



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

Le contrôle prédictif dans les bâtiments : de la recherche au déploiement sur le terrain

Etienne Saloux

Ressources Naturelles Canada
CanmetÉNERGIE à Varennes

Webinaire du Réseau Énergie et Bâtiments
10 juin 2026

Canada



Conférencier



Etienne Saloux

Chercheur scientifique

Ressources Naturelles Canada

CanmetÉNERGIE à Varennes

Objectifs d'apprentissage

Au terme de la session, les participants seront en mesure de:

- Connaître le rôle des bâtiments dans la transition énergétique
- Comprendre en quoi consiste le contrôle prédictif et quelles sont les applications et bénéfices pour les bâtiments, avec études de cas à l'appui
- Accroître les connaissances liées aux défis et aux perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments

Sommaire de la présentation

1. Rôle des bâtiments dans la transition énergétique
2. Le concept du contrôle prédictif, applications et défis
3. État de la recherche et revue des cas d'implantation sur le terrain du contrôle prédictif
4. Exemples d'études de cas au Canada (x4)
5. Enjeux et perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments

Sommaire de la présentation

- 1. Rôle des bâtiments dans la transition énergétique**
2. Le concept du contrôle prédictif, applications et défis
3. État de la recherche et revue des cas d'implantation sur le terrain du contrôle prédictif
4. Exemples d'études de cas au Canada (x4)
5. Enjeux et perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments

Quel est le rôle des bâtiments dans la transition énergétique ?

27 %

Les secteurs du bâtiment résidentiel et commercial et institutionnel (C&I) représentent **14 %** et **13 %** de la demande en énergie au Canada [\[réf\]](#)

50 %

50 % de la consommation d'énergie des bâtiments provient du chauffage, de la climatisation et de la ventilation [\[réf\]](#)

70 %

Les bâtiments d'aujourd'hui formeront **70 %** du parc immobilier en 2050 [\[réf\]](#)

47 %

La demande en électricité au Canada pourrait augmenter de **47 %** d'ici 2050 [\[réf\]](#) (par rapport à 2021) malgré les limites actuelles de capacité des réseaux électriques (par ex., Hydro-Québec doit doubler sa capacité [\[réf\]](#))

0 %

Les bâtiments institutionnels fédéraux visent à être **carboneutres** d'ici 2050 [\[réf\]](#), les bâtiments institutionnels québécois d'ici 2040 [\[réf\]](#)

Quel est le rôle des bâtiments dans la transition énergétique ?

*Quels sont les moteurs de l'évolution des bâtiments?
Vers un changement de paradigme: de l'efficacité énergétique à la décarbonation*



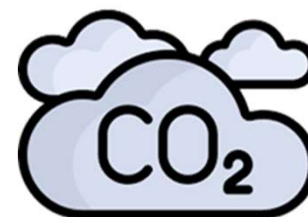
Confort & bien-être des occupants

- *Thermique: température, humidité; habitudes vestimentaires; sensations thermiques; plaintes des occupants*
- *Qualité de l'air; lumière naturelle; confort visuel, acoustique, esthétique, ergonomique; santé; productivité*



Coûts économiques (conception, opération)

- *Coûts initiaux des infrastructures, maintenance & durée de vie des équipements*
- *Facturation de l'énergie (kWh) et de la puissance (kW); multitude de structures tarifaires*
- *Les bâtiments peuvent aider le réseau électrique lors de périodes critiques (flexibilité)*



Émissions de gaz à effet de serre (GES)

- *Portée 1: directes (combustion)*
- *Portée 2: indirectes (électricité)*
 - *Facteurs annuels vs. horaires*
 - *Émissions moyennes vs. marginales*
- *Portée 3: indirectes (activités)*

Sommaire de la présentation

1. Rôle des bâtiments dans la transition énergétique
- 2. Le concept du contrôle prédictif, applications et défis**
3. État de la recherche et revue des cas d'implantation sur le terrain du contrôle prédictif
4. Exemples d'études de cas au Canada (x4)
5. Enjeux et perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments

Qu'est-ce que le contrôle prédictif ?

*Le contrôle prédictif **tire avantage de prévisions** (météo, etc.) pour anticiper le comportement futur d'un bâtiment et de son système CVCA et **optimiser l'opération actuelle** selon un ou plusieurs critères de performance et des contraintes données*

→ *Besoin d'**inertie** !*

→ *Besoin de **flexibilité** opérationnelle !*

→ *Besoin d'**incitatifs** !*

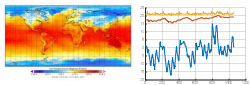
Qu'est-ce que le contrôle prédictif ?

Contrôle prédictif (MPC)

MPC: Model-based Predictive Control

Données opérationnelles,
météo, occupation, objets
connectés, etc.

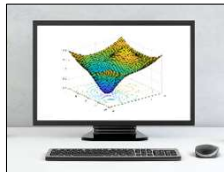
Prévisions des
perturbations
(météo, occupation)



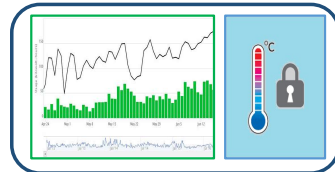
CanMÉTÉ



Modèle de
bâtiment



Optimisation



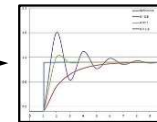
Contrôle optimal
(points de consigne)
Consommation
d'énergie future
optimale

La fonction objective est définie par l'utilisateur:
minimiser la consommation d'énergie, les
coûts, les émissions de GES, etc.

Contrôle conventionnel

Point de
consigne

+



Contrôleur



Actuateurs



Bâtiment

Perturbations
(météo, occupation)

Rétroaction

Quelles applications pour les bâtiments, quels défis ?

