



# PROGRAMME OPTIMISATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS

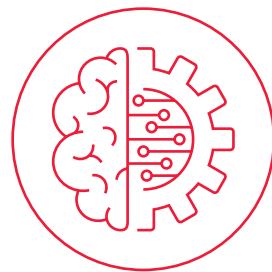
CanmetÉNERGIE à Varennes



## Faire progresser la science et la technologie

Notre équipe de chercheurs.euses et d'ingénieur.e.s rassemble un large éventail de compétences et occupe une position unique au Canada pour s'attaquer aux problèmes complexes liés à l'optimisation des systèmes énergétiques à grande échelle et pour soutenir le développement et l'adoption de technologies industrielles dans divers domaines.





## Mégadonnées et intelligence artificielle

- > Une **approche novatrice pour l'amélioration des systèmes de contrôle industriels** fondée sur une combinaison de techniques d'apprentissage par renforcement causal, de jumelage numérique et d'optimisation a été développée. Cette approche permet le réglage automatique et la supervision des systèmes de contrôle locaux pour **obtenir un potentiel d'économies d'énergie de 15 %** dans un réseau de récupération de chaleur d'une usine de pâte thermomécanique.
- > Un **outil d'entretien assisté par l'IA** et fondé sur des méthodes d'apprentissage machine prédictives et normatives a été développé et testé sur un concentrateur de liqueur noire d'une usine de pâte kraft, ce qui a permis d'améliorer le rendement énergétique du procédé, de réduire les coûts d'entretien et de réaliser des économies d'énergie allant jusqu'à 12 %.
- > Une **approche novatrice de fusion de données** utilisant la génération de polygones et des techniques d'apprentissage profond pour résoudre le problème d'intégration des données de sources et de formats multiples et des données chronologiques des opérations forestières a été développée. Cette approche a permis d'extraire des niveaux d'information plus élevés de ces ensembles de données, améliorant la précision de la prédiction des volumes de bois récolté de 52 % à 89 %, permettant ainsi une meilleure exploitation de données précieuses pour optimiser les chaînes de valeur forestières.

Exploiter  
**l'intelligence  
artificielle**  
pour révéler de nouvelles  
opportunités  
**d'optimisation**

Tirer parti de la **biomasse**  
pour fournir des ressources  
**durables**  
et renouvelables ainsi  
que pour **réduire les**  
**émissions de GES**



## Transformation et utilisation de la biomasse

- > Dans le cadre de l'exploitation de la **lignine en tant que matière première durable**, un procédé catalytique continu sans solvant de transformation par hydrodésoxygénation de la lignine en composés aromatiques a été mis au point. Les résultats préliminaires sont prometteurs, puisqu'une sélectivité de 87,5 % a été obtenue pour les hydrocarbures aromatiques.
- > Une étude de cas a été réalisée pour évaluer la **production de diesel et de carburant** d'aviation renouvelable à l'échelle industrielle. L'étude de cas a envisagé la gazéification par procédé Fischer-Tropsch (GFT) et la liquéfaction hydrothermale (LHT) comme voies de production pour produire jusqu'à 740 000 litres de carburant renouvelable par jour. L'intensité carbone des produits GFT et LHT était de 38 g de CO<sub>2</sub>/MJ et de 26 g de CO<sub>2</sub>/MJ, respectivement.
- > Les avantages de l'utilisation de la **biomasse dans les applications industrielles** ont été démontrés, avec une réduction potentielle des émissions de GES de 15 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an. L'utilisation de la biomasse dans des applications à haute température générant des émissions de CO<sub>2</sub> est particulièrement prometteuse, car elle permettrait de générer des crédits d'émissions négatifs lorsqu'elle est utilisée avec une technologie de captage du carbone.







