



Centre de recherche
d'Hydro-Québec

Bilan annuel 2024



Table des matières

03 Introduction

04 Améliorer la qualité du service

09 Aider notre clientèle à faire
une meilleure consommation
de l'énergie

12 Augmenter la production
d'électricité

16 Devenir une organisation agile,
innovante et transparente

22 Retour sur nos contributions
scientifiques

Introduction

2024 : Une année de transition et de réflexion pour le CRHQ

L'année 2024 a été une période charnière pour le Centre de recherche d'Hydro-Québec (CRHQ). Elle a été synonyme de transition vers un nouveau modèle d'innovation avec la création de la direction principale – Excellence opérationnelle, stratégies d'innovation et solutions technologiques et un arrimage renforcé de nos projets avec les objectifs du *Plan d'action 2035*. Le but commun de ces évolutions : contribuer à maintenir la position de leader de la transformation énergétique d'Hydro-Québec et toujours viser l'excellence en recherche et innovation.

Tout au long de l'année, le CRHQ a démontré la valeur, scientifique et financière, créée par les projets décrits dans les pages suivantes. Pour 1\$ investi en recherche et développement au CRHQ, les retombées pour l'entreprise s'approchent maintenant de 3\$. Nos initiatives ont non seulement amélioré notre positionnement stratégique, mais également mis en lumière notre capacité à répondre aux défis associés au réseau électrique de demain. Les résultats obtenus témoignent de l'impact positif de nos activités de recherche pour l'entreprise ainsi que pour la décarbonation et la prospérité du Québec.

Parallèlement, 2024 a été une année de réflexion approfondie sur la mise à jour de notre plan directeur. Ce processus a impliqué une réévaluation de nos thèmes de recherche et développement visant à assurer qu'ils restent pertinents et alignés sur les besoins émergents et les impératifs de l'exploitation. Cette démarche a permis de définir des orientations claires ainsi que neuf thèmes aux objectifs ambitieux pour les années à venir.

En conclusion, cela a été une année de transition réussie. Ce bilan des activités 2024 du CRHQ met en lumière des réalisations qui contribuent à la concrétisation de notre *Plan d'action 2035*. En révisant nos axes de recherche, nous avons jeté les bases d'une croissance durable et d'un progrès continu. Nous sommes convaincus que ces efforts porteront leurs fruits et nous permettront de continuer à être un formidable chef de file de l'innovation, au Québec et au-delà.

Christian Bélanger

Directeur principal – Recherche et innovation





Améliorer la qualité du service

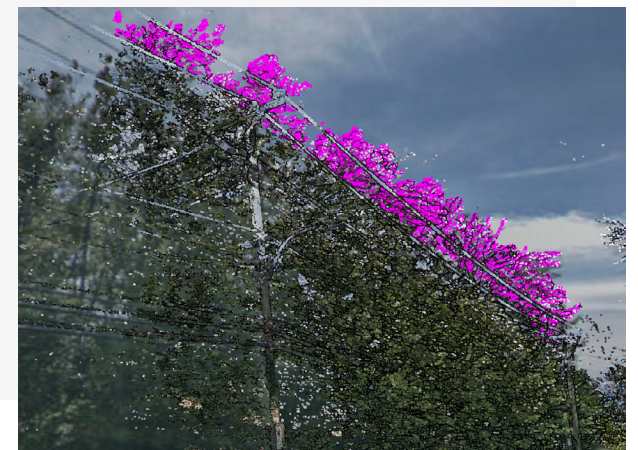
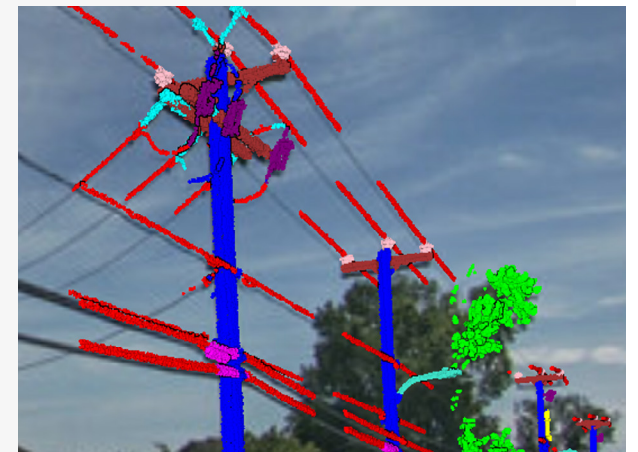
Détective

Vers une maintenance intelligente du réseau de distribution aérien

Le projet Détective incarne une avancée majeure dans la gestion proactive du réseau de distribution aérien d'Hydro-Québec. L'intégration de l'intelligence artificielle, de l'imagerie haute définition et du LIDAR – issus de captations externes ou à partir de nos véhicules – visent à mieux connaître notre réseau pour améliorer notre gestion du risque. Les enjeux sont considérables. La végétation est responsable de 40% des pannes, tandis que 27% sont causées par le vieillissement ou la défaillance d'actifs. À cela s'ajoutent des risques environnementaux multiples, une exigence réglementaire de 150 000 inspections visuelles et d'échantillonnage pour repérer les transformateurs ayant un potentiel de contenir des BPC (biphényles polychlorés), et plus de 5 300 visites terrain annuelles pour répondre aux demandes de la clientèle.