APPLICATIONS	DÉFIS
• Utiliser les prévisions de la météo, de l'occupation du bâtiment et des besoins du réseau électrique pour ajuster la demande du bâtiment (p. ex. préchauffer) et optimiser le fonctionnement des systèmes CVCA (incluant le stockage thermique) • Utiliser le coût et l'intensité carbone de l'énergie pour maximiser l'utilisation d'énergie provenant de sources renouvelables, réduire les émissions de GES des systèmes biénergie	• Est-ce que les coûts actuels de l'énergie nécessitent ce niveau de complexité et d'efforts? • Quel type de modèle utiliser pour prédire le comportement du bâtiment? Quel type de stratégie utiliser? Quand réentraîner le modèle? • Principalement implanté dans des zones thermiques ou bâtiments de petite ou moyenne taille & sur de courtes périodes; la mise à l'échelle est-elle possible?

Sommaire de la présentation

1. Rôle des bâtiments dans la transition énergétique
2. Le concept du contrôle prédictif, applications et défis
- 3. État de la recherche et revue des cas d'implantation sur le terrain du contrôle prédictif**
4. Exemples d'études de cas au Canada (x4)
5. Enjeux et perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments

Où en est la recherche ?

- Le contrôle prédictif pour les bâtiments est étudié depuis des années, avec plus de **8,000 publications** → ces stratégies ont-elles été implantées sur le terrain?
- On a trouvé seulement **91 études (1 %)** sur du contrôle prédictif avec implantation sur terrain
- Trois questions nous ont intéressés:
 1. Quels **bénéfices** peut-on espérer de l'implantation du contrôle prédictif dans les bâtiments ?
 2. Quels sont les **facteurs clés** et les **systèmes ou fonctionnalités** qui assurent le succès du contrôle prédictif en pratique ?
 3. Quels **obstacles** freinent l'adoption à grande échelle ? Quels **aspects** méritent d'être approfondis ?

Revue des cas d'implantation sur le terrain

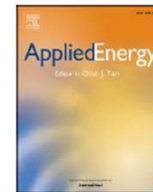
Applied Energy 393 (2025) 126091



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy



91 publications

From theory to practice: A critical review of model predictive control field implementations in the built environment

Etienne Saloux^{a,*}, José A. Candanedo^b, Charalampos Vallianos^c, Navid Morovat^d, Kun Zhang^e

^a CanmetENERGY, Natural Resources Canada, Varennes, Québec, Canada

^b Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada

^c Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada

^d Center for Zero-Energy Building Studies, Concordia University, Montréal, Québec, Canada

^e Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure, Montréal, Québec, Canada



24 pays



47% publié en
2020-2024



13% des auteurs
provenant du
secteur privé

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126091>



Autres études intéressantes:

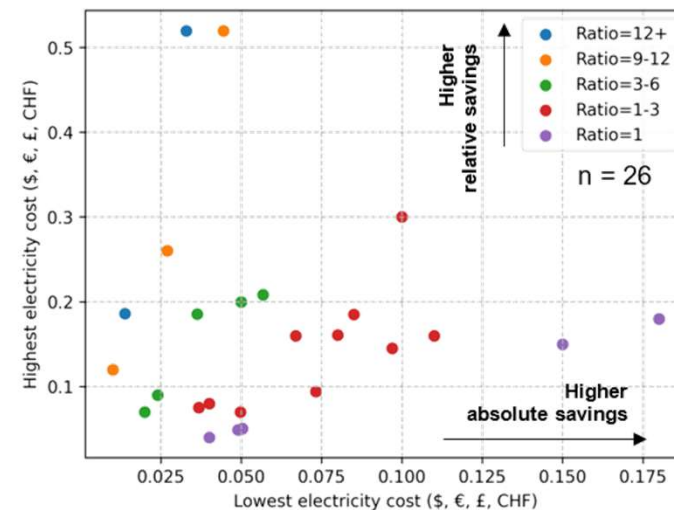
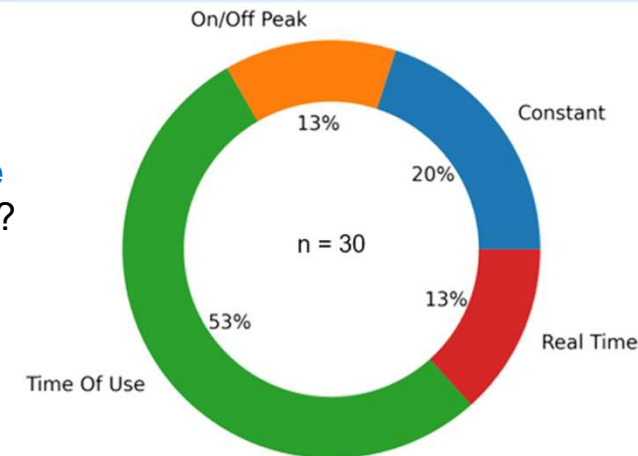
- <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116087>
- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126459>

