

RAPPORT ANNUEL  
2018-2019

# SOMMAIRE

- 01 Historique**  
**Mission**
- 02 Mot du directeur académique**  
Équipe de l'IET
- 03 Gouvernance**
- 04 Axes stratégiques**
- 05 Activités 2018-2019**
- 07 6<sup>e</sup> Symposium annuel Trottier sur l'ingénierie, l'énergie et la conception durable
- 08 Programme de subventions à la recherche**
- 09 Étude du phosphore noir 2D : un nouveau matériau pour la conversion d'énergie
- 10 Conception des systèmes géothermiques à puits à colonne permanente
- 11 Développement de réseaux de chaleur de 4<sup>e</sup> génération pour des quartiers durables
- 12 Métafenêtres intelligentes
- 13 Réduction de l'empreinte carbone de l'agriculture
- 14 Bourses Trottier**
- 16 Programmes d'études supérieures**
- 17 Revue de presse**



# HISTORIQUE

La création de l'Institut de l'énergie Trottier (IET) a été rendue possible, en 2013, grâce à un don exceptionnel de la Fondation familiale Trottier à Polytechnique Montréal, dans le cadre de la grande campagne de financement de Campus Montréal.

L'énergie est l'un des créneaux d'excellence de Campus Montréal. Plus d'une douzaine de départements de HEC Montréal, de Polytechnique Montréal et de l'Université de Montréal sont actifs dans ce domaine.

Rassembleur, l'IET s'est donné le mandat d'enrichir et de consolider cette expertise. Son statut particulier lui permet d'ailleurs d'utiliser une approche systémique et globale prenant en compte les dimensions techniques, sociales et économiques des enjeux énergétiques.

En plus de travailler avec un bassin de professeurs et de chercheurs issus des trois établissements de Campus Montréal, l'IET mène des travaux en collaboration avec le *Trottier Institute for Sustainability in Engineering and Design (TISED)*, de l'Université McGill.



Lorne Trottier, le grand philanthrope derrière la création de l'IET, en conversation avec des étudiants de Polytechnique.

# MISSION

**L'Institut de l'énergie Trottier a pour mission :**

## La formation

d'une nouvelle génération d'ingénieurs, de scientifiques et d'innovateurs ayant une compréhension systémique et transdisciplinaire des enjeux énergétiques;

## La recherche

de solutions durables qui permettront d'assurer l'avenir énergétique, en appuyant la génération de connaissances et l'innovation dans le domaine énergétique;

## La diffusion

des connaissances liées à l'énergie pour ainsi alimenter le dialogue sociétal sur les questions énergétiques.

# MOT DU DIRECTEUR ACADÉMIQUE

Malgré les objectifs de réduction de GES adoptés par les gouvernements à travers la planète, la demande en hydrocarbures fossiles continue d'augmenter. Cette augmentation signifie que la transition énergétique nécessaire pour l'atteinte des objectifs ne se produit pas au rythme attendu.

Pour comprendre les freins techniques, économiques et sociaux qui empêchent la transformation du système énergétique et identifier les pistes les plus prometteuses, l'Institut de l'énergie Trottier de Polytechnique Montréal mise sur trois leviers pouvant stimuler le changement : la formation, la recherche et la sensibilisation. Cette mission vise à promouvoir la co-construction d'un système énergétique durable, à la fois respectueux de l'environnement et pouvant soutenir la vitalité économique et la qualité de vie des citoyens.

Notre équipe prend part activement à l'élaboration de solutions positives, au cœur d'une transition amorcée par divers acteurs à l'échelle du pays. Ainsi, au cours des dernières années, nous avons travaillé à déployer, aux niveaux québécois et canadien, des structures capables d'éclairer la prise de décisions en matière de politique et d'investissement.

Nous agissons directement pour faire valoir des avis fondés sur la science, et ce, tant auprès de l'industrie que des différents paliers gouvernementaux. À ce chapitre, l'une des réalisations phares de la dernière année fut le lancement des *Perspectives énergétiques canadiennes*. Publié à la suite d'un rigoureux exercice de projection de l'évolution de la production et de la consommation d'énergie au Canada jusqu'en 2050, ce document a atteint l'objectif visé, c'est-à-dire celui d'engager les discussions sur la trajectoire à suivre afin que tous les Canadiens puissent bénéficier de la transformation en cours.

Poursuivant une approche collaborative, l'IET a aussi initié différents ateliers de travail. Ces ateliers portaient notamment sur la planification de l'exploitation future du réseau électrique, sur l'adaptation aux changements climatiques ainsi que sur le développement d'une plateforme de modélisation pour des études de décarbonisation. Dans chacun des cas, les activités ont bénéficié de la mise en commun des forces complémentaires du monde universitaire, du secteur industriel et des services publics.

Je désire également souligner notre implication à mettre de l'avant les enjeux environnementaux lors de la dernière campagne électorale provinciale. Cette implication s'est traduite par des sorties répétées dans les médias de même que par l'organisation du débat politique sur la gouvernance environnementale " Le climat, l'État et nous " et a créé un véritable lien de confiance avec de nombreux acteurs politiques.

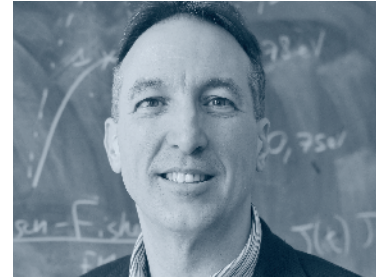
Par ailleurs, notre appui aux équipes de recherche de Polytechnique Montréal a donné lieu à des avancées importantes sur les tableaux de l'efficacité énergétique et de l'intégration des ressources renouvelables. Dans les pages qui suivent, vous pourrez prendre toute la mesure des ambitions et du talent des chercheurs affiliés à l'IET. Mettant leur matière grise au service d'un monde plus vert, ceux-ci s'activent à mettre au point des réponses technologiques, à travers une approche sociale.

Car je tiens à le préciser : si les défis à relever sont nombreux, les scientifiques et les chercheurs motivés à y travailler le sont tout autant, grâce l'appui, à l'intelligence et à l'efficacité remarquables de toute l'équipe qui m'entoure à l'IET.



