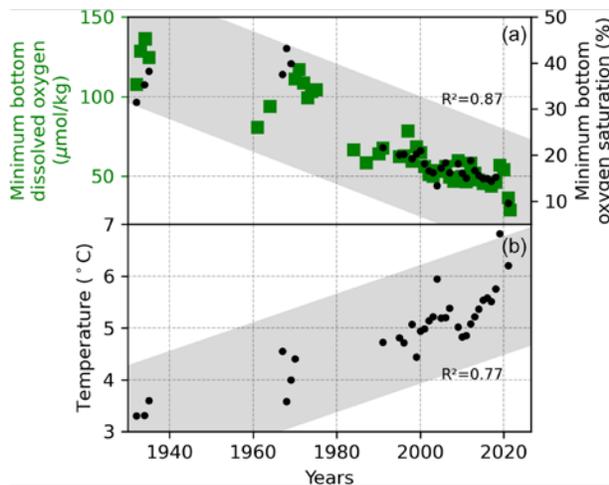
1. *Surveiller* l'étendue, l'intensité et l'évolution de la désoxygénation des eaux du Saint-Laurent et les rétroactions avec l'écosystème
 2. *Quantifier* les modifications dans la chimie des eaux en zone côtière subarctique
 3. *Identifier* les principaux mécanismes biogéochimiques dans la colonne d'eau et les sédiments sous-jacents
 4. *Évaluer* la sensibilité des organismes marins à la désoxygénation des océans
-

L'océan côtier est particulièrement vulnérable au réchauffement, à l'acidification et à la désoxygénation. Ce trio de processus, très étroitement interreliés, entraîne un vaste éventail d'effets négatifs sur les organismes et les écosystèmes marins, ainsi que des rétroactions biogéochimiques encore mal identifiées. Avec la déclaration de Kiel («L'océan perd son souffle»), la communauté scientifique internationale a identifié la perte d'oxygène dissous de l'océan mondial comme le phénomène le plus alarmant de ce trio mortel. En effet, la manière dont les concentrations d'oxygène dissous contrôlent la nature du cycle des éléments est loin d'être comprise, notamment en raison des nombreuses et complexes rétroactions entre l'oxygène dissous, le cycle du carbone et celui des nutriments et, par conséquent, la productivité biologique. Des estimations plus précises de l'évolution des flux de carbone côtiers et des rétroactions biogéochimiques sont essentielles pour prédire et quantifier avec précision les changements futurs du cycle global du carbone. En identifiant

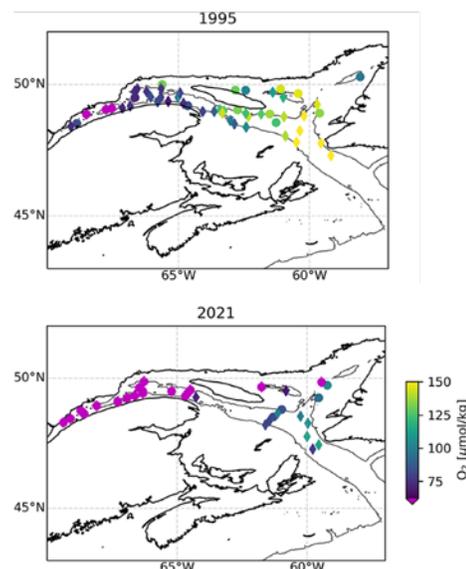
et en quantifiant les différents processus biogéochimiques dans la colonne d'eau et les sédiments de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, les équipes de recherche de l'ISMER participent à l'établissement de diagnostics clés pour tester et suivre l'efficacité des politiques climatiques et des stratégies de remédiation basées sur les océans.

Les résultats de modélisations récentes suggèrent que les niveaux d'oxygène océanique diminueront de manière significative au cours des prochaines décennies, voire des prochains siècles, en réponse aux changements climatiques et à des modifications de la circulation océanique. L'océan pourrait alors connaître des changements majeurs dans le cycle des nutriments et les conditions de pH déclenchés par l'expansion et l'intensification de la sous-oxygénation des masses d'eau côtières et hauturières. Au cours du siècle dernier, les concentrations d'oxygène dissous dans les eaux de fond (>250 m) de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent ont progressivement diminué pour atteindre, dans les années 2000,

le seuil théorique de l'hypoxie (soit ~62 μm ou 20 % de saturation). Depuis 2019, cependant, les concentrations ont chuté drastiquement conduisant à des concentrations d'oxygène de ~30-35 μm (soit 9 à 11 % de saturation), bien en dessous du seuil hypoxique. La diminution à long terme des concentrations d'oxygène dans les eaux de fond, associée à une augmentation de la température, était principalement due à une combinaison de processus physiques et biogéochimiques. Toutefois, depuis 2019, les changements dans le schéma de circulation de l'océan Atlantique Nord sont responsables de la majeure partie de l'appauvrissement en oxygène. Les eaux profondes de l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent sont « à bout de souffle » et l'on s'attend à de graves répercussions sur les écosystèmes et les ressources marines. Les équipes de recherche travaillent à anticiper les conséquences de cette situation sur la production primaire et les bilans biogéochimiques, avec un intérêt spécifique pour les cycles du carbone (organique et inorganique) et des nutriments (azote et phosphore). De plus, l'ISMER est dédié à développer et à déployer de nouvelles techniques de surveillance et quantification de l'hypoxie qui incluent des marqueurs moléculaires, du traçage isotopique, des techniques d'incubation *in situ* et des expérimentations dans des bassins (mésocosmes et benthocosmes) en conditions contrôlées. L'institut participe activement à des programmes nationaux et internationaux pour déterminer les vitesses de dispersion de l'oxygène dans la masse d'eau profonde.



Diminution des concentrations d'oxygène dissous dans les eaux de fonds dans l'estuaire du Saint-Laurent, de 1930 à 2021, associée à l'augmentation des températures. Figure issue de Jutras et al. (2023).



Concentrations en oxygène dissous dans les eaux de fond (>250 m de profondeur) de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. La surface hypoxique (sous 62 μm ou 20 % de saturation d'oxygène) s'est étendue de quelque 1000 km^2 en 1995 à plus de 9000 km^2 en 2021. Figure issue de Jutras et al. (2023).



© Jez Timms

Dans les écosystèmes côtiers et des marges océaniques, les sédiments sont un site important pour la consommation d'oxygène, la reminéralisation de la matière organique et le recyclage des nutriments. Ils sont aussi le site ultime de séquestration et d'enfouissement du carbone et d'éléments métalliques. Les cycles des différents éléments dans ces sédiments sont dominés par des réactions souvent catalysées par des bactéries et fortement influencées par l'activité de la macrofaune. La désoxygénation, le réchauffement et l'acidification de la colonne d'eau altèrent les conditions biogéochimiques benthiques et induisent des rétroactions qui peuvent avoir de fortes conséquences sur le système marin du Saint-Laurent. La réponse du système benthique n'est cependant pas linéaire et des seuils d'oxygène, de pH et de température dans les eaux de fond semblent contrôler la transition du système vers un ou de nouveaux états. Les équipes de recherche de l'ISMER identifient, quantifient et anticipent les mécanismes de rétroaction dans le couplage entre les domaines benthique et pélagique. Entre autres, une attention particulière est portée à la respiration benthique et la reminéralisation de l'azote afin de mieux comprendre le rôle des sédiments dans le métabolisme net, le bilan de nutriments, l'appauvrissement en oxygène, la production métabolique de CO_2 et N_2O dans les eaux profondes de l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Elles s'intéressent au rôle de l'activité des organismes benthiques (bioturbation et bioirrigation) sur les processus d'échanges biogéochimiques à l'interface eau-sédiment. Elles étudient la sensibilité des processus benthiques à la désoxygénation, de l'échelle micrométrique dans la couche limite benthique, à l'échelle métrique dans la colonne sédimentaire où l'enregistrement sédimentaire

« fossilise » les signaux. En comparant les similitudes et les différences entre le Saint-Laurent et d'autres estuaires marins, comme le bassin de Bedford, la mer Baltique et la mer Noire, les équipes de recherche de l'ISMER espèrent contraster les contrôles sédimentaires qui seront influencés par la progression de l'hypoxie. Cette recherche est cruciale pour développer des stratégies de gestion et de conservation plus efficaces face aux défis qui sont globaux et locaux. Les équipes de recherche de l'ISMER s'efforcent de développer des approches *in situ* en utilisant des plateformes benthiques d'observation et de mesure innovantes (véhicules sous-marins téléopérés, incubateurs et microprofileurs) qui leur permettront de continuer à surveiller les conditions biogéochimiques benthiques et le couplage pelago-benthique avec un minimum de perturbation. Les résultats des travaux de recherche des équipes de l'ISMER aideront à tester, concevoir et évaluer des stratégies de remédiation potentielle, y compris de pompage de CO₂, d'injection d'oxygène et d'alcalinisation, aujourd'hui proposées par l'industrie.



© Gwénaëlle Chaillou

N/R Coriolis II lors d'une mission océanographique dans la zone hypoxique de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

Détermination de la concentration d'oxygène par la méthode de Winkler des échantillons d'eau profonde provenant de la zone hypoxique de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.



© Gwénaëlle Chaillou

1.4 Flux de matières et d'énergie aux interfaces océaniques

OBJECTIFS

1. *Prédire* l'impact de la variation des marais dans le cycle global de l'azote en zone côtière
2. *Évaluer* le rôle des substances humiques dans le bilan carbone du Saint-Laurent et de l'Arctique
3. *Quantifier* les flux de carbone entre les compartiments terre-océan-atmosphère pour définir les sources et puits de carbone

Les équipes de recherche de l'ISMER s'intéressent aux effets des apports en nutriments et de l'eutrophisation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent ainsi qu'à la diversité des communautés bactériennes marines et à leur dynamique dans le cycle de l'azote dans les marais côtiers. Ces marais, hôtes d'une communauté benthique abondante, sont des zones critiques, car les échanges d'eau y demeurent limités et ils sont soumis à des apports importants d'azote anthropique provenant d'un développement intensif de l'agriculture et des rejets urbains et industriels. La prévision du devenir de ces marais à la suite des bouleversements climatiques en cours passe par la compréhension des échanges des espèces de l'azote entre l'estuaire du Saint-Laurent et les marais côtiers qui le bordent pour en déterminer l'impact sur l'ensemble du biogéocycle de l'azote dans le système Saint-Laurent.