Détective permet de réduire les déplacements grâce à la réalisation d'inspections et de relevés à distance lorsque les travaux nécessitent de l'ingénierie. Il favorise des interventions plus ciblées, notamment en élagage et en remplacement d'équipements, augmentant ainsi l'efficacité opérationnelle. En 2024, plusieurs innovations ont été concrétisées : une cartographie de plus de 500 km de réseau géoréférencé à 5 cm près en moyenne a permis le développement du repérage automatique de 10 types d'actifs aériens et la reconnaissance de 150 essences d'arbres avec une précision de 83%, surpassant largement les normes précédentes. Le système permet aussi la géolocalisation automatique des poteaux et conducteurs (avec une précision oscillant entre 85 et 98% selon le milieu), l'extraction des branches à élaguer, la lecture automatique des plaques d'adresse électrique (LCLCL) et la détection d'autres actifs de distribution comme les isolateurs, coupe circuits et transformateurs.

Avec Détective, Hydro-Québec se dote d'un outil stratégique pour prévenir les défaillances, optimiser ses ressources et renforcer la fiabilité de son réseau afin de mieux gérer la performance de façon qu'elle réponde aux attentes de notre clientèle.





Climatologie

Prévoir l'hydraulicité pour adapter nos stratégies de production

La gestion des réserves énergétiques est un élément clé de la sécurité des approvisionnements à court et moyen terme, et elle est régie par différents critères. En particulier, Hydro-Québec doit pouvoir tenir ses engagements lorsqu'un événement de sécheresse important, mais probable, se produit sur plusieurs années consécutives. Depuis les années 1990, l'entreprise s'assure donc de façon continue qu'elle peut couvrir les aléas des apports hydriques à venir. L'année 2023 ayant été marquée par un déficit énergétique annuel record, nos équipes de recherche ont effectué des analyses pour produire une prévision probabiliste de l'apport énergétique de 2024.

Ces estimations ont permis à l'entreprise d'opter pour une stratégie de production mieux adaptée au contexte hydrologique. Afin de minimiser les achats potentiels d'énergie à fort prix, la stratégie de production 2024 a ainsi été ajustée, notamment avec une réduction des ventes nettes planifiées. Cette stratégie de production a été révisée deux fois au cours de l'année en fonction de l'évolution des conditions hydriques.



Résilience cybernétique des infrastructures des véhicules électriques (ReCIVE)

Cybersécurisation de l'intégration des véhicules électriques

Le projet Résilience cybernétique des infrastructures des véhicules électriques (ReCIVE) s'inscrit dans une démarche stratégique visant une intégration sécurisée, résiliente et optimisée des véhicules électriques (VE) au réseau électrique québécois. Cette initiative se concentre sur trois grands objectifs, soit recenser et documenter les vulnérabilités propres à l'écosystème des VE, modéliser les impacts de ces vulnérabilités sur la stabilité du réseau grâce à une plateforme de cosimulation et développer des mécanismes de détection, de surveillance et de réponse aux cyberattaques adaptés à ces menaces. ReCIVE vise également à définir des classes d'attaques selon leurs impacts et à concevoir des stratégies dynamiques de détection et d'atténuation transférables aux environnements opérationnels. Les résultats

obtenus alimenteront des outils d'aide à la décision pour orienter les actions futures en cybersécurité énergétique.

En 2024, l'équipe a franchi une étape clé avec la mise en place d'un environnement de cosimulation infonuagique, capable de simuler les effets d'attaques sur le réseau électrique. Deux analyses techniques spécifiques ont été réalisées : l'une sur la sécurité par conception des bornes et l'autre sur les vulnérabilités d'intégration des VE. Une carte interactive a également été développée, offrant une visualisation des indicateurs de performance des bornes à l'échelle du Québec. Ces réalisations marquent un jalon important vers une infrastructure énergétique plus résiliente et sécurisée.

Prévision de la demande à court terme

Rayonnement de nos travaux sur la prévision de la demande jusqu'à l'ONU

Avec l'aide de l'intelligence artificielle, nos équipes travaillent depuis plusieurs années à améliorer les modèles de prévision de la demande de puissance à court terme, autant pour les équipes du parquet de transactions que pour celles de la direction – Planification de la conduite du système énergétique. En 2024, ces travaux novateurs ont été présentés à plusieurs forums dont la Sustainable Energy Week de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies.





Aider notre
clientèle à faire
une meilleure
consommation
de l'énergie

Modélisation de la décarbonation

Analyser pour mieux décider

Le projet de Modélisation de la décarbonation vise l'élaboration de trajectoires énergétiques devant représenter les impacts en énergie et en puissance des différents choix technologiques permettant d'atteindre la carboneutralité du Québec en 2050. Les résultats de ces travaux permettront à Hydro-Québec d'anticiper les évolutions de la demande d'énergie à moyen et long terme pour alimenter les réflexions stratégiques de l'entreprise.

