

PROGRAMME DE TRAVAIL

Projet de recherche visant à évaluer l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et à déterminer les solutions d'adaptation



Umiujaq



Ivujivik

Partenaires



Villages
nordiques
du Nunavik



Affaires indiennes
et du Nord Canada

Indian and Northern
Affairs Canada



Environnement
Canada

Environment
Canada



Transports
Canada

Transport
Canada



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

INRS
Université d'avant-garde

UQAR SMER



ENVIRONNEMENT
ILLIMITÉ INC.



TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE	5
1.1	Objectifs du projet.....	6
2	DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROJET DE RECHERCHE.....	8
2.1	Principales activités du projet de recherche.....	8
2.2	Schéma des activités de recherche	9
2.3	Bénéfices additionnels du projet de recherche	11
2.3.1	Niveaux d'eau : aménagement du territoire et gestion de risques.....	11
2.3.2	Dynamique des glaces : sécurité des populations	12
2.3.3	Changements climatiques et événements extrêmes : enjeux économiques, développement des infrastructures maritimes et navigation.....	12
3	INSTALLATION D'ÉQUIPEMENTS ET COLLECTE DE DONNÉES	13
3.1	Choix des sites pour la collecte de données	13
3.2	Suivi des niveaux d'eau : stations marégraphiques	13
3.2.1	Stations marégraphiques côtières.....	13
3.3	Suivi des conditions climatiques maritimes : stations météorologiques	14
3.4	Suivi du relèvement isostatique : repères géodésiques.....	15
3.5	Suivi de la dynamique du couvert de glace.....	15
3.5.1	Portrait régional des glaces côtières : images satellitaires.....	16
3.5.2	Portrait local des glaces côtières : images satellitaires et photos (appareils photo).....	16
3.5.3	Consultation de la population locale	17
4	VALIDATION DES MODÈLES ET PROJECTIONS	18
4.1	Modélisation du régime des tempêtes	18
4.2	Modélisation des glaces.....	18
4.3	Modélisation des niveaux d'eau	19
4.4	Modélisation des vagues.....	20
5	DÉTERMINATION DES SOLUTIONS D'ADAPTATION POUR LES INFRASTRUCTURES MARITIMES DU NUNAVIK AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	21

6. RÔLE ET RESPONSABILITÉ DES MEMBRES DE L'ÉQUIPE DE RECHERCHE.....	22
6.1 Ministère des Transports du Québec.....	22
6.2 Administration régionale Kativik	22
6.3 Consortium Ouranos	22
6.4 Ministère des Affaires indiennes et du Nord Canada.....	22
6.5 Environnement Canada	23
6.6 Transports Canada.....	23
6.7 Ressources naturelles Canada.....	23
6.8 Institut national de la recherche scientifique - Eau, terre et environnement.....	23
6.9 Institut des sciences de la mer de Rimouski	24
6.10 CIMA+	24
6.11 Environnement Illimité.....	24
6.12 Le Groupe-conseil LaSalle	24
6.13 Autres consultants.....	24

LISTE DES ACRONYMES

ARK	Administration régionale Kativik
BCNQ	Bureau de la coordination du Nord-du-Québec
EC	Environnement Canada
GCL	Le Groupe-conseil LaSalle
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISMER	Institut des sciences de la mer de Rimouski
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique - Eau, terre et environnement
MAINC	Ministère des Affaires indiennes et du Nord Canada
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MRCC	Modèle régional canadien du climat
RNCan	Ressources naturelles Canada
SCG	Service canadien des glaces
TC	Transports Canada

1 CONTEXTE

Depuis 1999, les gouvernements fédéral et provincial ont financé la mise en place d'infrastructures maritimes dans les 14 villages du Nunavik afin notamment :

- d'améliorer la sécurité des utilisateurs des petites embarcations marines et de leur garantir un meilleur accès à l'eau;
- d'améliorer la sécurité et d'optimiser les opérations liées à la desserte maritime;
- de contribuer au développement socioéconomique des communautés;
- de favoriser la poursuite des activités traditionnelles des Inuits.

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a convenu de participer financièrement à l'entretien courant et périodique de ces infrastructures maritimes pour une durée de trois ans à partir de 2008.

Lors de la conception de ces infrastructures, les facteurs de sécurité ont été difficiles à établir étant donné le peu de données de base (sur les niveaux d'eau, sur le climat, etc.) disponibles à ce moment. Cependant, les changements climatiques induisent une certaine vulnérabilité de ces infrastructures maritimes liées principalement à la diminution du couvert de glace qui engendre une plus grande mobilité des glaces, aux vagues et aux ondes de tempêtes (déviation du niveau d'eau par rapport au niveau prévu de la marée).

Afin de protéger son investissement, le MTQ a élaboré un projet de recherche visant à connaître la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik dans un contexte de changements climatiques et de les adapter en fonction des risques liés au climat. Ce projet est piloté par le MTQ en collaboration avec l'Administration régionale Kativik (ARK) et le Consortium Ouranos. De plus, les partenaires suivants y contribuent financièrement et scientifiquement : les villages nordiques du Nunavik, le ministère des Affaires indiennes et du Nord Canada (AINC), Environnement Canada (EC), Ressources naturelles Canada (RNCan), l'Institut national de la recherche scientifique - Eau, terre et environnement (INRS-ETE), l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), CIMA+, Environnement illimité inc., le Groupe-conseil LaSalle (GCL) et des consultants en océanographie physique. Ce projet de recherche s'inscrit également dans le cadre de l'action 23 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012, du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs : il a été entrepris à l'été 2009 et se prolongera jusqu'à l'automne 2013 (4,5 ans) pour un montant total estimé à 3,11 millions de dollars.

Pour des raisons d'ordre budgétaire, les activités de recherche seront principalement réalisées dans sept communautés réparties sur l'ensemble de la côte du Nunavik, soit : Umiujaq, Akulivik, Puvirnituq, Ivujivik, Kangiqsujuaq, Quaqtaq et Kuujuaq. Ces communautés ont été sélectionnées à des fins représentatives des différents contextes du Nunavik, en matière d'exposition à des contraintes de glaces, de vagues et de niveaux d'eau. Il est cependant important de noter que les retombées de la connaissance développée dans le cadre de ce projet seront à l'échelle du territoire du Nunavik.

Les activités prévues visent l'évaluation de l'influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau, les tempêtes et la dynamique des glaces de mer et côtières ainsi que leurs interactions avec les infrastructures maritimes.

Afin d'optimiser le projet, notamment dans le cadre de la calibration des modèles qui intégrera de l'information basée sur le vécu et le mode de vie traditionnel des habitants du Nunavik, des consultations des communautés seront effectuées par l'ARK et par l'INRS-ETE pour recueillir des connaissances traditionnelles (fréquence et intensité des événements extrêmes passés, etc.). Ces consultations permettront également de sensibiliser ces communautés aux outils développés dans le cadre du projet de recherche, et pouvant être disponibles pour la gestion des risques liés notamment à la sécurité des utilisateurs dans le cas d'événements extrêmes.

