

# PROGRAMME SCIENTIFIQUE

CENTRE Eau Terre  
Environnement

*2020-2025*

4 septembre 2020

**IN  
RS**

Institut national  
de la recherche  
scientifique

## Table des matières

1. Mission, vision et valeurs de l'INRS.....	3
1.1 Mission.....	3
1.2 Vision.....	3
1.3 Valeurs.....	3
2. Profil du Centre Eau Terre Environnement.....	4
3. Enjeux de société.....	6
3.1 Gestion responsable des ressources naturelles.....	6
3.2 Protection et restauration des écosystèmes urbains, ruraux et naturels.....	6
3.3 Adaptation aux changements climatiques.....	6
4. Axes de recherche.....	7
4.1 Géomatique et télédétection.....	7
4.2 Écologie, écotoxicologie et génomique environnementale.....	8
4.3 Hydroclimatologie.....	8
4.4 Technologies environnementales.....	9
4.5 Géologie et ressources géologiques.....	9
4.6 Géosciences environnementales.....	10
5. Plan de développement et ressources nécessaires.....	14
5.1 Développement des effectifs professoraux.....	14
5.1.1 Géomatique et télédétection.....	14
5.1.2 Écologie, écotoxicologie et génomique environnementale.....	14
5.1.3 Hydroclimatologie.....	15
5.1.4 Technologies environnementales.....	15
5.1.5 Géologie et ressources géologiques.....	16
5.1.6 Géosciences environnementales.....	16
5.2 Développement de l'offre de formation.....	17
5.3 Développement des initiatives et infrastructures de recherche.....	17
6. Conclusion.....	18
7. Annexes.....	19

## Mot du directeur de centre

L'Institut national de la recherche scientifique (INRS) s'est doté d'un nouveau Plan stratégique couvrant la période de 2019 à 2024. En lien avec les orientations présentées dans ce plan institutionnel et dans le but de renouveler la planification du développement du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS, laquelle couvrait la période de 2014 à 2019, un vaste exercice de réflexion a été amorcé afin de définir une nouvelle programmation scientifique pour la période de 2020 à 2025.

C'est donc avec fierté et enthousiasme que nous vous présentons la nouvelle programmation scientifique du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS. Comme vous pourrez le constater dans les pages suivantes, nos équipes de recherche sont actives dans des domaines importants pour le Québec et également à l'échelle internationale. Ainsi, une part considérable des travaux porte sur la gestion responsable des ressources naturelles y compris le développement de biotechnologies d'assainissement et de valorisation. De même, un volet important des recherches est consacré à la protection et restauration des écosystèmes urbains, ruraux et naturels. Finalement, de nombreux projets de recherche sont consacrés à l'adaptation aux changements climatiques.

Les recherches menées par nos professeur-e-s/chercheur-e-s sont présentées selon six axes de recherche qui seront développés au cours des cinq prochaines années. Ce document se termine par une présentation des besoins projetés en termes de nouvelles ressources professorales, ceci afin de soutenir le développement de ces axes de recherche.

A handwritten signature in blue ink that reads "André St-Hilaire".

Directeur par intérim

## **1. Mission, vision et valeurs de l'INRS**

### **1.1 Mission**

L'Institut a pour objet la recherche fondamentale et appliquée, les études de cycles supérieurs et la formation de chercheurs. Dans le cadre de cet objet et tout en poursuivant les finalités propres de la recherche universitaire, l'Institut doit, de façon particulière, orienter ses activités vers le développement économique, social et culturel du Québec, tout en assurant le transfert des connaissances et des technologies dans l'ensemble des secteurs où il œuvre.

### **1.2 Vision**

L'INRS : L'Institut de recherche universitaire incontournable pour les partenariats et la formation des leaders scientifiques.

### **1.3 Valeurs**

Les valeurs de notre institut sont : L'excellence, l'interdisciplinarité, l'engagement, l'équité, et l'intégrité.

## 2. Profil du Centre Eau Terre Environnement

Le Centre Eau Terre Environnement (ETE) de l'INRS est né en 2001 de la fusion de deux centres, soient l'INRS-Géoressources et l'INRS-Eau. Depuis sa création, le Centre ETE est résolument orienté vers le développement durable du Québec et, tout particulièrement, dans la résolution de problèmes de notre société dans les domaines des ressources hydriques et terrestres et de la protection de l'environnement. La gestion durable de la ressource en eau est une priorité au Centre qui regroupe une des plus fortes concentrations d'experts universitaires dans le domaine de l'eau au Canada. De même, une entente de partenariat unique au Canada entre un établissement universitaire, le Centre ETE de l'INRS, et un organisme du gouvernement fédéral, la Commission géologique du Canada (CGC, bureau de Québec), une division de Ressources naturelles Canada, a permis de créer le Centre géoscientifique de Québec (CGQ), un des plus importants regroupements multidisciplinaires de recherche en géosciences au pays. Nous avons aussi établi plusieurs partenariats avec des organismes tant publics, parapublics que privés.

Le Centre ETE est situé au centre-ville de Québec sur le campus urbain de l'Université du Québec. Il regroupe un total de 36 membres du corps professoral, 65 membres du personnel de recherche et 36 employés administratifs des autres services du Centre. Les revenus totaux d'opération comprenant les revenus institutionnels et les revenus externes s'élèvent à environ 25 millions de dollars par année.

