



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

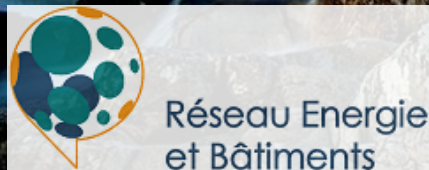
Canada

# CONTRÔLE AVANCÉ BASÉ SUR LES DONNÉES:

son rôle dans la gestion de la puissance  
électrique et de la flexibilité énergétique

José Candanedo, PhD  
Chercheur scientifique  
*Groupe bâtiments*  
**CanmetÉNERGIE à Varennes**

Navid Morovat (doctorant), Charalampos Vallianos (doctorant),  
Camille John (MSc), Prof. Andreas Athienitis, PhD  
*Chaire de recherche industrielle CRSNG-Hydro-Québec*  
**Université Concordia**

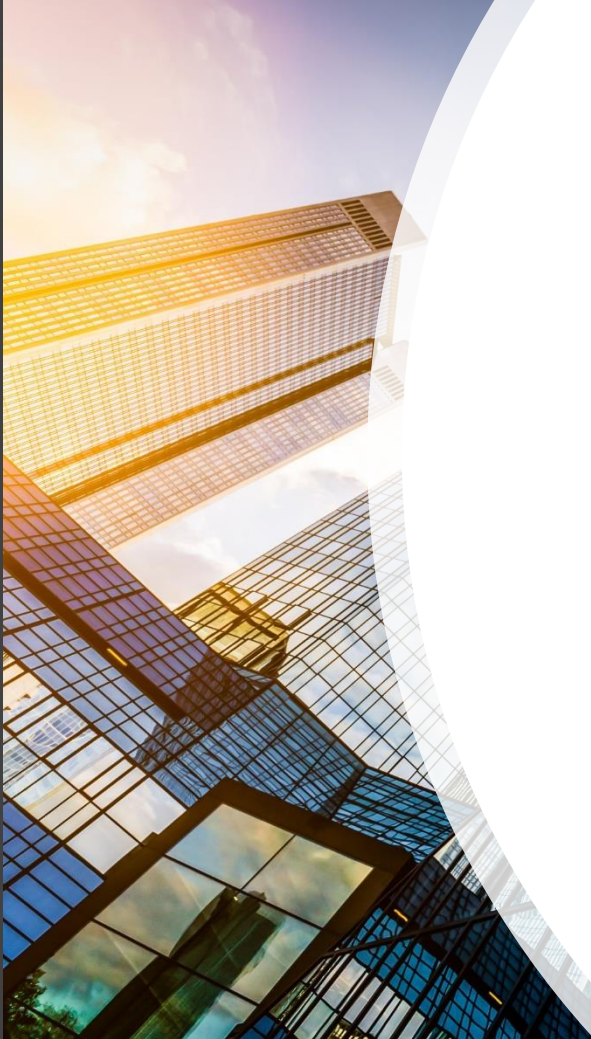


Symposium – Réseau Énergie et Bâtiments  
12 Décembre 2022

# TABLE DES MATIÈRES

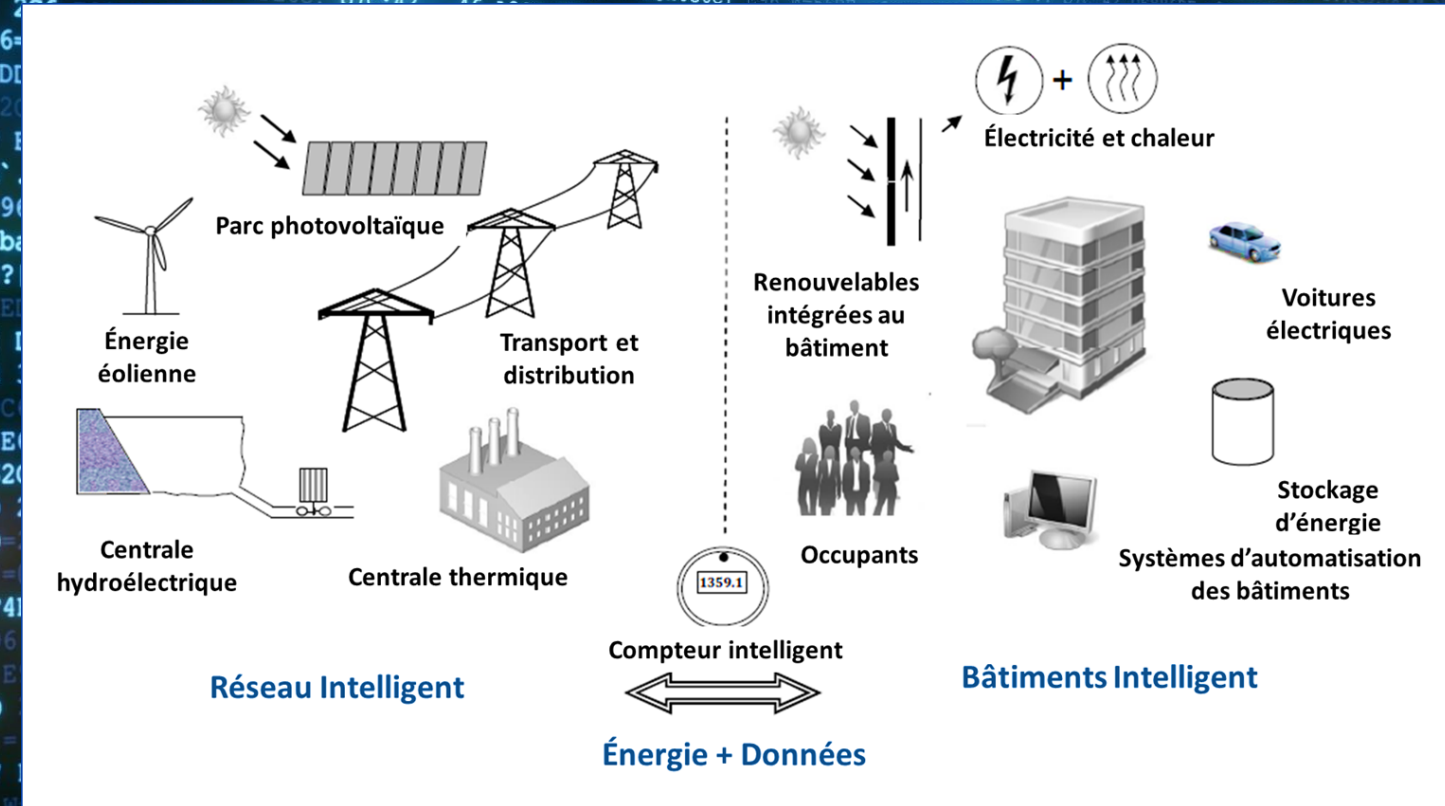
- **Contexte**
- **Projets**
  1. **Gestion de la demande électrique à l'école Horizon-du-Lac**
  2. **Identification de constantes de temps (données Ecobee)**
  3. **Simulation de contrôle prédictif à grande échelle**
- **Remarques finales**

# CONTEXTE



# INTERACTION RÉSEAU- BÂTIMENT ET L'ANALYSE DES DONNÉES

- La gestion de la demande électrique est un enjeu clé pour le secteur électrique, aussi important que la consommation totale d'énergie.
- Les bâtiments contribuent de manière significative à la charge de pointe du réseau électrique (chauffage électrique, climatisation, etc.).
- L'accès aux données (compteurs électriques, températures, points de consigne, etc.) permet de mieux **comprendre** et de **gérer** cette interaction.



# NOUVELLES TECHNOLOGIES ET GESTION DE LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE

- L'intégration des nouvelles technologies introduit de nouveaux défis et opportunités.
- Le stockage d'énergie peut être utilisé pour **capter la production photovoltaïque** sur site et ainsi atténuer la demande sur le réseau à des moments critiques.
- L'incorporation de **voitures électriques** représente une contribution non négligeable à la demande électrique d'un bâtiment (7 kW par chargeur niveau 2).
- L'électrification du chauffage (e.g., **pompes à chaleur**) doit inclure une stratégie pour gérer la charge.