La matière organique dissoute, comme les substances humiques, contrôle en partie la lumière pénétrant la zone photique, en affectant l'intensité et la composition spectrale du rayonnement photosynthétiquement

actif (PAR) ainsi que le rayonnement UV. Ces substances, produites par une grande diversité de réactions biogéochimiques conduisent à une « mutation chimique » des biopolymères naturels (lipides, protéines, sucres) synthétisés par les organismes. Les molécules transformées forment les substances humiques. Elles ouvrent un nouveau champ de formes et de réactivités chimiques qui réécrit le devenir de la matière organique dans l'environnement. Comme l'abondance de ces substances est liée au bon fonctionnement des écosystèmes, les équipes de recherche de l'ISMER s'efforceront de comprendre les effets des changements globaux sur les services d'écosystèmes associés à ces substances. Par exemple, si un réchauffement climatique produit des climats plus chauds et secs, cela entraînera moins de drainage de substances humiques vers les écosystèmes aquatiques, ce qui affectera les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. L'effet de filtre solaire associé à la présence des substances humiques en sera modifié. Ces substances humiques peuvent aussi avoir des effets indésirables, comme favoriser le développement d'efflorescences

d'algues nuisibles ou toxiques. Des découvertes récentes concernant le cycle du carbone font aussi partie des intérêts de l'ISMER. En particulier, la production et l'importance des particules exopolymériques produites par le phytoplancton et les bactéries semblent jouer un rôle central dans les flux de carbone à l'intérieur de la colonne d'eau. Ces particules pourraient entraîner, dans le futur, une augmentation importante de l'intensité du pompage biologique du gaz carbonique dans l'océan. Le système du Saint-Laurent, l'un des plus grands de la planète, pourrait contribuer de façon non négligeable aux flux globaux de carbone, mais cette contribution reste très peu connue.

Échantillonnage des eaux porales dans la zone intertidale sur les plages de l'Île-Verte (Bas-Saint-Laurent), quantification des flux d'eau souterraine, de carbone et de nutriments à l'océan côtier.

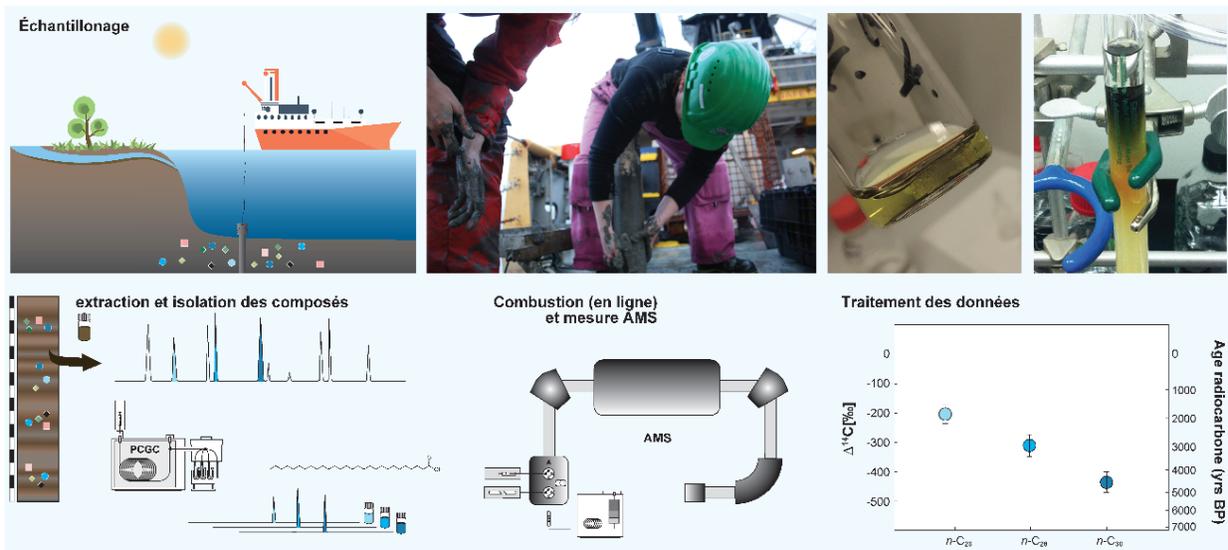


© Gwénaëlle Chaillou

Échantillonnage de la matière organique dissoute terrigène (DOM) et du carbone organique dissous (DOC) dans les eaux porales de plage le long des falaises de pergélisol à Augustus Hill, dans la région de Cambridge Bay (Iqaluktuuttiaq, région du Kitikmeot au Nunavut).

Le flux de matière organique terrigène dans l'océan est également étudié par les équipes de recherche de l'ISMER. Le carbone organique terrestre est principalement transporté vers l'océan par les rivières et contient du carbone organique biosphérique récemment produit par les plantes et les sols ainsi que du carbone pétrogénique provenant de l'érosion du substrat rocheux. Si une fraction importante de ce carbone organique terrestre est reminéralisée pendant le transport, une autre fraction est enfouie dans les sédiments marins. L'enfouissement du carbone biosphérique récemment produit est un mécanisme efficace pour réduire le CO₂ atmosphérique. En revanche, la reminéralisation du carbone organique pétrogénique ou d'autres sources de carbone organique ancien, comme les sols du pergélisol, constitue une source d'acidification pour les océans côtiers et une source de CO₂ pour l'atmosphère.

Le changement climatique et les perturbations anthropiques influencent le flux de carbone organique vers l'océan et, par conséquent, influencent directement le budget global du carbone. De plus, la végétation marine (algues, herbiers de phanérogames) se développant en densité et biomasse importantes en zone infralittorale est un puits de carbone atmosphérique qui est stocké temporairement dans leur biomasse après assimilation. Le devenir de ce carbone organique est similaire au carbone organique d'origine terrestre : il peut être séquestré dans les sédiments marins côtiers ou profonds, reminéralisé en carbone inorganique ou transporté vers le rivage où il contribue aux écosystèmes terrestres. Les équipes de recherche de l'ISMER travaillent sur la caractérisation moléculaire et la réactivité de ces différentes matières ainsi qu'à la quantification de ces mécanismes critiques de rétroaction terre-océan-atmosphère, à l'heure actuelle et dans le passé. En outre, elles étudient les mécanismes de rétroaction dans l'océan : l'apport excessif de carbone organique terrestre et sa reminéralisation ultérieure dans l'océan contribuent à la désoxygénation et à l'acidification qui influencent la chimie des eaux côtières et les cycles biogéochimiques des sédiments. L'ampleur de ces mécanismes de rétroaction en réponse au changement climatique dans l'estuaire et le golfe de Saint-Laurent et dans l'Arctique canadien sont largement inconnus.



© Stephanie Kusch

Schéma illustrant la préparation d'échantillons de sédiments marins pour l'analyse radiocarbone spécifique des biomarqueurs de cire végétale. L'équipe de biogéochimie organique moléculaire de l'ISMER utilise cette méthode pour reconstruire les flux de carbone organique terrestre biosphérique et pétrogénique à travers l'espace et le temps.

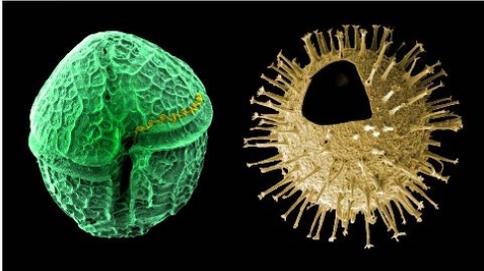
1.4

1.5 Comprendre le passé pour mieux prédire l'avenir

OBJECTIFS

1. *Reconstituer* l'évolution des variations climatiques et océanographiques passées pour comprendre la dynamique du climat et documenter l'évolution des conditions océanographiques de surface en étudiant :
 - les archives géologiques;
 - les variations des conditions océaniques de surface au cours des temps géologiques récents;
 - les processus qui gouvernent les interactions inlandsis-atmosphère-océans durant les glaciations;
 - les variations passées du champ magnétique terrestre;
 - la composition minéralogique et géochimique des sédiments détritiques;
 - les caractéristiques sclérochronologiques et sclérochimiques des structures calcifiées;
 2. *Cartographier, analyser et comprendre* les processus qui façonnent les sédiments des fonds marins et des zones côtières
-





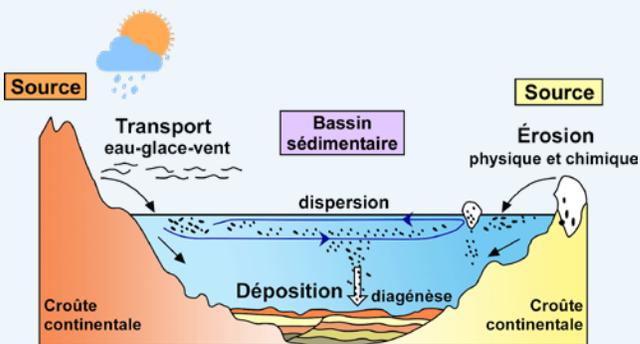
© André Rochon

Le dinoflagellé *Protoceratium reticulatum* (à gauche) et le kyste *Operculodinium centrocarpum* qu'il produit durant son cycle de vie annuel (à droite).

Les dinoflagellés sont des protistes unicellulaires dont certains produisent des toxines et sont à l'origine des floraisons d'algues nuisibles. Les formes mobiles et leurs kystes sont étudiés dans les travaux traitant du transport d'espèces aquatiques envahissantes dans l'eau et les sédiments de ballast de navires. Les formes enkystées se retrouvent préservées dans les sédiments marins et leurs assemblages fossiles sont utilisés en tant qu'indicateurs de l'évolution des conditions océaniques de surface au cours des temps géologiques récents.

Les projections du climat futur réalisées à partir de modèles numériques ont fait l'objet d'une compilation récente par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). L'ensemble des modèles simule une diminution de l'étendue de la glace de mer dans l'Arctique au cours des prochaines décennies. Toutefois, les résultats illustrent une grande dispersion des projections et aucune simulation ne prédit la diminution du couvert de glace de mer telle qu'elle a été observée au cours des dernières années. De surcroît, les simulations sont réalisées sans prendre en compte le risque de fonte des calottes glaciaires actuelles, celle du Groenland notamment. Il s'avère donc indispensable de développer des outils de validation des modèles de simulation numérique du climat et de la cryosphère. Une solution pour tester des hypothèses sur la dynamique climatique et valider les modèles développés à des fins prédictives est l'utilisation des variations climatiques passées, accessibles à partir des archives géologiques. Ces travaux, réalisés dans le cadre de programmes internationaux comme ArcticNet, REFUGE-ARCTIC, l'*International Ocean Drilling Program* et l'*International Continental Scientific Drilling Program*, visent à comprendre la dynamique du climat et à documenter l'évolution des conditions océanographiques de surface (interactions océan-atmosphère). Ils tenteront de reconstituer l'évolution des variations climatiques et océanographiques passées à l'aide de carottes sédimentaires prélevées dans les zones d'accumulation des fonds marins et des marais côtiers en étudiant les propriétés sédimentologiques, minéralogiques, physiques, magnétiques, géochimiques et micropaléontologiques des sédiments.