Les laboratoires de recherche du Centre comprennent un ensemble très complet d'équipements d'analyse essentiels à la recherche avancée, ainsi que d'importantes capacités de modélisation et de traitement de données. Le Centre possède notamment plusieurs salles environnementales et une multitude d'équipements hautement spécialisés en biologie moléculaire et cellulaire pour répondre aux questions environnementales contemporaines. Le Centre dispose également d'infrastructures mobiles permettant de réaliser sur le terrain des travaux spécialisés de décontamination environnementale et d'analyses limnologiques, géologiques, géophysiques, géothermiques, hydrogéologiques et en génie côtier. De plus, une station de recherche située à Sacré-Cœur, au Saguenay, près de l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite, offre aux équipes de recherche et aux étudiantes et étudiants un espace de travail et de formation dans un environnement naturel exceptionnel. Cette station peut accueillir jusqu'à 40 personnes.

Le Centre est également doté de laboratoires pilotes majeurs (LISTE : Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement) localisés au Parc technologique du Québec métropolitain. Les LISTE comprennent notamment des laboratoires de tomodensitométrie, d'assainissement et de décontamination, de mise à l'échelle des bioprocédés, d'électrotechnologies environnementales, de caractérisation des aquifères, de caractérisation des roches, d'échangeurs de chaleur en forage pour essais en géothermie, de télédétection environnementale par drone, de gestion hydraulique en réseau, ainsi qu'un laboratoire d'hydraulique environnementale de calibre mondial. Notre capacité de recherche a été rehaussée de manière significative par la mise en place de ces laboratoires au cours des dernières années.

En tant que milieu universitaire, le Centre ETE offre six programmes d'enseignement supérieur en sciences de l'eau et en sciences de la Terre (<http://www.ete.inrs.ca/ete/etudier/programmes>):

#### Deuxième cycle

- Maîtrise de recherche en sciences de l'eau, incluant trois cheminements bidiplômants, en *Écotoxicologie aquatique* avec l'Université de Bordeaux en France, en *Sciences de l'eau* ainsi qu'en *Sciences de l'eau et changements climatiques* avec l'Institut supérieur des hautes études en développement durable (ISHÉDD) au Maroc;
- Maîtrise professionnelle en sciences de l'eau comprenant aussi deux cheminements bidiplômants, en *Sciences de l'eau* ainsi qu'en *Sciences de l'eau et changements climatiques* avec l'Institut supérieur des hautes études en développement durable (ISHÉDD) au Maroc;
- Maîtrise de recherche en sciences de la Terre, incluant deux cheminements bidiplômants, en *Géoingénierie et environnement* avec l'Université de Rennes 1 en France et en *Énergies renouvelables* avec l'Université de Reykjavik en Islande;
- Maîtrise professionnelle en sciences de la Terre – technologies environnementales.

#### Troisième cycle

- Doctorat en sciences de l'eau
- Doctorat en sciences de la Terre

Environ 200 étudiantes et étudiants sont inscrits à ces programmes, dont environ les deux tiers au doctorat.

La maîtrise et le doctorat en sciences de la Terre sont des programmes interuniversitaires qui sont le fruit d'une collaboration avec le Département de géologie et génie géologique de l'Université Laval.

Le Centre possède quatre chaires de recherche du Canada dans les domaines de 1) l'hydroclimatologie statistique, 2) l'écotoxicogénomique et perturbation endocrinienne, 3) la sédimentologie environnementale, et 4) la biogéochimie des éléments traces.

Les professeur-e-s/chercheur-e-s du Centre dirigent également deux importants projets, soit un Programme de formation orientée vers la nouveauté, la collaboration et l'expérience en recherche (FONCER) sur les technologies environnementales de décontamination et gestion intégrée des eaux et effluents résiduaux (TEDGIEER) financé par le CRSNG, ainsi qu'un regroupement de professeur-e-s/chercheur-e-s en écotoxicologie (EcotoQ) financé par le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT). Ils sont également actifs au sein de l'Institut nordique du Québec, notamment avec la Chaire de recherche sur le potentiel géothermique du Nord. D'autres associations sont également à souligner dont notre association au regroupement CentrEau (<https://www.centreau.ulaval.ca>), au réseau RIISQ (<https://crp.uqam.ca/riisq>

reseau-inondations-intersectoriel-du-quebec/), au CIRSA (<http://cirsa-saumon.ca/>; dirigé par l'un de nos professeurs), pour ne nommer que ceux-ci.

### **3. Enjeux de société**

Les activités de recherche et de développement menées par les équipes de recherche du Centre ETE couvrent un large spectre des problématiques liées aux études sur l'eau, la Terre et l'environnement. De manière plus spécifique, les recherches peuvent être associées à trois enjeux importants pour le Québec et, par extension, pour de nombreux autres pays développés et en développement.

#### **3.1 Gestion responsable des ressources naturelles**

Une grande partie des activités de recherche vise à développer les connaissances utiles à une meilleure gestion des ressources hydriques (eaux de surface et souterraines), des énergies renouvelables (géothermique, hydroélectrique, solaire, éolienne et les biocarburants), des ressources minérales (métaux de base, précieux, stratégiques) ainsi que des ressources secondaires par une valorisation des déchets et sous-produits organiques (eaux usées, boues d'épuration) et inorganiques (résidus miniers, déchets électroniques, matières résiduelles alcalines).

#### **3.2 Protection et restauration des écosystèmes urbains, ruraux et naturels**

Les professeur-e-s/chercheur-e-s du Centre possèdent une expertise reconnue à l'échelle internationale dans les domaines du suivi environnemental, de la caractérisation des effets des activités anthropiques sur la santé des écosystèmes et de la réhabilitation des sites et des écosystèmes dégradés par les activités humaines (par exemple, l'exploitation minière et pétrolière). D'une part, ils réalisent des recherches de nature écotoxicologique associées à l'impact sur les écosystèmes de différents types de contaminants tels que les nutriments, la matière organique, les métaux, les hydrocarbures, les composés énergétiques, les contaminants émergents et les perturbateurs endocriniens (pesticides, produits pharmaceutiques, retardateurs de flamme, nano- et micro-plastiques, etc.). D'autre part, ils proposent des solutions afin de minimiser les impacts de l'altération humaine des rivières (fragmentation des habitats, déboisement du bassin versant et des berges, enrochement), des lacs et des côtes sur la faune aquatique et ses habitats.