**Normand Mousseau**

## ÉQUIPE DE L'IET



**Normand Mousseau**  
Directeur académique



**Louis Beaumier**  
Directeur exécutif



**Guy Marleau**  
Coordonnateur des programmes  
d'études supérieures en génie



**Audrey Rondeau**  
Conseillère en communications

# GOVERNANCE

## CONSEIL DE DIRECTION

### **Lorne Trottier**

Président de la Fondation familiale Trottier

### **Sylvie Trottier**

Directrice de la Fondation familiale Trottier

### **Guy Lefebvre**

Vice-recteur, Université de Montréal

### **François Bertrand**

Directeur général adjoint et Directeur de la formation et de la recherche, Polytechnique Montréal

### **Pierre-Olivier Pineau**

Professeur titulaire, Sciences de la décision, HEC Montréal

### **Louise Millette**

Professeure agrégée et directrice du Département des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal

## COMITÉ DE GESTION

### UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

#### **Erick Lachapelle**

Professeur adjoint, Science politique

#### **Dominic Rochefort**

Professeur titulaire, Chimie

### POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

#### **Normand Mousseau**

Directeur académique de l'IET et professeur titulaire, Physique

#### **Michel Bernier**

Professeur titulaire, Génie mécanique

#### **Michel Gendreau**

Professeur titulaire, Mathématiques et génie industriel

#### **François Guibault**

Professeur titulaire, Génie informatique et génie logiciel

#### **Guy Marleau**

Coordonnateur des programmes d'études supérieures en génie énergétique, professeur titulaire, Génie physique

#### **Elmira Hassanzadeh**

Professeure adjointe, Génies civil, géologique et des mines

#### **Oumarou Savadogo**

Professeur titulaire, Génie chimique

#### **Frédéric Sirois**

Professeur agrégé, Génie électrique

#### **Oussama Moutanabbir**

Professeur agrégé, Génie physique

# AXES STRATÉGIQUES

La mission de l'IET s'articule autour de trois axes stratégiques :

## FORMATION

- ▶ Administrer les programmes de bourses d'études de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycles liées au domaine de l'énergie;
- ▶ Agir comme centre de référence pour intégrer un point de vue systémique dans le contenu universitaire sur l'énergie de Polytechnique Montréal;
- ▶ Offrir à la communauté polytechnicienne un environnement intellectuel et scientifique propice à éveiller et à nourrir l'intérêt pour les questions énergétiques;
- ▶ Favoriser le maillage entre les étudiants qui consacrent leur projet intégrateur aux thématiques énergétiques et des spécialistes de divers horizons;
- ▶ Collaborer à promouvoir la culture d'excellence du génie énergétique à Polytechnique Montréal afin d'attirer la relève dans ce champ d'activités porteur d'avenir.

## RECHERCHE

- ▶ Créer un milieu favorable au démarrage de nouveaux projets de recherche transdisciplinaires portant sur l'énergie. La transdisciplinarité est encouragée afin d'inscrire les projets dans une approche systémique de résolution de problème allant au-delà de la seule discipline de l'ingénierie;
- ▶ Établir et maintenir des partenariats pour consolider les réseaux régionaux, nationaux et internationaux de Polytechnique Montréal;
- ▶ Jouer un rôle actif dans la recherche de financement, dans les circuits gouvernementaux et privés, afin d'appuyer la recherche, notamment la recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire sur des thématiques, des problématiques ou des projets précis.

## DIFFUSION

- ▶ Soutenir la création d'événements transdisciplinaires comme tribune de discussion sur les questions énergétiques;
- ▶ Favoriser et soutenir la présence médiatique des différents experts en énergie de Polytechnique;
- ▶ Encourager la participation des professeurs, des chercheurs et des étudiants aux événements scientifiques – régionaux, nationaux ou internationaux – liés aux questions énergétiques;
- ▶ Appuyer la participation aux événements scientifiques de Polytechnique pertinents à la mission de l'Institut;
- ▶ Agir comme un lieu privilégié d'accès à l'expertise et de diffusion de la recherche et de la formation en énergie, tant à l'échelle du campus qu'aux échelles nationale et internationale;
- ▶ Faire preuve de leadership en matière d'énergie auprès de la communauté universitaire et scientifique, ainsi que du public;
- ▶ Être un intervenant incontournable pour la classe politique, de même qu'une source d'information pour la société en général.

# ACTIVITÉS 2018-2019



## DÉBAT POLITIQUE “ LE CLIMAT, L'ÉTAT ET NOUS ”

Dans le cadre des élections québécoises 2018, un débat politique sur la gouvernance environnementale s'est tenu devant plus de 350 personnes. Réunissant le péquiste Sylvain Gaudreault, le caquiste Richard Campeau et la solidaire Ruba Ghazal, la rencontre d'une durée de deux heures a donné lieu à des échanges éclairants sur les idées des trois partis représentés, relativement aux structures de décision et d'action à mettre en place pour lutter efficacement contre les changements climatiques.

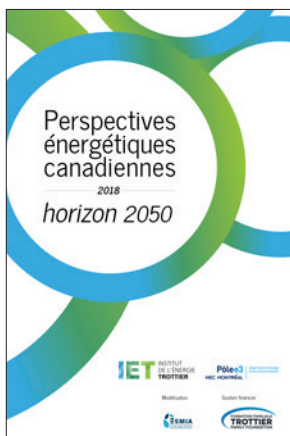


## VISITE D'UNE DÉLÉGATION GOUVERNEMENTALE ET UNIVERSITAIRE DE LA BELGIQUE

Accompagné d'une délégation belge, le ministre wallon du Budget, des Finances, de l'Énergie, du Climat et des Aéroports, l'honorable Jean-Luc Crucke, était de passage à Polytechnique Montréal. Motivé par l'intérêt du ministre à rencontrer l'équipe de l'IET, l'arrêt à Polytechnique a donné lieu à des échanges de connaissances, portant sur l'énergie et les villes intelligentes. Éric Haubruge, premier vice-recteur de l'Université de Liège, et Aurore Richel, responsable du Laboratoire de biomasse et technologies vertes de l'Université de Liège, ont également participé à la discussion au sujet des ponts à établir entre la science et l'engagement social.