Résultats de la revue: emplacements & incitatifs



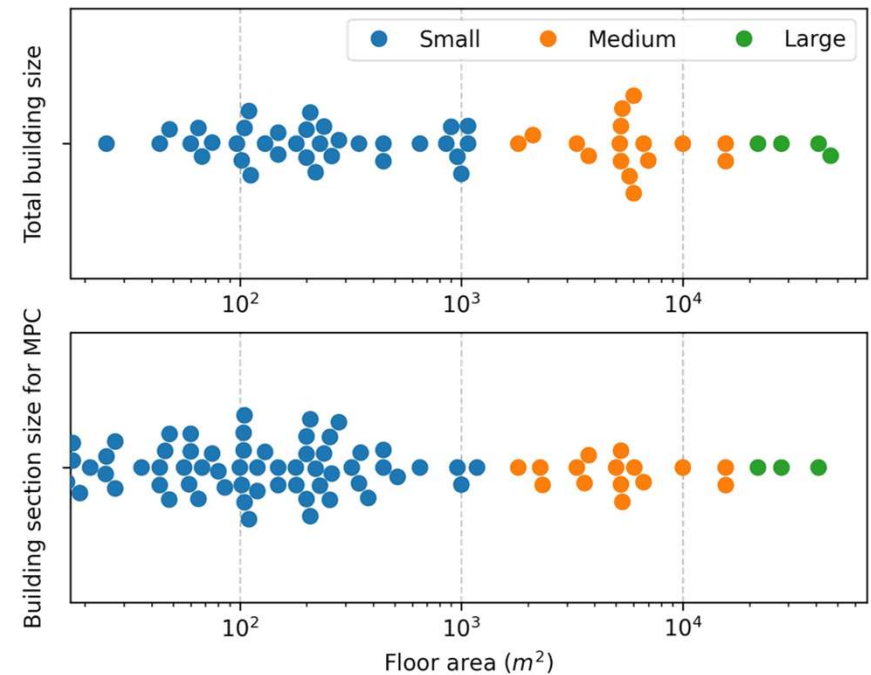
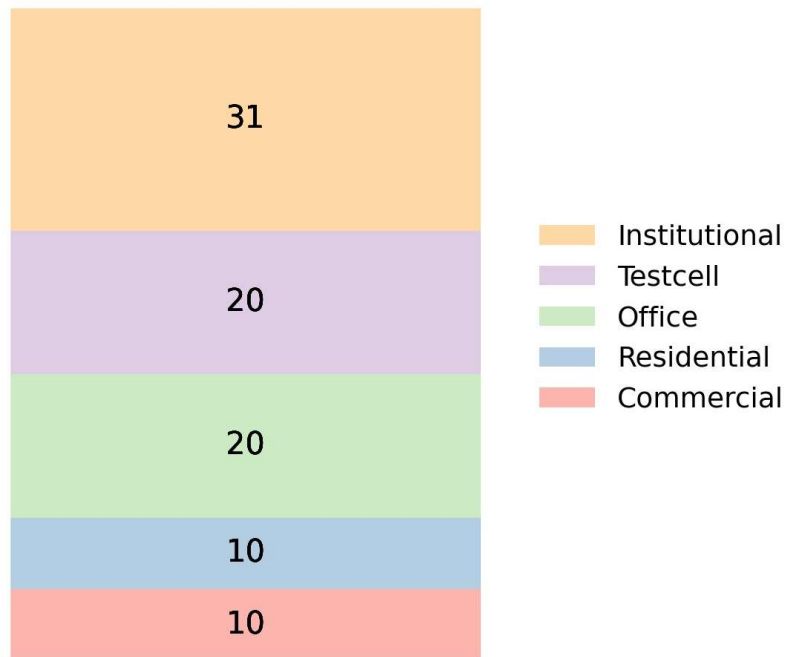
Pourquoi ces emplacements ? **Pôles d'expertise, besoins particuliers** (feux de forêt, adoption d'énergies renouvelables), **opportunités potentielles** (tarification dynamique) ?

Structure tarifaire
comme facteur clé ?

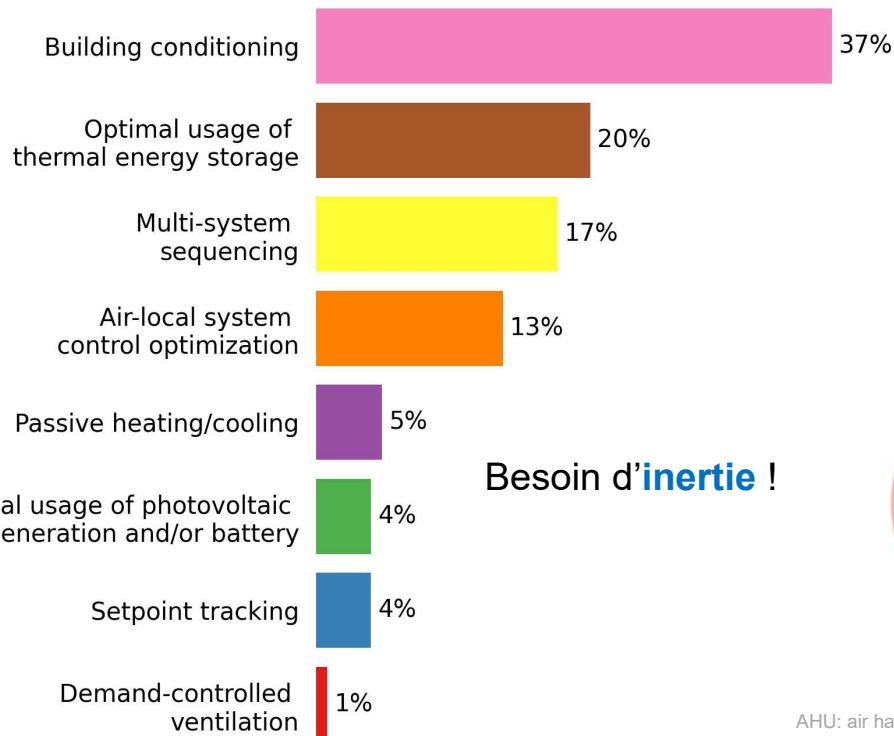


Résultats de la revue: bâtiments cas d'étude

Bancs d'essai (22%); bâtiments de **petite taille** ou
implantation sur **certaines zones thermiques** seulement