#### **3.3 Adaptation aux changements climatiques**

Considérant la masse critique du personnel hautement qualifié du Centre engagé dans les recherches sur l'eau et l'environnement, une part significative des travaux vise à étudier les impacts appréhendés des changements climatiques sur les eaux de surface et souterraines, sur les écosystèmes terrestres et aquatiques et sur les infrastructures urbaines d'eau (eaux usées, pluviales et potables). Il est essentiel d'identifier des moyens afin de limiter les impacts des changements climatiques sur l'environnement et les organismes vivants incluant l'humain. À ce titre, des technologies visant à réduire les

émissions de gaz à effet de serre et à lutter contre les îlots de chaleur en milieu urbain sont développées. Des travaux sont aussi réalisés sur la modélisation et sur l'adaptation aux impacts des changements climatiques, notamment pour ce qui est des infrastructures urbaines, de l'aménagement du territoire (incluant la cartographie des zones inondables) et de l'exploitation durable des ressources en eau et halieutiques (gestion des pêches) en milieu forestier, agricole, urbain et nordique. La recherche réalisée au Centre contribuera par ailleurs à parfaire les projections climatiques en améliorant la compréhension des variations naturelles du climat par des reconstructions qui vont au-delà du registre instrumental. Ces travaux visent aussi à mettre les changements actuels dans un contexte temporel en tenant compte des trajectoires biogéochimiques, physiques et écologiques des écosystèmes aquatiques, notamment dans l'Arctique où les changements se produisent de manière accélérée. Par exemple, des travaux de recherche sont menés pour évaluer la vulnérabilité des sources d'eau potable dans les communautés nordiques. Finalement, il ne faut pas oublier les efforts importants de recherche qui devront être déployés pour trouver des solutions aux problèmes d'érosion côtière, de recul du trait des côtes et de submersion côtière.

#### 4. Axes de recherche

Les principaux axes de recherche qui seront développés au cours des prochaines années au Centre ETE sont : 1) géomatique et télédétection, 2) écologie, écotoxicologie et génomique environnementale, 3) hydroclimatologie, 4) technologies environnementales, 5) géologie et ressources géologiques et 6) géosciences environnementales.

##### 4.1 Géomatique et télédétection

Le développement d'outils géomatiques et de télédétection à des fins environnementales représente est en pleine expansion au Centre. Au cours des dix dernières années, le nombre et la variété des satellites d'observation de la Terre ont connu une progression fulgurante. De grandes avancées technologiques ont également eu lieu dans le domaine des capteurs aéroportés (hyperspectral, LiDAR) et de l'utilisation de drones à des fins environnementales. Avec tous ces nouveaux capteurs et l'accessibilité à une diversité de données satellitaires gratuites, les avancées technologiques sont nombreuses et de très haute résolution. L'exploitation de nouvelles longueurs d'ondes, la polarimétrie, l'altimétrie et l'interférométrie permettent ainsi une meilleure couverture d'un site donné. Avec les développements informatiques et dans les réseaux de communication, la transmission des données est plus rapide et l'on parle, dans certains cas, d'acquisition et de transmission en temps quasi réel. Avec cet afflux d'une grande quantité de nouvelles données, les besoins en recherche de méthodes novatrices de traitement utilisant les avancées en intelligence artificielle et en apprentissage automatique et le calcul haute performance basé sur le nuage informatique sont immenses. Afin de permettre des applications pratiques dans de nombreux domaines, les professeur-e-s/chercheur-e-s du groupe Télédétection s'associent à d'autres membres du Centre ETE et celles et ceux du Centre Énergie Matériaux Télécommunications. Par ailleurs, les collaborations avec les équipes de recherche des autres axes du Centre apportent une connaissance et une compréhension plus approfondie des processus environnementaux et permettent de développer des outils répondant aux besoins de la société québécoise. Le Centre possède aussi une expérience nordique déjà bien établie. L'intégration des savoirs



scientifiques et autochtones est devenue incontournable étant donné son inscription dans la loi fédérale C-69 (évaluations environnementales). Au regard de ces nouvelles balises, les professeur-e-s/chercheur-e-s du Centre en s'associant à celles et ceux du réseau Dialogue valorisent la synergie entre l'observation de la Terre et les savoirs autochtones afin de faire progresser les connaissances sur l'état et l'impact des changements climatiques dans le Nord. En somme, l'augmentation et la diversité des besoins des partenaires publics ou privés de l'INRS, la multiplication des outils de télédétection, les avancées informatiques et la demande en formation de professionnels et de personnel hautement qualifié dans ce secteur de pointe justifient pleinement le développement de cet axe de recherche.

## **4.2 Écologie, écotoxicologie et génomique environnementale**

Les changements globaux et la présence de contaminants émergents et persistants dans les environnements agricoles, forestiers, nordiques et urbains nécessitent de développer régulièrement de nouvelles approches pour le suivi et l'évaluation des effets de ces changements sur les organismes vivants. Cela comprend l'évaluation des services rendus par ces écosystèmes, services qui incluent de fournir une eau potable, des ressources de qualité, des endroits de villégiature et de ressourcement, et une projection des trajectoires futures de ces écoservices. Des efforts d'échantillonnage sur le terrain, des travaux en laboratoire et le développement de modèles mathématiques permettent de tracer un portrait juste de la santé environnementale des régions touchées, et ce, à tous les niveaux des réseaux trophiques, des microorganismes (bactéries, archées, microalgues, protistes) aux vertébrés (poissons, amphibiens, oiseaux et mammifères) et à leurs habitats. Les développements récents d'outils moléculaires (métagénomique, transcriptomique, protéomique, métalomique, etc.) sont mis à profit pour évaluer, par exemple, la santé des écosystèmes aquatiques via l'analyse de profils d'ADN environnemental dans l'eau, les effets des contaminants sur l'ADN, les gènes et les protéines des animaux, le risque écotoxicologique des activités anthropiques, le déplacement de la faune dans leur habitat et la diversité microbienne des écosystèmes anthropisés et naturels. Ces outils modernes peuvent, entre autres, contribuer à une meilleure gestion des environnements aquatiques, agricoles ou forestiers, et de leur biodiversité.