## LANCEMENT DES PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES CANADIENNES

L'IET et le Pôle e3 ont publié les *Perspectives énergétiques canadiennes 2018*. Produit avec la collaboration de la firme ESMIA, ce rapport projette l'évolution jusqu'en 2050 de la production et de la consommation d'énergie du Canada, comparant quatre scénarios de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) à un scénario de référence. Il est le premier de ce genre depuis plus d'une décennie couvrant le Canada.



## ATELIER DE TRAVAIL ET RAPPORT SUR L'AVENIR DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

À l'initiative de l'IET, d'InnovÉÉ, de l'IGEE et de l'AIEQ, une cinquantaine d'acteurs stratégiques québécois et ontariens se sont réunis dans le cadre d'un atelier de travail consacré à l'avenir du réseau électrique. Tenue dans les bureaux de Deloitte Montréal, cette rencontre visait une mise en commun des forces complémentaires du monde universitaire, du secteur industriel et des services publics. Les deux ateliers de la journée – le premier portant sur la demande et le second sur le service – ont mené à la publication d'un rapport de synthèse mettant en relief les enjeux et les opportunités devant être pris en compte dans l'élaboration des politiques publiques.



# ACTIVITÉS 2018-2019

## ATELIER ET RAPPORT SUR LE DÉVELOPPEMENT D'UNE PLATEFORME DE MODÉLISATION POUR DES ÉTUDES DE DÉCARBONISATION EN PROFONDEUR

Le laboratoire Canmet ÉNERGIE de Ressources naturelles Canada et l'IET ont organisé un atelier de travail sur les efforts pancanadiens et nord-américains de décarbonisation, dans l'optique de développer une plateforme de modélisation ouverte sur le sujet. Réunissant une cinquantaine de têtes pensantes des milieux universitaires et institutionnels, cet atelier avait pour objectif de définir les orientations d'un futur effort de collaboration, visant à fournir aux scientifiques et aux décideurs les moyens de mener des études approfondies sur la décarbonisation en profondeur et l'électrification. Le [rapport de synthèse](#) identifie les lacunes dans les modèles existants et dresse une liste de stratégies proposées pour pousser l'initiative plus loin.



## SESSION DE TRAVAIL D'EXPERTS DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

Polytechnique Montréal a été l'hôte d'une session de travail d'experts de l'Agence internationale de l'énergie, dans le cadre du programme *Energy in Buildings and Communities* qui mène des projets de recherche et d'innovation pour améliorer la performance énergétique des bâtiments et communautés. La rencontre de travail était consacrée au projet *Annex 67*, dont les activités de recherche et développement portent sur la flexibilité énergétique des bâtiments. Fort de la participation d'une soixantaine de chercheurs et d'acteurs industriels canadiens et internationaux, ce séminaire a contribué à nourrir l'écosystème du bâtiment vert en idées nouvelles.

## COLLABORATION À LA MISE SUR PIED D'UN NOUVEL INSTITUT PANCANADIEN SUR LE CLIMAT

La Coalition pancanadienne d'organisations expertes, dont fait partie l'IET, a remporté le concours d'appel à propositions lancé par Environnement et Changement climatique Canada pour la création d'un nouvel institut indépendant sur le climat. Réunissant une quinzaine d'organisations diversifiées et réputées de partout au pays, cette coalition s'est engagée à mettre sur pied un institut national indépendant, sans but lucratif et axé sur les politiques, dont les travaux porteront sur la croissance propre et les changements climatiques.

## NOTRE RELATION À L'ÉLECTRICITÉ : CONVERSATION ENTRE CHRISTINE BEAULIEU ET GRETCHEN BAKKE

La première édition des "conversations de l'IET", animée par Louis Beaumier, directeur exécutif, a connu un grand succès. À l'aide de deux visions, celle d'une autrice engagée (Christine Beaulieu) ainsi que celle d'une anthropologue américaine (Gretchen Bakke), cette rencontre a permis d'aborder le sujet de notre relation à l'électricité sous des angles nouveaux.

## ATELIER DE TRAVAIL SUR L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le Cité-ID LivingLab et l'IET ont tenu un atelier de discussion dans le cadre du sixième Symposium annuel Trottier, avec les acteurs de deux réseaux : le réseau en résilience et en adaptation aux changements climatiques (CC) et le réseau en mitigation des CC. Cet atelier a regroupé plus d'une trentaine de représentants du secteur municipal, de la recherche et d'organisations œuvrant dans ces domaines. En plus de fournir un portrait sommaire des ressources existantes dans les deux réseaux, l'activité a donné lieu à la caractérisation et à la comparaison des actions prises ainsi qu'à une réflexion sur les enjeux de coordination. Le rapport d'atelier présente une synthèse du contenu des présentations et des discussions.



# SYMPOSIUM



## 6<sup>e</sup> SYMPOSIUM ANNUEL TROTTIER SUR L'INGÉNIERIE, L'ÉNERGIE ET LA CONCEPTION DURABLES

Le 6<sup>e</sup> Symposium annuel Trottier sur l'ingénierie, l'énergie et la conception durables s'est déroulé à la Grande Bibliothèque (BAnQ). Cette édition, dont le thème portait sur les changements climatiques et de la transition juste, était organisée par l'Institut de l'énergie Trottier (IET) de Polytechnique Montréal.

Animée par Normand Mousseau, directeur académique de l'IET, la rencontre s'est déroulée devant une salle comble. Près de 300 personnes étaient présentes afin d'écouter Valérie Masson-Delmotte et Mario Tremblay aborder les changements à venir, qu'ils soient d'ordre climatique, institutionnel ou social.



### Valérie Masson-Delmotte : le climat d'aujourd'hui et de demain

La climatologue française Valérie Masson-Delmotte a présenté les points-clés du dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont elle co-préside le groupe de travail sur les éléments scientifiques du changement climatique.

Approuvé en octobre 2018, ce rapport spécial met en exergue un certain nombre de conséquences des changements climatiques qui pourraient être évitées, si le réchauffement était limité à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C comme le vise l'Accord de Paris. Sa rédaction a rassemblé 91 auteurs issus de 40 pays, avec une parité entre les représentants de pays développés et de pays en développement. Au total, plus de 6 000 publications scientifiques ont été analysées, dont 75 % parues depuis 2014.