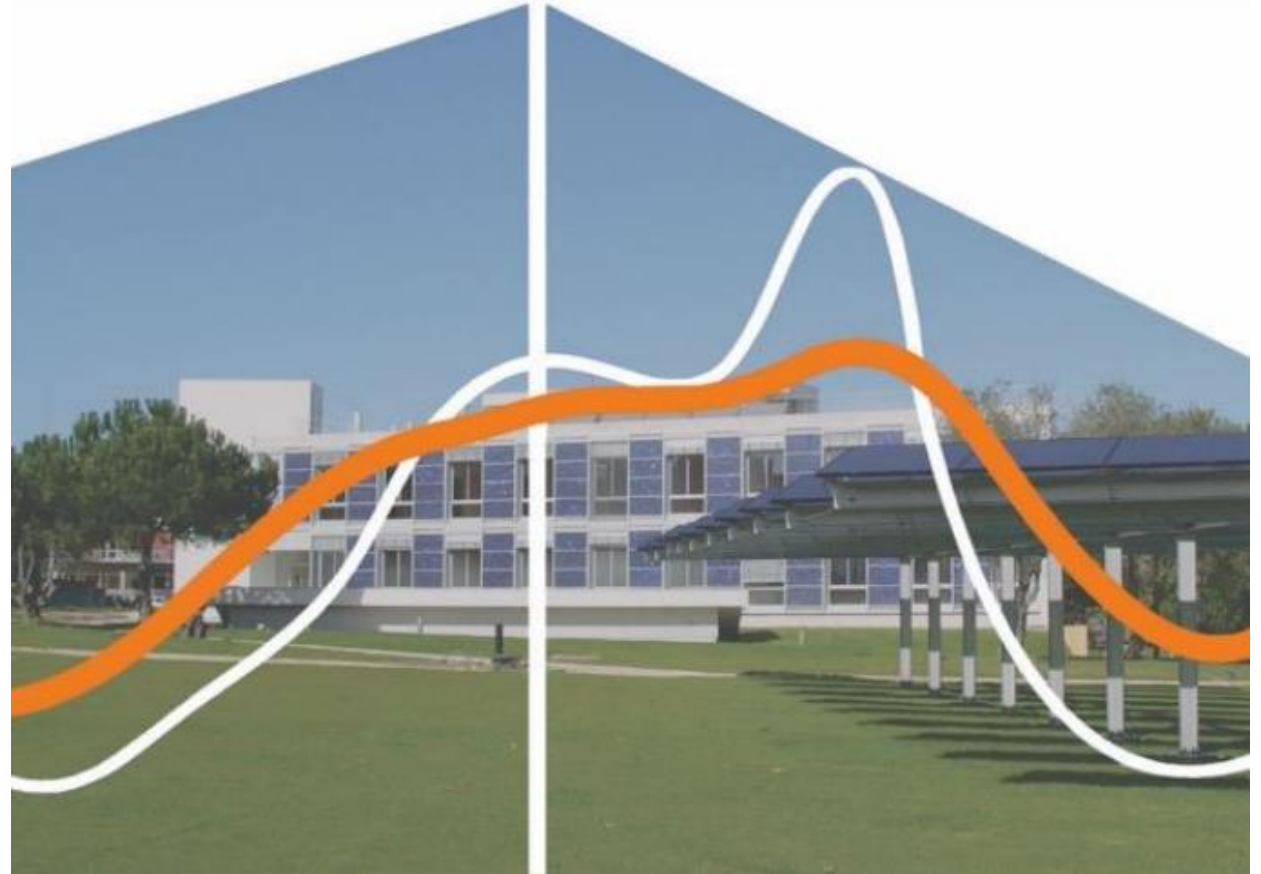


<https://www.hydroquebec.com/electrification-transport/voitures-electriques/recharge.html>



# Flexibilité énergétique

- Le concept de **flexibilité énergétique** décrit la capacité d'un bâtiment de répondre aux demandes du réseau électrique.
- La flexibilité est **variable** : elle évolue en fonction de l'heure de la journée, des technologies disponibles, des stratégies opérationnelles, etc.
- La flexibilité peut être augmentée grâce aux **énergies renouvelables sur site**, des dispositifs de **stockage d'énergie** et des **stratégies de contrôle** avancées.





# 1. BÂTIMENT SCOLAIRE: DEMANDE ÉLECTRIQUE ET FLEXIBILITÉ



# ÉCOLE PRIMAIRE: FLEXIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE

**Objectif: réduction de la pointe électrique et amélioration de la flexibilité**

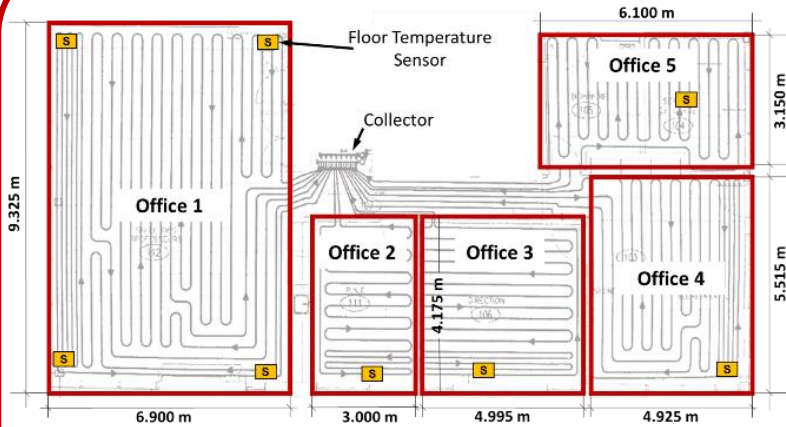
- **Bâtiment scolaire** (près de Montréal)
  - En opération depuis 2017
  - Superficie 5200 m<sup>2</sup> (2600 m<sup>2</sup>/étage)
- **Électricité seulement** (pas de gaz naturel)
- **Distribution de chaleur**
  - Plusieurs zones avec planchers radiants (Gym et bureaux)
  - Plusieurs zones avec systèmes convectifs (Salles de classe)
- **Géothermie: 28 boucles**
- **Pompes à chaleur (source géothermique)**
  - 36 ventilo-convecteurs terminaux avec pompes à chaleur
  - Grande PAC eau-eau
- **Stockage thermique**
  - ThermElect™ pour le stockage d'énergie (max 80 kW)