## **4.3 Hydroclimatologie**

Diverses méthodes mathématiques de modélisation déterministes, statistiques et stochastiques constituant l'arsenal des sciences hydrologiques sont exploitées pour l'évaluation et l'anticipation des aléas naturels associés aux changements climatiques et aux autres impacts anthropiques (urbanisation, agriculture). Les équipes de recherche du Centre utilisent ces outils pour assurer un approvisionnement adéquat en eau de qualité (eaux souterraines et de surface) ou pour optimiser la gestion des ressources en eau et pour l'aménagement du territoire dans divers contextes (production d'hydroélectricité, alimentation en eau potable ou d'irrigation, cartographie des zones inondables, gestion des eaux pluviales en milieu urbain et rural). Deux modèles hydrologiques déterministes ont été développés et sont toujours en développement au Centre (HYDROTEL et CEQUEAU). De plus, un logiciel d'analyse fréquentielle des extrêmes en environnement (FAES) est sur le point d'être déployé (version 1.0) et aussi en développement constant et des percées importantes continuent d'être faites pour l'application de ces méthodes

dans un cadre multivarié, un cadre régional et en tenant compte des tendances dans les séries des variables étudiées. Un autre secteur de recherche en important développement porte sur l'évaluation des impacts associés à l'érosion côtière et la mise au point d'approches techniques pour limiter ce phénomène en lien direct avec les changements climatiques. La recherche dans ce secteur va continuer de privilégier à la fois le développement d'outils de modélisation statistique et numérique et les études hydrauliques en laboratoire.

#### **4.4 Technologies environnementales**

Le développement de technologies vouées à la protection de l'environnement et notamment à la préservation des ressources est l'un des grands enjeux du XXI<sup>e</sup> siècle, car si rien n'est fait, l'impact des activités humaines sur la santé publique, le cycle naturel de l'eau et les écosystèmes pourrait avoir des conséquences irrémédiables. La détérioration de la qualité de l'environnement est la conséquence directe de la pollution anthropique, principalement attribuée à une industrialisation intense dans divers secteurs d'activités (p. ex. minières, pétrolières, pharmaceutiques, chimiques, cosmétiques, etc.). Dans l'optique d'un développement durable, avec des réglementations environnementales toujours plus contraignantes et un marché des technologies environnementales en pleine expansion, il devient urgent de développer des approches de gestion écoresponsable des rejets, ainsi que de concevoir et d'implanter des technologies de traitement des eaux, d'épuration et de décontamination de matrices polluées ou encore, de réhabilitation de sites dégradés. Sont également couverts dans cet axe les procédés de récupération et de valorisation/réutilisation des ressources (matière organique, nutriments [azote phosphore, etc.], métaux précieux, métaux de base, énergie, eau, etc.) à partir de divers types de rejets d'origine urbaine ou industrielle, ainsi que le développement de bioprocédés performants pour la protection de l'environnement (dégradation des hydrocarbures) ou la biovalorisation de déchets en produits à valeur ajoutée (p. ex. bioplastiques, biocarburants). Les technologies environnementales incluent aussi les outils modernes de diagnostic environnemental et d'évaluation des ressources souterraines hydriques, minérales ou énergétiques. Des travaux sont menés sur les technologies d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Finalement, le domaine de la séquestration et l'utilisation des gaz à effet de serre (GES) demeurent un axe de recherche important pour le centre qui développe différentes approches technologiques qui marient développement durable, économie circulaire et innovation.

#### **4.5 Géologie et ressources géologiques**

Le Canada, et particulièrement le Québec, est riche en ressources souterraines, telles que les minéraux et les ressources énergétiques. Les travaux sur les ressources géologiques, réalisés en collaboration avec différents ministères et l'industrie minière, se concentrent sur la compréhension de la nature et de l'origine de ces ressources et des roches encaissantes ainsi que sur les mécanismes de formation et de remobilisation des ressources tels que la circulation des fluides à l'échelle lithosphérique et la déformation tectonique. Ces connaissances facilitent la découverte de nouvelles ressources et leur exploitation raisonnée. Par exemple, afin de prolonger la durée de vie des principaux camps miniers du Québec, le Centre réalise des travaux de recherche en géophysique profonde et en géologie visant à détecter des minéralisations et structures à des

profondeurs de l'ordre kilométrique. De nouvelles activités de recherche sur les ressources énergétiques souterraines sont réalisées dans le cadre d'une chaire de recherche de l'Institut nordique du Québec. Ces activités incluent l'évaluation des ressources géothermiques profondes des bassins sédimentaires, des systèmes hydrothermaux et du nord du Canada, et considèrent notamment la réhabilitation d'anciens puits pétroliers en échangeurs de chaleur. Les travaux en géologie et ressources géologiques impliquent une diversité de spécialités, notamment la pétrologie ignée et métamorphique, la géochronologie, la volcanologie, la sédimentologie, la stratigraphie, la géologie structurale et la tectonique, la métallogénie, la géophysique, la géochimie, la géothermie, l'hydrogéologie et l'intelligence artificielle.