### Mario Tremblay : la transition demande des fonds

Mario Tremblay, vice-président aux affaires corporatives et publiques du Fonds de solidarité FTQ, a quant à lui abordé la question des investissements responsables. Le Fonds représente 15 milliards de dollars, confiés par 700 000 travailleurs. Ce Fonds canalise l'épargne des Québécois vers près de 3 000 entreprises, dont 90 % ont moins de 200 employés.

En 2016, l'organisation s'est d'ailleurs engagée dans un processus de transition énergétique, voulue à la fois socialement juste, économiquement viable et environnementalement responsable.

# PROGRAMME DE SUBVENTIONS À LA RECHERCHE

Présenté chaque automne sous forme d'appel à projets, le programme de subventions à la recherche de l'IET soutient des projets de recherche dans le domaine énergétique, conduits par des professeurs de Polytechnique Montréal. Les candidats sélectionnés se voient accorder un financement maximal de 150 000 \$ par projet, réparti sur trois ans.

Cinq projets recevaient du financement durant l'année 2018-2019.

En plus du développement de nouvelles connaissances scientifiques et technologiques dans le domaine de l'énergie, le programme vise certains objectifs en lien avec la mission de l'IET, à savoir :

**Appuyer le développement de solutions durables**

**Contribuer à assurer l'avenir énergétique de la planète**

**Favoriser la compréhension systémique des enjeux énergétiques**

---

PROJET FINANCÉ (début du financement : hiver 2016)

# ÉTUDE DU PHOSPHORE NOIR 2D : UN NOUVEAU MATÉRIAU POUR LA CONVERSION D'ÉNERGIE

## CHERCHEURS

### Sébastien Francoeur

Génie physique, Polytechnique Montréal  
(chercheur principal)

### Richard Martel

Chimie, Université de Montréal

### Oussama Moutanabbir

Génie physique, Polytechnique Montréal

### Thomas Szkopek

Génie électrique, Université McGill

Les objectifs de ce projet sont de mettre au point des techniques de croissance et de dopage du phosphore noir, de le caractériser et d'optimiser ses propriétés pour la fabrication de dispositifs de conversion d'énergie solaire ou thermique en électricité.

## PRÉSENTATION DU PROJET

L'hypothèse de départ est que l'utilisation du phosphore noir a le potentiel d'améliorer l'efficacité d'opération des technologies photovoltaïque et thermoélectrique. Ceci aurait un impact majeur sur plusieurs enjeux de sociétés comme l'électrification des transports, la dépendance aux énergies fossiles et les changements climatiques.

## AVANCEMENT DES TRAVAUX

Durant la troisième et dernière année de ce projet, l'équipe de recherche a progressé dans le développement et la compréhension d'un nouveau matériau 2D aux propriétés uniques et inusitées, autant sur le plan scientifique et fondamental que sur le plan technologique et appliqué.

L'équipe du professeur Szkopek a fabriqué des transistors à effet de champ avec une grille composée d'un oxyde  $P_4O_{10}$  et d'une couche diélectrique de  $Al_2O_3$ . Cet oxyde joue un rôle analogue à celui du  $SiO_2$  pour le silicium, il s'agit d'un oxyde natif passivant la surface, réduisant la recombinaison non-radiative, et permettant le dépôt d'une grille diélectrique de très grande qualité. Ces travaux permettent de fabriquer des dispositifs de conversion de l'énergie plus performants.

De façon à pouvoir faire les structures multicouches nécessaires aux dispositifs de conversion de l'énergie, l'équipe du professeur Moutanabbir a poursuivi l'étude et la croissance des éléments du groupe V du tableau périodique. Elle a démontré que la passivation du substrat avec de l'hydrogène permettait de retrouver les propriétés semi-conductrices attendues. Ces travaux favorisent le développement de techniques de croissance permettant la fabrication de dispositifs 2D de grande surface pour des économies d'échelle.

L'équipe du professeur Martel et du professeur Francoeur a enregistré des progrès dans l'étude des phonons par spectroscopie Raman et l'analyse des propriétés d'émission du phosphore noir. Ces travaux ont révélé que la dynamique des porteurs dans la structure de bande du phosphore ne peut se comparer à celle d'aucun autre matériau similaire. En effet, des porteurs de charge excités à haute énergie émettent des photons avant même de thermaliser aux niveaux de moindre énergie. Alors qu'il ne devrait émettre que dans l'infrarouge, le phosphore noir émet aussi dans le visible. Ainsi, contrairement à ce que la communauté avait initialement anticipé, les applications du phosphore noir ne sont pas limitées à l'infrarouge.

Mentionnons que les contributions scientifiques découlant de ce projet ne s'arrêtent pas là, puisque l'aide financière de l'IET a constitué un excellent levier pour la suite des choses. **Grâce à leurs avancées prometteuses, les chercheurs ont obtenu des subventions de partenariat stratégique du CRSNG d'un montant de près de 1,5 M\$ sur trois ans.** Ceci, pour le volet développement de photodétecteurs IR basés sur le phosphore noir ainsi que pour le volet développement des matériaux 2D appartenant à la même famille que le phosphore.

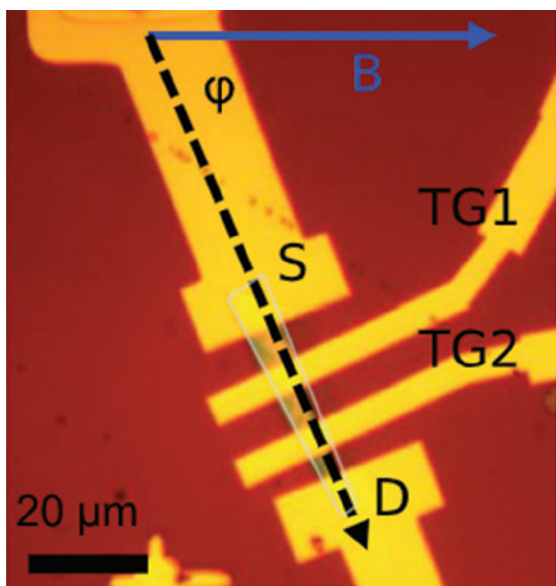


Image d'un transistor à effet de champ. Le mince feuillet de phosphore noir est indiqué par le rectangle gris. Le substrat est rouge et les contacts, la source (S), le drain (D), et les deux grilles (TG), sont jaunes.