Les données pertinentes à la sécurité des déplacements, la gestion des zones côtières et le maintien des activités traditionnelles seront mises à la disposition de l'ARK et des communautés.

De plus, les données et les modèles qui seront développés pendant le projet ont un potentiel d'utilisation dépassant largement les besoins du projet. Ces données et ces outils seront publics et disponibles pour toute organisation gouvernementale ou publique intéressée à les utiliser à d'autres fins que celles prévues dans le cadre du projet.

1.1 Objectifs du projet

Le but du projet proposé est de fournir les données et les avis nécessaires pour anticiper les impacts des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et de définir des mesures d'adaptation, le cas échéant. Les mesures établies permettront d'optimiser les programmes d'entretien et de définir les programmes de conservation de réhabilitation de façon à maintenir la sécurité des usagers et la pérennité des infrastructures.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont les suivants :

- À l'aide d'un modèle de trajectoires des tempêtes, d'un modèle numérique de prévision des niveaux d'eau et d'un modèle d'évolution du couvert de glace (de mer et côtière), réaliser des projections à long terme afin de définir le niveau de risque associé à ces phénomènes auxquels sont exposées les infrastructures maritimes dans le contexte des changements climatiques;

- Évaluer et anticiper la nature, l'ampleur et la fréquence des impacts pour les infrastructures dues aux modifications du couvert de glace (de mer et côtière) ainsi qu'à l'augmentation de l'exposition des infrastructures aux crêtes de pression de glace, aux niveaux d'eau extrêmes (surcotes) et aux vagues de tempêtes;
- Améliorer la prévision de la nature, la fréquence et les coûts des activités d'entretien et de réhabilitation des infrastructures maritimes afin de les maintenir sécuritaires et d'en assurer la pérennité.

L'information recueillie dans le cadre de ce projet est d'une importance vitale pour les habitants du Nunavik compte tenu de l'augmentation des incidents (noyades, égarements, etc.) qui se produisent en mer en période hivernale et estivale (augmentation de l'instabilité des glaces l'hiver due aux redoux hivernaux qui modifient les conditions du couvert de glace, augmentation de l'intensité des conditions météorologiques extrêmes, etc.). Ces incidents semblent être attribuables notamment au manque de connaissances sur les effets récents des changements climatiques sur les conditions du couvert de glace et sur les conditions météorologiques maritimes.

2 DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROJET DE RECHERCHE

2.1 Principales activités du projet de recherche

Dans le cadre du présent projet visant à évaluer la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques et les mesures d'adaptation, les huit principales activités qui seront réalisées sont les suivantes :

1. Installation d'équipement et la collecte de données pour trois ans, d'octobre 2009 à octobre 2012 :
 - Stations météorologiques : suivi des conditions météorologiques à Umiujaq, Akulivik, Puvirnituq, Ivujivik, Kangiqsujaq et Quaqaq. Les variables mesurées sont la température de l'air à 2 m du sol, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative et la pression atmosphérique;
 - Marégraphes : mesures des niveaux d'eau à Umiujaq, Akulivik, Puvirnituq, Ivujivik, Kangiqsujaq, Quaqaq et Kuujuaq;
 - Repères géodésiques : mesure des déplacements verticaux du sol (p. ex. : relèvement isostatique¹) à Umiujaq, Akulivik, Puvirnituq, Ivujivik, Kangiqsujaq, Quaqaq et Kuujuaq;
 - Appareils photo : observations de la dynamique des glaces côtières à Umiujaq, Quaqaq et Kuujuaq.
2. Réalisation d'entrevues auprès des communautés d'Umiujaq, de Quaqaq et de Kuujuaq avec la collaboration des chercheurs locaux afin de recueillir le savoir traditionnel des Inuits sur les événements climatiques extrêmes, les conditions de glace, etc.
3. Suivi et analyse des conditions du couvert de glace côtière et de glace de mer (concentration, mobilité et caractéristiques générales) autour des sept villages à l'étude à l'aide d'images satellitaires et des photos prises par des appareils photo.
4. Modélisation des tempêtes actuelles et futures ayant un effet potentiel sur les côtes québécoises de la baie d'Hudson, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava.
5. Modélisation des glaces (de mer et côtière) dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava et détermination des interactions des glaces de mer et des glaces côtières ainsi que des paramètres descripteurs des conditions de glaces près des infrastructures maritimes.
6. Modélisation des niveaux d'eau dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava.
7. À partir des analyses et projections effectuées dans le cadre de l'ensemble des travaux, réalisation d'une synthèse et d'une présentation des types d'impacts potentiels sur les infrastructures maritimes au Nunavik liés aux changements climatiques.

¹ Relèvement de la croûte terrestre, à la suite du retrait des glaciers, qui provoque actuellement l'émersion des terres.

8. Élaboration des solutions d'adaptation des infrastructures maritimes aux changements climatiques afin de prévoir notamment la nature, la fréquence et les coûts des activités d'entretien et de réhabilitation.

2.2 Schéma des activités de recherche

Dans le cadre du présent projet, plusieurs étapes et activités de recherche seront réalisées, tel qu'il est indiqué à la figure suivante :

- En **rouge** : les quatre principales étapes du projet (collecte de données, modélisation, projections, solutions d'adaptation);
- En **vert** : les différentes activités de recherche (niveaux d'eau, glace de mer, tempêtes, etc.);
- En **noir** : les principaux responsables des champs d'études (ISMER, Ouranos, ARK, etc.);
- Traits : les interrelations des différents champs d'études.