Des expertises de pointe dans l'analyse des assemblages de microfossiles (notamment de dinoflagellés), en magnétostratigraphie, en minéralogie et en géochimie sédimentaire ont été développées au cours des dernières années et continueront d'être à l'avant-garde.



© Jean-Carlos Montero-Serrano

Les propriétés sédimentologiques, minéralogiques, physiques, magnétiques, géochimiques et micropaléontologiques des sédiments permettent d'étudier dans un bassin sédimentaire les voies de propagation des sédiments fluviatiles, l'origine et le mélange des apports sédimentaires en milieu marin ainsi que l'évolution des variations climatiques et océanographiques passées.

L'étude de la stratigraphie, des corps sédimentaires, des variations passées du niveau marin ainsi que de la mise en place des sédiments constitue une fenêtre sur tous les processus bio-physico-chimiques qui ont lieu sur la planète à diverses échelles de temps. Des travaux sont donc poursuivis par les équipes de recherche de l'ISMER dans le but de déterminer la stratigraphie des sédiments de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, mais aussi ceux de la baie d'Hudson, de l'Arctique canadien, de la Patagonie et de la Nouvelle-Zélande. Ceci a pour but non seulement de reconstituer l'histoire quaternaire de façon plus complète et détaillée, mais aussi d'étudier les processus qui gouvernent les interactions inlandsis-océans durant les glaciations. Il s'agit de comprendre les mécanismes et les interactions entre plusieurs processus agissant de concert (dynamique des courants glaciaires, apports d'eaux de fonte sous-glaciaire, processus de vêlage, augmentation du niveau marin relatif, tendance au réchauffement, entre autres), processus qui pourraient jouer un rôle critique dans les prochains siècles. Par ailleurs, les données stratigraphiques et sédimentologiques recueillies par les équipes de recherche de l'ISMER peuvent servir de base pour l'établissement du niveau de référence (p. ex. : biodiversité, aires marines protégées, déversement d'hydrocarbures, etc.).

L'ISMER poursuivra également ses travaux en paléomagnétisme en étudiant des variations passées du champ magnétique terrestre. Sur le plan fondamental, le paléomagnétisme permet de comprendre le géodynamo interne de la Terre, processus

fondamental de notre planète qui génère et maintient le champ magnétique terrestre, alors que sur le plan plus appliqué, le paléomagnétisme sert à établir la stratigraphie de séquences sédimentaires. Au cours des prochaines années, l'ISMER poursuivra des travaux en paléomagnétisme dans les deux hémisphères. Une attention particulière sera portée aux hautes latitudes où l'ISMER joue actuellement un rôle de leader, et aux variations rapides du champ magnétique terrestre.

En ce qui concerne l'étude des sédiments détritiques, l'équipe de recherche en géologie marine de l'ISMER utilise la diffraction et fluorescence aux rayons X pour étudier la composition minéralogique et géochimique de la fraction minérale du sédiment. En effet, parmi les traceurs des transferts de particules sédimentaires allochtones, la minéralogie et géochimie des sédiments sont des outils d'une grande utilité pour étudier la dynamique sédimentaire en milieu marin. La signature sédimentaire de ces traceurs varie en fonction de la lithologie et de la pétrologie des zones sources. Par ailleurs, les sédiments fins, comme les argiles et limons fins, peuvent être advectés sur de grandes distances par les rivières, courants océaniques et par le vent. Dans ce contexte, l'étude de la composition

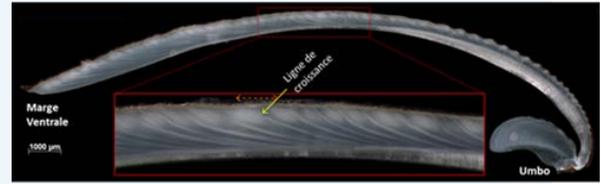


© Jean-Carlos Montero-Serrano

Vue aérienne du glacier Fitzroy sur l'île de Devon prise lors d'une mission océanographique à l'été 2021 dans l'Arctique à bord du brise-glace de recherche *NGCC Amundsen*.

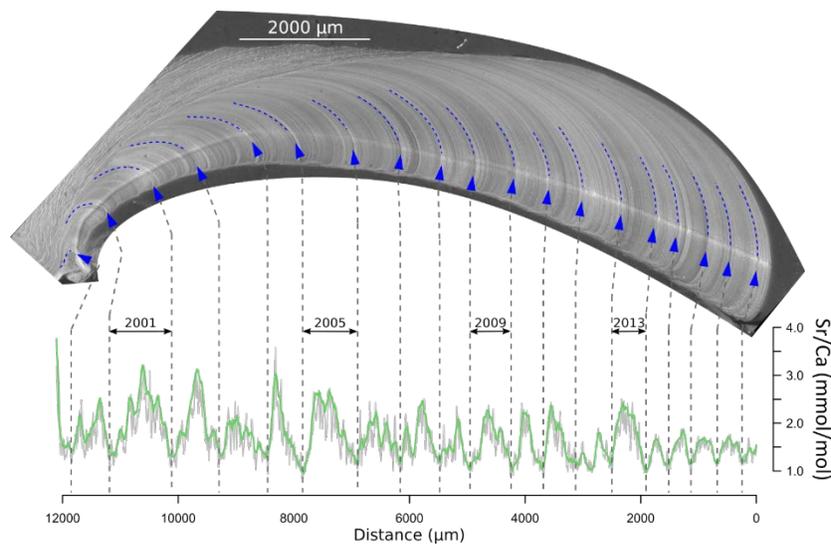
minéralogique et géochimique des sédiments détritiques permet de déterminer les zones sources du matériel terrigène, de déchiffrer les mécanismes de transport sédimentaire, de retracer la dynamique sédimentaire en milieu marin et de reconstituer les conditions hydrologiques et climatiques passées.

Une autre façon d'étudier le passé pour anticiper l'avenir est d'étudier les structures calcifiées des organismes, comme les coquilles de mollusques ou les vertèbres et otolithes (pièces de l'oreille interne) de poissons. Ces structures permettent de reconstruire l'histoire vécue par les organismes vivants et sont couramment utilisées pour déterminer leur âge (« sclérochronologie »). Elles conservent des marques temporelles enregistrées au cours de la vie, et leur composition chimique (degré de calcification, concentration en minéraux traces et isotopes stables) reflète



Section de 160 µm d'épaisseur d'une coquille d'*Astarte moerchi* utilisées pour des analyses sclérochronologiques (Figure tirée de la thèse de Justine Doré [2020], Doré et al., 2022).

les conditions ambiantes rencontrées au cours de la croissance (production primaire, température de l'eau, niveau d'alimentation, pH, teneur en oxygène dissous, composition de l'eau de mer). En utilisant la sclérochronologie et la sclérochimie, les équipes de recherche de l'ISMER reconstruisent le climat océanique dans lequel les organismes ont vécu.

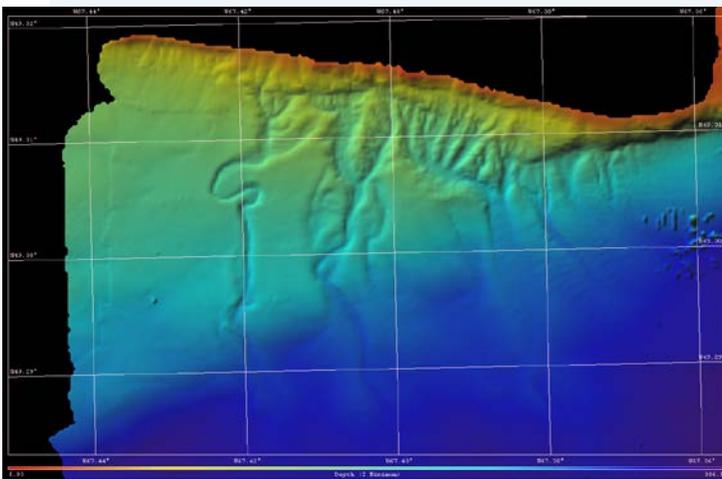


Profil du rapport de strontium sur calcium (Sr/Ca) d'un spécimen de mactre de Stimpson et photographie de sa plaque charnière. La mactre de Stimpson est caractérisée par un nombre surnuméraire de stries de croissance qui ne permet pas d'utiliser l'approche traditionnelle de sclérochronologie. Une méthode indirecte de sclérochimie permet alors d'identifier les stries annuelles de croissance. La sclérochimie est un outil en développement qui permet non seulement de pallier au manque de monitoring dans certaines zones mais qui sert aussi d'outil de gestion des stocks de bivalves dans les bancs coquilliers (Figure tirée de la thèse de Justine Doré [2020], Doré et al., 2022).

Les travaux de recherche réalisés à l'ISMER en géologie marine visent également l'étude détaillée des fonds marins et des zones littorales ainsi que de leurs sédiments à l'aide de techniques de pointe, qui sont employées aussi bien en laboratoire que lors de campagnes océanographiques dans le fjord du Saguenay, l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, mais aussi le long de la côte est canadienne, dans l'Arctique et dans l'hémisphère Sud. L'objectif est de cartographier, d'analyser et de comprendre les processus qui façonnent les sédiments des fonds marins et des zones côtières. Les équipes de recherche de l'ISMER espèrent ainsi remonter plusieurs milliers, voire des centaines de milliers d'années dans le temps, afin d'apporter des informations précieuses sur les catastrophes naturelles, l'érosion côtière, le transport sédimentaire, les changements climatiques et l'histoire géologique du Canada au-delà des enregistrements historiques. Les activités de recherche se déroulent selon plusieurs axes : (1) la reconstitution du paléoclimat à partir de carottes de sédiments ; (2) la stratigraphie des sédiments marins quaternaires ; (3) les risques naturels ; et (4) le transport sédimentaire, la provenance des sédiments et l'érosion côtière.

Influence possible des ondes internes sur la formation des canyons sous-marins

© Jean-Carlos Montero-Serrano



Cartographie de canyons sous-marins au large de la Pointe-des-Monts.