PROJET FINANCÉ (début du financement : printemps 2016)

# CONCEPTION DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES À PUIXS À COLONNE PERMANENTE

## CHERCHEURS

### Philippe Pasquier

Génies civil, géologique et des mines,  
Polytechnique Montréal  
(chercheur principal)

### Paul Baudron

Génies civil, géologique et des mines,  
Polytechnique Montréal

### Florent Barbecot

Sciences de la Terre et de l'atmosphère,  
UQAM

### Benoît Courcelles

Génies civil, géologique et des mines,  
Polytechnique Montréal

### Denis Marcotte

Génies civil, géologique et des mines,  
Polytechnique Montréal

---

**Ce projet de recherche étudie la conception et l'opération des systèmes géothermiques à puits à colonne permanente (PCP). La réduction envisagée des coûts de construction de cette technologie accélérera son adoption et contribuera à réduire l'empreinte environnementale des bâtiments canadiens.**

---

## PRÉSENTATION DU PROJET

Au Québec, plus de la moitié de la consommation électrique d'une résidence est dévolue au chauffage et à la climatisation. Alors que l'utilisation de pompes à chaleur géothermiques permet de réduire significativement cette consommation d'énergie, l'investissement requis pour aménager les puits en boucle fermée dissuade les promoteurs immobiliers. C'est à ce besoin de diminuer les coûts de construction et d'opération des systèmes géothermiques que veut répondre ce projet de recherche en améliorant la conception d'une technologie prometteuse : les puits à colonne permanente (PCP).

Cette technologie a le potentiel de se démarquer positivement de celle des puits en boucle fermée puisqu'elle s'intègre plus facilement à des bâtiments existants en milieu urbain à haute densité. En effet, elle nécessite un seul puits profond creusé dans le roc pour accéder à l'eau souterraine. L'efficacité thermique de cette méthode peut atteindre le triple de celle des puits en boucle fermée.

## AVANCEMENT DES TRAVAUX

Une étudiante ayant identifié des séquences de contrôle adaptées à l'opération des PCP en climat froid a terminé sa maîtrise en mai 2019, peu après avoir présenté ses travaux à une conférence internationale en Belgique. Cette ancienne étudiante travaille maintenant pour une firme de mécanique du bâtiment où elle est la seule spécialiste des PCP.

Parallèlement, une étudiante au doctorat a finalisé des travaux de validation expérimentale au laboratoire mobile de géothermie de Varennes. Les résultats ont déjà fait l'objet de publications et servent dorénavant à finaliser la mise au point d'un algorithme de convolution non stationnaire accélérant la simulation dynamique des PCP.

La vérification des stratégies de traitement de l'eau pour PCP et l'analyse des facteurs influençant l'entartrage des puits et équipements se termineront au début 2020. Ces travaux ont également fait l'objet de présentations dans des colloques. Au cours des prochains mois, les stratégies d'analyse développées seront appliquées à d'autres sites afin d'établir une cartographie préliminaire du risque de colmatage des PCP dans la région montréalaise. Les travaux de caractérisation des aquifères ceinturant les PCP par des approches de traçage isotopique avancent bien et seront finalisés en 2020.

**Il est à noter que les travaux amorcés avec la présente subvention se poursuivront pour au moins cinq années supplémentaires, grâce à de nouvelles subventions totalisant 3,1 M\$.** Ces montants permettront d'accélérer le déploiement des PCP en milieu urbain et permettront de réaliser des projets en collaboration avec une dizaine de partenaires industriels, institutionnels et gouvernementaux.



PROJET FINANCÉ (début du financement : hiver 2017)

# DÉVELOPPEMENT DE RÉSEAUX DE CHALEUR DE 4<sup>e</sup> GÉNÉRATION POUR DES QUARTIERS DURABLES

## CHERCHEURS

### Michaël Kummert

Génie mécanique, Polytechnique Montréal  
(chercheur principal)

### Daniel Pearl

Faculté de l'aménagement,  
École d'architecture,  
Université de Montréal

### Lisa Bornstein

School of Urban Planning,  
Université McGill

**Le projet a pour but de mettre au point des réseaux de chaleur de 4<sup>e</sup> génération, c'est-à-dire un système de partage et de récupération de chaleur à la fois performant, rentable et éthique. L'objectif à long terme est de réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle des villes, en redéfinissant les approches de développement urbain et en créant des quartiers durables qui seront mixtes, compacts, diversifiés et efficaces.**

## PRÉSENTATION DU PROJET

Selon les chercheurs impliqués dans ce projet de recherche, les réseaux de chaleur représentent la clé pour accélérer l'intégration des énergies renouvelables et rendre possibles le partage et la récupération de chaleur. Ils travaillent donc à inventer et à mettre en œuvre une 4<sup>e</sup> génération de réseaux de chaleur. À terme, c'est tout un quartier qui pourrait bénéficier d'un chauffage communautaire alimenté en partie à même les rejets thermiques des activités aux alentours.

## AVANCEMENT DES TRAVAUX

L'équipe de recherche a tracé le diagnostic de plusieurs quartiers ciblés par le projet en utilisant des indicateurs multidimensionnels inspirés par ceux de l'Agence de l'écologie urbaine de Barcelone. Les chercheurs ont notamment cartographié la demande en chaleur et en froid des bâtiments, leurs rejets thermiques, mais aussi des indicateurs de mobilité, de qualité de vie, différents indicateurs sociaux ainsi que des indicateurs de durabilité tels que les espaces verts et la canopée. Ces diagnostics ont permis à l'équipe de recherche de nouer des partenariats avec des acteurs de la communauté dans différents quartiers. Deux cas ont été poussés plus loin : Rosemont et Bridge-Wellington.

La vision de développement des réseaux de chaleur pour Rosemont, basée sur le diagnostic établi, a été présentée lors du colloque " Pour des quartiers durables " organisé en septembre 2018. L'atelier de travail du colloque a réuni des acteurs du monde académique, associatif, génie conseil ainsi que des producteurs et distributeurs d'énergie et des décideurs politiques, dont le maire de l'arrondissement de Rosemont–La Petite-Patrie.