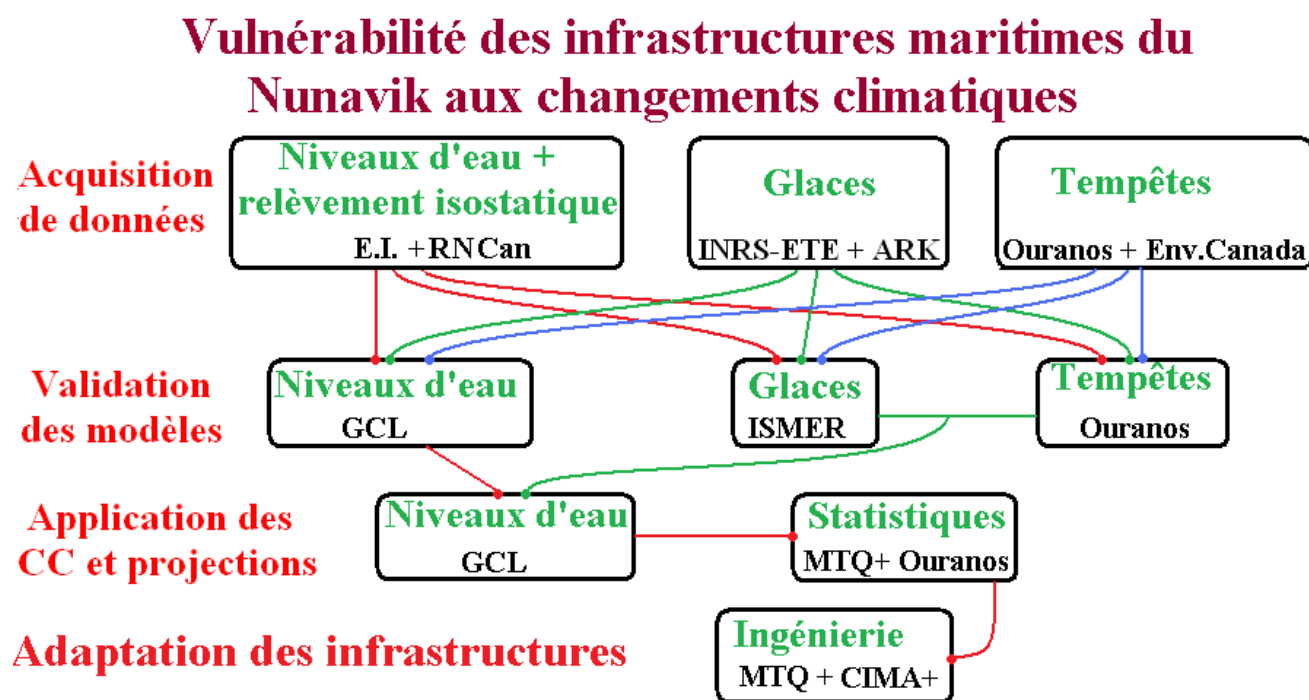


Figure 1 Schéma des activités du projet de recherche

Comme illustré à la figure 2 et décrit dans le texte suivant, l'interaction des **niveaux d'eau extrêmes**, le régime des **vagues** et les conditions de **glace côtière** sont les composantes principales qui influent sur l'intégrité des infrastructures portuaires.

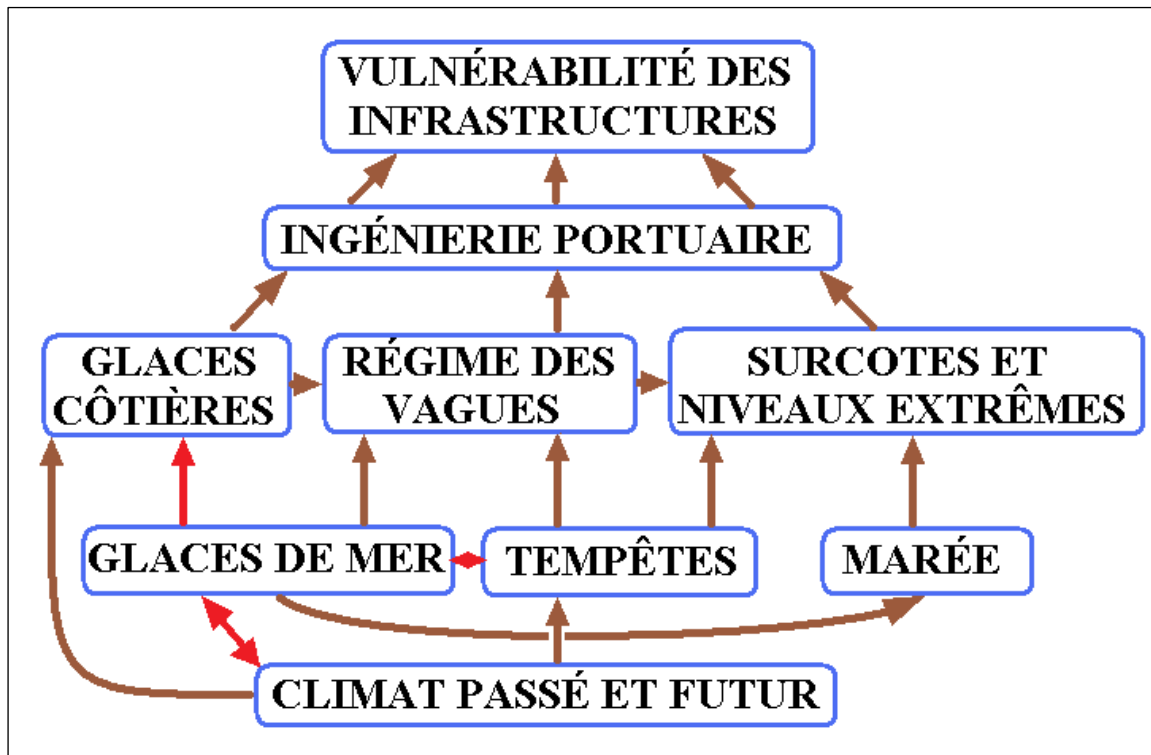


Figure 2 Interaction des différentes composantes de l'étude de la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik aux changements climatiques

Conditions de glace

Les glaces côtières interagissent avec les glaces de mer, mais elles sont aussi influencées localement par la température de l'air et de l'eau, le régime hydrologique des rivières, les vents et d'autres variables climatiques.

Conditions de vagues et de niveaux d'eau

Les vagues sont produites par les vents et dépendent du régime des tempêtes, de la topographie des sites portuaires et des bassins attenants. Les tempêtes se conjuguent à l'effet des marées pour engendrer des surcotes et des niveaux d'eau extrêmes. La majeure partie de ces variables est liée au climat, y compris les marées, puisque l'amplitude, la phase et la symétrie des ondes de marée dépendent en partie de la couverture de glace, qui dépend elle-même du climat.

Changements climatiques

Les changements climatiques peuvent donc modifier la quasi-totalité des variables susceptibles d'influer sur la durabilité et l'intégrité des infrastructures maritimes côtières au Nunavik. La plupart des choix d'ingénierie qui ont été appliqués à la construction des infrastructures au Nunavik sont basés sur des projections de récurrence des extrêmes de niveaux d'eau, de vagues et parfois de glace, et fondés sur les données historiques existantes (très sommaires au Nunavik). Ces projections s'appuient sur l'hypothèse que les distributions des extrêmes passés sont plutôt stationnaires et seront toujours valides dans le futur. Or, selon une étude récente², l'hypothèse de stationnarité est souvent invalide, en particulier en milieu nordique où cet aspect est souvent peu documenté. Par ailleurs, le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), publié en 2007, démontre que le régime des tempêtes devrait changer et que leurs trajectoires devraient se déplacer vers le nord. Les systèmes côtiers nordiques pourraient être davantage exposés à des tempêtes que par le passé. Il est donc essentiel de développer de nouvelles approches fondées sur des modèles climatiques déterministes qui permettent de prendre en considération l'évolution probable du climat au cours des prochaines décennies.