Des équipes de recherche de la Commission géologique du Canada, de l'ISMER-UQAR, de l'Université du Nouveau-Brunswick et de l'Université Laval ont étudié des canyons sous-marins actifs au large de Pointe-des-Monts, dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. À partir de cartographie sous-marine, de l'analyse de carottes sédimentaires, d'images satellitaires et de la modélisation hydrodynamique, ces équipes de recherche ont démontré que l'activité récente de ces canyons était liée à des ondes internes et des tempêtes majeures et non à l'apport de sédiments par les rivières. Ces travaux illustrent le caractère multidisciplinaire de l'océanographie tout en mettant de l'avant le rôle jusqu'ici peu documenté des ondes internes et des tempêtes sur la dynamique des canyons sous-marins.

1.6 Dynamique sédimentaire et érosion côtière

OBJECTIFS

1. *Prédire* des taux d'érosion et leur évolution en fonction des changements climatiques dans le futur
2. *Évaluer* l'adéquation des interventions de génie côtier contre l'érosion littorale
3. *Déterminer* les processus sédimentaires qui conditionnent la préservation des marais côtiers
4. *Étudier* les processus hivernaux et l'impact de la glace sur le transport sédimentaire

Étude de l'hydrodynamisme côtier



© Urs Neumeier

Ce type de mouillage avec un houlographe-profileur de courant mesure les vagues, les courants et la glace hivernale; ces données sont essentielles pour étudier l'érosion côtière et calibrer les modèles numériques.

La fréquence des catastrophes naturelles a augmenté ces dernières décennies et cette augmentation semble reliée au réchauffement de la planète. Le Québec et l'est du Canada ne sont pas épargnés et plusieurs zones géographiques sensibles ont déjà été touchées. En particulier, la hausse du niveau de la mer ainsi que la diminution de la couverture de glace accélèrent l'érosion dans de nombreux secteurs du littoral de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Les constats scientifiques relatifs aux changements globaux ont conduit l'ISMER à porter une attention particulière aux risques naturels qui en découlent et qui sont analysés sous toutes leurs facettes, en conditions extrêmes ou évolutives en fonction des événements actuels ou antérieurs. Les travaux visent à analyser leurs impacts, entre autres, sur la biologique (augmentation ou diminution du nombre d'espèces, migration vers les zones polaires, augmentation de la compétition interspécifique). D'autres travaux visent l'étude des floraisons d'algues nuisibles et la propagation d'espèces aquatiques envahissantes dans les eaux côtières canadiennes qui sont des phénomènes en expansion à l'échelle mondiale.

1.6

La mobilité des sédiments en zone littorale représente différents risques pour les populations côtières, le trafic maritime et les exploitants de ressources marines. De sérieux problèmes d'érosion côtière et de risques de submersion, en particulier, existent au Québec, en raison des fluctuations des niveaux d'eau. Les équipes de recherche de l'ISMER, en collaboration avec plusieurs partenaires, dont les ministères des Transports et de la Sécurité publique du Québec, étudient les processus responsables de l'érosion côtière pour la relier aux conditions hydrodynamiques (vagues, courants et surcote de tempête) et aux caractéristiques sédimentaires et géomorphologiques locales. Les objectifs sont de prédire des taux d'érosion et l'évolution de ceux-ci en fonction des changements climatiques futurs, en particulier les variations du climat, des vagues, du niveau marin relatif et de la couverture de glace hivernale. Les objectifs sont aussi d'évaluer l'adéquation des interventions de génie côtier contre l'érosion littorale. Les équipes de recherche de l'ISMER explorent également le rôle des canyons sous-marins dans le transfert des sédiments de la côte jusqu'à leur dépôt plus en profondeur dans le chenal Laurentien.

Les marais côtiers, qui sont des écosystèmes particulièrement riches, sont étudiés pour déterminer leur évolution passée et future, ainsi que pour comprendre les processus hydrodynamiques et sédimentaires et les relations avec les différentes communautés végétales. Il s'agit de déterminer les conditions sédimentaires qui conditionnent la préservation de ces zones humides actuellement menacées d'érosion, surtout dans un contexte de hausse du niveau marin global. Les travaux portent sur les variations saisonnières des processus, notamment sur l'influence de la végétation, qui réduit les courants et piège les sédiments, et sur l'érodabilité des sédiments cohésifs, qui est fortement influencée par des biofilms recouvrant leur surface. Une attention particulière est portée aux processus hivernaux. Les marais jouent aussi un important rôle de zone tampon pour dissiper l'énergie marine frappant la côte, c'est pourquoi l'atténuation de l'énergie des vagues par la végétation et par d'autres éléments morphologiques est mesurée et la propagation des vagues dans la zone littorale modélisée.



02



© AdobeStock

SANTÉ, RÉSILIENCE ET GESTION DURABLE DES ÉCOSYSTÈMES

2.1 Évaluation et protection de la biodiversité

OBJECTIFS

1. *Étudier* l'impact cumulé des stresseurs environnementaux et des activités humaines sur les écosystèmes
 2. *Documenter* les conditions qui contribuent au maintien de la biodiversité taxonomique et fonctionnelle
 3. *Évaluer* si la diminution de la biodiversité entraîne une perte de services écosystémiques dans des milieux benthiques très contrastés
 4. *Développer* la mesure de la biodiversité fonctionnelle
-

L'étude des processus écologiques fondamentaux implique également celle des interactions entre les espèces composant les différents niveaux trophiques, des microorganismes jusqu'aux prédateurs apicaux. Par ailleurs, les modifications des composantes biologiques dans le milieu pélagique ont une incidence sur le milieu benthique. Les études des équipes de recherche de l'ISMER visent à caractériser la dynamique de couplage physique/biologique structurant les relations prédateurs/proies à tous les niveaux du réseau trophique tout en considérant la variabilité des habitats benthiques et pélagiques en termes de diversité fonctionnelle et de résistance aux perturbations anthropiques. L'étude des effets combinés de la hausse du CO₂, de la température, de la diminution du pH et de la variation des conditions lumineuses seront une priorité pour comprendre comment le changement climatique affecte les écosystèmes marins, et comment à leur tour ils peuvent affecter les conditions locales et le climat. De plus, les activités humaines plus locales (p. ex. : transport maritime, rejet des eaux usées) sont devenues un important élément structurant les communautés marines et sont étudiées, en même temps que les stress environnementaux, sous forme d'impacts cumulés.



Les équipes de recherche de l'ISMER examinent les conditions naturelles qui contribuent au maintien de la biodiversité via l'étude des réponses biologiques et de l'adaptabilité des organismes marins à leur environnement via les processus d'adaptation et d'acclimatation. Ces études permettent notamment de prédire les niveaux de sensibilité des espèces face à des impacts simples et cumulés de stress environnementaux et d'envisager l'évolution de leur aire de répartition future et de ce fait, de changements de biodiversité dans les communautés. Les recherches portent également sur l'étude de l'écologie et de la dynamique des populations de poissons et d'invertébrés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour contribuer au choix des espèces exploitables par la pêche commerciale ou utilisable en fermes aquacoles. Les équipes de recherche de l'ISMER y étudient les conditions optimales et critiques explicatives de l'évolution spatio-temporelle de la diversité spécifique des poissons démersaux dans le golfe du Saint-Laurent et d'invertébrés benthiques et pélagiques dans l'estuaire du Saint-Laurent soumis aux conditions d'hypoxie et d'apports de contaminants. Un intérêt particulier est également porté aux espèces anadromes et catadromes qui utilisent les habitats côtiers durant certaines portions de leur cycle de vie et qui supportent des activités économiques d'importance pour plusieurs communautés côtières du Québec et de l'est du Canada. Des études poussées sur la reproduction d'invertébrés benthiques mettent également

2.1

en relief les ressemblances et dissemblances des processus fonctionnels inter-espèces dans différents écosystèmes de hautes latitudes. Les résultats obtenus sont donc d'intérêt autant pour le volet conservation que pour le volet de production aquacole.

Les efforts de recherche visent également à caractériser la diversité taxonomique, génétique et fonctionnelle des systèmes côtiers, estuariens et marins en fonction de différentes échelles spatiales et temporelles. La qualité écologique et l'état de santé de nombreux écosystèmes côtiers (p. ex. : herbiers marins) se concentrent principalement sur la biodiversité taxonomique (parfois liée à des paramètres environnementaux) ou sur des indices basés sur les caractéristiques des écosystèmes. Cependant, la capacité d'un écosystème à résister aux changements environnementaux n'est pas seulement liée à sa biodiversité en termes de nombre et d'identité des espèces qui s'y trouvent. La diversité des fonctions peut fournir des indications essentielles sur le potentiel de résilience des écosystèmes et doit être prise en compte pour la caractérisation et la protection de la biodiversité. Le maintien et la

régulation des fonctions dans un écosystème dépendent donc essentiellement des rôles et des caractéristiques écologiques des taxons présents. L'étude des traits fonctionnels (c'est-à-dire les caractéristiques des espèces qui influencent leurs performances fonctionnelles et leur aptitude) peut fournir une perspective sur la biodiversité qui s'est avérée efficace pour la modélisation prédictive de la réponse d'une communauté au changement. Les équipes de recherche de l'ISMER étudient ainsi le lien entre biodiversité et fonctionnement pour évaluer dans quelle mesure une perte de biodiversité ou une modification des conditions océanographiques peut impacter les services écosystémiques fournis par les écosystèmes marins et la résistance de ces systèmes aux pressions anthropiques sous des conditions d'effets cumulés (p. ex. : pêches, hypoxie, pollution, acidification, bruit, etc.). La caractérisation conjointe des biodiversités taxonomique, génétique et fonctionnelle fournit également aux gestionnaires et aux décideurs de nouvelles recommandations, car les programmes de conservation et de gestion maintiennent souvent la biodiversité en partant de l'hypothèse implicite que les fonctions écologiques seront également maintenues.