Le projet analyse les différentes solutions technologiques de décarbonation par la conversion des usages des combustibles fossiles, en accordant la priorité aux mesures d'efficacité énergétique et aux technologies d'électrification directe et en étudiant les impacts de l'électrification indirecte et le recours à d'autres sources d'énergie carboneutres telles que la biomasse.

En 2024, les principaux travaux ont permis d'élaborer une dizaine de scénarios de décarbonation pour les cinq secteurs industriels critiques du Québec et de réaliser des analyses prospectives de l'impact de la biomasse sur les besoins d'énergie et de puissance. La réflexion a aussi pris en compte les aspects sociologiques, ainsi qu'une revue critique des procédés industriels concernant l'allocation des nouveaux blocs de puissance d'Hydro-Québec. Ces livrables ont contribué à la planification stratégique d'Hydro-Québec, acteur incontournable de la transition énergétique du Québec.



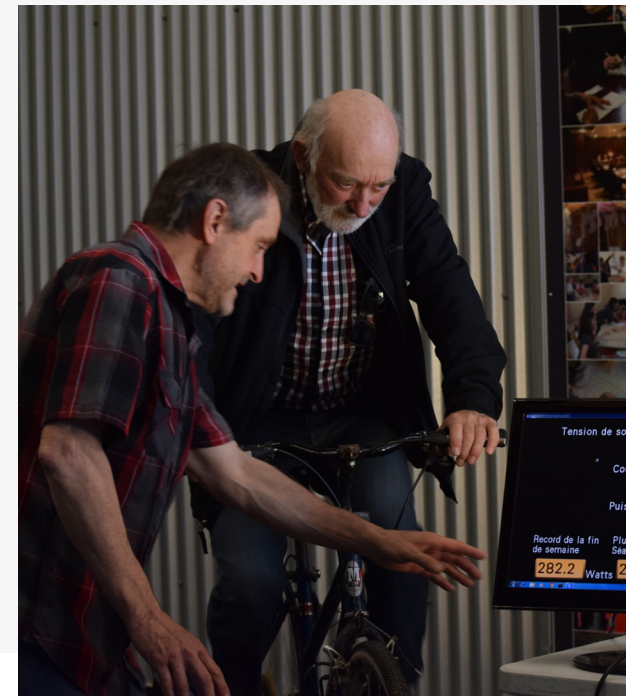
Comportements énergétiques – Lac-Mégantic

Au cœur de la transition énergétique à Lac-Mégantic

Les efforts combinés de nos équipes et de la direction – Solutions d'innovations appliquées et expertises sectorielles, associés à la volonté de la Ville de Lac-Mégantic et avec le soutien du Programme fédéral des énergies renouvelables intelligentes et de trajectoires d'électrification, ont permis de mettre en place un véritable laboratoire vivant de la transition énergétique à Lac-Mégantic. En 2024, deux projets de recherche en sociologie de l'énergie y ont été réalisés, le premier visant à analyser les comportements énergétiques dans une municipalité de taille moyenne résolument engagée dans la transition énergétique et le second portant sur la consommation d'électricité de ménages à faible revenu accédant à des technologies efficaces.

Le 20 septembre 2024, les gouvernements du Québec et du Canada, le Fonds de solidarité FTQ, la Ville de Lac-Mégantic, la Société d'aide au développement de la collectivité de la région de Mégantic, Hydro-Québec et les Chevaliers de Colomb de Lac-Mégantic ont inauguré Le Chevalier, un bâtiment offrant 21 logements sociaux et abordables ainsi qu'une salle communautaire. Au cœur du microréseau

de Lac-Mégantic, ce bâtiment intègre une combinaison de technologies innovantes (accumulateurs thermiques combinés à des thermopompes, panneaux solaires hybrides, etc.). On surveille ces équipements afin de déterminer leur efficacité. Au-delà de cet aspect technique, le comportement des occupants et occupantes fait lui aussi l'objet d'une étude qualitative. Celle-ci vise à mieux comprendre le processus de domestication de ces technologies, c'est-à-dire les formes de travail, d'apprentissage et d'innovation par lesquelles les personnes s'approprient des équipements peu familiers et les intègrent à leur quotidien. Ces recherches nourrissent les efforts d'Hydro-Québec visant à mieux connaître les habitudes de consommation des ménages à revenus modestes pour faire évoluer nos programmes de commercialisation.