2.3 Bénéfices additionnels du projet de recherche

Le contexte géographique global dans lequel s'inscrit cette étude dépasse largement le contexte des infrastructures maritimes côtières du Nunavik. Ainsi, les modèles numériques météorologiques de glace ou de niveaux d'eau toucheront au moins la partie orientale du Nunavut et pourraient avoir des applications très concrètes (en temps réel) en matière de sécurité pour la navigation (petites embarcations et desserte maritime par barge) et des infrastructures côtières au Nunavik (avertissement de niveaux d'eau exceptionnels ou de tempêtes pouvant avoir de fortes répercussions) moyennant un certain travail de développement. Bien que ces utilisations ne soient pas prévues dans le cadre du présent projet, le développement de ces outils nouveaux et performants permettra à différentes organisations de les utiliser comme outils d'adaptation aux changements climatiques dans divers domaines.

2.3.1 Niveaux d'eau : aménagement du territoire et gestion de risques

Bien que l'étude décrite ici cible principalement les infrastructures maritimes des villages du Nunavik, les retombées de l'étude dépassent largement cette cible. Il n'existe pratiquement aucune donnée fiable sur les niveaux d'eau dans le Nunavik et encore moins de données sur les niveaux extrêmes de tempêtes. Toute la collecte de données systématiques et durables comble un manque évident d'information de base.

² XU, Z., F. J SAUCIER et D. LEFAIVRE (2006), « Water Level Variations in the Estuary and Gulf of St. Lawrence », *Presentation at the Understanding Sea-level Rise and Variability Workshop*, 6-9 juin, 2006, Paris, France.

Connaître l'évolution des niveaux d'eau moyens et extrêmes est un élément essentiel de toute politique d'aménagement d'une zone côtière. Ces données pourront être utilisées afin de déterminer les risques d'inondation des propriétés lors d'événements extrêmes et de sélectionner les critères de conception des différents ouvrages côtiers. Elles constituent aussi le point d'appui de toute connaissance des processus côtiers pouvant affecter l'érosion des berges, nuire à la faune et à la flore marine et côtière, mais également la base pour l'évaluation des effets des changements climatiques.

2.3.2 Dynamique des glaces : sécurité des populations

Les données et les modèles sur les glaces côtières et les glaces de mer sont essentiels à la compréhension des processus qui contrôlent la dynamique des glaces dans cette région. Cette compréhension est de plus en plus critique puisque le couvert de glace joue le rôle de route de transport en hiver pour les Inuits et de milieu de vie pour la faune nordique (ours polaires, phoques, baleines, etc.). La dynamique des glaces est peu documentée au Nunavik et l'étude proposée permet de mieux comprendre le comportement des glaces dans cette région. Cette connaissance est très utile aux communautés pour la sécurité de leurs déplacements et pour faciliter le maintien des activités traditionnelles de chasse et de pêche hivernale. Ces activités constituent un important facteur de cohésion sociale et jouent un rôle important en matière de santé publique (apport alimentaire de haute qualité pour les communautés). Cette connaissance pourrait s'avérer également très utile aux compagnies minières et de navigation, à Transports Canada, à Pêches et Océans Canada ainsi qu'à la garde côtière canadienne en matière de sécurité de la navigation dans la glace et de prévision d'accès aux sites.

2.3.3 Changements climatiques et événements extrêmes : enjeux économiques, développement des infrastructures maritimes et navigation

Enfin, la connaissance des tempêtes et des extrêmes climatiques qui sera acquise dans le cadre du projet de recherche pourrait par la suite être utilisée par les organisations intéressées afin de leur permettre de contribuer à améliorer la sécurité des activités impliquant les petites embarcations marines ou le transport maritime, dont la desserte maritime des villages nordiques par barges. L'ouverture probable d'ici quelques décennies du passage du Nord-Ouest à la navigation hauturière augmentera le trafic maritime. Il est alors évident qu'il faudra améliorer l'information destinée à ces navires. De plus, l'accès maritime plus facile et la raréfaction des ressources auront pour résultat d'attirer plus de compagnies minières et de transport maritime dans la région, impliquant ainsi la construction de nouveaux ports ou l'agrandissement de ports existants. Dans tous les cas, les promoteurs se heurteront à l'absence quasi totale de données fiables pour établir les critères de conception et d'aménagement, ainsi que des prévisions d'accessibilité ou de protection des sites et des eaux navigables. L'étude constitue donc une base de données de référence qui pourra être utilisée ultérieurement pour consolider le développement socioéconomique du Nunavik. Tous les acteurs tireront un avantage direct de cette connaissance améliorée des risques concernant la navigation et les infrastructures maritimes.

3 INSTALLATION D'ÉQUIPEMENTS ET COLLECTE DE DONNÉES

3.1 Choix des sites pour la collecte de données

Les 14 villages nordiques du Nunavik se déploient sur un territoire immense de quelque 2 500 km de côte et présentent chacun un contexte physique, climatique, maritime et côtier très varié. Comme discuté précédemment, pour chacune des activités du projet de recherche, certains villages ont été ciblés en fonction des critères d'efficacité et de représentativité de l'information recherchée. Toutefois, il y a un manque flagrant de données de base pour réaliser les analyses requises et mener à bien le projet de recherche. Il a donc été nécessaire de procéder à l'installation de l'équipement pour la collecte de données, pour la plupart des villages, dès l'automne 2009. La collecte de données sera généralement réalisée pour une durée de trois ans et sera terminée en octobre 2012.

3.2 Suivi des niveaux d'eau : stations marégraphiques

3.2.1 Stations marégraphiques côtières

Compte tenu de la grande variabilité d'un village à l'autre des conditions des niveaux d'eau et des conditions d'exposition aux glaces et aux vagues de tempêtes, il est nécessaire de mettre en place des instruments de mesure des niveaux d'eau, tels des marégraphes, dans sept villages et d'en faire le suivi pendant trois années.

La réalisation de cette partie du projet implique :

- La mise en place de marégraphes et la récupération des données chaque année. Les niveaux d'eau seront enregistrés en continu pendant trois ans pour constituer une banque de données permettant de réaliser des analyses approfondies et à long terme, concernant les différents phénomènes susceptibles d'affecter les niveaux d'eau le long des côtes du Nunavik.
- L'analyse des données de niveau d'eau comporte plusieurs étapes, y compris l'analyse des constituantes harmoniques de la marée en eau libre et sous glace, ainsi que le calcul de certaines statistiques de base comme le niveau moyen de la mer et les niveaux résiduels (non tidaux). D'autres analyses statistiques permettant de comparer les extrêmes climatiques et les niveaux d'eau seront également effectuées.