2.2 Perturbations locales et résilience des écosystèmes

OBJECTIFS

1. *Comprendre* les déclencheurs de floraisons d'algues nuisibles ou toxiques et documenter l'écologie des espèces d'algues en cause
 2. *Élucider* les mécanismes du développement et du maintien des lits de kystes de dormance de dinoflagellés nuisibles
 3. *Étudier* le déplacement d'espèces nuisibles par les eaux et sédiments de ballast des navires en zone Arctique et dans les eaux de l'est du Canada
 4. *Étudier* les principaux facteurs locaux affectant des systèmes végétalisés (herbiers marins et forêts d'algues) et limitant leur restauration
 5. *Établir* des monitorages longue durée pour surveiller l'état écologique et mesurer la résilience des écosystèmes côtiers
 6. *Étudier* la distribution et le devenir des contaminants dont la toxicité et les risques écologiques sont connus dans le contexte du changement climatique
-

L'utilisation de plus en plus abondante d'engrais artificiels pour la culture à grande échelle, les rejets industriels et urbains et l'utilisation accrue des zones côtières à des fins récréotouristiques et aquacoles constituent les principaux facteurs responsables de l'eutrophisation des régions côtières. Cette eutrophisation résulte en une augmentation de la fréquence des floraisons d'algues nuisibles ou toxiques, comme celle survenue dans l'estuaire du Saint-Laurent à l'été 2008 et causée par le dinoflagellé *Alexandrium catenella*. De tels événements ont des effets importants sur la chaîne alimentaire marine (mortalité de poissons, d'oiseaux et de mammifères marins) qui peuvent se répercuter sur la santé humaine. Il importe donc de connaître les causes de tels événements, l'écologie des espèces impliquées, ainsi que les mécanismes de développement, de maintien des lits de kystes de dormance et de réensemencement des masses d'eau de surface la saison suivante.

De nombreuses substances chimiques sont introduites dans l'environnement marin, notamment des polluants organiques persistants (POP) anciennement interdits, des matériaux d'usage courant, des sous-produits industriels, des composés toxiques d'origine naturelle et des métaux lourds. Il a été démontré

que certaines substances, telles que les POP et les métaux lourds, ainsi que leurs produits de transformation, présentent des risques pour la santé biologique, humaine et écologique. Cependant, les sources, la distribution, la bioaccumulation et les impacts de ces produits chimiques dans des systèmes marins spécifiques, tels que l'océan profond, les écosystèmes du Saint-Laurent et les régions polaires, sont encore mal compris. Ce manque de compréhension entrave l'évaluation des risques liés à ces produits chimiques dans l'environnement marin, ce qui est particulièrement important dans le contexte du changement climatique. Le changement climatique pourrait affecter le transport et la répartition de certains contaminants. Par exemple, des preuves suggèrent que le pesticide interdit α -hexachlorocyclohexane (α -HCH) est transporté de la masse d'eau du Saint-Laurent vers l'air et progressivement distribué sur la côte sud du Saint-Laurent.

Ce processus est typiquement corrélé positivement avec la température. De plus, des analyses de tendances temporelles de contaminants présentant des risques connus sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des réglementations actuelles, telle que la Convention de Stockholm, et pour comprendre les variations des risques d'exposition et de bioaccumulation. Les recherches menées à l'ISMER visent à étudier les sources, la distribution, le devenir et les tendances temporelles de ces contaminants dans le contexte du changement climatique afin de mieux élucider les risques d'exposition des organismes à ces contaminants.

Les impacts anthropiques ne s'articulent pas seulement autour de composés chimiques; l'augmentation en nombre et en taille des navires servant au commerce mondial a comme conséquence un transport accru de nombreux organismes aquatiques qui voyagent dans les réservoirs de ballast (eau et sédiment de fond) ou sur les coques des navires. Ces « espèces aquatiques envahissantes » peuvent parfois causer des dommages considérables aux environnements récepteurs (le cas de la moule zébrée dans les Grands Lacs est un exemple célèbre), soit en déplaçant des populations locales (affectant leurs prédateurs) ou en provoquant d'autres effets nocifs (p. ex. : colmatage de prises d'eau dans le cas de la moule zébrée). Des équipes de recherche de l'ISMER s'intéressent au transport d'algues nuisibles et d'invertébrés via l'eau et le sédiment de ballast des navires en zone Arctique et dans les eaux de l'est du Canada, particulièrement pour les dinoflagellés dont plusieurs espèces sont toxiques. Les travaux récents effectués dans la région d'Iqaluit (nord de la baie de Frobisher, Nunavut) montrent que plusieurs espèces toxiques de dinoflagellés et de diatomées font partie des populations phytoplanctoniques locales. La phénologie de ces populations continue d'être étudiée afin de caractériser leur évolution temporelle et spatiale grâce à un échantillonnage annuel et saisonnier. Certaines régions à risque pour l'introduction d'espèces aquatiques envahissantes via les rejets d'eau de ballast sont également à l'étude, notamment dans le port de la Baie de Milne dans le nord de la Terre de Baffin où de nombreux vraquiers déchargent leurs

eaux de ballast avant de charger leur cargaison de minerai de fer. Finalement, les résultats préliminaires concernant les populations phytoplanctoniques le long de la côte est de la baie de James ont mis en évidence des floraisons massives du dinoflagellé toxique *Dinophysis acuminata* dans certains échantillons récoltés près de la communauté Cree Wemindji, à l'embouchure de la rivière Maquatua, et de quatre autres espèces potentiellement toxiques dans plusieurs autres échantillons (*Alexandrium catenella*, *Dinophysis norvegica*, *Phalacroma rotundata* et *Protoceratium reticulatum*). *Dinophysis acuminata* est notamment responsable d'intoxications diarrhéiques par les mollusques.

Les équipes de recherche de l'ISMER étudient les facteurs environnementaux affectant les écosystèmes végétalisés côtiers tels que les herbiers marins et les forêts d'algues et limitant leur restauration dans les systèmes boréaux et subarctiques. À l'échelle planétaire, les herbiers marins ont globalement subi des réductions drastiques à cause de la dégradation des conditions environnementales des eaux côtières, principalement liée aux rejets des activités anthropiques (p. ex. : eutrophisation et pollutions aux hydrocarbures). Les forêts d'algues sont quant à elles principalement affectées par les épisodes d'augmentation de température des eaux. Cependant, les études sur ces milieux indiquent pour la plupart que les dynamiques et variations temporelles ont une composante très locale nécessitant une meilleure compréhension des facteurs limitant la croissance et le développement des espèces de macrophytes. Les recherches développées à l'ISMER utilisent donc des expérimentations *in situ* et en laboratoire ainsi que des suivis environnementaux pour mesurer les effets limitant de la lumière, des nutriments et de la chimie des carbonates associées à des perturbations locales sur les macrophytes marins.



© Christian Nozais

Suivi de densité dans les forêts de laminaires d'Anticosti.



Échantillonnage mensuel des herbiers de zostères à Rimouski.

Dans un contexte de changement climatique, les suivis et évaluations d'état écologique contribuent à comprendre la résistance et évaluer les capacités de résilience des écosystèmes face aux perturbations. Il est nécessaire de surveiller régulièrement et de manière constante dans le temps les écosystèmes côtiers afin de suivre leur évolution et d'évaluer leur état écologique afin de maintenir la productivité, la biodiversité de ces systèmes et la durabilité des services qu'ils fournissent. Les équipes de l'ISMER déploient des monitorages et participent à l'élaboration de protocoles nationaux pour évaluer l'état écologique des écosystèmes côtiers. Les résultats acquis soutiennent les prises de décisions politiques en matière de gestion et de protection des habitats et ressources naturelles. Ils servent également à la réflexion sur l'élaboration de stratégies d'adaptation et de gestion du risque face aux changements climatiques et aux perturbations anthropiques locales. Cela peut notamment inclure la régulation des activités humaines, la protection des habitats critiques, la gestion des zones marines protégées, et d'autres mesures visant à assurer une utilisation durable des ressources marines et leur protection.

2.2

2.3 Exploitation durable et valorisation des biomasses marines (aquaculture, pêche, biotechnologie)

OBJECTIFS

1. *Étudier* les déterminants microbiologiques, physiologiques, génomiques et nutritionnels de la performance des poissons et invertébrés pour soutenir leur exploitation
 2. *Caractériser* l'état de santé des écosystèmes exploités
 3. *Qualifier et quantifier* l'influence de l'aquaculture sur l'environnement
 4. *Développer* des technologies de productivité, de récolte et de valorisation durable de la biomasse
-

Les besoins alimentaires de la planète augmentent sans cesse et les écosystèmes naturels ont atteint ou dépassé leur capacité à y répondre. Le plafonnement, sinon l'épuisement, des ressources halieutiques traditionnelles pose également de nouveaux défis du point de vue écologique, particulièrement dans le contexte des changements climatiques et autres perturbations anthropiques. Les solutions se trouvent dans l'acquisition rapide de connaissances afin d'identifier des réponses technologiques et de gestion. De façon générale, l'exploitation des ressources naturelles engendre des impacts sur les écosystèmes. Ces questions n'interpellent pas que le domaine scientifique, mais les équipes de recherche doivent alimenter les débats sociétaux en fournissant les connaissances nécessaires aux prises de décisions éclairées. De façon globale, l'ISMER veut se donner la capacité d'établir des diagnostics sur l'état des écosystèmes, avec le souci majeur de les protéger tout en permettant une utilisation et une valorisation durable des ressources

naturelles québécoises et canadiennes. Par ces acquis, l'ISMER veut développer des innovations technologiques et des nouveaux modes de gestion permettant un développement responsable respectant les capacités de support du milieu.

L'aquaculture est devenue incontournable dans notre façon de penser l'utilisation des bioressources marines, que ce soit en soutien, en complément ou en remplacement des prélèvements traditionnels. L'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) a démontré que ce mode de production en croissance constante a excédé celui de la pêche pour répondre aux besoins humains en organismes aquatiques. Des défis doivent cependant être relevés. Il s'agit d'activités très sensibles à un ensemble de facteurs biologiques, sanitaires ou climatiques qui peuvent influencer les performances des animaux, aussi bien au niveau de la reproduction, de leur recrutement et de leur santé que du grossissement. Comme

2 3

toutes activités anthropiques, les impacts environnementaux et sociaux liés au développement aquacole ne sont pas nuls et doivent être mesurés adéquatement afin de trouver des solutions d'atténuation efficaces. Quant à la pêche, ce mode d'exploitation est en plein bouleversement généré par les changements climatiques et les modifications d'habitat qui en résultent. Par exemple, le retour fulgurant du sébaste constitue un événement déstabilisateur du secteur halieutique québécois en imposant d'importants changements, comme une prédation accrue sur la crevette nordique. Dans toute la gestion et le développement de ces activités humaines, l'ISMER joue un rôle primordial afin de favoriser la formation et l'innovation durable orientées vers une exploitation responsable.



© Jean-Daniel Tourangeau-Larivière

Étude de l'écophysiologie des sébastes à l'aide de respiromètres *in situ* dans l'estuaire du Saint-Laurent.