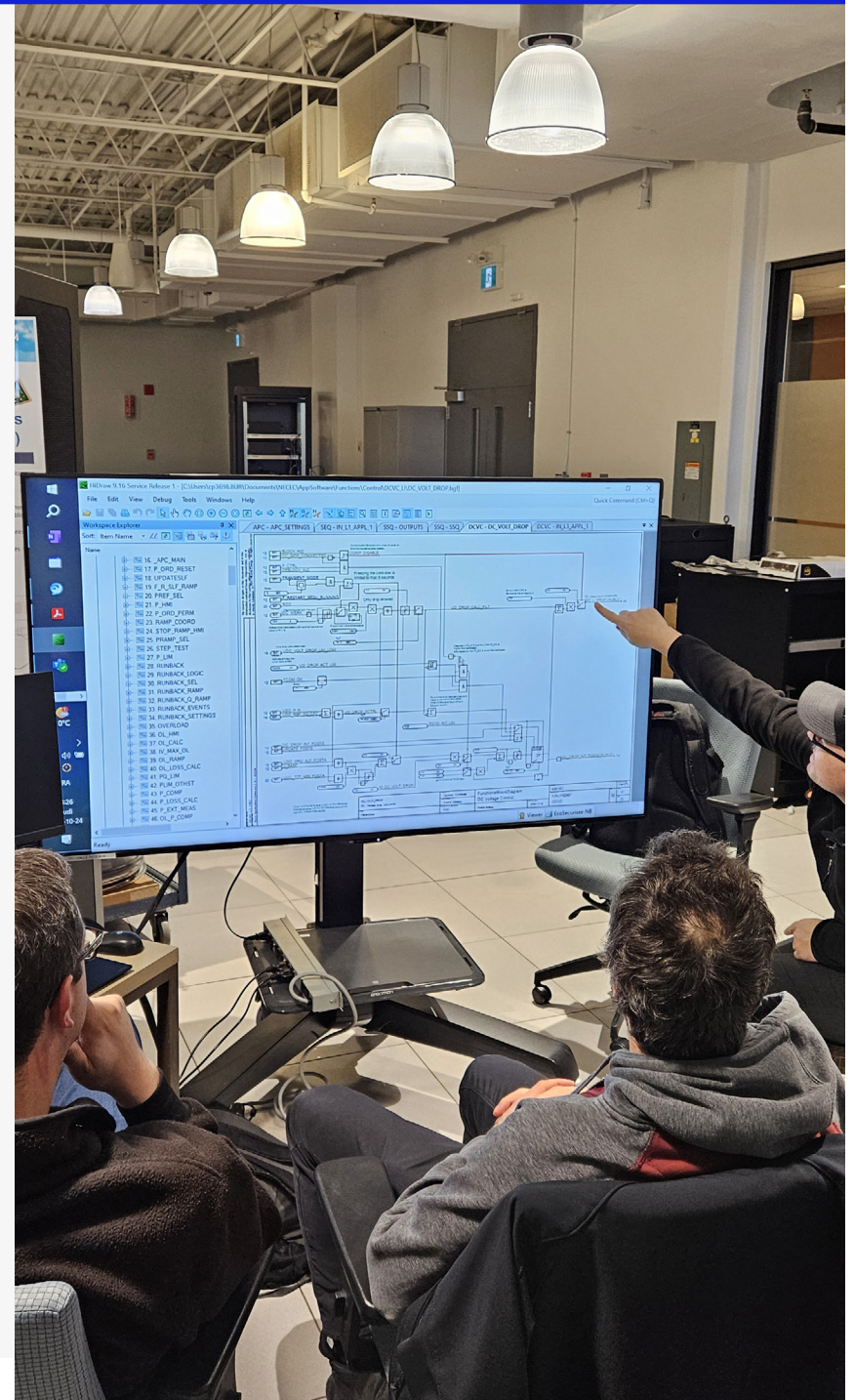
Augmenter la production d'électricité

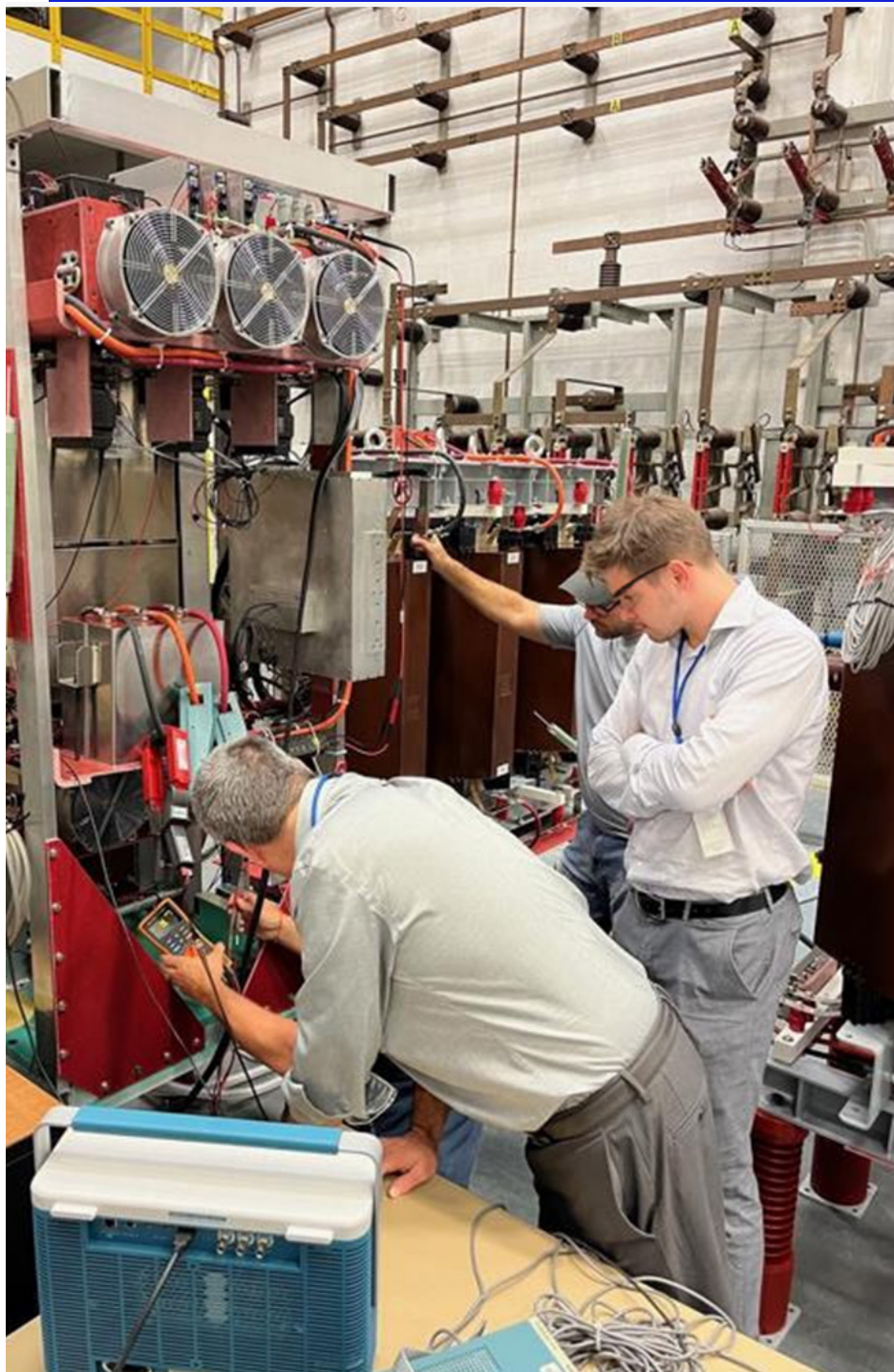
HyperSim

Ligne d'interconnexion des Appalaches-Maine : simulation réussie en vue du jour J

Les avantages des études avec réplique dans notre simulateur HyperSim ne font plus aucun doute. En effet, ces études permettent l'introduction réussie, accélérée et sécuritaire d'équipements critiques dans le réseau d'Hydro-Québec. Les répliques sont utilisées tout au long de la vie de l'installation, permettant ainsi des remises en service accélérées lors d'événements réseau et une optimisation continue des activités.

Le projet de la ligne d'interconnexion des Appalaches-Maine, qui se raccordera à la ligne New England Clean Energy Connect (NECEC) aux États-Unis, se distingue par son caractère inédit puisqu'il intègre pour la toute première fois à notre réseau une nouvelle technologie d'interconnexion à courant continu. Depuis plus de 15 ans, nous menons des travaux de recherche et de développement critiques pour bâtir l'expertise et les outils nécessaires pour relever ce défi. Grâce à la puissance et à la précision d'HyperSim, la réplique du système de commande a pu être soumise à des scénarios d'un grand réalisme. En 2024, la réplique a été mise en service en boucle fermée avec HyperSim. Depuis, les spécialistes de nos équipes et de l'unité Systèmes de compensation et interconnexions de la direction – Expertise, ingénierie et standardisation sont à l'œuvre pour développer et tester des correctifs qui seront déployés avant la mise en service de l'interconnexion au poste Appalaches à l'automne 2025.





SimP

SimP : succès pour le test de la première cellule à pleine puissance

En octobre 2024, la construction de la nouvelle infrastructure de recherche en électronique de puissance SimP a franchi une étape majeure avec la validation à pleine puissance de la première cellule de son amplificateur de puissance. Cette cellule, l'une des 24 nécessaires à la réalisation de l'amplificateur triphasé à 25 kV de 7,5 MVA, est le fruit de plusieurs années de recherche et de développement ayant permis d'optimiser sa conception et ses performances. Grâce aux algorithmes en boucle fermée développés au CRHQ, SimP permettra, entre autres, de mieux comprendre et maîtriser l'impact des ressources énergétiques décentralisées (RED) et des ressources basées sur les onduleurs (*inverter-based resources*) sur les réseaux électriques, avec un niveau de détail inégalé.