Pour des raisons de représentativité spatiale des niveaux d'eau extrêmes, par exemple l'amplitude de la marée qui passe de microtidale dans la baie d'Hudson (0,5 m à Puvirnituq) à macrotidale dans la baie d'Ungava (15 m à Tasiujaq), les sept villages suivants ont été retenus pour la mise en place des marégraphes :

- Umiujaq (installation en 2009)
- Akulivik (installation en 2010)
- Puvirnituk (installation en 2010)
- Ivujivik (installation en 2009)
- Kangiqsujuaq (installation en 2009)
- Quaqtaq (installation en 2009)
- Kuujuaq (installation en 2010)

3.3 Suivi des conditions climatiques maritimes : stations météorologiques

Tous les villages du Nunavik possèdent une station météorologique installée à l'aéroport. Par contre, plusieurs de ces stations ne sont pas automatisées (à l'exception de Kuujuaq, Inukjuak et Kuujuarapik). Les stations automatisées sont nécessaires pour la collecte de données en continu et indispensables pour le suivi des conditions météorologiques utilisées dans le cadre du projet. Pour combler ce besoin et obtenir des données plus représentatives des conditions météorologiques en milieu maritime, avec le soutien de l'ARK, le MTQ a mis en place des stations météorologiques dans six villages sur les sept à l'étude. Celles-ci mesureront la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, la température de l'air et l'humidité. Ces stations météorologiques ont généralement été installées à proximité de la côte, afin d'acquérir des données sur les vents représentatives du climat maritime (à Kuujuaq, comme la station météorologique de l'aéroport est automatisée et que les conditions climatiques de ce site sont représentatives de celles que l'on trouve à l'infrastructure maritime, les données enregistrées à l'aéroport seront utilisées dans le cadre du projet).

L'automatisation des stations météorologiques a été financée par EC. Les données sont traitées et archivées par EC et les analyses de données pour divers usages (validation de modèles climatiques, des tempêtes, des surcotes et des mouvements de glaces, etc.) sont effectuées par les équipes de recherche des domaines d'étude respectifs.

Les villages où ont été déployées les stations météorologiques maritimes sont les suivants :

- Umiujaq (installation en 2010)
- Akulivik (installation en 2010)
- Puvirnituk (installation en 2009)
- Ivujivik (installation en 2010)
- Kangiqsujuaq (installation en 2009)
- Quaqtaq (installation en 2010)

3.4 Suivi du relèvement isostatique : repères géodésiques

Les mesures de niveaux d'eau seront prises par rapport à des repères géodésiques en place dans les sept villages ciblés. Par contre, à la suite du départ des glaces de la dernière période glaciaire, et par conséquent du relèvement isostatique de cette partie du continent nord-américain, ces repères géodésiques sont en mouvement continu vers le haut. Leur vitesse de rehaussement peut être aussi élevée que 15 mm/an dans la baie d'Hudson.

Il est donc indispensable de tenir compte de ce déplacement vertical des repères géodésiques pour estimer correctement l'évolution future des niveaux d'eau. À cette fin, des relevés très précis des repères géodésiques seront effectués par l'équipe responsable des marégraphes, chaque année, pour chaque site en parallèle avec la récupération de l'information de niveaux d'eau (les sept sites sélectionnés étant les mêmes que ceux des stations marégraphiques côtières).

L'information sera traitée pour calculer la position, d'année en année, des repères géodésiques et, par comparaison des positions annuelles, pour estimer le taux de relèvement isostatique dans chacun des sept villages visés par le suivi des niveaux d'eau. Ressources naturelles Canada effectue l'analyse des données géodésiques recueillies dans le cadre du présent projet.

3.5 Suivi de la dynamique du couvert de glace

Le suivi du couvert de glace (de mer et côtière), qui est réalisé par l'INRS-ETE est un volet important du projet, car les glaces sont sans doute l'un des éléments les plus susceptibles de provoquer des dommages aux infrastructures portuaires avec les vagues. Le couvert de glace est aussi utilisé par les résidents du Nunavik pour leurs déplacements et leurs activités traditionnelles de chasse et de pêche. Les données recueillies pourraient également contribuer à permettre à ces communautés d'améliorer leur connaissance de l'état de la glace et de son évolution probable et d'anticiper les problèmes potentiels de sécurité lors de leurs trajets sur le couvert de glace, considérant que le déplacement des navires (desserte maritime, compagnies minières, etc.) s'effectue au gré des conditions de glace.

Cette activité du projet se développe autour de plusieurs actions complémentaires :

- un suivi et une analyse « régionale » des conditions de glace seront réalisés à l'aide d'images satellitaires;
- un suivi et une analyse « locale » des glaces impliqueront la mise en place d'appareils photo sur des poteaux pour la prise de photos permettant de vérifier l'impact direct des mouvements du couvert de glace sur les infrastructures maritimes. Une analyse d'images satellitaires à fine résolution sera également réalisée afin de compléter cette activité;
- l'utilisation des connaissances traditionnelles et actuelles recueillies lors d'ateliers de consultation réalisés auprès des communautés (qui font l'objet d'une analyse locale des glaces) pour caractériser l'historique et les changements relatifs aux conditions d'englacement et aux événements climatiques extrêmes dans ces communautés et, plus particulièrement, aux alentours des infrastructures maritimes.

L'ensemble de l'information recueillie dans cette activité de recherche sera ensuite colligé pour établir un portrait historique et actuel des conditions d'englacement et des événements extrêmes.

Cette information concernant les glaces sera intégrée aux modèles de prédiction des niveaux d'eau et des vagues.

3.5.1 Portrait régional des glaces côtières : images satellitaires

Le but de cette activité de recherche est de dresser un portrait plus régional des glaces côtières dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava entre 1997 et 2012 à partir des produits du Service canadien des glaces (SCG) (50 m de résolution) afin de mieux en connaître les conditions d'englacement des baies au voisinage des villages.

Ce projet consiste plus précisément à extraire les caractéristiques des glaces (formation et départ des glaces en lien avec les courants et les vents, concentration, épaisseur, qualité de glace, présence de crêtes et quilles, présence de glace noire, frasil, glace de neige, dynamique de fracture et de détérioration des glaces, déplacement, etc.) et les paramètres climatiques associés à ces caractéristiques des glaces (degrés-jours de gel, précipitations pluviales et nivales, température de l'air, évaporation, etc.) afin d'établir des relations quantitatives entre ces paramètres ou indicateurs climatiques et l'état des glaces pouvant présenter des risques pour les infrastructures. En utilisant un nombre suffisamment élevé d'événements survenus au cours de la dernière décennie, il est sans doute possible de quantifier la probabilité d'occurrence des événements climatiques pouvant engendrer des conditions de glace côtière présentant un risque quantifiable pour les infrastructures.

Sur la base de ces relations, les données de modèles climatiques devraient ensuite être utilisées pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les risques futurs de dommages aux infrastructures associés aux conditions de glace.

Dans le cadre d'un autre projet, ces mêmes données pourraient aussi être utilisées par les organisations intéressées afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les glaces côtières et les risques liés à la sécurité des usagers lors des déplacements en motoneige ou pour d'autres infrastructures côtières, s'il y a lieu.

Ces données seront complétées avec l'information produite par le SCG pour la période 2009-2012. Un grand nombre d'images ou de produits dérivés seront ainsi analysés pour caractériser les glaces côtières à différentes étapes de leur formation et de leur dégradation près des sites sélectionnés et ainsi dresser un portrait régional historique.