#### **4.6 Géosciences environnementales**

Les géosciences environnementales impliquent la compréhension de la circulation des fluides, des solutés et de la chaleur dans les milieux géologiques à l'échelle de millénaires et aussi la compréhension des processus géologiques actuels et leurs impacts sur l'environnement et sur les risques naturels (érosion des berges, sismicité, volcanisme, etc.). Cet axe multidisciplinaire englobe divers aspects des systèmes géologiques superficiels : géomorphologie, sédimentologie, géophysique, géochimie, microbiologie et écologie. Les travaux sont appliqués à la gestion des ressources en eau, à l'exploitation des systèmes géothermiques superficiels, à la réhabilitation des aquifères contaminés, à l'agroenvironnement et à l'érosion côtière; toutes ces applications devant considérer l'effet des changements climatiques sur les hydrogéo-systèmes qui sont étudiés. Le développement des technologies permettant l'évaluation et l'exploitation de l'énergie géothermique superficielle a fait l'objet d'importantes avancées ces dernières années. Il est prévu d'aborder l'intégration des technologies géothermiques aux projets de tunnels, au chauffage des bâtiments nordiques avec des pompes à chaleur géothermique et au stockage thermique souterrain, tout en considérant les aspects géochimiques et microbiologiques qui peuvent faire toute la différence dans le succès de ces technologies. Des développements importants ont aussi été réalisés sur la caractérisation de l'hétérogénéité des aquifères et des milieux géologiques, notamment par l'hydrogéophysique et des méthodes géostatistiques. De nouveaux travaux vont porter sur les méthodes d'intégration et de traitement des données géoscientifiques basées sur l'apprentissage profond, notamment pour prédire les événements majeurs et aider la prise de décision des gestionnaires d'infrastructures. La poursuite et le développement de capacités de simulation numérique des processus de transport de particules, fluides, solutés et chaleur, ainsi que les réponses géophysiques dans les milieux géologiques devraient également faire l'objet de travaux. De plus, le développement d'approches multi-isotopiques en géochimie de l'eau contribuera à mieux définir les processus naturels, identifier les sources de contaminants et évaluer les impacts environnementaux dans de multiples secteurs d'activités tels l'agroenvironnement ou l'exploitation minière et pétrolière. Ces travaux se feront notamment en collaboration avec le Delta-Lab de la Commission géologique du Canada.

Le tableau ci-dessous expose de manière succincte des exemples d'activités associées aux axes de recherche en développement par rapport aux trois enjeux majeurs de société.

Axes/Enjeux	Gestion responsable des ressources naturelles	Protection et restauration des écosystèmes urbains, ruraux et naturels	Adaptation aux changements climatiques (CC)
<b>Géomatique et télédétection</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation des drones en agriculture de précision</li> <li>• Cartographie et surveillance du pergélisol</li> <li>• Évaluation des risques d'inondation et des dommages et impacts financiers.</li> <li>• Suivi de l'équivalent en eau du couvert nival</li> <li>• Cartographie des milieux humides</li> <li>• Surveillance de l'humidité du sol en milieu agricole</li> <li>• Occurrence et mécanismes de formation des embâcles et débâcles</li> <li>• Estimation des paramètres hydrométriques (débit, niveau)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévission à partir d'imagerie de la contamination des systèmes aquatiques par les algues, les cyanobactéries, les microplastiques ou les retardateurs de flamme</li> <li>• Évaluation de la qualité de l'eau, du brunissement, de la turbidité et de la température des systèmes aquatiques</li> <li>• Cartographie des types de glace de rivière et leur impact sur la végétation</li> <li>• Suivi de la biodiversité des écosystèmes</li> <li>• Caractérisation du couvert de glace (lacs et rivières) et son évolution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anticipation des aléas naturels pour diminuer les risques</li> <li>• Aménagement urbain intelligent</li> <li>• Détection des glissements de terrain en milieu argileux</li> <li>• Détection de l'érosion du pergélisol dans l'Arctique et ses effets sur les écosystèmes aquatiques et leur production de GES</li> <li>• Suivi du gel saisonnier du sol à l'échelle régionale</li> <li>• Suivi des infrastructures maritimes nordiques par caméras <i>in situ</i></li> <li>• Impact des CC sur la qualité de la glace côtière au Nunavik</li> <li>• Intégration des savoirs technologiques, empiriques, sociaux et autochtones</li> </ul>
<b>Écologie, écotoxicologie et génomique environnementale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement de modèles prédictifs de la biodisponibilité des métaux pour mieux évaluer le risque écologique</li> <li>• Développement de modèles prédictifs pour les préférences d'habitats des poissons</li> <li>• Étude et analyse des services écosystémiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suivi et effets des activités anthropiques sur la santé de la biosphère</li> <li>• Caractérisation des microbiomes environnementaux et leur rôle sur la santé des écosystèmes</li> <li>• Identification de traceurs microbiens et géochimiques des changements environnementaux</li> <li>• Développement de méthodes analytiques de spéciation des métaux dans les eaux naturelles</li> <li>• Santé des sols pour une agroforesterie durable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effets combinés des changements climatiques et des contaminants sur la faune</li> <li>• Suivi des déplacements des populations de poissons avec des outils d'ADN environnemental</li> <li>• Suivi de la diversité taxonomique et fonctionnelle des écosystèmes</li> <li>• Impact des changements climatiques sur les services procurés par les écosystèmes</li> </ul>