Cette infrastructure unique au monde offrira à Hydro-Québec un environnement d'essai essentiel aux planificateurs et exploitants pour réduire les risques liés à l'intégration des ressources basées sur les onduleurs, notamment l'éolien, tout en assurant la fiabilité des réseaux. SimP permettra l'avancement des recherches sur les algorithmes de contrôle avancés de telles ressources, tels que les stratégies de type composition du réseau (*grid forming*), visant l'optimisation des coûts et de la performance des réseaux de transport et de distribution. Les travaux de construction de SimP se poursuivent en 2025, avec une mise en service prévue à l'été 2026.

DIAAA

Diagnostic des alternateurs à son plein potentiel

Nous avons déployé en 2024 le dernier outil du projet Diagnostic avancé des alternateurs (DIAAA) qui permet à l'entreprise d'améliorer la maintenance de ses alternateurs hydroélectriques grâce à une approche intégrée de diagnostic.

DIAAA intègre des outils tels que l'inspection visuelle, la mesure du flux magnétique dans l'entrefer, l'analyse des ampères-tours, la résistance d'isolement à la terre de l'enroulement rotor, ainsi que des tests sur les décharges partielles, les courants de polarisation et de dépolarisation et la mesure d'ozone.

Accessible via une interface Web, cette plateforme permet de surveiller en continu l'état du stator et du rotor des alternateurs en combinant des outils de diagnostic en ligne

et hors ligne (nécessitant un démontage ou simplement un arrêt). Elle calcule automatiquement un indice d'état (ou de santé) pour chaque alternateur, basé sur les résultats obtenus au moyen de plusieurs outils de diagnostic, et attribue un niveau de confiance selon la quantité et la qualité des données disponibles.

En plus de faciliter la planification de la maintenance et de réduire les arrêts imprévus, DIAAA ouvre la voie au développement de jumeaux numériques qui permettent de simuler et de prédire le comportement des alternateurs en temps réel. Cette innovation représente une avancée majeure dans la gestion proactive et durable des équipements de production d'électricité.



DIAAA récompensé au gala des Prix Innovation de l'ADRIQ

L'équipe du projet DIAAA a reçu le prix InovÉÉ lors du gala 2024 des Prix Innovation de l'Association pour le développement de la recherche et de l'innovation du Québec (ADRIQ). Elle partage avec l'École de technologie supérieure et l'entreprise Opal-RT ce prix qui souligne l'excellence du projet sur le plan du partenariat avec le milieu universitaire et du rayonnement scientifique international. Au total, l'équipe de DIAAA a rédigé plus de 32 articles scientifiques et supervisé 11 étudiants à la maîtrise, ainsi que 7 étudiants au doctorat.





Devenir une organisation agile, innovante et transparente

Drains de barrage autonettoyants

Solutions pour le nettoyage des drains de barrage

Hydro-Québec installe des drains dans ses barrages en béton pour réduire la force de soulèvement. Or, des dépôts solides de calcite obstruent progressivement ces drains, ce qui réduit leur efficacité et nécessite un nettoyage mécanique. Nous mettons actuellement en œuvre les solutions issues d'un projet de recherche par lequel nous visons à comprendre et à gérer ces dépôts. Voici celles qui ont été utilisées en 2024 :

1

Inhibiteurs de calcite

Des pastilles de polysuccinimide, qui libèrent de l'acide polyaspartique, ont été testées à la centrale de Beauharnois et au barrage Daniel-Johnson. Nous avons montré qu'elles diminuent la formation de cristaux de calcite et en facilitent l'élimination.

2

Outil d'inspection ECHOTRON

En partenariat avec Mecanum Inc., Hydro-Québec a développé un outil d'inspection acoustique des drains, plus rapide et efficace que les méthodes visuelles.

3

Logiciel HQDrain

Développé au CRHQ, ce logiciel prédit le colmatage des drains par la calcite, permettant d'anticiper et de traiter les blocages potentiels avant qu'ils ne deviennent problématiques.

Ces initiatives contribuent à la sécurité et à la durabilité des barrages en béton d'Hydro-Québec.



Linux Foundation Energy

Participation à la communauté Linux Foundation Energy

En 2024, le CRHQ a franchi plusieurs étapes marquantes dans son engagement auprès de la communauté Linux Foundation Energy et dans l'avancement de projets stratégiques liés à la transition énergétique. Dès avril, le CRHQ a officialisé sa première participation à la LF Energy en tant que membre à part entière, témoignant ainsi de sa volonté claire de s'impliquer dans l'écosystème énergétique de sources libres. Cet engagement s'est concrétisé en septembre par une première présence au sommet international de LF Energy, où plusieurs initiatives ont été mises en lumière. Parmi celles-ci, le projet stratégique GridFM qui porte sur les modèles génératifs et l'utilisation de l'IA est le tout premier projet d'Hydro-Québec à intégrer LF Energy, une avancée majeure officialisée en octobre. Ce projet a bénéficié d'un soutien notable, notamment avec la participation d'IBM et du milieu universitaire européen.