L'équipe a également travaillé sur des scénarios de développement de réseaux de chaleur dans l'arrondissement de Ville-Marie, ainsi que sur le site Bridge-Wellington (Pointe Saint-Charles – cité du Havre – Griffintown – Centre-ville). Ce travail a culminé avec la réalisation d'une étude en partenariat avec le CIRAIQ pour évaluer les impacts environnementaux d'une réglementation visant les rejets thermiques des bâtiments à Montréal.



# MÉTAFENÊTRES INTELLIGENTES

## CHERCHEURS

### Christophe Caloz

Génie électrique,  
Polytechnique Montréal  
(chercheur principal)

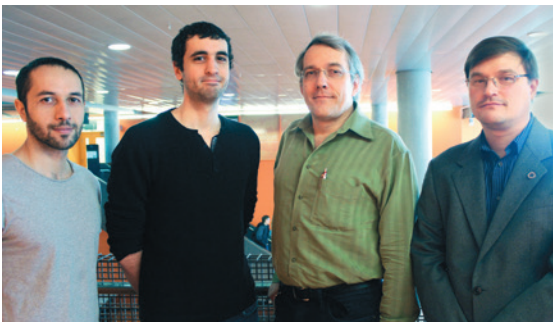
### Maksim Skorobogatiy

Génie physique,  
Polytechnique Montréal

---

**Ce projet de recherche vise le développement de fenêtres thermiquement optimales, dites métafenêtres. Il promet de révolutionner la technologie des fenêtres, en augmentant considérablement leur efficacité énergétique.**

---



## PRÉSENTATION DU PROJET

Le développement de métafenêtres pourrait conduire à des économies en chauffage et en climatisation de plus de 20 %. Ces fenêtres ne se limiteraient pas à la rétention de chaleur à l'intérieur : elles en puiseraient à partir de l'extérieur.

Les chercheurs convoitent un réservoir d'énergie propre, jusqu'ici inexploité. Ce réservoir tire sa source d'un rayonnement électromagnétique, appelé rayonnement du corps noir. Lié à la température des objets, ce dernier comprend une importante quantité d'énergie dans l'infrarouge. Il provient essentiellement du soleil ainsi que des masses physiques environnantes.

L'innovation de ce projet s'appuie sur le développement de nouvelles métasurfaces, à savoir des matériaux artificiels bidimensionnels. Parmi les propriétés de ces matériaux, un potentiel de contrôle du rayonnement thermique naturel a été observé, et ce, avec un raffinement sans précédent.

## AVANCEMENT DES TRAVAUX

Au terme de la première année du projet, d'importants progrès ont été réalisés au chapitre de la modélisation du transfert de chaleur et de la conception des métasurfaces.

D'une part, l'équipe du professeur Skorobogatiy a développé un modèle physique et un code numérique efficace pour analyser les fenêtres intelligentes multicouches utilisant la formulation exacte de transfert de chaleur radiative en 1D. Ce modèle a permis d'élaborer des critères de conception pour des systèmes intelligents à haute efficacité thermique ainsi que pour des refroidisseurs radiatifs. Les résultats théoriques ont été diffusés publiquement sur la plateforme arXiv et un article a été soumis à une revue scientifique. L'équipe a aussi procédé à la mise en place d'un dispositif expérimental de recherche pour étudier les propriétés thermiques médianes des matériaux choisis pour la fabrication des fenêtres, spécifiquement les propriétés de matériaux planaires avec un patron de transmission judicieusement choisi en visible et en mi-infrarouge. De plus, un spectromètre IRTF a été adapté pour mesurer en espace libre la transmission résolue angulaire à travers ces matériaux.

Par ailleurs, l'équipe du professeur Caloz a développé une classe spéciale de métasurfaces bianisotropes pouvant être appliquées comme un revêtement sur n'importe quel diélectrique, dont le verre. Cela permettra d'optimiser la réponse de la fenêtre dans les bandes spectrales des radiations infrarouges moyen afin de maximiser l'évacuation de l'énergie thermique de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur. Le concept de revêtement bianisotrope de métasurface a été publié sur arXiv.

L'étude des propriétés actives de métasurfaces bianisotropes non-réciproques a également été poussée. Ce type de métasurfaces, qui utilise un concept actif de magnétisme artificiel, offre des propriétés non-réciproques sans nécessiter la présence encombrante d'aimants. De telles métasurfaces pourraient transmettre le rayonnement thermique de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur. De la même façon, elles pourraient bloquer la pénétration vers l'intérieur du bâtiment du rayonnement thermique. L'équipe travaille à démontrer l'étendue du potentiel avec une preuve de concept à fréquences micro-ondes. Le concept de ces métasurfaces non-réciproques a aussi été publié sur arXiv.



PROJET FINANCÉ (début du financement : été 2019)

# RÉDUCTION DE L'EMPREINTE CARBONE DE L'AGRICULTURE

## ÉQUIPE

### Étienne Robert

Génie mécanique,  
Polytechnique Montréal  
(chercheur principal)

### Klas Engvall

Génie chimique,  
KTH Stockholm, Suède

### Jamal Chaouki

Génie chimique,  
Polytechnique Montréal

### Philippe Pasquier

Génies civil, géologique et des mines,  
Polytechnique Montréal

---

**Ce projet de recherche se consacre à la réduction de l'empreinte carbone de l'agriculture, notamment par la conversion de la biomasse résiduelle en carburant pour le transport**

---

## PRÉSENTATION DU PROJET

Plusieurs tâches en milieu agricole sont associées à une forte demande en énergie, tels que chauffage des serres, le séchage des grains ou l'utilisation de machinerie. À l'heure actuelle, la majorité de ces besoins sont comblés par l'utilisation de combustibles fossiles. Paradoxalement, les ressources en énergie renouvelables sont abondantes en milieu agricole, dont la biomasse résiduelle et l'énergie solaire.

En considérant que les grandes cultures (maïs ou céréales à paille) génèrent entre 5 et 20 tonnes/ha/an de biomasse résiduelle, l'agriculture peut faire plus que combler ses propres besoins. Pour maximiser l'impact de cette ressource énergétique renouvelable, il est nécessaire de la convertir pour répondre à des besoins, par exemple en chaleur pour le chauffage ou en hydrocarbures liquides (HC) pour le transport.