<p><b>Hydroclimatologie</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Approvisionnement en eau et en énergie propre</li> <li>• Production hydroélectrique</li> <li>• Gestion de l'eau en milieu urbain et rural</li> <li>• Gestion des barrages publics</li> <li>• Prévission hydrologique à court terme et saisonnière</li> <li>• Effets de l'aménagement du territoire sur la qualité de l'eau</li> <li>• Évaluation de l'offre et de la demande en eau à l'échelle des bassins des tributaires du fleuve St-Laurent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suivi et modélisation des effets des activités anthropiques sur la santé de la biosphère et de l'hydrosphère</li> <li>• Santé des sols pour une agroforesterie durable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anticipation des aléas naturels pour diminuer les risques</li> <li>• Aménagement urbain intelligent</li> <li>• Cartographie des zones inondables</li> <li>• Dynamique du couvert nival</li> <li>• Évaluation des structures vertes en tant que mesures de mitigation des crues</li> <li>• Érosion et submersion côtière</li> </ul>
<p><b>Technologies environnementales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valorisation des déchets organiques et inorganiques</li> <li>• Exploitation écoresponsable des ressources minérales</li> <li>• Optimisation des échangeurs de chaleur en forage pour les systèmes de pompes à chaleur géothermique</li> <li>• Développement de consortiums microbiens pour des technologies propres (biocarburants et bioplastiques)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement et réutilisation des eaux</li> <li>• Réhabilitation des sites contaminés</li> <li>• Évaluation des risques associés à l'exploitation des technologies (études de microbiomes environnementaux, études écotoxicologiques)</li> <li>• Utilisation d'approches isotopiques pour le suivi des contaminants</li> <li>• Valorisation des déchets organiques et inorganiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement de techniques et procédés de capture, d'utilisation et de stockage des GES</li> <li>• Valorisation du potentiel de climatisation des aquifères dans la lutte aux îlots de chaleur urbains</li> </ul>
<p><b>Géologie et ressources géologiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation, compréhension et exploration des ressources géologiques (minéraux, énergie, eau)</li> <li>• Évaluation des ressources géothermiques des bassins sédimentaires et des territoires nordiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement des méthodes de géophysique et de télédétection pour minimiser l'impact des activités terrestres dans les programmes d'exploration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation des réservoirs géologiques pour la séquestration des GES</li> </ul>

<p><b>Géosciences environnementales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation physique, chimique et microbiologique des aquifères</li> <li>• Approches novatrices pour une meilleure utilisation des sources d'eau potable</li> <li>• Caractérisation des processus dans les milieux géologiques par scanographie</li> <li>• Simulation numérique des processus de transfert de fluides, masse et chaleur dans les milieux géologiques</li> <li>• Processus de transport de sédiments en relation avec l'érosion des berges, les glissements de terrain et les glissements de terrain sous-aquatiques</li> <li>• Simulation physique des processus côtiers avec des canaux hydrauliques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Santé des sols pour une agroforesterie durable</li> <li>• Suivi et effets des activités anthropiques sur la santé de la biosphère</li> <li>• Développement de méthodes analytiques de spéciation des métaux dans les eaux naturelles</li> <li>• Rôle de l'eau souterraine en relation avec les milieux humides et les habitats</li> <li>• Caractérisation et modélisation des processus de migration des contaminants dans les sols et aquifères</li> <li>• Réhabilitation <i>in situ</i> des sols et aquifères contaminés, notamment par les liquides organiques</li> <li>• Conception de champs de tirs durables dans les secteurs d'entraînement militaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anticipation des aléas naturels pour diminuer les risques</li> <li>• Gestion intégrée des ressources en eau dans la perspective des changements climatiques et de l'évolution de l'utilisation du territoire</li> <li>• Érosion côtière en fonction des changements climatiques</li> </ul>
---	---	---	---

## **5. Plan de développement et ressources nécessaires**

### **5.1 Développement des effectifs professoraux**

Au cours de la période de 2020 à 2025, six à huit professeur-e-s/chercheur-e-s du Centre ETE devraient partir à la retraite. Ces postes seront évidemment pourvus de manière à renforcer la capacité de développement du Centre dans les six axes de recherche décrits précédemment. De plus, nous continuerons nos efforts afin de créer de nouvelles Chaires de recherche et participer aux Unités Mixtes de Recherche proposées récemment par l'INRS. Cela pourrait nous amener à augmenter le nombre de nos effectifs en matière de ressources professorales.

#### **5.1.1 Géomatique et télédétection**

L'équipe de recherche en Télédétection environnementale et nordique (TENOR) du Centre possède l'expertise sur la collecte, le traitement, l'extraction, l'intégration et la diffusion de données d'observation de la Terre avec une expérience nordique déjà bien établie. Afin de répondre aux besoins de plus en plus importants des communautés nordiques dans un contexte de développement durable et d'adaptation aux changements climatiques, il est important que le Centre conserve une expertise en télédétection appliquée à la cryosphère et aux milieux nordiques. Les perspectives d'emploi sont généralement bonnes dans le domaine de l'observation de la Terre, les grands employeurs étant les gouvernements et le milieu de l'enseignement et de la recherche, et compte tenu du rôle transversal de la géomatique et de la télédétection, les perspectives d'emploi iront en grandissant. Les récents départs à la retraite font en sorte que nous devons maintenir une expertise en télédétection et en recherche avec des partenaires publics, privés et inuits afin de conserver le leadership du Centre en recherche et formation nordique d'autant que l'INRS est impliqué dans l'Institut nordique du Québec. L'éventuel recrutement de nouvelle ressource devra se faire en intégration avec l'équipe TENOR (milieux nordiques) et en collaboration avec plusieurs professeur-e-s/chercheur-e-s de l'INRS dans des projets multidisciplinaires, intersectoriels et interinstitutionnels (codirections) en sciences de l'eau et de la Terre.