VoltAIRE (GridFM)

Quand VoltAIRE rime avec partenaires

Le projet VoltAIRE vise le développement d'un modèle génératif de réseau électrique (GridFM) en collaboration avec IBM. Le GridFM sera utilisé conjointement avec un modèle génératif météo (WeatherFM) et ciblera principalement des applications en planification du réseau de transport. Coup de chapeau à notre collègue chercheur François Miralles qui a réussi à rassembler tout un écosystème de partenaires autour de ce projet, le premier projet en source libre de LF Energy pour Hydro-Québec. Le travail sur nos données électriques pourra être mis à profit dans d'autres projets d'innovation ainsi qu'avec nos partenaires du MILA et de Polytechnique.

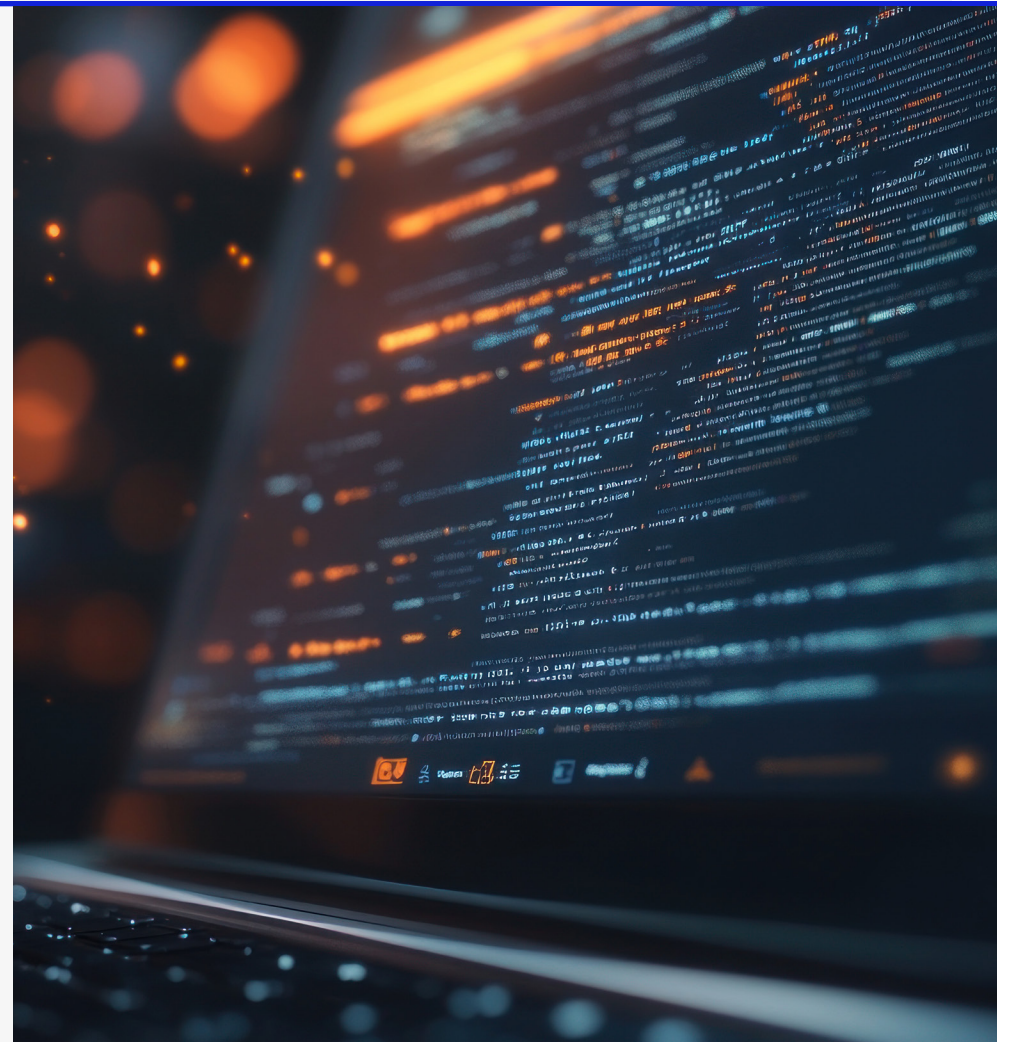


Prospective sur les grands modèles de langage (LLM)

IA à la loupe

L'émergence des grands modèles de langage (LLM) marque un tournant historique dans l'évolution de l'intelligence artificielle et sa démocratisation. Ils sont devenus des catalyseurs incontournables de transformations technologiques, économiques et sociales. La prospective réalisée en 2024 sur le sujet a permis de déterminer et de documenter des occasions et enjeux importants des LLM pour Hydro-Québec.

Militant pour l'intégration de différents outils d'IA pour la recherche scientifique, l'équipe a pu obtenir l'accès à Scopus AI et à Science Direct AI ouverts à toute l'entreprise et appuyer le déploiement de Github Copilot au CRHQ. Elle a documenté les enjeux de cybersécurité liés aux capacités de tromperie des nouveaux modèles, suscitant l'intérêt de la direction principale – Cybersécurité et menant à l'élaboration d'un scénario d'attaque pour le projet Cybersécurité des réseaux électriques (CySRE) du CRHQ. L'équipe a également examiné les risques liés au développement d'agents intelligents de plus en plus puissants, tels que soulevés par des spécialistes du domaine, et analysé leurs implications pour une entreprise critique comme Hydro-Québec. Enfin, les LLM adoptés à grande échelle par les géants de la technologie ont et auront un impact énergétique important sur les entreprises de services publics d'électricité telles qu'Hydro-Québec, dans son rôle autant de client que de fournisseur d'électricité.