Tout en couvrant les aspects fondamentaux d'acquisition de connaissances, les recherches effectuées à l'ISMER sont fortement orientées vers les priorités de développement identifiées par les acteurs du milieu. La synergie créée par la concertation et la collaboration interdisciplinaire et intersectorielle entre équipes de recherche de compétences diverses permettent à l'ISMER de jouer un rôle de direction du réseau Ressources Aquatiques Québec (Regroupement stratégique FRQNT). Les équipes de recherche de l'ISMER s'intéressent non seulement à l'étude microbiologique, physiologique, génomique, nutritionnelle et écologique d'espèces adéquates et performantes en élevage, mais également au soutien de la pêche commerciale. Il est d'ores et déjà reconnu que les changements climatiques ont un impact sur les choix des espèces et de souches ou les types de production à favoriser pour le développement futur de l'industrie aquacole. Ils entraînent également le déplacement de stocks actuellement exploités par les pêches commerciales. Ces questions nécessitent des réponses sur lesquelles les équipes de recherche de l'ISMER travaillent de concert avec les gestionnaires du milieu et les industriels. La qualité des installations de la station aquicole de Pointe-au-Père couplée aux capacités analytiques exceptionnelles de l'ISMER jouent un rôle clé dans la capacité des équipes de recherche de l'ISMER à réaliser des projets d'avant-garde dans ce domaine.



Larves produites à l'écloserie expérimentale de Pointe-au-Père d'huître *Crassostrea virginica*, de moule *Mytilus edulis* et de pétoncle *Placopecten magellanicus*, les trois espèces en production conchylicole au Québec.

Le volet de la valorisation de la biomasse marine fait partie intégrante du vaste domaine des sciences marines en développement à l'ISMER. Ce volet constitue l'un des points forts des nouvelles stratégies gouvernementales en favorisant davantage la croissance économique des régions où l'on pratique la pêche en diversifiant la base des ressources halieutiques tout en respectant l'environnement. Cette diversification passe par l'obtention de la biomasse par l'aquaculture, la pêche de nouvelles espèces sous-exploitées et/ou par la valorisation des résidus pour les espèces déjà exploitées.

La science des produits naturels se trouve avantagée par l'augmentation des capacités de séparation et de caractérisation des molécules marines naturelles développées à l'ISMER, qui permet de les valoriser en leur trouvant une application cosmétique, nutraceutique ou pharmaceutique.

Ce volet implique des travaux de recherche appliqués à la découverte de nouvelles propriétés nutritionnelles, nutraceutiques et pharmaceutiques pour des tissus ou fractions biologiques qui autrement n'auraient pas de valeur commerciale. Les travaux consistent à rechercher des molécules ou encore des familles de composés montrant des activités biologiques bien spécifiques comme la cytotoxicité envers des lignées cellulaires cancéreuses ou au contraire une activité probiotique favorisant la régénération de cellules de la peau ou de la flore intestinale. La station aquicole de Pointe-au-Père, avec ses capacités de production massive de microalgues, d'élevage de poissons et d'invertébrés et son nouveau laboratoire pour l'utilisation des radiotraceurs, est le principal outil favorisant de développement.



Pigment bleu, marennine, extrait de la diatomée *Haslea ostrearia* valorisé pour ses caractéristiques antibactériennes.

2.4 Préparation au risque des pollutions émergentes

OBJECTIFS

1. *Identifier et cartographier* les communautés biologiques
 2. *Caractériser* la nature des fonds marins à la surface des sédiments et dans les couches profondes
 3. *Modéliser* la circulation hydrodynamique dans le golfe du Saint-Laurent afin de prévoir le devenir des nappes de pétrole
 4. *Identifier* les sources d'hydrocarbures en milieu marin et leurs mécanismes de dégradation en milieu froid
 5. *Identifier* les contaminants émergents, leur devenir dans l'environnement marin et leurs effets sur les écosystèmes
-

Le bruit anthropique est maintenant reconnu comme une source de pollution émergente dans le milieu marin. Le bruit chronique lié à la navigation peut nuire à la qualité des habitats marins par leur fragmentation acoustique tout en masquant des sons importants. En 50 ans, il est estimé que le bruit généré par le trafic maritime a augmenté de plus de 5 %, surtout en raison d'un accroissement du nombre des bateaux commerciaux, ceux-ci étant plus puissants et rapides. Plus nombreux, ces navires sont aussi plus grands. Ceux d'une longueur de plus de 100 m émettent des sons de haute intensité allant de 160 à 220 dB re 1 µPa 1 m à basse fréquence, pendant de longues périodes. Ces sons peuvent être entendus jusqu'à des centaines de kilomètres aux alentours. Par conséquent, le bruit généré par les gros navires domine

souvent le paysage sonore sous-marin à basse fréquence dans de nombreux environnements marins. Le bruit sous-marin a donc été reconnu comme une source de pollution émergente par plusieurs organisations et juridictions nationales et internationales (p. ex. : DCSMM, MMPA, SARA, UNESCO, IMO). C'est dans ce contexte que l'ISMER en collaboration avec Pêches et Océans Canada a développé l'ATLAS des paysages acoustiques du Saint-Laurent (soundscape-atlas.uqar.ca). C'est une application web opérationnelle, extrêmement fluide, mettant à portée de quelques clics plus de 7 millions de cartes de composantes de paysages sonores océaniques et des risques d'impacts acoustiques associés dans le système du Saint-Laurent. L'information de l'impact du bruit étant essentiellement développée autour des mammifères marins,

il y a encore beaucoup d'information à acquérir sur les poissons et invertébrés marins afin d'alimenter cet ATLAS. L'acquisition de ces données intégrées à l'ATLAS aidera les réflexions sur les besoins potentiels de réglementation et de mesures d'atténuation de la part des ministères responsables de la gestion des ressources. Le système Saint-Laurent est une zone majeure pour le transport de marchandises dans l'Amérique du Nord. Le trafic par cette voie maritime offre un moyen d'échange à faible coût et son potentiel de développement pourrait encore être optimisé, augmentant la pression anthropique de cette activité économique majeure. Toutefois, le Saint-Laurent est également un des plus grands estuaires du monde, qui est reconnu comme un des habitats ayant la plus forte productivité et biodiversité sur la planète. L'énergie solaire transformée par la productivité primaire en nourriture aux animaux est très supérieure aux autres écosystèmes productifs, comme les prairies, les forêts tempérées et même les zones agricoles intensives. Il en résulte que les ressources biologiques du Saint-Laurent ont un rôle majeur dans le maintien de la biodiversité canadienne tout en étant le cœur économique de nombreuse communauté côtière par son exploitation via la pêche et l'aquaculture, mais également pour son observation par les touristes. Environ 40 % de la population habite près des côtes ou le long des estuaires, ce qui provoque diverses sources de pression anthropique sur les écosystèmes aquatiques, dont les biens et services bénéficient aux industries et communautés locales. Développer des outils performants d'aide à la décision pour une utilisation et une exploitation responsable de cet environnement est majeur pour le Québec et le Canada et leur objectif commun de maintien de la biodiversité.

D'autre part, l'activité humaine innovante produit chaque année de nouvelles molécules et matériaux capables d'améliorer la qualité de vie. Ces nouveaux matériaux, souvent développés pour des besoins spécifiques, peuvent être utilisés, par la suite, dans de nombreuses applications inconnues lors de leur commercialisation initiale. Il en résulte une utilisation croissante qui conduit à la libération des nouveaux matériaux dans l'environnement, souvent sans que leurs effets toxicologiques soient connus. Les équipes de recherche de l'ISMER sont attentives à la présence de nouvelles sources de pollution pour lesquelles la communauté scientifique a peu d'information sur les concentrations environnementales et sur les effets écotoxicologiques. À titre d'exemple, on peut citer les polymères synthétiques (y compris les microplastiques), les produits d'hygiène personnelle et les additifs ou sous-produits industriels dont la distribution et les effets sont mal connus lorsqu'ils sont rejetés dans l'environnement. Pour les contaminants émergents, les équipes de recherche de l'ISMER souhaitent contribuer au développement de nouvelles méthodes et techniques de caractérisation pour mieux les mesurer et décrire leur devenir et leurs effets dans l'environnement. Nous étudions également la toxicocinétique et la toxicodynamique

des contaminants émergents chez différentes espèces (poissons, oiseaux et mammifères) afin de mieux comprendre leur toxicité et les mécanismes associés. En ce qui concerne les microplastiques, la photodégradation et la biodégradation jouent un rôle important dans le contrôle de la transformation et du devenir des microplastiques. En outre, l'altération des microplastiques pourrait libérer des gaz à l'état de traces qui agissent sur le climat. Les équipes de recherche de l'ISMER souhaitent quantifier les taux de ces dégradations, élucider leurs impacts sur les propriétés physico-chimiques des microplastiques et comprendre comment la contamination par les microplastiques peut influencer sur le changement climatique. De plus, des travaux récents en écotoxicologie montrent que les effets toxiques observés dans l'environnement proviennent de facteurs de stress cumulatifs qui combinent leurs actions dans les milieux naturels. Les équipes de recherche de l'ISMER travaillent également sur l'identification et l'impact des facteurs de stress cumulatifs dans les environnements de haute latitude tels que l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et l'Arctique.



03



/03

INNOVATION MARITIME ET DÉVELOPPEMENT AU SERVICE DE LA SOCIÉTÉ

Les recherches effectuées à l'ISMER permettent non seulement de répondre à des questions scientifiques complexes, mais également de développer des outils pour mieux cibler l'utilisation des écosystèmes marins et mieux se prémunir des impacts environnementaux qui affectent cette utilisation. De la cartographie des fonds marins et des habitats à la protection des berges, en passant par le développement et l'exploitation de nouvelles molécules, les contributions des équipes de recherche de l'ISMER sont nombreuses.