## Capture, utilisation et stockage du carbone (CUSC)

- > Une étude de cas industrielle a été réalisée pour évaluer les effets environnementaux et économiques de la mise en œuvre d'un système de **conversion d'électricité en X** (X représentant les produits chimiques ou carburants à faible teneur en carbone). Les résultats démontrent des avantages environnementaux considérables, permettant de réduire jusqu'à 57 % les émissions de CO<sub>2</sub> provenant des procédés de production d'acier et de méthanol.
- > Le **diméthyléther (DME)** est un produit intéressant qui peut être utilisé comme produit chimique intermédiaire ou comme carburant de remplacement. Deux **voies de production utilisant le CO<sub>2</sub> capté comme matière première** et la voie habituelle utilisant le gaz naturel ont été modélisées et comparées d'un point de vue énergétique, économique et environnemental. La voie directe du CO<sub>2</sub> au DME, sans production de méthanol comme produit intermédiaire, est apparue comme une solution de remplacement intéressante à l'utilisation du CO<sub>2</sub> dans un produit de valeur, consommant moins de gaz naturel que le procédé habituel, et ce, à un coût de production attrayant.
- > **L'intelligence artificielle et la connaissance des procédés ont été utilisées pour accélérer le dimensionnement et l'établissement des coûts de deux technologies de capture du CO<sub>2</sub> par solvant.** Des modèles de substitution fondés sur l'apprentissage machine ont été entraînés sur des données générées par des milliers de simulations afin de prédire le dimensionnement des équipements et le rendement des procédés avec une marge d'erreur inférieure à ±10 % pour une large gamme de conditions de gaz de combustion et de taux de capture. Combiné à notre modèle d'établissement des coûts d'équipement, l'outil peut prédire les paramètres de conception et les coûts d'investissement, d'exploitation et de capture en quelques secondes. Il peut être utilisé pour estimer rapidement et précisément le coût du capture du CO<sub>2</sub> pour des émetteurs au Canada.
- > La **bioénergie avec capture et stockage du carbone (BECS)** représente une occasion unique pour le Canada de générer des émissions négatives dans les activités de pâtes et papiers, de ciment et de sidérurgie. Un modèle complet d'usine de capture du CO<sub>2</sub> à base d'amines, comprenant le conditionnement des gaz de combustion et les unités de capture du CO<sub>2</sub>, a été développé pour une usine canadienne typique de pâte kraft afin d'établir le coût et l'énergie supplémentaire nécessaire pour capter le CO<sub>2</sub> de la chaudière de récupération, de la chaudière de production d'énergie et du four à chaux. Une analyse d'un système public a été réalisée à l'aide de notre logiciel COGEN afin de déterminer la source d'énergie la plus appropriée pour fournir de la vapeur à l'unité de capture.





## Production et utilisation de l'hydrogène



- > Une limite de système et une méthodologie harmonisées ont été établies pour évaluer les effets environnementaux de cinq **voies de production d'hydrogène** à l'aide de simulations de procédé. Ces modèles de masse et d'équilibre énergétique complets visaient la production de 160 tonnes par jour d'hydrogène d'une pureté de 99,9 % en poids, avec et sans captage du carbone. Une évaluation d'impact du cycle de vie a ensuite été réalisée pour déterminer l'intensité en carbone de ces cinq voies de production.
- > Les limites de système, les conditions d'exploitation et le rendement de la production d'hydrogène par reformage intégré du méthane à la vapeur avec captage du carbone ont été validés avec un partenaire industriel investissant dans une **installation énergétique à hydrogène carbonutre** en Alberta.
- > Diverses **applications industrielles pour l'utilisation de l'hydrogène vert** ont été étudiées, notamment la production de chaleur à haute température, la production d'acier avec fer à réduction directe, le remplacement de l'hydrogène gris dans les raffineries et l'utilisation du méthanol dans le transport maritime. Peu de ces applications ont un potentiel de réduction des émissions de GES aussi élevé que l'électrification directe.



## Évaluation des voies de décarbonisation industrielle

- > La viabilité technico-économique de plusieurs stratégies pour parvenir à la **carbonutralité dans la fabrication de l'acier** a été développée, en partant d'une base de référence d'usines de production de fer à réduction directe et de boulettes de fer jusqu'à une usine non émettrice en 2050. Cela a permis de soutenir le plan d'investissement stratégique de notre partenaire industriel pour la décarbonisation de ses activités.
- > Une plateforme de simulation a été développée pour évaluer les configurations potentielles des **usines de pâte kraft carbonégatives**. Dix nouvelles technologies et nouveaux procédés ont été ajoutés à une usine de référence afin de proposer des feuilles de route de décarbonisation pour éliminer l'utilisation des combustibles fossiles.



# DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODOLOGIES ET D'OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION



Nous développons et entretenons un ensemble de logiciels, de méthodes, d'outils de modélisation et d'outils d'aide à la décision qui permettent la conception et l'exploitation optimales des procédés industriels sous différents angles.