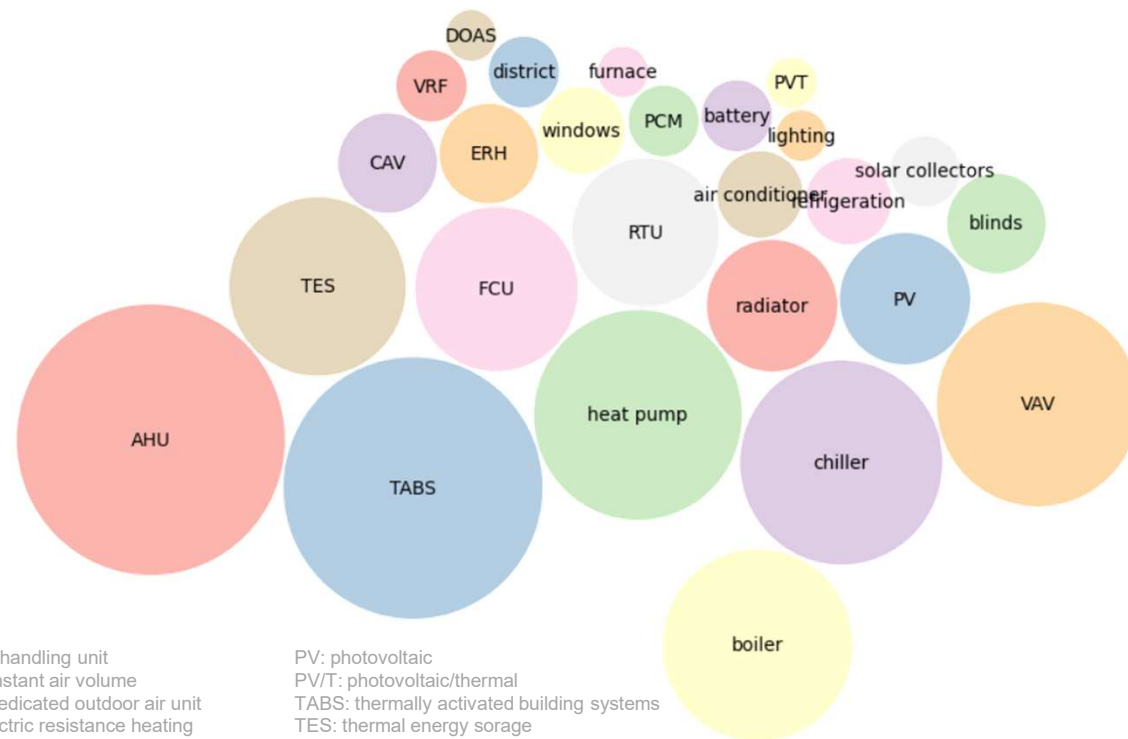


Résultats de la revue: applications & systèmes



Besoin d'**inertie** !

Variété d'équipement (incl. thermopompes & stockage thermique); peu de PV, PV/T & batterie

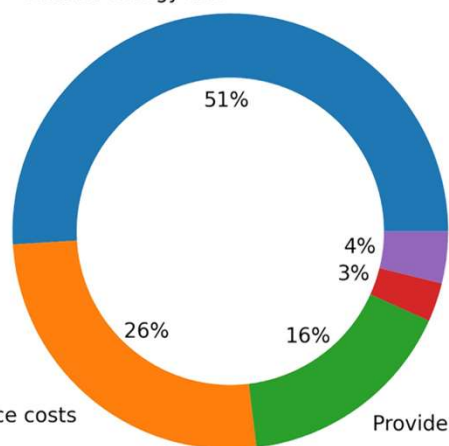


AHU: air handling unit
 CAV: constant air volume
 DOAS: dedicated outdoor air unit
 ERH: electric resistance heating
 FCU: fan coil unit
 PCM: phase change material

PV: photovoltaic
 PV/T: photovoltaic/thermal
 TABS: thermally activated building systems
 TES: thermal energy storage
 VAV: variable air volume
 VRF: variable refrigerant flow

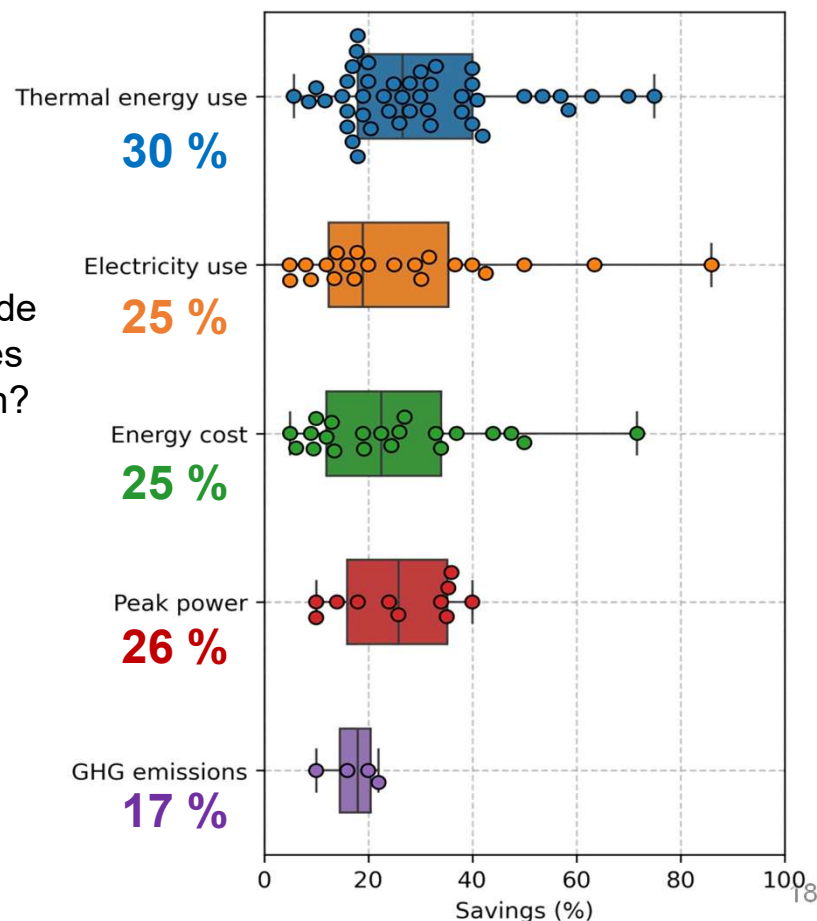
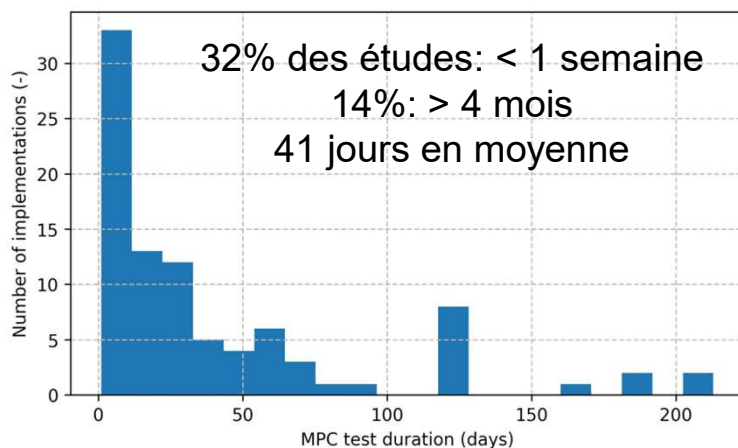
Résultats de la revue: objectifs, durée des tests & bénéfices