3.1 Développement de modèles numériques

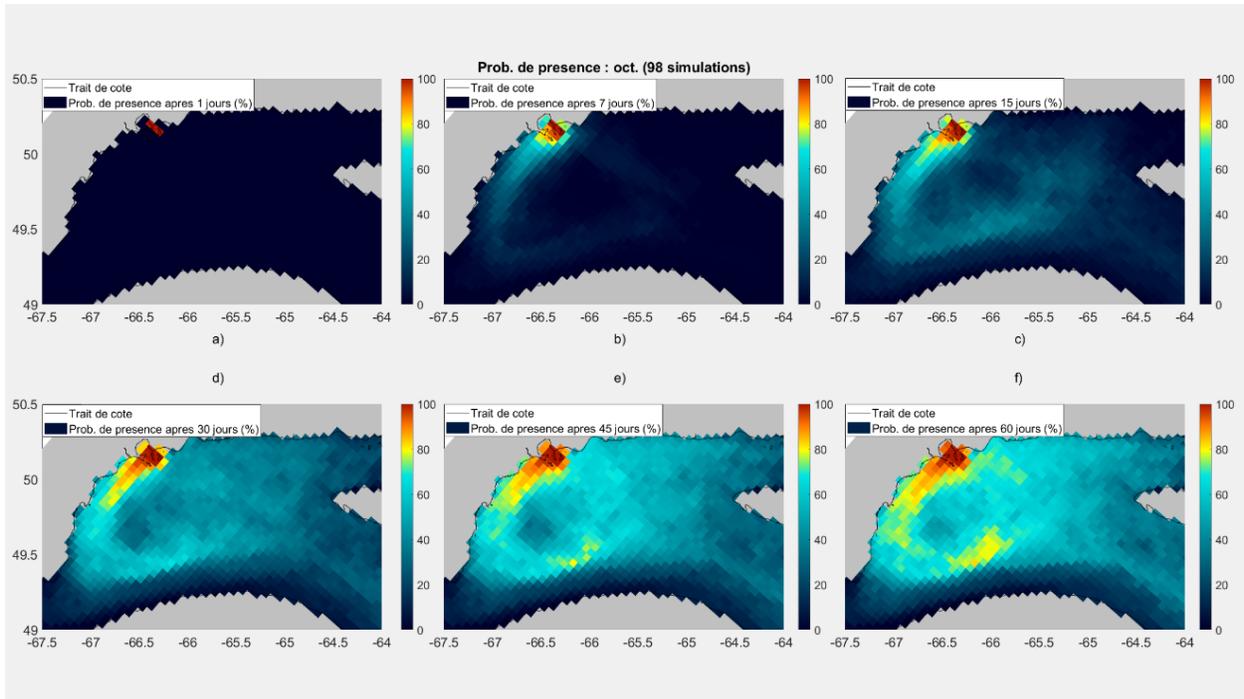
OBJECTIFS

1. *Construire* des représentations mathématiques des processus océaniques
 2. *Simuler* les conditions passées et futures à des fins de prévision
-

L'outil intégrateur par excellence de plusieurs travaux effectués à l'ISMER est la modélisation numérique qui représente mathématiquement les différents processus (physiques, biologiques, biogéochimiques) et les intègre numériquement dans l'espace et le temps, dans des régions d'intérêts particuliers et sur des périodes plus ou moins longues, passées ou futures. La complexité des modèles est typiquement adaptée à la question de recherche. Parmi les modèles opérés par l'équipe de recherche de l'ISMER, il y a les modèles de circulation tridimensionnelle appliqués au golfe du Saint-Laurent, à la baie d'Hudson et à la baie de Baffin. Par l'étude de processus, les modèles sont constamment améliorés et testés avec les données récoltées sur le terrain ou provenant des bases de données opérationnelles. En intégrant un grand nombre de processus différents, les modèles permettent de mieux comprendre les interactions entre les différentes composantes et dans diverses situations idéalisées que l'on ne peut obtenir en réalité. Ultimement, les modèles servent à faire des prédictions à court, moyen ou long terme et des efforts sont déployés afin de les rendre opérationnels et applicables, et ce, en travaillant de concert avec des partenaires nationaux et internationaux impliqués dans ces recherches.



3.1



Probabilité de présence (%) de contaminants passifs comptabilisée sur 98 simulations de rejet au port de Sept-Îles au cours du mois d'octobre après 1, 7, 15, 30, 45 et 60 jours. Les rejets sont faits sur une période de 2 jours et suivis pendant 60 jours. Les simulations numériques de courant proviennent d'un simulateur océanique tridimensionnel tenant en compte la météorologie, les débits d'eau douce et les marées. Ces dérives sont représentatives des conditions probables en octobre dans le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent (figure tirée de Senneville et Dumont, 2023).

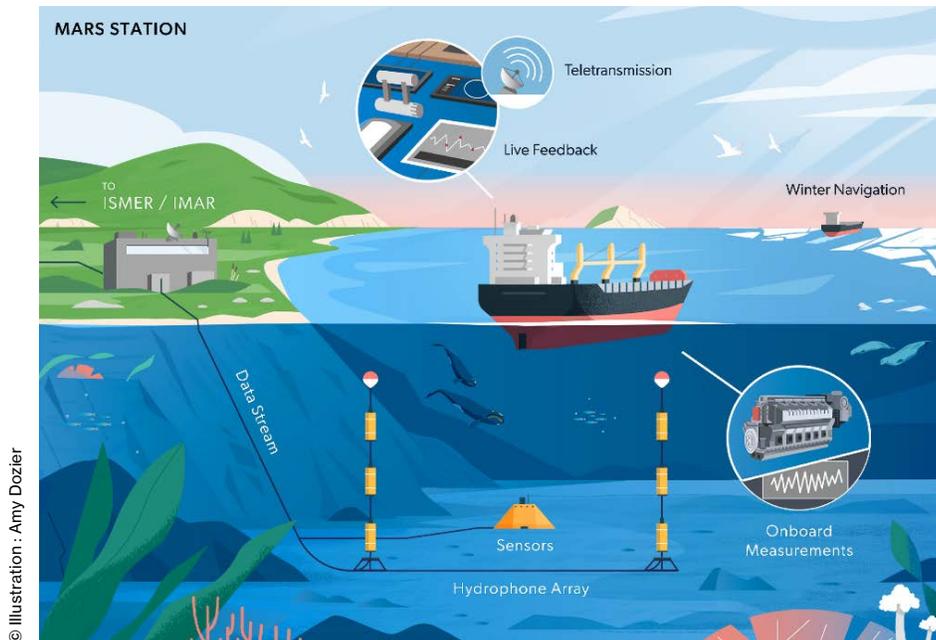


3.2 Applications multidisciplinaires et observations multicapteurs

OBJECTIFS

1. *Développer* des outils et des usages adaptés aux défis et aux technologies modernes
 2. *Construire* les observatoires de demain
-

Les travaux de l'ISMER accompagnent l'émergence de nouvelles technologies de collecte et de traitement de données, ouvrant la voie à l'amélioration de notre capacité à observer l'environnement marin. Le développement d'outils de télédétection (p. ex. : radars hautes fréquences, acoustique) et de plateformes autonomes d'observations aériennes (drones), de surface (bouées dérivantes) et sous-marines (AUV, ROV, drones sous-marins, *gliders*, *landers*), permet d'augmenter la durée, la portée et la résolution des observations tout en préservant la sécurité des personnes et en limitant l'impact environnemental. La mise en place d'observatoires multidisciplinaires permet de cibler les différents processus (physiques, biologiques, biogéochimiques) et les facteurs anthropiques influençant l'environnement marin, de fournir des observations *in situ* aux bases de données opérationnelles (OGSL) et de contribuer à l'amélioration des modèles. L'utilisation d'espèces sentinelles instrumentées par des capteurs haut-débit offre également des possibilités intéressantes de suivi des facteurs de stress environnementaux. L'ISMER développe entre autres des bouées permettant l'instrumentation de moules avec des valvomètres permettant l'envoi de données par réseau cellulaire. Ces mesures de comportement *in situ* permettent de prédire instantanément l'arrivée de polluants et d'algues toxiques à des faibles concentrations.



Observatoire marin câblé MARS, imaginé par l'ISMER et Innovation maritime pour l'observation en continu et en temps réel du bruit sous-marin et de ses effets sur l'environnement. Il accueillera une batterie de capteurs pour observer les pressions climatiques et anthropiques, la qualité de l'environnement marin, prévenir les géorisques ou suivre les mammifères marins.

Les travaux de recherche en acoustique permettent de quantifier la part anthropique, et son évolution, du bruit ambiant sous-marin et d'en étudier l'impact sur les écosystèmes. Ils permettent d'observer et comprendre certains processus physiques, liés notamment aux interactions océan-atmosphère-glace. Ils participent à la compréhension des comportements et de la dynamique des populations marines.

Les équipes de l'ISMER participent activement aux efforts internationaux de développement et standardisation des méthodes d'observation, et de promotion des bonnes pratiques, via notamment le GOOS, *OceanGliders*, OGC et *Ocean Sound EOVS*.

3.2

3.3 Adaptation des systèmes socio-écologiques aux changements climatiques et risques naturels

OBJECTIFS

1. *Identifier* les zones de grande biodiversité
 2. *Localiser* les habitats sensibles et les sites de concentration des espèces rares ou menacées
 3. *Anticiper* les conséquences des changements globaux sur la distribution des espèces
 4. *Identifier, caractériser, dater et déterminer* les mécanismes responsables du dépôt des glissements sous-marins
 5. *Étudier* la fréquence et la magnitude des événements sismiques et glissements sous-marins dans les régions particulièrement exposées
 6. *Développer* des solutions transformatrices d'adaptation et d'atténuation au bénéfice des systèmes socio-écologiques
-

La notion de « biens et services d'écosystèmes » est une approche économique de l'environnement qui tente de calculer et d'attribuer une valeur aux divers processus biologiques qui produisent des bénéfices retirés par l'espèce humaine de son environnement immédiat et de l'écosystème global. Une telle approche est controversée et les scientifiques peuvent contribuer très positivement au débat parfois virulent qui s'en dégage. Il faut répondre non seulement à la question : « comment protéger et conserver un écosystème », mais aussi expliquer « comment fonctionne ce système et identifier les bénéfices d'un fonctionnement équilibré » et dire « pourquoi il faut le préserver et à quel prix ». Les données scientifiques sur la qualité des eaux et des sédiments, sur les effets toxiques de substances d'origine anthropique, mais également sur les effets des activités humaines en général (p. ex. : chalutage, rejet d'eau de ballast, bruit, etc.) et sur les risques environnementaux entrent directement dans l'équation de ce débat de fond de la société.