#### **5.1.2 Écologie, écotoxicologie et génomique environnementale**

Étant donné l'importance de la chimie analytique et des écosystèmes aquatiques pour toutes les activités de recherche de cet axe, des embauches professorales en chimie environnementale et en écologie et restauration des systèmes aquatiques sont des priorités à court terme. Ces nouvelles ressources contribueront à maintenir les infrastructures analytiques de pointe et l'équipement de terrain nécessaires aux travaux de recherche développés dans cet axe et dans plusieurs autres au Centre.

### 5.1.3 Hydroclimatologie

Les récents départs à la retraite ont laissé un vide au Centre en modélisation hydrodynamique. Les modèles hydrodynamiques sont des outils incontournables pour évaluer l'impact sur les infrastructures et les populations de divers événements météorologiques extrêmes (inondations, tempêtes causant de l'érosion, etc.) ainsi que pour proposer des solutions visant à minimiser ces impacts. Ces activités sont essentielles, notamment pour s'adapter aux inondations et tempêtes de plus en plus fréquentes dans un contexte de changements climatiques.

Une synergie avantageuse pourrait également être créée par l'embauche d'une nouvelle ressource professorale en hydroclimatologie ou hydrométéorologie, qui s'attaquerait à des enjeux tels que le développement et l'utilisation de projections climatiques à haute résolution, le développement de méthodes d'analyse de séries chronologiques à différentes échelles spatio-temporelles ainsi que les risques associés aux extrêmes climatiques et leurs incidences sur les systèmes naturels et la gestion des ressources hydriques. À cet effet, on peut penser aux trajectoires de tempêtes, vagues de chaleur, sécheresse, crues, approvisionnement en eau potable, inondations et besoins énergétiques ainsi qu'aux prévisions d'ensemble météorologiques et hydrologiques.

Enfin, dans un contexte de croissance des stress anthropiques sur les écosystèmes fluviaux, le Centre pourrait également tirer profit de l'embauche d'une nouvelle ressource professorale en écohydraulique et santé des écosystèmes fluviaux. Ce poste s'intégrerait à la croisée des axes Hydroclimatologie et Écologie, écotoxicologie et génomique environnementale. Cette personne serait responsable de développer un programme de recherche portant sur des thèmes tels que la modélisation des habitats aquatiques, l'écologie des poissons, les stress anthropiques et la santé des populations de poissons, la continuité écologique, les espèces invasives, les méthodes de repeuplement, la restauration d'habitats ou l'effacement de barrages, tout ceci dans un contexte de changements climatiques et de développement du territoire.

### 5.1.4 Technologies environnementales

Le Centre possède des infrastructures de recherche à la fine pointe pour la mise à l'échelle préindustrielle de procédés de décontamination, récupération et valorisation de divers types de rejets d'origine urbaine ou industrielle. Au nombre de celles-ci se trouvent des fermenteurs de type préindustriel installés dans les Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement (LISTE). Ces fermenteurs sont utilisés pour le développement de procédés de transformation de déchets en produits à haute valeur ajoutée (p. ex. biopesticides, bioplastiques, biofloculants, biofongicides, biocarburants, etc.). La biovalorisation de ces déchets requiert une expertise en microbiologie pour la caractérisation, le conditionnement et l'adaptation des microorganismes impliqués dans ces processus biologiques. Le recrutement d'une ressource professorale en microbiologie industrielle contribuerait à renforcer et valoriser les travaux de recherche réalisés aux LISTE.

Au Québec, plusieurs municipalités situées en région (~93 municipalités) rejettent leurs eaux usées sans traitement préalable dans des cours d'eau (rivière, fleuve, etc.). Au nord du 55<sup>e</sup> parallèle, le pergélisol rend difficile et coûteux l'aménagement d'un réseau souterrain de collecte des eaux usées. De plus, l'isolement de certaines communautés limite l'accès aux produits chimiques souvent requis dans les systèmes conventionnels



d'assainissement des eaux résiduaires ou de potabilisation des eaux. Cette problématique nécessite le développement de systèmes d'assainissement décentralisé innovants, simples, robustes, économiques et surtout adaptés aux conditions extrêmes. Le recrutement d'une ressource professorale en assainissement décentralisé contribuerait à renforcer les activités de recherche et développement des technologies d'assainissement en milieu nordique. Ce poste renforcerait l'expertise du Centre dans le domaine nordique et s'inscrirait dans la continuité des travaux proposés par l'Institut nordique du Québec.

### **5.1.5 Géologie et ressources géologiques**

De nombreux types de gîtes minéraux existent au Québec et plusieurs sont encore mal compris. Les travaux en métallogénie sont essentiels pour l'industrie minière québécoise qui opère 25 mines et dépense deux milliards de dollars par année dans la province. Le Centre doit ainsi renforcer son expertise en métallogénie pour soutenir la croissance de ce domaine. Le développement de cet axe n'exige pas de nouvelles infrastructures majeures. Toutefois, il faudrait pourvoir un poste en métallogénie (géologie économique) pour travailler sur les thèmes de recherche suivants : 1) formation des gîtes minéraux et exploration minérale, 2) métaux usuels (Cu, Zn, Pb, Ni, ...), précieux (Au, Ag, Pd, Pt, ...) et stratégiques (terres rares, Li, Co, V, ...) et 3) application de l'intelligence artificielle à l'exploration minérale. La découverte et l'exploitation de ces ressources sont nécessaires à la transition énergétique et au stockage d'électricité prévu dans les programmes d'énergie propre. Cette nouvelle recrue interagira avec tous les professeur-e-s/chercheur-e-s impliqués dans l'axe 4.5 puisque les gîtes minéraux sont au cœur de cet axe. Il ou elle interagira aussi étroitement avec la Commission géologique du Canada et le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec.