Le projet vise le développement d'outils décentralisés pour la conversion thermo-chimique de la biomasse résiduelle en hydrocarbures liquides adaptés au transport, par exemple en alcool ou en DME (diméthyl ether). L'approche privilégiée dans ce projet est polyvalente en termes d'intrants et de combustible produit. Il s'agit de la gazéification de la biomasse, suivie du nettoyage du gaz de synthèse produit et de la conversion catalytique en HC liquide.

## AVANCEMENT DES TRAVAUX

L'équipe se donne trois ans pour réaliser une preuve de concept en laboratoire ainsi que des études de modélisation basées sur des profils d'utilisation réels. Ces résultats préliminaires ouvriront la porte aux phases subséquentes envisagées pour le programme de recherche, dont la conception et la construction d'une installation de démonstration.

Le projet offre un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre considérable puisque l'agriculture représente 8,5 % du total des émissions du Canada.

Il promet de placer les agriculteurs au cœur de la solution puisqu'ils seront appelés à participer activement à l'approvisionnement en énergie de leur ferme. Ils pourront non seulement diminuer leurs coûts d'exploitation, mais aussi éventuellement générer un revenu en revendant leurs surplus à des voisins. Sachant que l'énergie représente 54 % des dépenses en agriculture, le projet pourrait constituer un important levier pour le développement économique de ce secteur.



# BOURSES

## BOURSES TROTTIER

C'est dans le cadre du volet formation de sa mission que l'IET a mis en place le programme des Bourses Trottier. Il est destiné aux étudiants des trois institutions de Campus Montréal (Polytechnique Montréal, HEC Montréal, Université de Montréal) qui amorcent un programme d'études aux cycles supérieurs – maîtrise de recherche ou doctorat – dans un domaine de recherche compatible avec la mission de l'IET, à savoir le développement de solutions durables permettant d'assurer l'avenir énergétique de notre société.

- ▶ Maîtrise de recherche : 25 000 \$ / 2 ans
- ▶ Doctorat : 48 000 \$ / 3 ans

## LAURÉATS

Durant l'année 2018-2019, 10 étudiants profitaient d'une aide de l'IET. Les projets des lauréats se démarquent tant par leur qualité scientifique que par leur intérêt sociétal.

## BOURSES DOCTORALES 2016



**Samuel Pelletier**

Administration – HEC Montréal

Directeurs : Gilbert Laporte et Ola Jabali

Résolution d'un modèle mathématique pour optimiser la performance des véhicules électriques destinés à la livraison de colis en milieu urbain

## BOURSES DOCTORALES 2017



**Abdelaziz Gouda**

Génie physique – Polytechnique Montréal

Directrice : Clara Santato

Stockage électrochimique d'énergie avec l'aide du biopigment eumelanine



**Carole Brunet**

Génie industriel – Polytechnique Montréal

Directeur : Oumarou Savadogo

Identification des conditions nécessaires pour favoriser l'utilisation de l'énergie solaire en Afrique, dans une perspective de développement durable



**Arunprabharan Subramanian**

Génie chimique – Polytechnique Montréal

Directeur : Fabio Cicoira

Synthèse d'électrodes transparentes pour cellule photovoltaïque à base de nanofibre de cuivre et de nanotubes de carbone par méthode d'électrospinning

**BOURSES DE MAÎTRISE**  
2017

---



**Maxime Berger**

Génie électrique – Polytechnique Montréal  
Directeur : Ilhan Kocar

Développement d'un convertisseur  
d'alimentation auxiliaire de haute efficacité  
pour métro

**BOURSE DE MAÎTRISE**  
2018

---



**Viviane Aubin**

Génie énergétique – Polytechnique  
Montréal

Directeur : Miguel Anjos

Optimisation de ressources hydroélectriques  
dans le contexte de l'intégration des  
énergies renouvelables

**BOURSES DOCTORALES (suite)**  
2018

---



**Elsa Briqueleur**

Chimie – Université de Montréal

Directeur : Mickael Dollé

Preuve de concept d'une photobatterie  
organique

**BOURSES DOCTORALES**  
2018

---



**Étienne Bouthillier**

Génie physique - Polytechnique Montréal  
Directeur : Oussama Moutanabbir

Croissance et fabrication des nanodiodes  
électroluminescentes à base de nanofils  
semi-conducteurs du groupe IV



**Mona Azimi**

Génie chimique - Polytechnique Montréal  
Directeur : Fabio Cicoira

Cellules solaires flexibles et extensibles  
exemptes d'oxyde d'étain d'indium



**Guillaume Lavigne**

Génie électrique - Polytechnique Montréal  
Directeur : Christophe Caloz

Développement de métafenêtres  
intelligentes



# PROGRAMMES D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

## GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Polytechnique Montréal propose des cursus intégrés dans le domaine de l'énergie sous forme de maîtrise modulaire (45 crédits) ou de DESS (30 crédits).

L'objectif est de former des diplômés qui auront une compréhension globale des problématiques liées à l'avenir énergétique de la planète, ainsi que des technologies disponibles pour relever les défis auxquels la société aura à faire face, au cours des prochaines décennies.