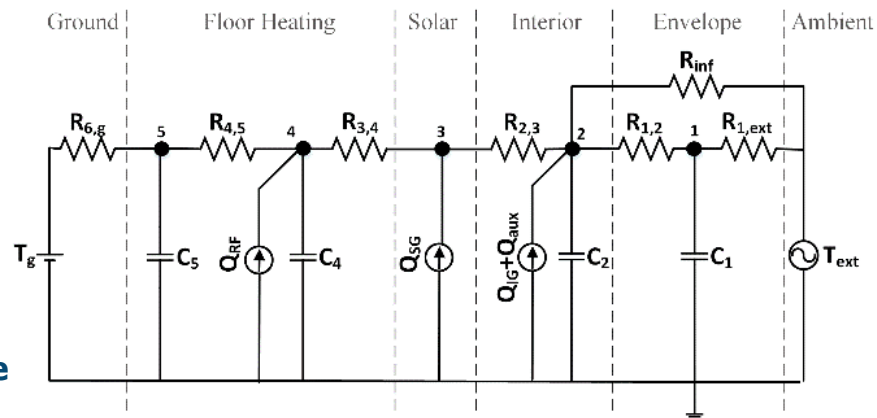
# ARCHETYPES DE ZONES RÉPRESENTATIVES

## Zone avec planchers radiants



Gym

Bureaux



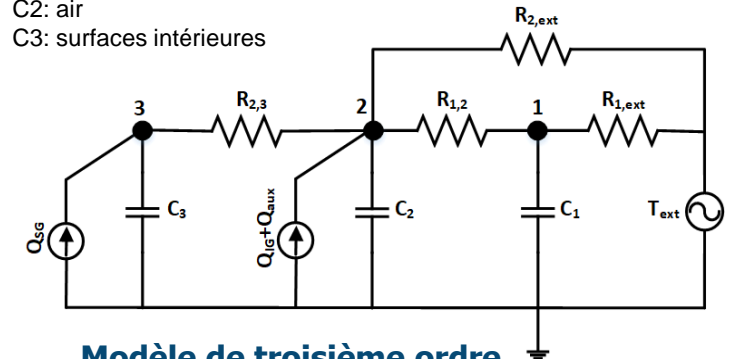
Modèle boîte-grise de quatrième ordre

## Zone avec systèmes convectifs



Salles de classe

- C1: envelope
- C2: air
- C3: surfaces intérieures



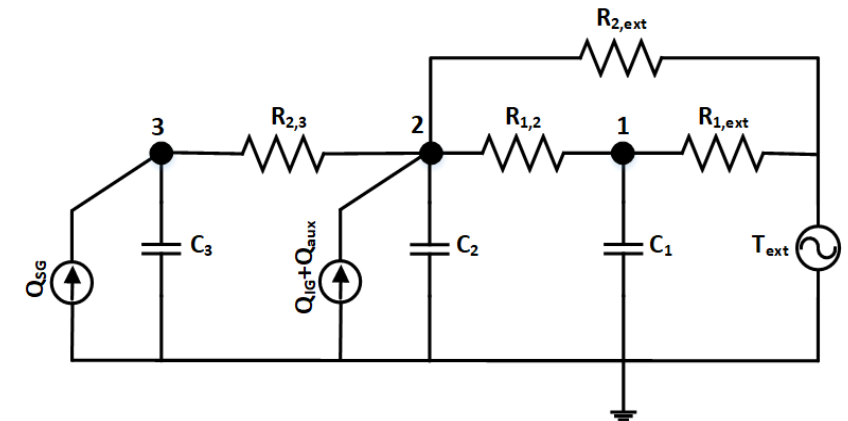
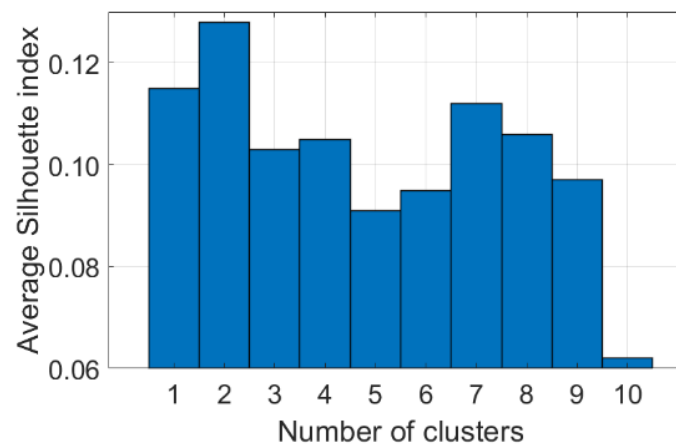
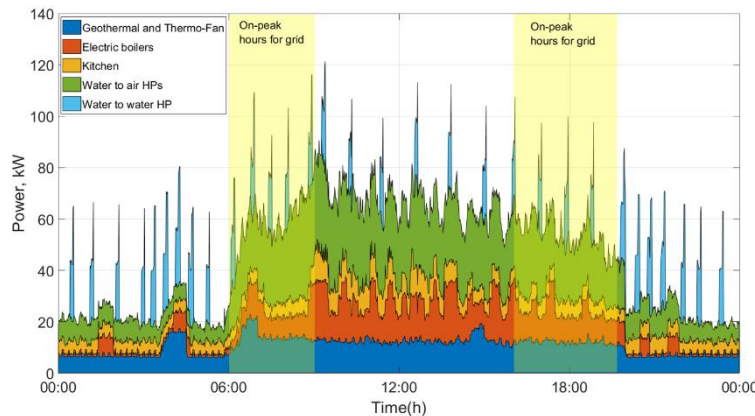
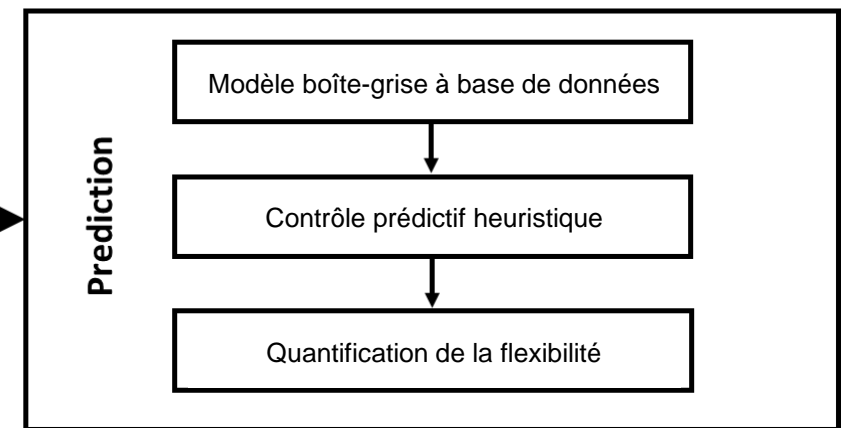
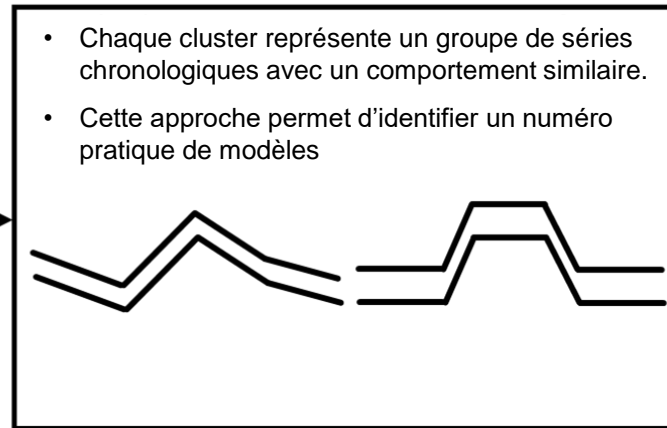
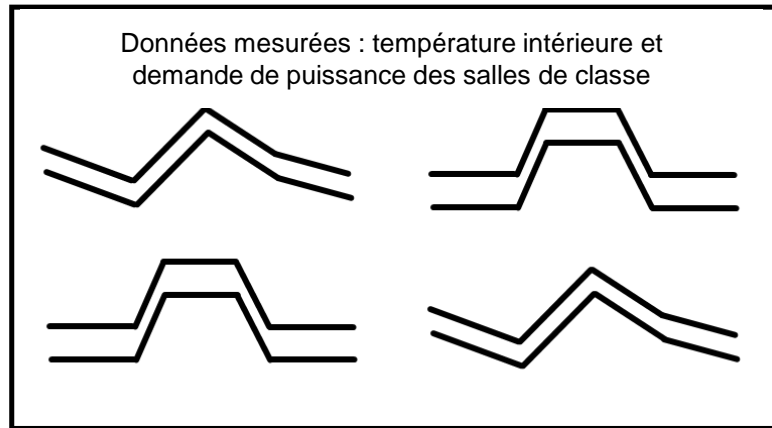
Modèle de troisième ordre

# ALGORITHME DE REGROUPEMENT

## Collecte de données

## Algorithme de regroupement (clustering)

## Création du modèle



Morovat, N., Athienitis, A.K., Candanedo, J.A., "Enhancing energy flexibility of electrically-heated school buildings using local setpoint adjustment in classrooms, *COBEE 2022*, Montreal, July 25-29.

# INDICE DE FLEXIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

- La flexibilité énergétique dynamique est définie comme la capacité d'un bâtiment à réduire sa consommation d'énergie pendant les périodes critiques ou sur demande du réseau.
- Un indice de flexibilité énergétique (BEFI, « *building energy flexibility index* ») est utilisé comme variable d'état du système.