Reduce energy use



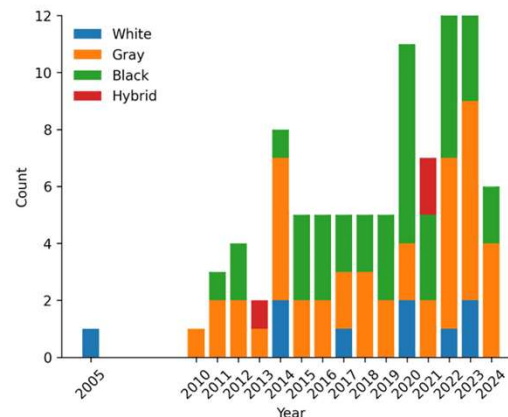
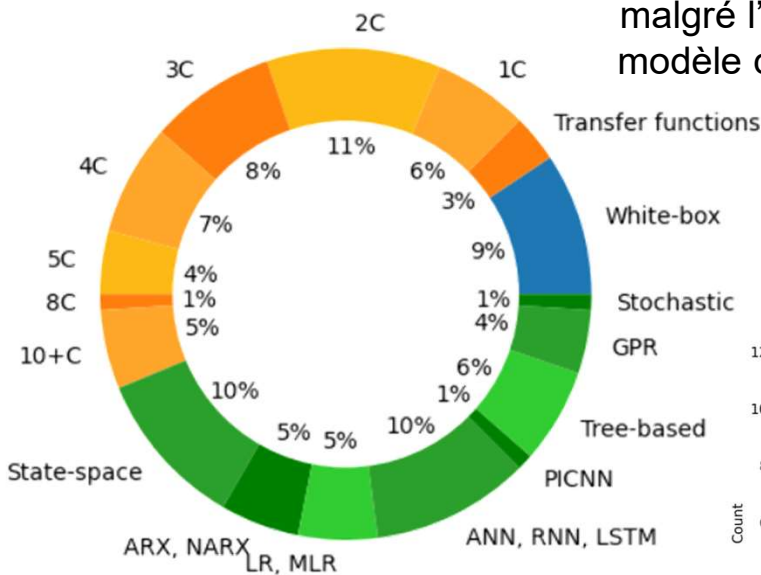
Énergie et **coûts** sont les facteurs clés;
s'adapter aux **besoins du réseau électrique** devient important; les **émissions de GES** sont peu étudiées

Quelle est l'opération de **référence**? Y a-t-il des problèmes d'opération?



Résultats de la revue: détails techniques

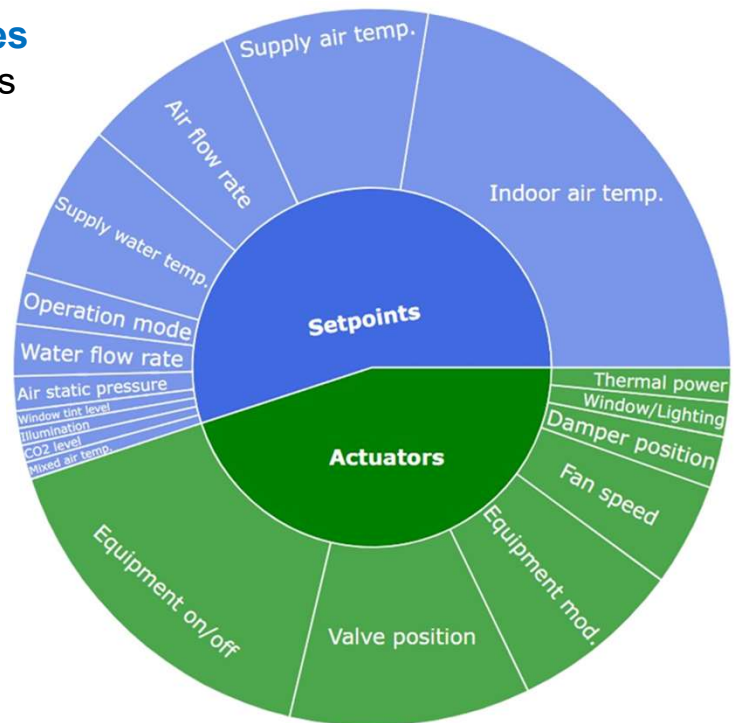
Une grande variété de modèles ; les **modèles à boîte grise** restent majoritairement utilisés malgré l'avènement de l'**IA** ; le choix du modèle dépend de **nombreux facteurs**



Modèle boîte blanche: basé sur des principes physiques seulement

Modèle boîte grise: basé sur des principes physiques, calibré avec données opérationnelles

Modèle boîte noire: calibré avec données opérationnelles, aucun principe physique



Le contrôle prédictif s'effectue via des **points de consigne** mais aussi directement des **actionneurs** ; la température de l'air intérieur est souvent utilisée

Sommaire de la présentation

1. Rôle des bâtiments dans la transition énergétique
2. Le concept du contrôle prédictif, applications et défis
3. État de la recherche et revue des cas d'implantation sur le terrain du contrôle prédictif
- 4. Exemples d'études de cas au Canada (x4)**
5. Enjeux et perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments

Cas d'étude #1: système biénergie

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109563>



Bâtiment institutionnel (5 257 m²)

Varennnes, Québec – Tarif M

Implanté dans le bâtiment au complet (bureaux)

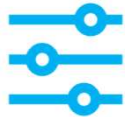
22 %

Réduction des **émissions de GES** sans coûts additionnels (chaufferie)



Système biénergie (chaudières électrique et au gaz)

Chauffage via la ventilation et une boucle hydronique périmétrique



Point de consigne des températures de pièce



Modèles d'IA pour la demande de chauffage, la puissance électrique du bâtiment, la consommation de gaz, la température de pièce



Implanté en 2018-19, 2019-20 et 2020-21, pour un total d'environ 9 mois



Concept et méthodologie:

- La transition des conditions de nuit à celles de jour génère une pointe de chauffage, couverte en majeure partie par les chaudières au gaz
- **Préchauffer le bâtiment graduellement** permet d'optimiser l'opération de la chaudière électrique la nuit et de réduire la consommation des chaudières au gaz
- La stratégie MPC prédit la demande de chauffage pour les prochaines 24 h et détermine le préchauffage qui minimise la consommation de gaz naturel

Cas d'étude #2: système 100% électrique

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131126>



Bâtiment institutionnel (5 192 m²)

Proche de Montréal, Québec – Tarif Flex M

Implanté dans certaines zones thermiques (380 m²)

44 %

Réduction des **coûts d'électricité**
(thermopompes locales)



Système 100 % électrique incluant thermopompes (locales, centrale), géothermie, stockage thermique
Chauffage par ventilation et planchers radiants



Points de consigne des températures de pièce



Modèles type boîte grise (Résistance-Capacitance) pour chaque zone thermique



Implanté en 2022-23 pour environ 2 semaines



Concept et méthodologie:

- La transition des conditions de nuit à celles de jour génère une pointe de chauffage, amenant à une consommation d'électricité importante (énergie, puissance)
- **Préchauffer le bâtiment graduellement** permet de réduire l'utilisation d'électricité lors des périodes de pointe du réseau quand l'électricité est dispendieuse
- La stratégie MPC prédit la demande de chauffage pour les prochaines 24 h et détermine le profil de température qui minimise les coûts d'électricité

Cas d'étude #3: ventilation optimisée

https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=esim2020_1109



Bâtiment institutionnel (6 650 m²)
Ottawa, Ontario
Implanté dans le bâtiment au complet

10-38 %

Réduction de la **consommation d'énergie** (38 % en chauffage; 10 % en climatisation)
(demande en énergie du bâtiment)



Centrales de traitement de l'air



Ouverture des volets d'air neuf



Courbes de performance des volets; *motif and discord identification* pour prédire les tendances d'occupation



Implanté en 2019-20 pour 24 semaines (Août-Février)



Concept et méthodologie:

- L'occupation réelle des bâtiments est bien plus faible que les valeurs de conception; l'arrivée d'air neuf se retrouve alors surestimée et génère une consommation d'énergie excessive
- **Ajuster l'arrivée d'air neuf en fonction de l'occupation réelle** permet de réduire la consommation d'énergie, à la fois en chauffage et en climatisation
- La stratégie MPC prédit l'occupation pour la journée à venir et ajuste l'arrivée d'air neuf pour réduire la consommation d'énergie

Cas d'étude #4: suivi optimal des points de consigne

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110056>



Bâtiment institutionnel

Ottawa, Ontario

Implanté dans 27 bureaux (11 zones thermiques sur 2 étages) du bâtiment

33-42 %

Réduction de la **consommation d'énergie** (33 % en chauffage; 42 % en climatisation)
(demande en énergie des bureaux)



Centrales de traitement de l'air
Chauffage radiant



Mode d'opération (chauffage, climatisation, off)



Modèle d'espace d'état pour chaque pièce (linéaire, boîte noire), arbre de classification pour extraire des règles simples (optionnel)



Implanté en 2018-19 pour 17 semaines (9 en chauffage, 8 en climatisation)



Concept et méthodologie:

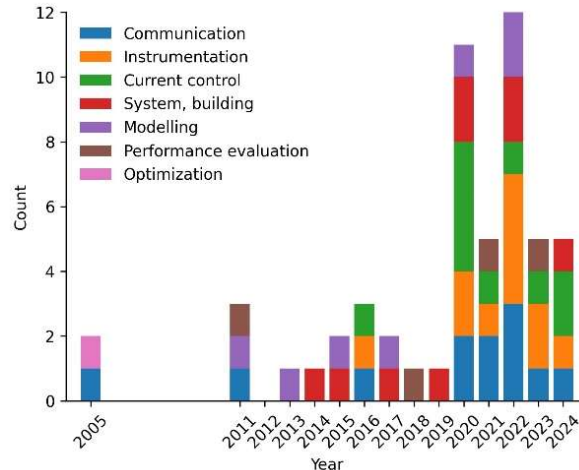
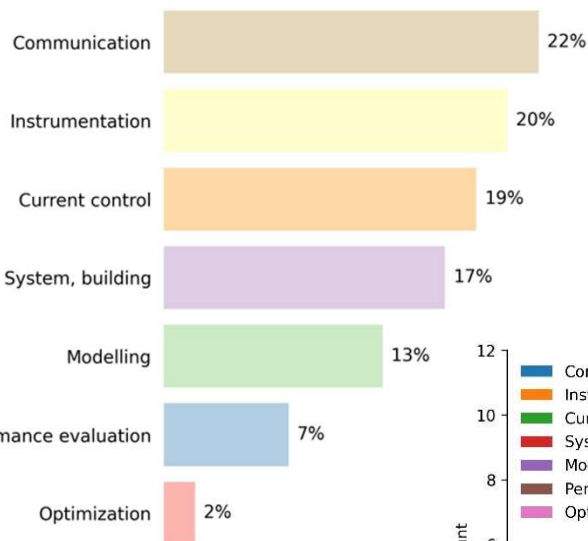
- Le contrôle de pièce est réactif et peut conduire à un dépassement des points de consigne (p. ex. fort gains solaires ou internes), conduisant à une consommation d'énergie excessive
- **Ajuster l'apport en chauffage ou climatisation selon les besoins réels de la pièce** permet de réduire la consommation d'énergie
- La stratégie MPC prédit les besoins en chauffage et climatisation pour atteindre le point de consigne de pièce pour les 3 prochaines heures et ajuste le mode d'opération en conséquence

Sommaire de la présentation

1. Rôle des bâtiments dans la transition énergétique
2. Le concept du contrôle prédictif, applications et défis
3. État de la recherche et revue des cas d'implantation sur le terrain du contrôle prédictif
4. Exemples d'études de cas au Canada (x4)
5. **Enjeux et perspectives pour le déploiement du contrôle prédictif à grande échelle dans les bâtiments**

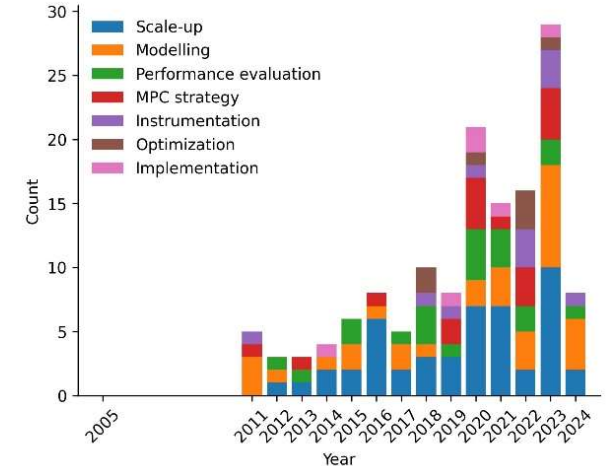
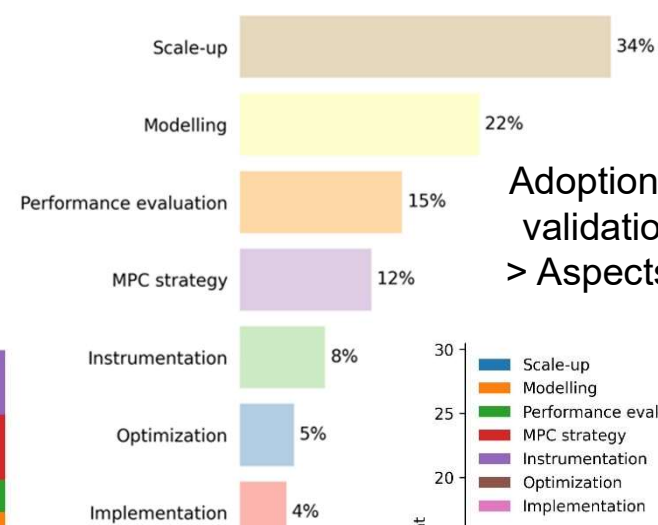
Quels enjeux, quelles perspectives pour le contrôle prédictif ?

Défis rencontrés



La **modélisation est essentielle**, mais le déploiement sur le terrain présente des **défis supplémentaires**

Travaux futurs



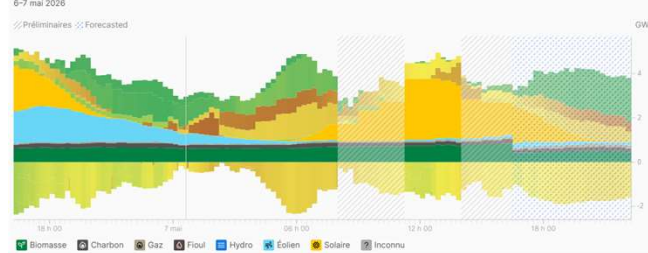
Adoption à **grande échelle** et validation des performances
> Aspects techniques du MPC

Qu'est-ce qui pourrait accélérer l'adoption ?

Quelques éléments de réponse ...

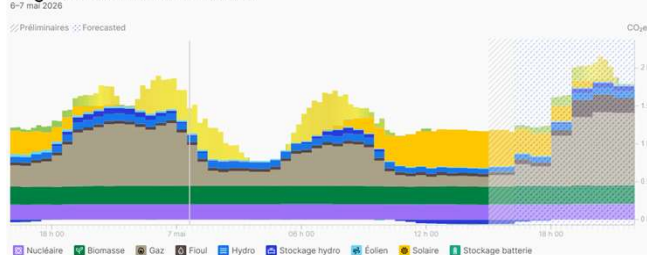
Pénétration des **énergies renouvelables**, besoins **grandissants** du réseau électrique & **imports/exports**

Origine de l'électricité



Intensité carbone horaire du réseau électrique
(REC, EAC, 24/7 carbon-free energy, ...)

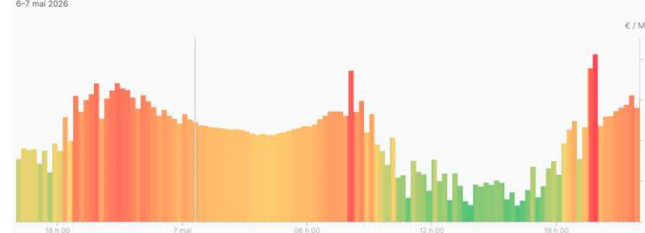
Origine des émissions de CO2



REC: Renewable Energy Certificate
EAC: Energy Attribute Certificate

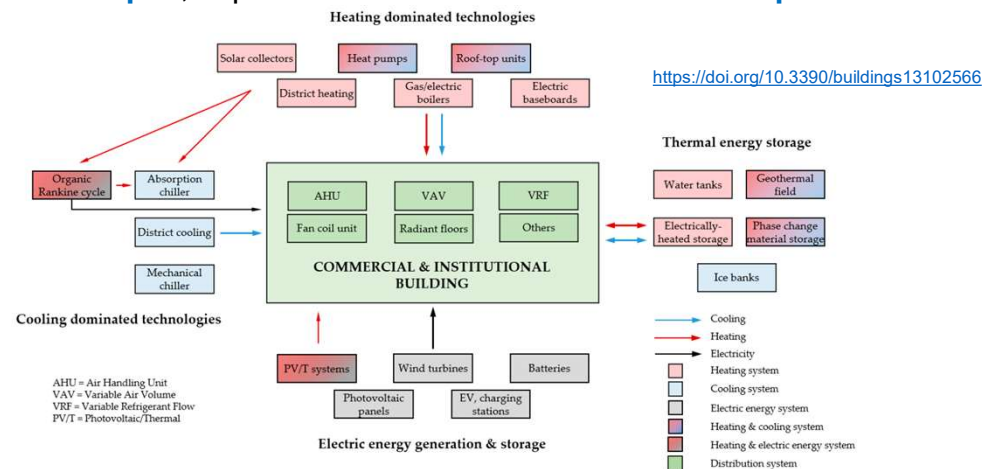
Volatilité des prix de l'énergie

Prix de l'électricité

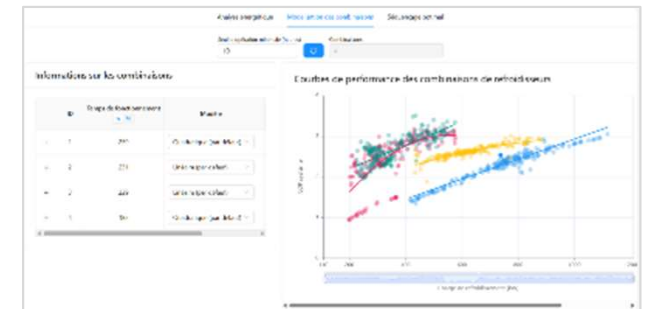


Source des figures:
ElectricityMaps (France, Denmark)

Complexité croissante des systèmes CVCA, incluant le **stockage thermique** ; importance de la **résilience** et des **occupants**



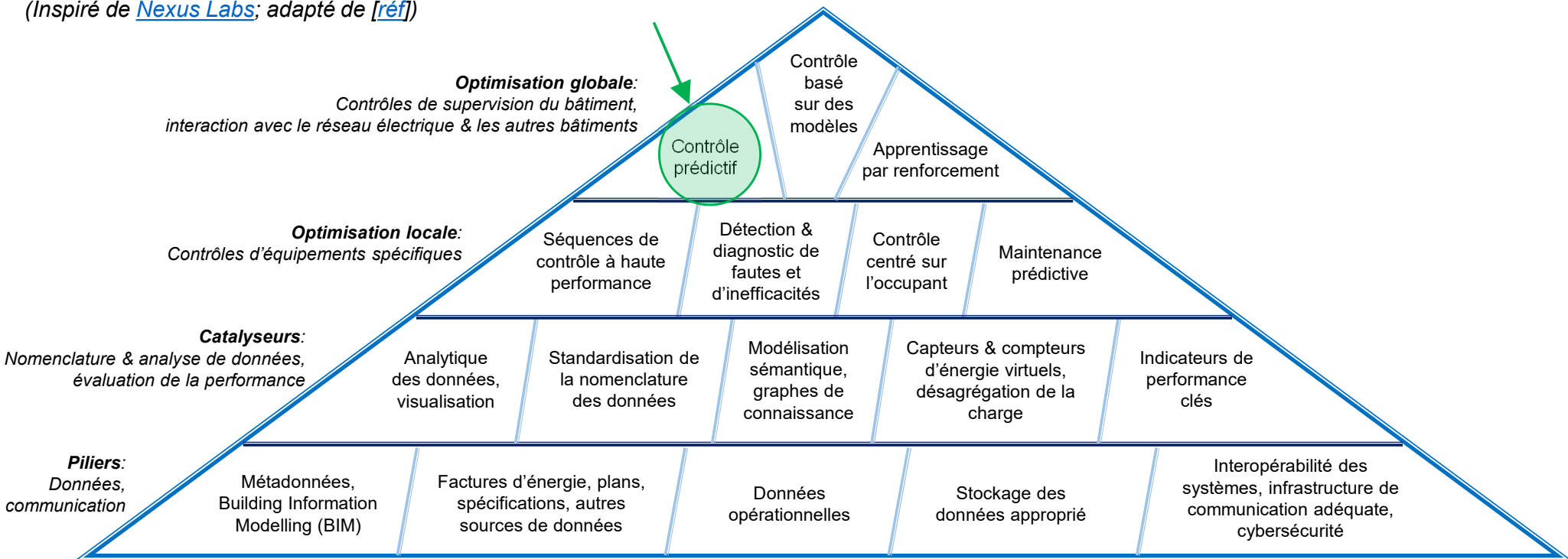
Outils facilitant le développement et le déploiement de stratégies de contrôle avancé



Qu'est-ce qui pourrait accélérer l'adoption ?

Hiérarchie des contrôles avancés : opportunités et exigences

(Inspiré de [Nexus Labs](#); adapté de [\[réf\]](#))

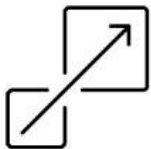


Les différents niveaux & thématiques sont plutôt des tendances que des catégories strictes

Remarques finales



La façon d'opérer les bâtiments fait face à un **changement de paradigme**, passant de l'efficacité énergétique à la décarbonation: les coûts de l'énergie & les émissions de GES deviennent des moteurs clés



La recherche s'intéresse à diverses approches, notamment l'IA et le contrôle prédictif, pour rendre les bâtiments plus intelligents, mais ces approches sont souvent conçues pour des cas particuliers; des solutions plus génériques sont nécessaires pour accélérer la **mise à l'échelle**



Les données opérationnelles représentent un **potentiel inexploité** pour améliorer la gestion des bâtiments; le déploiement des technologies à grande échelle dépend grandement de la façon de les organiser (p.ex. standardisation de la nomenclature)



La clé de l'exploitation optimale de bâtiments ne repose pas seulement sur la technologie, mais sur l'intégration des **synergies** entre les processus, les technologies et les personnes

DES QUESTIONS? N'HÉSITEZ PAS À NOUS CONTACTER

Tu veux assister au prochain webinaire du REB ?

Webinaire : Le développement des réseaux de chauffage urbains et la valorisation de chaleur fatale en France

Date : le 11 février 2026, de 12h à 13h

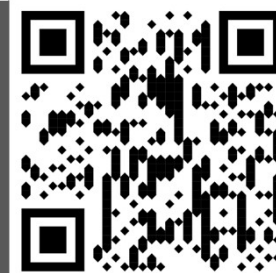
Etienne Saloux

Chercheur scientifique

etienne.saloux@nrcan-rncan.gc.ca



Ressources Naturelles Canada
CanmetÉNERGIE à Varennes
Gouvernement du Canada



1615 boul. Lionel-Boulet
Varennes, QC J3X 1P7
Tél. : 450 652-4621
canmetenergy@nrcan.gc.ca



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

Canada

Canada



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des Ressources naturelles Canada, 2026