Cinq options sont offertes :



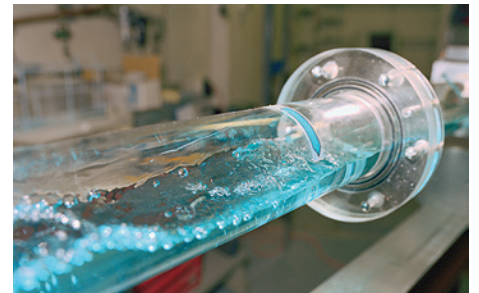
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE  
DANS LES BÂTIMENTS



SYSTÈMES ET RÉSEAUX  
ÉNERGÉTIQUES INTELLIGENTS



ÉNERGIE HYDROÉLECTRIQUE



GÉNIE NUCLÉAIRE



ÉNERGIES RENOUVELABLES

# REVUE DE PRESSE

## L'IET DANS L'ACTUALITÉ

Radio-Canada / [Le prix de l'essence continue de grimper](#)

Radio-Canada / [Rencontre avec un scientifique qui veut inspirer les décideurs politiques](#)

Radio-Canada / [Déclaration " Le climat, l'État et nous "](#)

La Presse / [À qui profite l'essence à 1.50 \\$ le litre ?](#)

Le journal de Québec / [10,2 milliards \\$ payés en trop à cause des énergies alternatives](#)

La Nouvelle Union / [Transition énergétique : "surplace" au Québec, "bêtise" à Ottawa](#)

Le Temps / [Le Canada délaisse la lutte contre le réchauffement](#)

Radio-Canada / [Transformer nos déchets en énergie : une bonne idée ?](#)

Le Devoir / [Six milliards pour amorcer la transition énergétique du Québec](#)

Radio-Canada / [La 1<sup>re</sup> station de ravitaillement en hydrogène au pays](#)

Radio-Canada / [L'Ontario va quitter le marché du carbone : quelles conséquences ?](#)

Le journal de Québec / [Un parc éolien à 3 M\\$ par emploi créé par année pendant 25 ans](#)

Le Devoir / [Québec débloque 8 M\\$ pour la filière de l'hydrogène](#)

TVA / [Hydro-Québec : des tonnes de dossiers controversés](#)

Le journal de Montréal / [Des tonnes de dossiers controversés](#)

Le Devoir / [Taxe sur le carbone : Ottawa se plie " aux pressions de l'industrie "](#)

Le journal de Québec / [Des " vaches à lait " qui tirent de la patte](#)

Le Droit / [Plus verte et moins chère, l'hydroélectricité ?](#)

Radio-Canada / [La démission de Nicolas Hulot vue par trois scientifiques](#)

La Maison du 21<sup>e</sup> siècle / [Transition énergétique : de la poudre aux yeux ?](#)

La Presse / [La gouvernance environnementale](#)

HuffPost / [Le Parti libéral absent d'un débat sur l'environnement à HEC Montréal](#)

Les Affaires / [Les partis politiques face aux défis environnementaux](#)

Les Affaires / [LocoMotion, un projet de mobilité qui plaira à Patrick Lagacé](#)

Radio-Canada / [Changements climatiques : les scientifiques ignorés par les politiciens](#)

Agence Science-Pressé : [Élections \(peu\) climatiques](#)

Le Devoir / [Le plan de transition énergétique du Québec n'a pas de cible de GES](#)

Radio-Canada / [Les incidences du rapport du GIEC pour le Québec](#)

Télé-Québec / [Analyse du rapport du GIEC](#)

La Presse / [" C'est jouable ", mais...](#)

RDI / [Que se passe-t-il avec le Fonds vert ?](#)

Radio-Canada / [Politique et changements climatiques : Table ronde](#)

Radio-Canada / [Pour une meilleure gestion du Fonds vert](#)

Radio-Canada / [500 personnalités appellent les Québécois à s'engager pour le climat](#)

Le Devoir / [Le climat à l'ordre du jour de François Legault](#)

Le Quotidien / [La production de granules doublera](#)

Le Devoir / [Projet Gazoduc: des bénéfices quasi nuls pour l'environnement](#)

Le Nouvelliste / [Auto électrique : va-t-on manquer de watts-heure ?](#)

Le maître papetier / [Les défis et opportunité de la filière biomasse](#)

La Presse / [Faut-il préférer le bio importé ou le non-bio d'ici ?](#)

La Presse / [Développement économique : mettons à profit notre avantage électrique](#)

La Presse / [Changements climatiques : l'atteinte des cibles est réaliste](#)

RDI / [Avons-nous conscience de l'urgence climatique ?](#)

Radio-Canada / [GES : la cible 2020 est-elle vraiment hors de portée ?](#)

Radio-Canada / [Comment expliquer certaines défaillances du réseau électrique? Entrevue de Louis Beaumier au TJ Acadie](#)

FM93 / [Prix de l'essence : doit-on l'augmenter](#)

Radio-Canada / [Augmenter les taxes sur l'essence pour compenser la baisse de prix](#)

The Conversation / [Transition énergétique : y a-t-il une réelle volonté politique ?](#)

Le Devoir / [Une feuille de route de la transition énergétique proposée à François Legault](#)

Le Devoir / [Les propositions des scientifiques du Pacte pour la transition](#)

La Presse / [Alimentation responsable : une bouchée pour la planète](#)

La Presse / [Vers une interdiction du mazout à Montréal](#)

Radio-Canada / [Aide à l'industrie pétrolière](#)

Radio-Canada / [Un rapport accablant sur la gestion du Fonds vert](#)

Radio-Canada / [Le Fonds vert, " c'est géré n'importe comment ", déplore Legault](#)

Le Devoir / [Fonds vert : " C'est géré n'importe comment " dit Legault](#)

Gaia Presse / [Collapsologie : doit-on accepter la fin de notre monde ?](#)

La Presse / [L'acquisition de la Caisse de dépôt critiquée](#)

Avant Première / [Création d'un institut indépendant sur le climat](#)

La Presse / [Symposium Trottier : sobriété, lucidité et jeunesse](#)

Le Soleil / [Symposium Trottier : éviter le superflu pour contenir le réchauffement](#)

L'Actualité / [Symposium Trottier : sauver la planète](#)

Le Droit / [Symposium Trottier : éviter le superflu suggère une experte](#)

Radio-Canada / [Environnement : ces pays dont le Canada devrait s'inspirer](#)

Le Devoir / [Le Canada, un pays en déficit de transition](#)

La Presse / [De petits et de grands gestes pour la planète](#)

Le Devoir / [Les sables bitumineux polluent plus qu'on le pense](#)

Le Devoir / [La CAQ à la recherche du virage vert](#)

La Presse / [Lutte contre les changements climatiques : une réforme de la gouvernance](#)

 [iet.polymtl.ca](http://iet.polymtl.ca)  
 [@EnergieTrottier](https://twitter.com/EnergieTrottier)  


**Publié par l'Institut de l'énergie Trottier**  
Coordination et rédaction : Audrey Rondeau, Louis Beaumier  
Conception graphique : Épicentre  
Révision : Geneviève Cloutier