Pour une zone

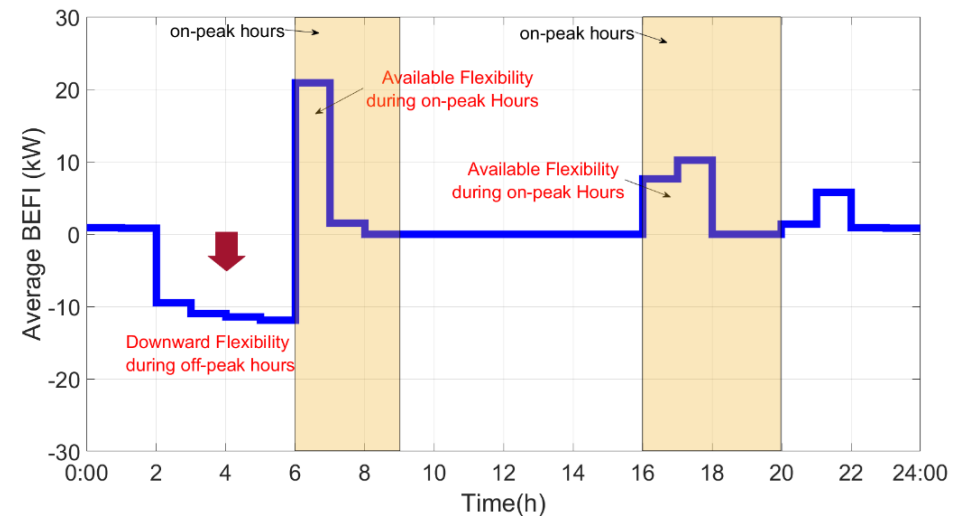
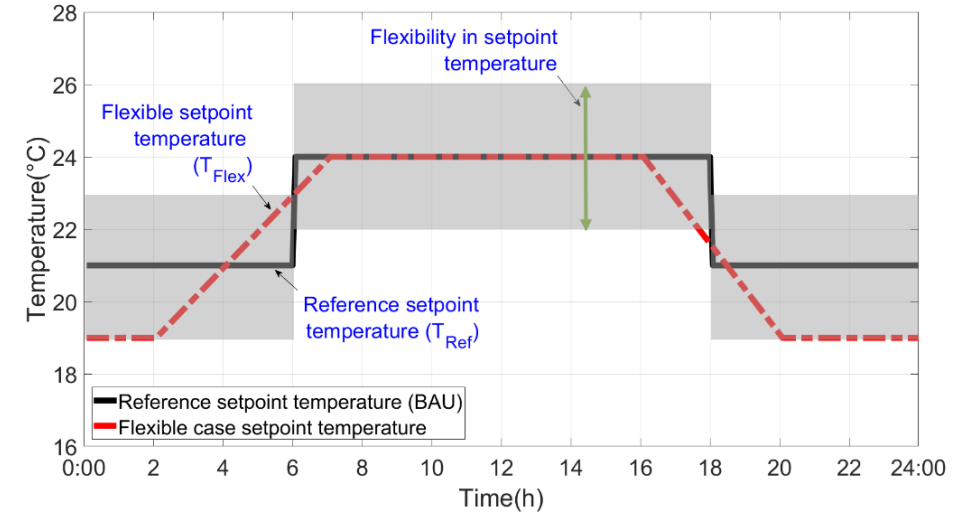
$$\overline{BEFI}(t, Dt) = \frac{\int_t^{t+Dt} P_{Ref} dt - \int_t^{t+Dt} P_{Flex} dt}{Dt}$$

En termes de pourcentage

$$BEFI\% = \frac{\bar{P}_{Ref} - \bar{P}_{Flex}}{\bar{P}_{Ref}} \times 100$$

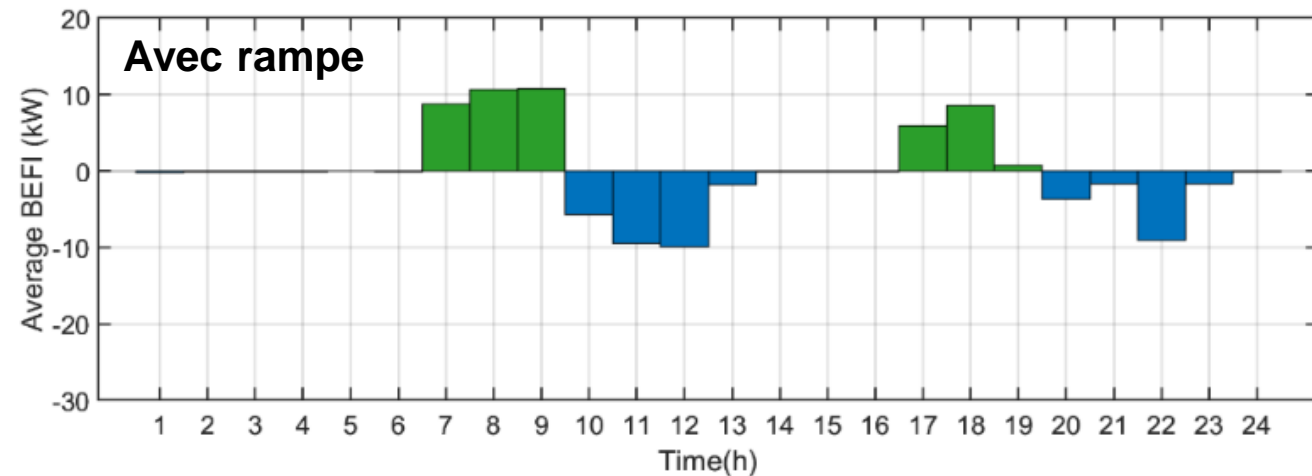
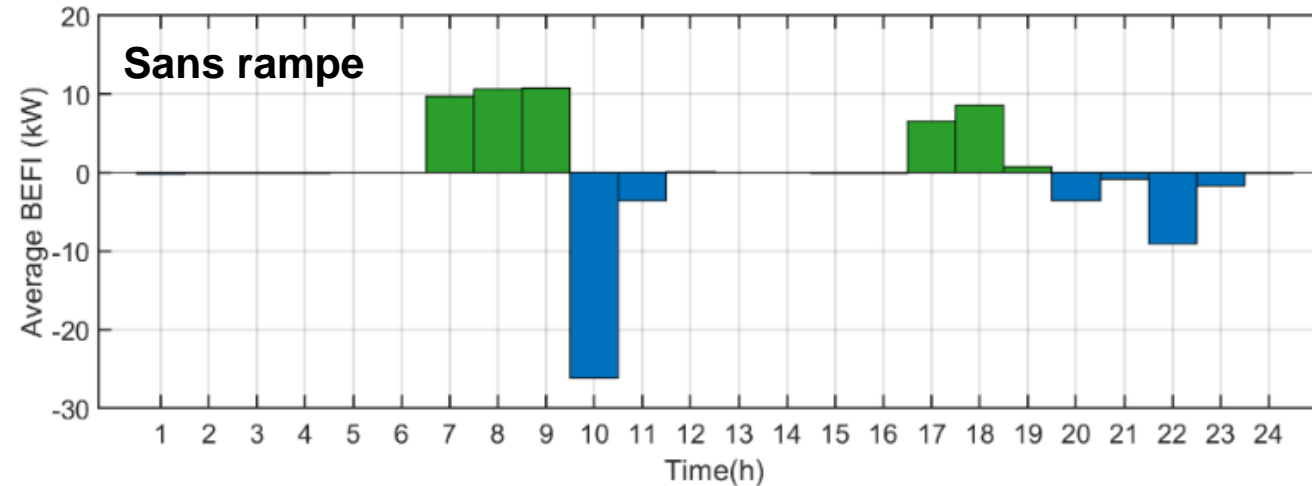
Flexibilité agrégée