- > Conçue pour quantifier la viabilité technico-économique et l'empreinte environnementale des **stratégies de bioraffinage**, la **plateforme logicielle I-BIOREF** a été améliorée par l'ajout d'une série de paramètres socioéconomiques, politiques et de prise de décision en matière de durabilité. Elle comprend désormais plus de 70 paramètres multidisciplinaires pour l'évaluation de la mise en œuvre des bioraffineries dans divers contextes intégrés et autonomes sur plusieurs sites.
- > Le potentiel du **logiciel d'analyse de données avancé EXPLORE** a été élargi par l'ajout d'une modélisation avancée de la capacité d'évolution des lots, ce qui permet d'optimiser le fonctionnement des procédés par lots utilisés dans les secteurs à forte consommation d'énergie comme la sidérurgie et les secteurs chimiques.
- > Une méthode novatrice et des outils inédits, combinant l'utilisation de l'apprentissage machine et de simulateurs de procédés commerciaux, ont permis d'**accélérer la conception des matériaux et des procédés**. Les premières applications aux technologies et procédés de CUSC et de production de biocarburants ont donné des résultats prometteurs.
- > Un **outil d'analyse multicritère pour l'allocation de la biomasse** a été développé. Les critères les plus importants sont les émissions de GES, l'existence de meilleures options, la disponibilité régionale de la ressource, la compatibilité de l'application avec la BECSC et les considérations techniques et économiques.
- > Le **Cadre national d'évaluation du CUSC**, développé par CanmetÉNERGIE et ses partenaires, est un cadre efficace qui permet une évaluation globale du potentiel de décarbonisation du CUSC, de ses coûts et de l'impact des politiques. Notre équipe a développé un modèle d'optimisation à haute performance pour la **conception optimale en fonction des coûts de chaînes de valeur CUSC** avec transport multimodal pour connecter les émetteurs et les sites de stockage. Ce modèle a été validé avec succès à l'aide de six cas de référence du département de l'Énergie américain.
- > **En utilisant nos outils d'analyse multicritère et d'établissement des coûts pour l'évaluation technico-économique des technologies d'utilisation du CO<sub>2</sub>**, nous avons démontré que le coût élevé de l'hydrogène vert issu de l'électrolyse est un obstacle important à la mise en œuvre des technologies de captage et stockage du carbone (CSC). Les modèles de procédés et les modèles technico-économiques développés pour un procédé de pyrolyse du méthane ont démontré que cette technologie de production d'hydrogène est une solution de remplacement viable au reformage du méthane à la vapeur avec CSC. Par rapport à l'électrolyse de l'eau, elle permet de réduire considérablement les coûts de production des produits à base de CO<sub>2</sub>.
- > S'appuyant sur une série d'outils de calcul développés pour quantifier les avantages énergétiques, économiques et environnementaux de l'électrification des procédés et de l'utilisation de la biomasse et de l'hydrogène dans les procédés à haute température, **une méthodologie et des outils fondés sur des critères de mérite** ont été introduits pour aider à sélectionner les utilisations de ces ressources rares qui ont la plus grande incidence sur les émissions de GES.



# DÉVELOPPEMENT DES CAPACITÉS

Afin de permettre un transfert technologique efficace vers l'industrie et ses partenaires, CanmetÉNERGIE développe des **solutions logicielles innovantes** qui incluent les avancées les plus récentes de nos activités de recherche. Notre suite logicielle comprend :

## Notre suite logicielle



### EXPLORE

Analyse et optimise l'opération des procédés grâce à l'analyse de données



### I-BIOREF

Évalue la viabilité technico-économique ainsi que l'empreinte écologique des stratégies de bioraffinage



### INTÉGRATION

Révèle les possibilités de récupération de chaleur dans vos usines



### COGEN

Maximise les revenus des systèmes de cogénération

En collaboration avec les ministères **MEIE** et **MELCCFP** du **gouvernement du Québec**, nous transformons le marché de la gestion énergétique en offrant des cours techniques et un soutien en matière d'**intégration des procédés** et d'**analyse de données**.

# 1 180

Personnes formées à l'utilisation des logiciels **EXPLORE** et **INTÉGRATION** (depuis 2017)

## 105

Formations et ateliers donnés

## 650

Ingénieur.e.s formé.e.s

## 530

Étudiant.e.s, enseignant.e.s et chercheurs.euses formé.e.s dans 6 universités québécoises

## +50

Entreprises utilisent régulièrement nos logiciels

## +350

Heures de soutien technique à l'utilisation des logiciels **EXPLORE** et **INTÉGRATION**

# SOUTIEN DES POLITIQUES

Nos analyses technico-économiques élargissent la boîte à outils des décideurs politiques et les aident à concevoir et à mettre en œuvre efficacement la stratégie de décarbonisation du Canada. Les outils d'aide à la décision que nous développons permettent une prise de décision optimale dans des scénarios complexes, y compris l'allocation efficace de ressources limitées comme l'hydrogène, la biomasse et l'électricité propre.