### **5.1.6 Géosciences environnementales**

Pour ce qui est des postes de professeur-e-s/chercheur-e-s, il faudra prévoir le remplacement de départs à la retraite prévus en hydrogéologie et la création d'un poste sur la simulation numérique des processus de transfert dans les milieux géologiques. Au niveau de l'hydrogéologie, il faudrait poursuivre les activités sur les ressources régionales en eau souterraine et l'hydrogéologie des contaminants qui ont permis la formation dans une spécialisation en forte demande. L'INRS a fortement contribué au développement des connaissances sur les ressources en eau souterraine au Québec et ces travaux vont permettre de développer des mécanismes de gestion et protection de ces ressources en considérant les aspects techniques et sociaux. Au niveau de l'hydrogéologie des contaminants, l'INRS a développé des technologies pour la réhabilitation des sols et aquifères contaminés par des produits organiques, des métaux et des matériaux énergétiques. L'INRS a aussi fait des développements fondamentaux et appliqués à la simulation de l'écoulement souterrain et de surface de l'eau qui devraient être complétés par une expertise en simulation des processus de transfert de masse et de chaleur dans les matériaux géologiques. Cette expertise supporterait aussi la recherche sur les ressources géothermiques. Ces trois expertises sont d'intérêt pour la réalisation de travaux non seulement au Québec mais aussi au niveau international.

## **5.2 Développement de l'offre de formation**

Plusieurs programmes de formation de maîtrise en bidiplomation ont été développés au cours des dernières années au Centre ETE. Les prochaines années seront consacrées à peaufiner et consolider ces programmes conjoints de formation avec l'Institut supérieur des hautes études en développement durable au Maroc, les universités de Bordeaux et de Rennes 1 en France, ainsi que l'université de Reykjavik en Islande. Une révision des programmes en sciences de l'eau et de la Terre a été entreprise et devra être finalisée au cours des cinq prochaines années.

## **5.3 Développement des initiatives et infrastructures de recherche**

Plusieurs initiatives de recherche et de formation se poursuivront dans les prochaines années. Par exemple, des efforts seront déployés pour faire progresser le regroupement stratégique EcotoQ en écotoxicologie financé par le FRQNT. De la même manière, le programme de formation TEDGIEER du CRSNG-FONCER se poursuivra au cours des trois prochaines années. Plusieurs professeur-e-s/chercheur-e-s du Centre ETE poursuivront leur engagement dans le cadre de regroupements stratégiques tels que le CentrEau, le Centre d'études nordiques, le Geotop, le Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie, ainsi que l'Institut nordique du Québec.

Le Centre ETE possède un éventail important d'infrastructures de recherche à la fine pointe de la technologie. Les efforts pour accroître la capacité de recherche et développement du Centre par la mise en place de nouveaux équipements se poursuivront toutefois à différents niveaux.

Pour ce qui est des infrastructures en géosciences environnementales, il serait nécessaire de faire l'acquisition d'un système de mesures distribuées de température par fibre optique. Des travaux récents réalisés en collaboration avec des partenaires internationaux ont démontré le potentiel de cette technologie et ses applications à plusieurs travaux dans cet axe de recherche. Des infrastructures de calcul scientifique et de stockage de données massives ainsi que des logiciels pour la simulation numérique de processus variés devraient aussi être acquises pour combler les besoins des équipes de recherche. Finalement, l'acquisition d'un ensemble de mésocosmes extérieurs serait nécessaire pour permettre de caractériser le devenir environnemental de divers contaminants, autant dans l'eau souterraine que dans l'eau de surface, dans des conditions environnementales représentatives qui prennent en compte le rayonnement solaire et les effets saisonniers de température et de précipitation. Ces mésocosmes serviraient à plusieurs équipes en géosciences environnementales ainsi qu'en écologie, écotoxicologie et génomique environnementale et en sciences de l'eau.

## 6. Conclusion

La nouvelle programmation du Centre va permettre une grande synergie et une bonne intégration des domaines pour lesquels l'expertise est déjà établie avec des domaines prometteurs. Cette intégration passe obligatoirement par une combinaison du renouveau d'une partie du corps professoral et par la création de créneaux innovateurs par l'ajout de chaires de recherche et la participation aux Unités Mixtes de Recherche proposées par l'INRS.

## 7. Annexes

### Annexe 7.1 Statistiques sur les publications et le nombre d'étudiants gradués

<b>Année 2019</b>		
Articles scientifiques	Conférences et affiches	Demandes de brevets
178 (soit 4,8/prof.)	371 (soit 10/prof.)	1

<b>Année 2014-2019</b>		
Articles scientifiques	Conférences et affiches	Brevets
1154 (soit 6.2/prof.)	2496 (soit 13,5/prof.)	Obtenus : 8 Demandé : 1

<b>Nombre d'étudiants gradués en 2019</b>		
Maîtrise	Maîtrise professionnelle	Doctorat
Sc. Eau : 13	11	13
Sc. Terre : 8	0	4

## Annexe 7.2 Statistiques concernant les partenariats

Nombre total de partenaires sur 2 ans (2018-2019) : 55

Valeur totale en contrat de recherche sur 2 ans (2018-2019) : 8 000 000\$

### Liste des partenariats importants (>100 000\$ sur 2 ans)

- Biokinetics
- Champs d'Or de la Beauce
- Commission mixte internationale
- Électricité de France
- Hydro-Québec
- Institut national de la santé publique du Québec
- Kativik regional government
- Ministère de la Défense nationale (MINDS)
- Ministère de la Sécurité publique
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
- Ministère des Transports, Mobilité durable et Électrification des transports
- Municipalité régionale de comté de Vaudreuil-Soulanges
- Ouranos
- Ressources Falco
- Sigma Devtech
- Travaux publics et Services gouvernementaux : Canada
- Ville de Québec