L'analyse des photos inclura la zone littorale sur plusieurs kilomètres de largeur, et de part et d'autre des villages. Des cartes thématiques seront établies à partir des photos et seront présentées dans un rapport qui comprendra également l'information pertinente.

3.5.2 Portrait local des glaces côtières : images satellitaires et photos (appareils photo)

Cette activité de recherche vise à étudier le comportement des glaces dans le voisinage immédiat des infrastructures maritimes des villages à l'aide d'images RADARSAT-2 de meilleure résolution (3 m) afin de caractériser le processus de formation et de fonte de la glace de rive, les mouvements de la glace de mer et les dangers potentiels pour les infrastructures et la sécurité des usagers.

Le portrait local annuel des glaces au voisinage des infrastructures maritimes des trois villages de Kuujuaq, Quaqtaq et Umiujaq sera produit à partir d'images RADARSAT-2 ayant une plus fine résolution (3 m). Pour ces villages, des images seront acquises (fournies par EC) à une fréquence maximale (aux 3-4 jours) durant la période d'englacement et de débâcle. Les algorithmes de classification développés par l'INRS-ETE seront utilisés. La géoréférence de ces images sera appuyée par des réflecteurs radars installés sur place.

Afin de terminer l'analyse des glaces locales à proximité des infrastructures maritimes, des appareils de surveillance photographique ont été achetés et installés par l'INRS-ETE pour le compte de l'ARK. La surveillance photographique, la récupération et l'archivage des photos sont réalisés par l'INRS-ETE. Les types d'appareils qui ont été installés sont des Reconyx (collecte d'images aux heures entre 6 h et 18 h) et des Pentax (collecte d'images toutes les deux heures, de 6 h 15 à 18 h 15). La récupération des photos est prévue une fois (si possible deux) par année dans les trois villages. Deux appareils photo par village ont été installés. Les photos permettront de vérifier l'impact direct des mouvements du couvert de glace ainsi que des événements climatiques extrêmes sur les infrastructures maritimes. S'ajouteront à ces informations les connaissances locales résultant du savoir traditionnel des Inuits des villages à l'étude. Pour les années 2009-2011, une comparaison des portraits régionaux et locaux sera effectuée.

3.5.3 Consultation de la population locale

Dans les communautés d'Umiujaq, de Quaqtaq et de Kuujuaq où l'analyse locale des glaces est réalisée, des consultations ont été organisées, sous la responsabilité de l'ARK et en collaboration avec l'INRS-ETE, afin de recueillir les connaissances traditionnelles relatives aux événements extrêmes (tempêtes et conditions de glace particulièrement marquantes) que les Inuits auraient eu l'occasion d'observer dans le passé.

Plus précisément, la transmission des connaissances traditionnelles sur les conditions de glace et les événements extrêmes s'est déroulée sous forme d'ateliers de consultation des communautés locales. Il s'agissait donc d'obtenir une information historique et un aperçu des changements observés par la population. Un questionnaire a été élaboré afin de recueillir de l'information sur les conditions de glace, les zones d'érosion et de sédimentation, le régime des niveaux d'eau, des tempêtes et des événements extrêmes (débâcle, inondation, érosion, etc.).

Pour appuyer les questions en atelier, des cartes et des images satellitaires des sites d'intérêt ont été utilisées. Les photographies prises par les appareils photo ont aussi été utilisées pour obtenir de l'information sur les événements observés (fréquence, historique, distributions, etc.). Les gens ont également été appelés à se déplacer sur les sites des infrastructures maritimes pour mieux documenter la localisation de l'information recueillie.

4 VALIDATION DES MODÈLES ET PROJECTIONS

4.1 Modélisation du régime des tempêtes

Les tempêtes sont l'un des principaux facteurs de risque pour les infrastructures portuaires parce qu'elles produisent de fortes vagues, des variations du niveau d'eau et des mouvements de glace importants. Ouranos et EC étudieront l'évolution passée des tempêtes à l'aide d'un modèle de trajectoires de tempêtes qui permet d'utiliser les données de divers modèles météorologiques et climatiques afin d'identifier les tempêtes pouvant avoir un impact significatif sur ces variables (vagues, niveaux d'eau et glaces). D'après les rapports du GIEC (2001 et 2007), les trajectoires de tempêtes devraient être modifiées par les changements climatiques et se déplacer vers le nord. Un changement de la fréquence ou de l'intensité des tempêtes s'ajoutant à un allongement de la saison d'eau libre ou de couverture partielle des glaces de mer pourrait modifier considérablement le stress appliqué aux structures côtières par les vagues, les niveaux d'eau extrêmes et les glaces.

En comparant les données des modèles climatiques avec celles d'un modèle de vagues et les données de concentration de glace d'EC, il est possible d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des processus hydrodynamiques ayant une influence sur une zone côtière particulière. Cette méthode a déjà été utilisée avec succès dans le golfe du Saint-Laurent (Savard *et al.* 2008). L'étude du régime des tempêtes sera réalisée par Ouranos en collaboration avec EC.

4.2 Modélisation des glaces

La modélisation des conditions de glace le long des côtes du Nunavik sera réalisée à l'aide du modèle océanique de l'ISMER (Saucier *et al.* 2004). Ce modèle permet en effet de simuler la formation, le développement et les mouvements des glaces à partir d'un modèle océanique 3D couplé avec un modèle atmosphérique et un autre de glace. Il a déjà été utilisé par Joly *et al.* 2009³ pour évaluer le comportement des glaces dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava pour simuler les conditions de glace futures (vers l'année 2050) à partir des données de glaces modélisées pour les années 1997 et 1998 et de 2001 à 2005. Les conditions de glace futures sont obtenues en reprenant les simulations des glaces de ces six années avec une température hivernale augmentée de 3 °C, correspondant à la médiane des hausses de températures projetées pour 2050 par 130 simulations climatiques dans la baie d'Hudson.

Une partie du projet consistera à compléter les simulations pour les années manquantes et à venir (2006 à 2010). L'information historique sera comparée avec celle analysée par l'INRS-ETE à partir des photos satellites afin de s'assurer de la cohérence des deux sources d'information aux moments et aux endroits où l'analyse des photos aura été faite.

Dans le cadre du présent projet, la modélisation des glaces comporte deux méthodes différentes. Dans un premier temps, la méthode employée par Joly *et al.* 2009³ sera appliquée à une période plus longue. Les données de 1997 à 2005 seront obtenues à partir de simulations portant sur la période 2006-2010. Des simulations plus complètes seront

³ Joly, S., S. Senneville, D. Caya, (2009) Sensitivity of Hudson Bay Sea ice and ocean climate to atmospheric temperature forcing. *Clim. Dyn.* doi : 10.1007/s00382-009-0731-4

aussi réalisées en couplant plusieurs autres variables climatiques tirées du Modèle régional canadien du climat (MRCC) utilisé par Ouranos au modèle océanique. Ces variables, en plus de la température de l'air, incluent le vent, l'humidité, la neige, le rayonnement solaire incident, etc. Les simulations couvriront une période commune avec la méthode delta déjà connue, s'échelonnant sur les périodes favorables aux simulations climatiques, de 1961 à 2050.