Les activités de prospective sur ce sujet ont été documentées une première fois en 2024 afin de mieux comprendre les enjeux énergétiques et de servir d'intrant dans les réflexions stratégiques de l'entreprise. Les LLM continuant d'évoluer rapidement et entraînant de nouveaux enjeux et de nouvelles possibilités, nous poursuivrons les travaux en 2025 pour mieux connaître et comprendre les LLM et mieux s'y préparer.



RIAUPEL couronné par l'OR aux OCTAS

Le projet RIAUPEL (robot d'inspection automatisée des postes électriques) est le lauréat OR dans la catégorie Robotique, grande entreprise, société d'État et paragouvernemental des OCTAS 2024. Le projet développe et déploie des systèmes robotisés au sein des installations de transport d'électricité afin d'y automatiser l'ensemble des inspections routinières et thermographiques.

Un prototype est déployé depuis décembre 2023 au poste La Grande-2, poste de départ de la centrale Robert-Bourassa (la plus importante d'Hydro-Québec). Grâce à ses capacités d'inspection visuelle et thermographique, le robot contribue aux efforts de télésurveillance des transformateurs de puissance, mais également des disjoncteurs, des inductances et des sectionneurs, tous des actifs essentiels pour le transport de l'électricité.

Bilan Free Electrons 2024

Free Electrons : un programme électrisant

2024 a été la deuxième année de participation d'Hydro-Québec au programme *Free Electrons*, un projet de collaboration international dans le domaine de l'énergie. Dans un premier temps, Hydro-Québec a été l'hôte du Master Module à la mi-juillet, à Montréal. Cet événement a rassemblé 75 personnes provenant des 15 entreprises en démarrage finalistes ainsi que des représentants et représentantes des 6 autres entreprises d'électricité membres de *Free Electrons*.

À la suite de notre participation à *Free Electrons*, cinq projets pilotes ont été réalisés en 2024. Les travaux se poursuivront en 2025 alors que six autres projets pilotes seront menés par nos équipes et nos collègues des différents groupes d'Hydro-Québec. Deux autres projets sont encore en élaboration.

Après deux années de participation et de nombreux projets pilotes, une première solution issue de *Free Electrons* a été intégrée aux activités d'Hydro-Québec. Ainsi, la solution de Salient, qui vise à prédire la température et les précipitations à l'aide d'un modèle hybride physique-IA sur un horizon de 2 à 52 semaines, est présentement utilisé par les équipes météo de la direction – Planification et conduite du système énergétique.





Retour sur nos contributions scientifiques

Nos brevets

Le CRHQ dispose d'un portefeuille très diversifié de brevets

214 Brevets et demandes en cours
soit 153 brevets délivrés et 61 demandes en instance
(le tout regroupé en 57 familles de brevets)

2 Nouvelles inventions
nouvelles innovations protégées en 2024
par le dépôt de demandes de brevet

16 Brevets
nouvellement délivrés en 2024

Nos publications scientifiques 2024

Le CRHQ publie chaque année en moyenne 150 articles de revue, articles de conférence, chapitres de livres et autres contenus scientifiques. L'année 2024 a été particulièrement productive, avec 204 publications scientifiques contre 168 en 2023.

Parmi les 204 publications diffusées par les éditeurs scientifiques, on dénombre 126 articles de revue, 77 articles de conférence et 1 chapitre de livre. Par ailleurs, on constate une forte présence de coéditions avec nos partenaires du milieu universitaire, dénotant un réel esprit de collaboration et de synergie entre les équipes. Celles-ci s'élèvent à 95 sur 204, soit 47% de l'ensemble des publications de l'année.

En matière de performance, 43 publications scientifiques de l'année ont été diffusées dans le top 10 % des revues les mieux cotées du monde selon le Source Normalized Impact per Paper (SNIP), un facteur d'impact pondéré par discipline, permettant de mieux comparer les revues entre elles.

126
articles de revues

95
coéditions avec nos partenaires universitaires

77
articles de conférences

Sous la loupe

Positionnement et vigie

Quelques exemples :

- Électrification efficace
- Énergie et société
- Intégration des ressources énergétiques décentralisées (RED)
- Systèmes de stockage d'énergie (SSE)
- Transformateur de puissance

Activités de prospective

En 2024, plusieurs projets de prospective ont été menés : 10 projets ont été réalisés et 14 nouveaux ont été lancés pour se poursuivre en 2025. Quelques exemples des projets terminés en 2024 :

- Stockage d'énergie en puits coffré
- Intégration de petits réacteurs modulaires
- Des énergies marines à l'électricité
- Étude du concept d'alternateur flexible