$$\overline{BEFI}_{Building} = \sum_1^n BEFI_{Zone}$$



# FLEXIBILITÉ EN ZONES DE CHAUFFAGE PAR CONVECTION

- Une réduction de la consigne de température permet d'augmenter la flexibilité énergétique dans une période critique (par exemple, entre 7h et 9h).
- Après la période critique, il y a une étape de « rebond »: la puissance requise augmente pour revenir au PC initial; donc la flexibilité est réduite.
- L'utilisation des rampes permet d'atténuer l'effet du rebondissement.



■ Flexibilité augmentée  
■ Flexibilité réduite

# UN MOT SUR LES ARCHÉTYPES DE CONTRÔLE

## Control-oriented archetypes: a pathway for the systematic application of advanced controls in buildings

José A. Candanedo <sup>a</sup>, Charalampos Vallianos <sup>b</sup>, Benoit Delcroix <sup>c</sup>, Jennifer Date <sup>b</sup>, Ali Saberi Derakhtenjani <sup>b\*</sup>, Navid Morovat <sup>b</sup>, Camille John <sup>b</sup> and Andreas K. Athienitis <sup>b</sup>

<sup>a</sup>CanmetENERGY in Varennes (NRCan), Varennes, QC, Canada; <sup>b</sup>BCEE Department, Concordia University, Montreal, QC, Canada; <sup>c</sup>Hydro-Québec Research Institute, Laboratoire des Technologies de l'Énergie, Shawinigan, QC, Canada

### ABSTRACT

While the potential of model-based control is recognized, the development of reasonably accurate models for control applications remains a challenging, cumbersome and time-consuming task. This paper proposes a systematic and generalizable approach – based on low-order control-oriented thermal network (RC) archetypes – for the development, testing and implementation of readily scalable control solutions for buildings. These archetypes, focusing specifically on control applications, can significantly facilitate assessing the effect of control strategies on energy efficiency and load management. Furthermore, this approach can also be used for characterization, design and testing of simple retrofit strategies. The utilization of RC-based archetypes for common types of zones (such as those heated/cooled with forced-air or radiant systems) is proposed. These simple models (often 1st to 4th order models suffice), can also be used for the control of residential buildings. For larger buildings, zonal models can be combined to form whole building models.

### ARTICLE HISTORY

Received 19 October 2021  
Accepted 2 April 2022

### KEYWORDS

Grey-box models;  
model-predictive control;  
building-grid interaction;  
flexibility; data-driven model  
and control-oriented  
archetypes