Les simulations obtenues à partir du modèle couplé océan-atmosphère-glace fourniront une paramétrisation détaillée qui permettra de caractériser les conditions de glace dans les zones à l'étude tirée des images satellitaires et des appareils photo. En quelque sorte, le modèle de glace de l'ISMER est un outil permettant d'intégrer les paramètres clés qui seront utilisés pour estimer l'évolution du risque lié aux conditions de glace au cours des prochaines décennies. Les données climatiques et l'analyse des tempêtes devraient fournir une bonne indication des interactions de ces variables passées et futures.

4.3 Modélisation des niveaux d'eau

Le Groupe-conseil LaSalle effectuera la modélisation des niveaux d'eau de la baie d'Hudson, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava dans le cadre de la présente étude portant sur les infrastructures maritimes nordiques. Ce modèle permettra de modéliser les marées et les ondes de tempêtes de 1960 à 2010 et dans un climat futur afin de permettre une évaluation des niveaux extrêmes pour toute la côte du Nunavik. Les forçages atmosphériques du modèle hydrodynamique seront réalisés à l'aide de données de modèles de réanalyses et de modèles de climat.

Le modèle hydrodynamique sera calibré à l'aide de données de stations marégraphiques du Service hydrographique du Canada à Nain (Labrador) et Churchill (Manitoba), de même qu'à l'aide de données de deux stations du Groenland. Les données marégraphiques recueillies dans les sept villages nordiques du Nunavik seront aussi utilisées pour la calibration et la validation du modèle hydrodynamique.

Le modèle de niveau d'eau a également besoin d'information provenant de l'historique des glaces (évaluations du SCG, photos aériennes et satellitaires, etc.) et de données sur la modélisation (prédictions du changement du couvert de glace en fonction des changements climatiques). Ces données proviendront des études décrites à la section 4.2 ci-dessus.

Le modèle hydrodynamique devra aussi être alimenté en données prescrites à la limite Atlantique de ce modèle, située dans la mer du Labrador. Une proposition de projet entre l'ISMER et le MTQ est présentement en cours pour assurer la mise au point d'un modèle des ondes de tempêtes de l'Atlantique qui permettrait de fournir ces données d'intrant.

Le modèle hydrodynamique sera en mesure d'évaluer les phénomènes de variations de niveaux d'eau observés dans la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava, de relier ces phénomènes aux caractéristiques des tempêtes et de fournir les données de base à une évaluation du risque de niveaux extrêmes hauts (surcotes) et bas (décotes) une fois prises en considération les estimations de hausse du niveau relatif de la mer.

4.4 Modélisation des vagues

Les données de vagues proviennent principalement du modèle de vagues d'EC. Aucune observation directe des conditions de vagues n'est disponible sur les sites d'étude. Le modèle d'EC génère des prévisions des hauteurs, périodes et directions de vagues et de houle à intervalles de trois heures sur une grille rectangulaire de 10 x 10 km. Il est forcé par le modèle GEM d'EC et par celui de l'océanique de l'ISMER. Les vagues qui se rendent à proximité des sites d'étude seront modélisées à l'aide d'un programme de génération de vagues de l'Université Laval utilisant les données sur le vent fournies par Ouranos et les fetchs (distance d'eau libre sur laquelle s'exerce le frottement du vent pour générer les vagues dans une direction donnée). Les résultats du modèle de fetch de l'Université Laval seront validés à l'aide des données du modèle d'EC.

Des projections statistiques permettant d'évaluer le climat de vagues futur sur les sites d'étude seront produites en utilisant les données sur le vent du MRCC d'Ouranos et le modèle de l'Université Laval validé. Cette information sera utilisée pour le dimensionnement des infrastructures de protection (stabilité et franchissement par les vagues des brise-lames) et l'effet d'empilement d'eau (*wave run-up*) sur les plages lorsque pertinentes.

5 DÉTERMINATION DES SOLUTIONS D'ADAPTATION POUR LES INFRASTRUCTURES MARITIMES DU NUNAVIK AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'analyse des résultats de ces outils servira à prédire l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes au Nunavik. Un groupe d'experts analysera ces résultats pour en déduire les implications techniques et financières liées à l'entretien et à la réhabilitation des infrastructures, de même que la nature, la fréquence et les coûts des interventions.

Les données historiques seront tout d'abord analysées par rapport aux défaillances ou non-défaillances des infrastructures maritimes qui ont été observées afin d'en valider les hypothèses de conception par rapport aux méthodes de dimensionnement reconnues et à l'expérience acquise sur les infrastructures en place.

Les prédictions des modèles de niveaux d'eau extrêmes, de hauteur de vagues et de glaces seront traduites en termes d'ingénierie (récurrence d'événements faisant intervenir ces différents paramètres) pour en déduire les critères de conception qui devraient être pris en considération pour les infrastructures maritimes dans le contexte des changements climatiques.

Ces critères de conception seront appliqués aux infrastructures en place pour évaluer les coefficients de sécurité, les vulnérabilités potentielles, la vie utile anticipée, les correctifs et programmes de surveillance à appliquer aux différentes parties des infrastructures maritimes.

Cette synthèse des études intégrera les aspects d'ingénierie des infrastructures maritimes pour chacun des villages concernés. Le choix des méthodes d'entretien, de consolidation et de protection de ces infrastructures, s'il y a lieu, tiendra compte de la localisation de ces infrastructures en milieu nordique, de la difficulté de réaliser des travaux dans ces conditions, du très petit nombre d'entrepreneurs en mesure de faire ces travaux, des coûts élevés de mobilisation de l'équipement et de la disponibilité des matériaux.

6. RÔLE ET RESPONSABILITÉ DES MEMBRES DE L'ÉQUIPE DE RECHERCHE

6.1 Ministère des Transports du Québec

Le présent projet de recherche est dirigé par M^{me} Anick Guimond du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec (BCNQ) pour le compte du MTQ et est réalisé en collaboration avec différents partenaires.

M. Christian Poirier, ingénieur au Service de la conception (SC) participe au projet de recherche. Il agit à titre de spécialiste des infrastructures côtières et sera responsable de la modélisation des vagues ainsi que de l'évaluation du comportement des infrastructures.

M. Daniel Lavallée, également ingénieur au SC participe à la réalisation des études de vagues.

M^{me} Maude Boucher, ingénieure au Service de la géotechnique et de la géologie, et M. Robin Roy, du BCNQ du Ministère, agissent à titre de conseillers techniques.

6.2 Administration régionale Kativik

M^{me} Mélissa Gagnon, du Département des ressources renouvelables de l'ARK, joue un rôle-conseil pour la réalisation des différentes étapes du projet qui impliquent la collaboration du milieu, comme la planification et la tenue des ateliers de consultation auprès du milieu. MM. Serge Payer et Jack Papak, du Département des transports de l'ARK, jouent quant à eux un rôle de soutien dans le cadre de l'installation des différents équipements en lien avec le transfert d'expertise lié à l'entretien des infrastructures maritimes. À la fin du projet de recherche, l'ARK accompagnera le MTQ pour le transfert des connaissances recueillies auprès des communautés du Nunavik.