- > Le secteur des carburants de RNCan a bénéficié d'une modélisation et d'une assistance technique pour **estimer les besoins futurs en hydrogène au Canada** et fournir des chiffres révisés au commissaire à l'environnement et au développement durable. Un soutien a également été apporté au gouvernement du Québec pour analyser et évaluer les opportunités liées à l'usage de l'hydrogène dans les efforts de décarbonation.
- > La synthèse de la documentation des **études de carboneutralité** fondées sur la modélisation a été renforcée et met en évidence la BECSC et l'électrification directe de l'utilisation finale comme étant les stratégies de décarbonation les plus intéressantes pour l'industrie. Une stratégie a été élaborée pour séquencer les projets de décarbonation en fonction de la substitution, de la réutilisation, de la séquestration et de l'élimination du carbone, les deux derniers moyens étant privilégiés pour atteindre la carboneutralité.
- > Des rapports soulignant l'importance de l'**utilisation de la biomasse comme carburant de remplacement dans les secteurs industriels** ont été remis au Service canadien des forêts, à Environnement et Changement climatique Canada et au secteur des carburants de RNCan.
- > Un travail de modélisation a été effectué pour estimer le potentiel de réduction des émissions de GES des **possibilités d'électrification industrielle les plus efficaces** au Québec, en soutien au MEIE et au MELCCFP. Il a été démontré que l'industrie pouvait augmenter sa demande d'électricité de 45 % tout en réduisant ses émissions de GES de 75 %. Au Québec, cela se traduirait par une consommation d'électricité supplémentaire de 30 TWh par an.
- > En collaboration avec l'INRS, deux ministères du gouvernement du Québec (MEIE et MELCCFP) et des organismes fédéraux, nous avons organisé le **premier atelier québécois sur le CUSC** intitulé « Captage, utilisation et stockage du CO<sub>2</sub> (CUSC) au Québec : état de la situation et perspectives ». Plus de 100 participants issus de l'industrie, du milieu universitaire et du gouvernement ont assisté à l'événement et ont échangé avec des experts du Québec et d'autres provinces sur les possibilités et les défis liés au déploiement du CUSC au Québec.
- > Des hypothèses de modélisation, des données sur le rendement des technologies et des **scénarios de décarbonation** ont été fournis à l'initiative de modélisation de la Régie canadienne de l'énergie et à d'autres plateformes de modélisation comme LEAP et NATEM.





# SENSIBILISATION À L'ÉCHELLE MONDIALE

Nous continuons à jouer un rôle de premier plan pour soutenir le **développement des sciences, des technologies et des politiques** en participant à des **comités d'experts nationaux et internationaux** et à d'autres initiatives de consultation.

## Au Canada, nous avons soutenu :

- > Le Service canadien des forêts dans l'affinement de sa vision de l'avenir du secteur forestier et dans sa contribution aux **plans climatiques du Canada** visant la carboneutralité d'ici 2050.
- > Environnement et Changement climatique Canada dans l'élaboration du **Règlement sur les combustibles propres** en évaluant son incidence potentielle sur le secteur forestier.
- > La Régie de l'énergie du Canada en fournissant des données et des hypothèses de modélisation pour ses nouvelles projections du **rapport Avenir énergétique du Canada en 2023 – Offre et demande énergétiques à l'horizon 2050**.
- > Le MEIE et le MELCCFP en élaborant des fiches de renseignements avec une cartographie énergétique détaillée et des diagrammes de Sankey pour neuf secteurs industriels, et en évaluant le potentiel de réduction des émissions de GES des projets d'électrification et de bioénergie.
- > Un atelier réunissant plus de 50 représentants de l'industrie forestière, de la communauté de la recherche et du développement et d'entreprises de développement de solutions organisé à Québec. Cet événement a permis de cerner les besoins et les défis liés au **développement et à la mise en œuvre de solutions numériques** pour réduire les émissions de GES et augmenter la productivité de l'industrie forestière. Plusieurs discussions sont en cours pour des projets de démonstration.
- > À l'échelle internationale, nous coprésidons le comité exécutif du programme de **l'Agence internationale de l'énergie sur les technologies et systèmes énergétiques industriels (AIE-TSEI)**. Nous dirigeons également deux tâches de recherche sur les bioraffineries industrielles pour la durabilité et la numérisation, l'intelligence artificielle et les technologies connexes pour l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de GES dans l'industrie, avec la participation de plus de 50 experts de 12 pays différents.