L'un des défis actuels dans la gestion des écosystèmes marins est la détermination de zones prioritaires à protéger. Pour ce faire, il importe d'abord d'identifier les zones de grande biodiversité (taxonomique, génétique et fonctionnelle) et de localiser les habitats sensibles et les sites de concentration des espèces rares ou menacées. La création de cartes continues de prédiction d'habitat potentiel est l'une des stratégies disponibles. Ces cartes illustrent la présence de communautés d'espèces



© Louis-Philippe Poitras

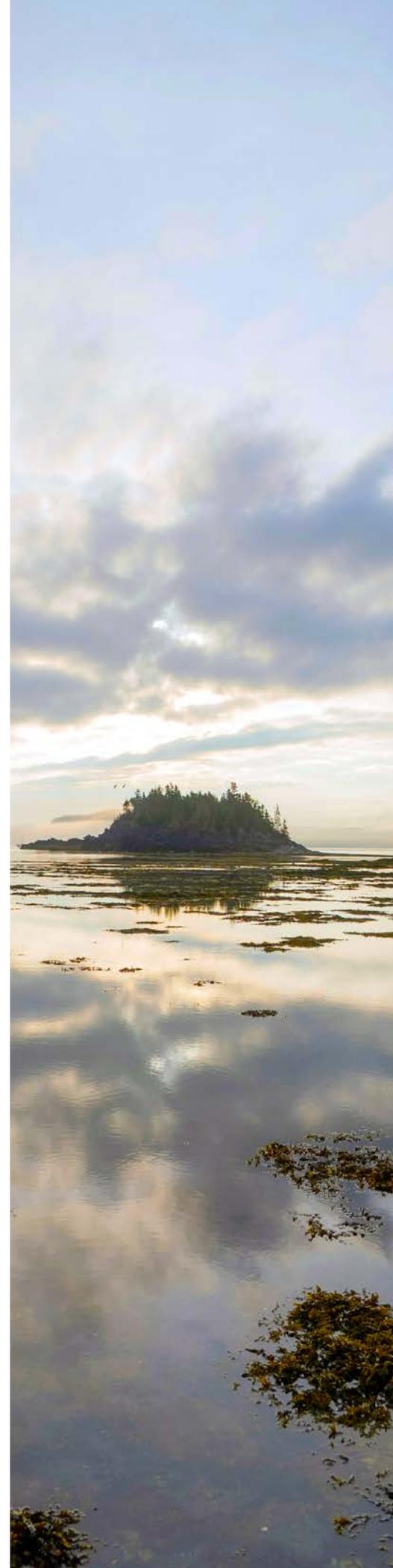
en fonction de l'habitat physique et biologique optimal pour ces communautés. Une fois le modèle initial de prédiction établi, il devient plus facile de mettre à jour les données de distribution spatiale en fonction des variables environnementales disponibles (chlorophylle, sédiment, courant, topographie, etc.). Il est aussi possible d'inclure dans le modèle les sources de stress (simple ou cumulé), que celles-ci soient d'origine anthropique (pression de pêche, aquaculture, pollution, bruit) ou naturelle (modification du niveau de la mer, de la température de l'eau, de la salinité, etc.). Ainsi, la réunion sur une même carte de l'ensemble des paramètres environnementaux et des activités anthropiques présents dans une zone d'étude permet, dans un second temps, de créer une carte continue de prédiction de la distribution spatiale des organismes benthiques et de la biodiversité.

Qui plus est, ce type de modèle tient compte de l'état dynamique des communautés spécifiques répondant aux changements environnementaux. Cette approche permet d'anticiper les conséquences d'éventuels changements globaux sur la distribution des espèces, ce qui aide les décideurs à prendre les meilleures mesures pour une saine gestion de l'environnement marin. Les équipes de recherche de l'ISMER contribuent à la cartographie et la modélisation des habitats benthiques et pélagiques à des fins de gestion par les relevés de monitoring déployés sur la façade est du Canada et dans l'Arctique, mais également par les études menées sur la sensibilité des espèces marines.

Dans le contexte actuel de crise climatique, un second enjeu important est le développement des solutions basées sur la nature pour mitiger

les changements climatiques. Les récentes Conférences des Parties (COP) ont mis en évidence le rôle primordial de l'océan dans la lutte contre les changements climatiques, et différentes techniques et technologies visant à retirer le dioxyde de carbone de l'atmosphère pour le stocker dans les océans attirent aujourd'hui un intérêt exponentiel. Les équipes de recherche de l'ISMER contribuent à la recherche transparente sur ces mécanismes et leurs impacts par leurs travaux sur les dynamiques océaniques, les flux de matière et de carbone aux interfaces, à la cartographie des écosystèmes et de leurs fonctions. Parmi les solutions basées sur la nature touchant aux océans, les équipes de l'ISMER sont en excellente position pour contribuer à l'étude de (i) la restauration des écosystèmes dégradés, tels que les marais et prairies sous-marines pour favoriser l'absorption du CO₂ par les sédiments, (ii) l'afforestation des océans, soit la protection ou culture des algues marines pour capturer du carbone, (iii) les approches BECCS (Bioénergie avec Capture et Stockage du Carbone) qui sont des cultures bioénergétiques pour produire de l'énergie, tout en capturant le CO₂ émis pendant le processus et (iv) l'alcalinisation des eaux marines pour augmenter la capacité d'absorption de CO₂ des océans.

Le changement climatique affecte profondément les communautés côtières, intensifiant la convergence des pressions locales et mondiales sur les populations autochtones et autres populations côtières. Ces pressions sont vécues comme des défis en interaction mutuelle, à la fois écologiques et sociétaux au sein de ses systèmes socio-écologiques (SSE) où l'humain et les interactions de la société sont des composantes intégrales de l'écosystème. Pour faire progresser la justice et les solutions équitables pour les communautés confrontées à ces défis, et afin de refléter la complexité des SSE, les équipes de recherche de l'ISMER s'engagent à développer de nouvelles perspectives et approches créatives. Par exemple, l'intégration de différentes formes de savoirs (scientifique, traditionnel, expérientiel) permettrait d'envisager de nouveaux modèles de gestion





© Régis-Hari Bouchard

face à la chute de ressources marines comme la crevette nordique. L'exploration de nouveaux modèles économiques associés aux ressources marines (p. ex. : co-culture algues et mollusques) ou aux transports (réduction du bruit et augmentation des performances des bateaux) s'inscrit dans une perspective d'économie bleue à laquelle les recherches de l'ISMER contribuent. Le changement climatique entraîne des défis en termes de gestion des ressources en eau en milieu côtier : la hausse de niveau marin et la redondance des submersions marines favorisant la salinisation des ressources exploitées, qu'elles soient de surface ou souterraine. La prédiction des zones à risque de salinisation ainsi que la sensibilisation des gestionnaires de l'eau des territoires côtiers est primordiale pour s'assurer de la sécurité et des bien-être physique, mental et économique des populations côtières. Les recherches interdisciplinaires développées par les équipes de recherche de l'ISMER en collaboration avec des équipes de recherche en sciences sociales, humaines et de la santé visent à développer conjointement avec les acteurs locaux des solutions transformatrices d'adaptation et d'atténuation ancrées dans les visions et les priorités des communautés vivant avec les conséquences du changement climatique.

L'ISMER poursuivra également ses travaux sur l'étude des risques naturels. Les récents séismes catastrophiques, comme ceux survenus au Japon en début de 2024, nous rappellent à quel point nous vivons sur une planète dynamique. Au Canada, on reconnaît diverses zones sismiques, dont une importante dans l'est du pays : la zone sismique de Charlevoix/Bas-Saint-Laurent (ZSCBSL). Plusieurs séismes d'une magnitude supérieure à 6 sur l'échelle de Richter s'y sont produits au cours des derniers 350 ans, dont celui du 5 février 1663 qui ébranla l'ensemble du nord-est de l'Amérique du Nord et causa d'énormes glissements de terrain tant terrestres (Saint-Jean-Vianney, Shawinigan, Betsiamites, Mont Éboulé) que sous-marins (fjord du Saguenay, estuaire du Saint-Laurent). Aujourd'hui, un

3.3

tel séisme causerait des dommages considérables, tant sur le plan de la stabilité des infrastructures (viaducs, routes, ponts, etc.) que sur la sécurité des populations. Une bonne compréhension des séismes de cette région et de leurs impacts est essentielle pour déterminer le risque et pour établir la période de retour de tels événements. Or, le milieu marin préserve les traces des événements catastrophiques comme les séismes, les glissements de terrain, les crues et même les tsunamis. Ces traces sont notamment visibles dans la nature et la composition des sédiments ainsi que dans leur stratigraphie et leur architecture. Les équipes de recherche de l'ISMER tenteront donc d'identifier, de caractériser, de dater et de déterminer les mécanismes responsables du dépôt des glissements sous-marins dans le fjord du Saguenay, mais aussi dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent afin de connaître la fréquence et la magnitude de ces événements pour des régions particulièrement exposées comme les régions du Québec situées dans la ZSCBSL. De façon similaire, les travaux de l'ISMER porteront aussi sur des glissements sous-marins et des crues majeures identifiés dans la baie d'Hudson et l'Arctique canadien, en plus de travaux dans d'autres régions du monde (Petites Antilles, Nouvelle-Zélande et Japon).





ABRÉVIATIONS

- ASP-ICE *Arctic Science Partnership* ou Partenariat scientifique pour l'Arctique - ICE
- BeBEST Laboratoire franco-québécois de recherche et de développement technologique en écologie benthique
- CAISN II *NSERC - Canadian Aquatic Invasive Species Network* ou Réseau canadien sur les espèces aquatiques envahissantes
- CHONell Canadian Health Oceans Network
- DCSMM directive cadre stratégie pour le milieu marin
- DESS Diplôme d'études supérieures spécialisées
- EOV *Essential Ocean Variable* ou Variable essentielle de l'océan
- FRQNT Fonds de recherche du Québec Nature et technologies
- GIEC Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
- Geotop Centre de recherche sur la dynamique du système Terre
- GOOS *Global Ocean Observing System* ou Système mondial d'observation des océans
- IMO *International Maritime Organization* ou Organisation maritime internationale
- MEOPAR *Marine Environmental Observation, Prediction and Response Network*

MMPA	<i>Marine Mammal Protection Act</i> ou Loi sur la protection des mammifères marins
NGCC	Navire de garde côtière canadienne
OGC	<i>Ocean gliders Canada</i> ou Planeurs sous-marins Canada
OGSL	Observatoire global du Saint-Laurent
RAQ	Ressources Aquatiques Québec
SARA	<i>Species at Risk Act</i> ou Loi sur les espèces en péril
UICN	Union internationale pour la Conservation de la Nature
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture



Photo de groupe lors de la rencontre annuelle 2024 des professeures et professeurs de l'ISMER au Gîte du Mont-Albert.



ISMER

Institut
des sciences
de la mer

UQAR

310, allée des Ursulines, C.P. 3300
Rimouski (Québec) G5L 3A1
CANADA

Courriel : ismer@uqar.ca
www.uqar.ca/institut-des-sciences-de-la-mer-ismer/