6.3 Consortium Ouranos

Le Consortium Ouranos, sous la direction de M. Jean-Pierre Savard, est responsable de la transmission des données climatiques aux autres équipes du projet, notamment en ce qui concerne les données du MRCC et d'autres modèles climatiques ainsi que de la production des scénarios climatiques pertinents. Ouranos est également responsable de la coordination scientifique du travail réalisé par les équipes d'Environnement Canada, de l'INRS-ETE, de l'ISMER et des consultants affectés à l'analyse et à la modélisation des niveaux d'eau dans le cadre du projet.

6.4 Ministère des Affaires indiennes et du Nord Canada

Dans ce projet de recherche, le MAINC est un partenaire qui, dans le cadre de son Programme d'adaptation aux changements climatiques, participe au financement des études sur l'analyse des conditions de glaces côtières, qui inclut la tenue des ateliers de consultation, et à la mise en place des appareils photo pour l'observation des glaces et événements climatiques extrêmes. M^{me} Yanie Chauret participe au suivi du projet à titre de personne-ressource.

6.5 Environnement Canada

Environnement Canada (EC), sous la direction de MM. Stéphane Gagnon, André Cotnoir et Philippe Gachon, est principalement responsable de l'analyse climatique, y compris la production de diagnostics sur les régimes atmosphériques passés et futurs, une assistance à l'interprétation des phénomènes climatiques importants pour le projet comme l'activité cyclonique, les fluctuations de la température et des vents, les tempêtes et les régimes de temps. EC met aussi à la disposition de l'équipe de projet des données météorologiques et climatiques, des résultats de modèles météorologiques et de vagues, et celles sur les conditions de glace dans la zone d'étude.

Environnement Canada a également fourni une partie de l'équipement nécessaire à l'installation des stations météorologiques, et assure le traitement et l'archivage des données météo qui seront recueillies dans le cadre du projet de recherche. De plus, un soutien technique lors de l'installation de certaines stations météorologiques a été fourni à l'équipe de l'INRS-ETE.

6.6 Transports Canada

Dans ce projet de recherche, TC est un partenaire qui participe au financement de l'étude de modélisation des niveaux d'eau. M. Frédéric Sirois participe au suivi du projet à titre de personne-ressource.

6.7 Ressources naturelles Canada

L'équipe de Ressources naturelles Canada (RNCa), sous la direction de M. Michael R. Craymer, est responsable de l'évaluation du relèvement isostatique, des niveaux moyens de la mer à chaque site d'étude à partir des données recueillies dans le cadre de ce projet et de l'information générale sur le relèvement du niveau des océans.

Les relevés d'arpentage requis seront par contre réalisés par l'équipe responsable de la mise en place des marégraphes selon les directives de RNCa.

6.8 Institut national de la recherche scientifique - Eau, terre et environnement

L'équipe de l'INRS-ETE (Yves Gauthier, Clément Clerc, Jimmy Poulin et Stéphanie Bleau), sous la direction de M^{me} Monique Bernier, effectue l'analyse des données de la dynamique des glaces côtières à partir des images satellitaires RadarSat II ainsi que des photos prises à l'aide des appareils photo dans les trois villages ciblés. Elle participe, de plus, aux entrevues menées auprès des communautés inuites pour recueillir leurs connaissances traditionnelles sur les événements extrêmes (glaces, niveaux d'eau, climat, etc.). Elle est également responsable de l'installation ainsi que de l'entretien des six appareils photo et stations météorologiques et de la collecte des données.

La principale tâche de l'équipe de l'INRS-ETE est de coordonner les études sur les glaces et de déterminer des paramètres pertinents à la description de la dynamique des glaces aux sites portuaires à l'étude, afin de faciliter une évaluation des risques liés aux glaces pour les infrastructures étudiées au cours des prochaines décennies.

6.9 Institut des sciences de la mer de Rimouski

L'équipe de l'ISMER (dont Simon St-Onge–Drouin), sous la direction de M. Simon Senneville, a été mandatée par le MTQ pour réaliser la modélisation de la formation, du développement et des mouvements des glaces de mer à partir d'un modèle océanique 3D couplé avec un modèle de glace et un modèle climatique pour tout le Nunavik.

6.10 CIMA+

Des consultants-experts ont été mandatés par le MTQ pour fournir un appui technique dans les différentes parties du projet et le suivi des résultats, et réaliser en collaboration avec les experts du projet la synthèse des aspects structuraux des impacts des changements climatiques sur les infrastructures maritimes.

M. Yann Ropars, ing., M. Sc., agit à titre d'expert en conception d'infrastructures maritimes, particulièrement en région nordique, et mettra au service du MTQ son expertise acquise depuis 1994 sur le programme des infrastructures maritimes du Nunavik avec Makivik.

M. Réjean Massé, ing., M. Sc., agit à titre d'expert en gestion de projet et en construction d'infrastructures maritimes. Son expérience de plus d'une trentaine d'années en génie maritime sera très utile aux prises de décisions complexes qui attendent les membres du comité.

D'autres spécialistes de CIMA+ (ingénieurs, techniciens, informaticiens, etc.) seront également mis à contribution dans leurs spécialités respectives pour appuyer les experts dans des domaines connexes comme les coûts de construction, la gestion de projet, etc.

6.11 Environnement Illimité

Environnement Illimité, sous la direction de M. Stéphane Lorrain, a été mandaté par le MTQ pour la mise en place des équipements de mesure de niveaux d'eau, y compris l'installation des repères géodésiques, le rattachement des marégraphes et la mesure du taux de relèvement isostatique dans les sept villages ciblés par le projet et de la collecte annuelle des données marégraphiques. Cette équipe est également responsable d'effectuer annuellement les relevés topométriques à l'aide de GPS à haute précision permettant d'évaluer le taux de relèvement isostatique.

6.12 Le Groupe-conseil LaSalle

La modélisation des niveaux d'eau sera réalisée par le Groupe-conseil LaSalle sous la direction d'Ouranos. La modélisation des marées et des ondes de tempêtes s'appuiera sur un modèle hydrodynamique 2D (MIKE 21) qui sera alimenté à ses frontières par des modèles empiriques et par des simulations des ondes de tempêtes de l'Atlantique dans la mer du Labrador. Les transferts de quantité de mouvement à l'interface eau-air seront calculés à l'aide de données de modèles de réanalyses et de modèles climatiques d'Ouranos. L'analyse statistique des récurrences de niveaux élevés sera déterminée par Ouranos et Cima+.

6.13 Autres consultants

L'analyse harmonique sera réalisée par des consultants sous la direction d'Ouranos. Cette analyse sera réalisée en suivant un protocole standard.