# TRANSFERT DES CONNAISSANCES



## Total depuis 2015

**47**

Chapitres de livre et articles évalués par des pairs dans des revues

**179**

Articles évalués par des pairs dans des actes et présentations de conférences

**140**

Documents techniques, rapports et présentations spéciales

**65**

Présentations de formation dans les universités et l'industrie

**41**

Partenariats

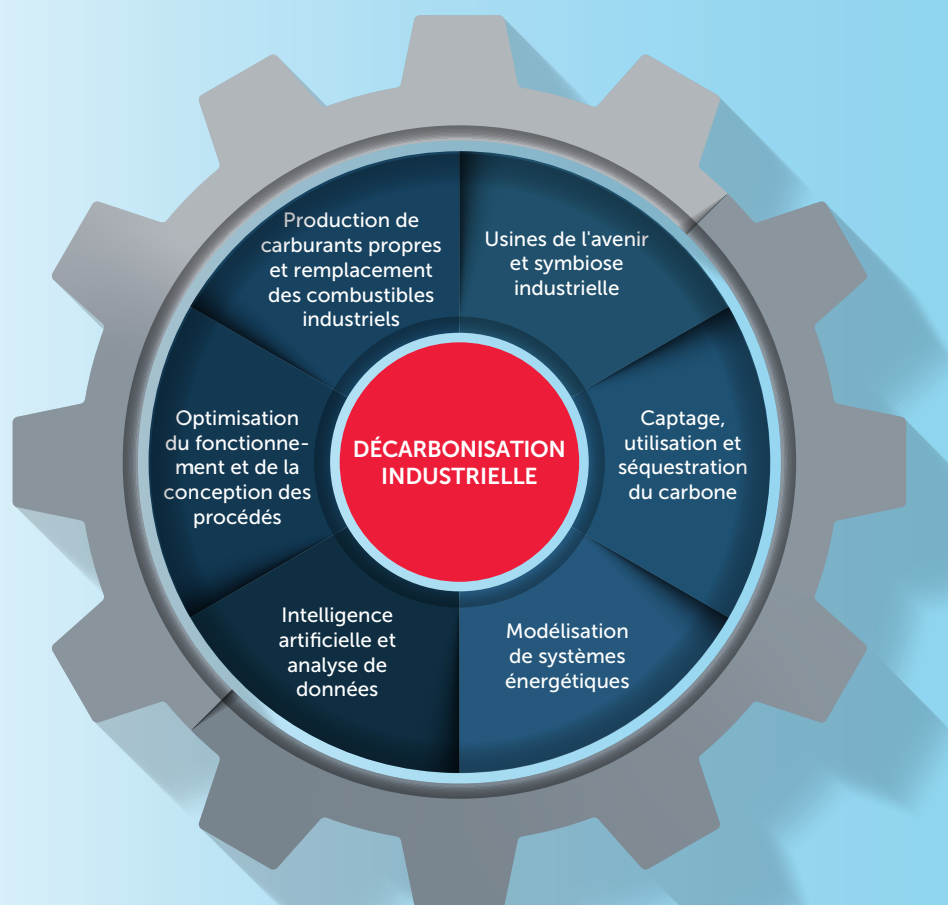


# PARTENAIRES ET COLLABORATEURS

Notre équipe de chercheurs.euses et d'ingénieur.e.s a établi une collaboration et des partenariats solides pour atteindre ses objectifs.



# PERSPECTIVES D'AVENIR





## ÉNERGIE PROPRE | RECHERCHE INNOVATION | LEADERSHIP

Le centre CanmetÉNERGIE à Varennes, situé près de Montréal, mène des activités et des recherches scientifiques innovantes pour concevoir et mettre en œuvre des solutions qui créent de la valeur et qui favorisent un avenir énergétique durable pour le Canada. Pour concrétiser cette mission, nous :

- > appliquons notre expertise en matière de science et technologie (S-T) afin de tester, de développer, de démontrer et de mettre en œuvre des technologies d'énergie propre;
- > partageons nos connaissances et notre expertise grâce à des collaborations avec des partenaires, y compris des organisations non gouvernementales, des universités, le milieu industriel et tous les paliers de gouvernement.

*La science au service de tous les Canadiens.*

Pour plus de renseignements, veuillez consulter notre site Web ou nous contacter :  
[www.rncan.gc.ca](http://www.rncan.gc.ca) | 1-450-652-4621 | [canmetenergy-canmetenergie@rncan-rncan.gc.ca](mailto:canmetenergy-canmetenergie@rncan-rncan.gc.ca)

ISSN 2564-1859



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada