



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

Le bâtiment de 2050 : où la recherche peut-elle nous mener ?

Etienne Saloux

CanmetÉNERGIE, Ressources Naturelles Canada

Symposium annuel du Réseau Énergie et Bâtiments

École de Technologie Supérieure (Montréal)

9 décembre 2025

Canada



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



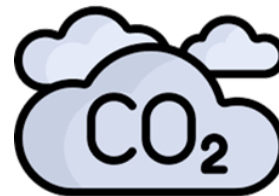
Confort & bien-être des occupants

- *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)

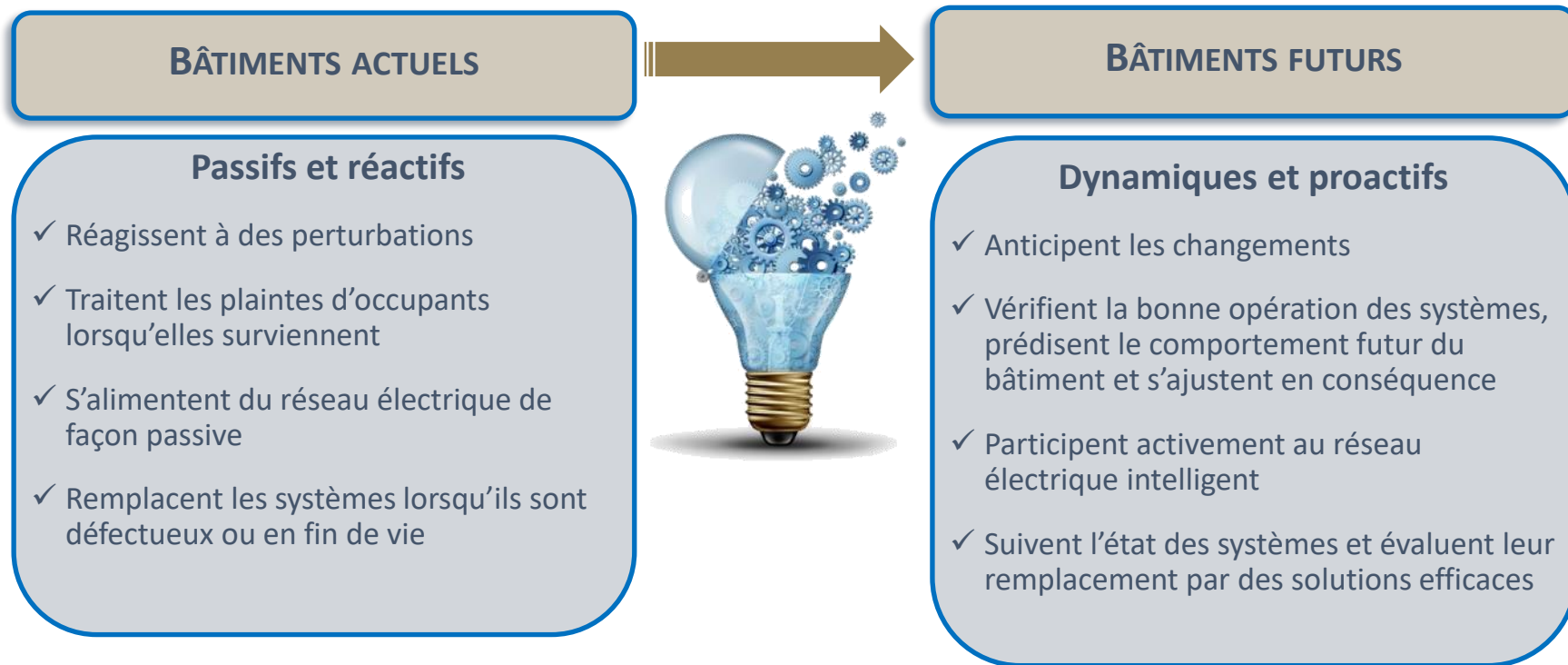
- *Coûts initiaux des infrastructures, maintenance & durée de vie des équipements*
- *Facturation de l'énergie (kWh) et de la puissance (kW); multitude de structures tarifaires*
- *Les bâtiments peuvent aider le réseau électrique lors de périodes critiques (flexibilité)*



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)*

Quelle vision pour les bâtiments?



Quelle vision pour les bâtiments?

Temps réel



Système

Énergie



Coûts



GES



Occupation



Bien-être



Ressources



Auto-diagnostic, correction & optimisation



Prévisions



Météo



Prix énergie



Intensité GES



Occupation



Besoins réseau



Maintenance prédictive



Coordination avec d'autres bâtiments, le réseau électrique



Échange d'information



Analyse de scénarios

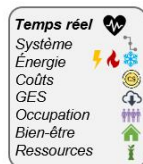


Pompes à chaleur PV Stockage thermique



Quels sont les défis pour y parvenir ?

Est-ce qu'on mesure les flux d'énergie, avec quel niveau de détail et d'incertitude? Est-ce qu'on mesure l'occupation? Comment est évalué le confort?



Comment savoir si quelque chose ne va pas? Comment détecter les fautes et les inefficacités? Quoi optimiser, comment le faire? Est-on capable de faire les ajustements?



Quelles prévisions sont disponibles? Comment calculer celles qui ne le sont pas? Comment utiliser les prévisions concrètement?



Comment vérifier l'état des systèmes? Comment prédire s'ils nécessitent un entretien?

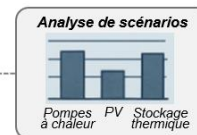


Comment gérer la coordination? Comment trouver un compromis entre performance individuelle et collective?

Est-ce que l'information est enregistrée? Est-elle sécurisée? Est-elle structurée correctement? Est-elle à jour? Comment la visualiser (graphiques, réalité virtuelle ou augmentée)?



Est-ce que les résultats que l'IA partage sont fiables?



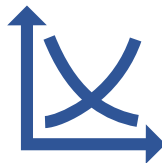
Quelles sont les options pour moderniser les systèmes? À quel niveau de performance et à quel coût?

Quel rôle pour l'IA?



Aide à la modélisation énergétique

- *Suivre la performance et vérifier que le bâtiment se comporte comme prévu; détecter les périodes typiques de fautes ou inefficacités*
- *Prédire le comportement futur du bâtiment pour l'optimiser (opération, défaillances)*
- *Tester des scénarios hypothétiques*
- *Générer un modèle du bâtiment à partir des plans (architecture, électricité, système CVCA, etc.)*
- *Générer des données qui ne sont pas mesurées (nouvelles variables, + de points)*



Aide à l'optimisation

- *Faciliter la recherche d'optima globaux de modèles complexes et éviter les optima locaux (calibration de modèles, optimisation de l'opération)*



Aide à la recherche d'information

- *Rechercher des informations précises dans des documents; faciliter les échanges et la communication*
- *Traiter des données et visualiser les résultats*
- *Générer du code (lecture de jeux de données, développement de modèles, séquences de contrôle pour le BAS)*

L'IA est une technique de modélisation parmi tant d'autres...

Dans quel cas d'utilisation, l'IA fournit-elle une valeur ajoutée?

Quel est l'état de la recherche actuelle?

Dans le domaine du bâtiment en général

Conception des systèmes HVAC

Développement de nouvelles technologies (PàC, stockage, solaire, géothermie, etc.)	Agriculture en environnement contrôlé, systèmes agrivoltaïques
Dimensionnement et intégration optimale des systèmes CVCA	Simulation énergétique, modélisation BIM à BEM, modèles de substitution

Opération des systèmes HVAC

Détection et diagnostic de fautes	Contrôles centrés sur l'occupant	Jumeaux numériques, prévision de la demande
Contrôle prédictif	Maintenance prédictive	
Apprentissage par renforcement	Flexibilité énergétique, autosuffisance	

Bien-être des occupants

Confort thermique personnalisé; dispositifs portables	Qualité de l'air (CO ₂ , NO ₂ , PM _{2.5} , radon, particules infectieuses)
Vulnérabilité à la chaleur	Luminosité naturelle, vitrage vs. productivité, stress, humeur, rythme circadien

Circularité et matériaux

Analyse de cycle de vie des bâtiments et des systèmes	Matériaux bas-carbone, d'origine naturelle	
Carbone intrinsèque lié à la construction, la rénovation et la déconstruction	Économie circulaire; index de réutilisation	Suffisance énergétique
	Architecture régénérative (à impact positif)	

Analyse à l'échelle urbaine

Impact du déploiement de technologies (PV, PàC, stockage, etc.) à grande échelle	
Modélisation à échelle urbaine	Microréseaux, réseaux de chaleur, communautés de bâtiments
Confort thermique extérieur (villes), îlots de chaleur, végétation urbaine	

Résilience et adaptation aux changements climatiques

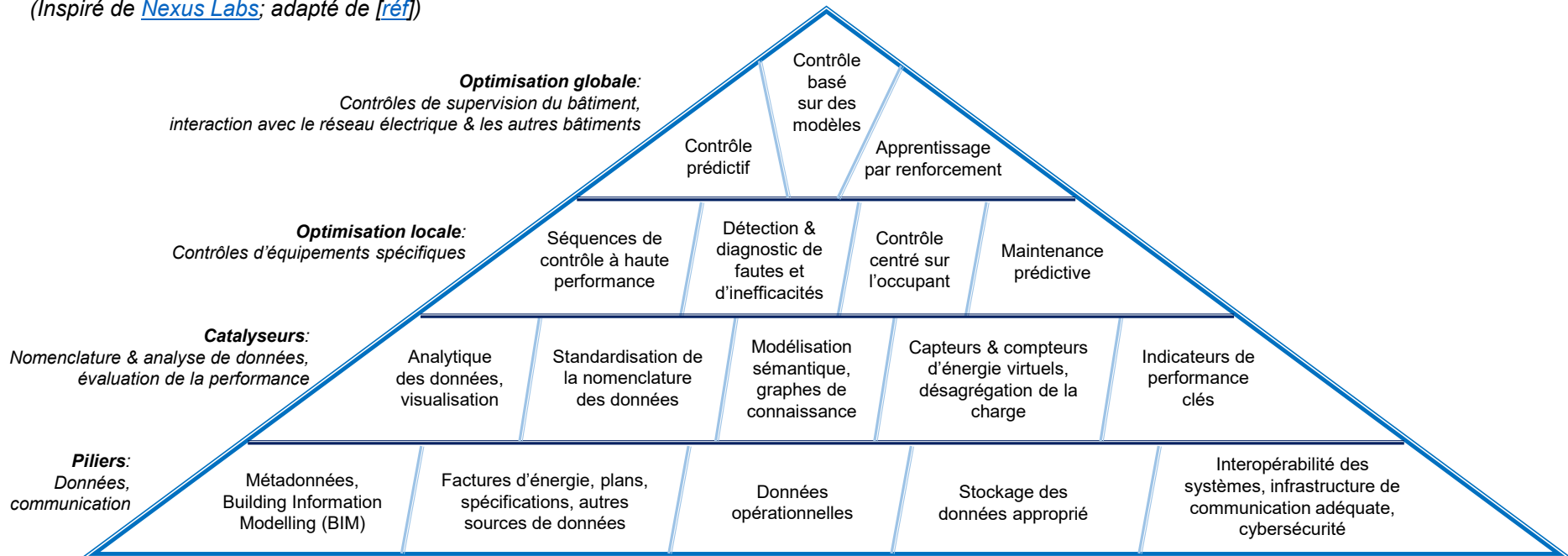
Risques de surchauffe dans les bâtiments	Projections sur les climats futurs, impact sur la performance et les rénovations des bâtiments
Effets des événements climatiques extrêmes sur les logements à faible revenu et les populations vulnérables	Résilience thermique durant des événements extrêmes

*Ce ne sont que quelques thématiques ...
(basées sur les conférences [CISBAT 2025](#), [Building Performance 2025](#), [COBEE 2025](#) & [eSim 2024](#))*

Quel est l'état de la recherche actuelle?

Dans le domaine de l'opération et du contrôle des bâtiments

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



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

Quel est l'état de la recherche actuelle?

Quelques exemples pour l'opération et le contrôle des bâtiments

Détection & diagnostic de fautes (FDD), d'inefficacités [réf1, réf2]	Contrôle centré sur l'occupant (OCC) [réf1, réf2]	Contrôle prédictif (MPC) [réf1, réf2]	Apprentissage par renforcement (RL, technique IA) [réf1, réf2]
• Améliorer la détection basée sur des modèles, pour les fautes dites <i>hard</i> (p. ex., valve ou volet coincé) mais aussi <i>soft</i> (p. ex., point de consigne de température inapproprié) • Automatiser la détermination des causes réelles des fautes et la correction des fautes	• Ajuster l'arrivée d'air neuf en fonction du nombre réel d'occupants, de l'occupation à venir • Ajuster les horaires d'opération selon les habitudes d'occupation (première arrivée/dernier départ; télétravail et mode hybride) • Optimiser les points de consigne selon les préférences personnelles, nudging comportemental	• Utiliser les prévisions de la météo, du coût de l'énergie et des besoins du réseau électrique pour préchauffer le bâtiment, optimiser le fonctionnement des systèmes CVCA (incluant le stockage thermique) • Utiliser l'intensité carbone du réseau pour maximiser l'utilisation d'électricité provenant de sources renouvelables, réduire les émissions de GES des systèmes biénergie	• Apprentissage par essai/erreur avec mécanisme de récompense/pénalité; entraînement sur simulation au préalable • Coordination de la flexibilité énergétique des communautés de bâtiments selon les besoins du réseau électrique

Quel est l'état de la recherche actuelle?

Quels sont les obstacles au déploiement?

Détection & diagnostic de fautes (FDD), d'inefficacités [réf1, réf2]	Contrôle centré sur l'occupant (OCC) [réf1, réf2]	Contrôle prédictif (MPC) [réf1, réf2]	Apprentissage par renforcement (RL, technique IA) [réf1, réf2]
• Quel est le niveau de complexité pour implanter du FDD (vs. standardisation des métadonnées)? • Comment améliorer le diagnostic, ne pas submerger l'opérateur d'informations et automatiser la correction? • Comment évaluer les bénéfices liés à la correction des fautes?	• Est-ce que l'infrastructure de mesurage en place permet l'implantation de OCC? Quels capteurs sont nécessaires? • Comment évaluer les bénéfices, principalement pour le confort (p. ex., santé, productivité) et l'utilisation des espaces?	• 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?	• Comment s'assurer que le bâtiment est opéré de façon sécuritaire lorsque le modèle IA est en phase d'apprentissage? Quelle durée, quantité de données pour l'apprentissage? • Est-ce que les modèles de simulation peuvent être utilisés pour entraîner le modèle IA? • Comment mettre à l'échelle un agent RL pour d'autres bâtiments, équipés de systèmes CVCA différents?

Preuve de concept (TRL 1-4)

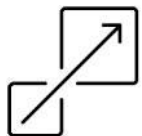
Projets pilotes (TRL 5-7)

Mise à l'échelle (TRL 7-9)

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, 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; la façon de les organiser (p.ex. standardisation de la nomenclature) est essentielle pour le déploiement des technologies à grande échelle



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



Etienne Saloux

Chercheur scientifique

etienne.saloux@nrcan-rncan.gc.ca



CanmetÉNERGIE à Varennes

Secteur de l'efficacité énergétique et
de la technologie de l'énergie

Ressources Naturelles Canada

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, 2025