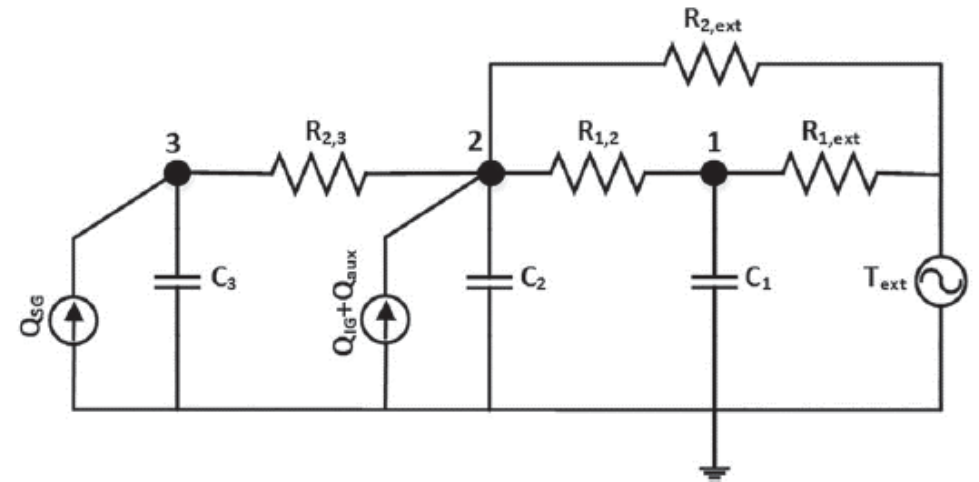
## 1. Introduction

### 1.1. Motivation

In recent years, model-based predictive control (MPC)

for the development and application of control-oriented models, based on the concept of zonal archetypes, is introduced. This notion of archetypes has interesting ramifications and is at the core of ongoing projects in our

- Il s'agit de modèles génériques applicables à une variété de configurations.
- Les archétypes orientés pour le contrôle sont une méthode prometteuse pour le déploiement rapide de stratégies de contrôle.



## 2. CONSTANTES DE TEMPS: ANALYSE DES DONNÉES DE THERMOSTATS INTELLIGENTS



## 2. UTILISATION DES DONNÉES DES THERMOSTATS INTELLIGENTS

**Objectif:** appliquer un vaste ensemble de données pour caractériser la réponse dynamique des maisons typiques en Amérique du Nord, afin que ces informations puissent être utilisées pour la gestion de la charge et l'évaluation de la résilience.

Base de données Ecobee (~100,000 résidences, presque toutes en Amérique du Nord):

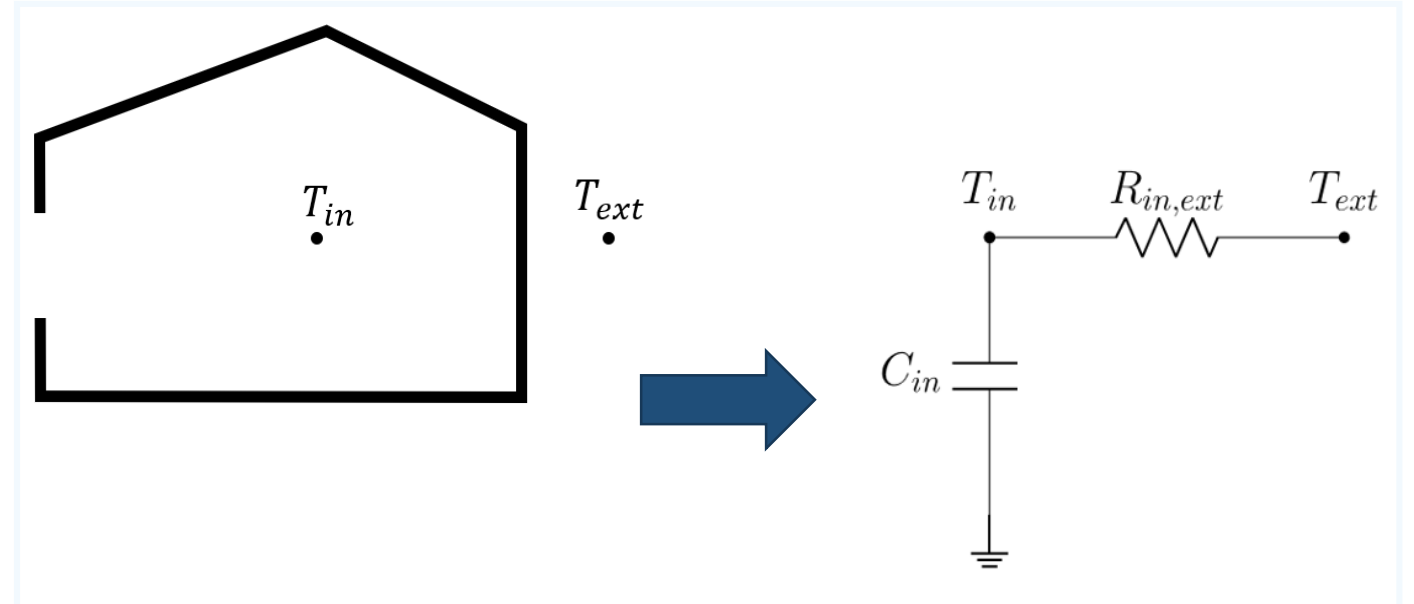
- **Données** : séries chronologiques (intervalles de 5 min)
  - ✓ Température intérieure et points de consigne
  - ✓ Humidité relative et points de consigne
  - ✓ Température extérieure
  - ✓ **Durée d'opération des systèmes CVAC**
- **Métadonnées (anonymisées)**
  - ✓ Pays, Province/État et Ville
  - ✓ Surface de plancher
  - ✓ Âge de la maison
  - ✓ Nombre d'étages
  - ✓ Nombre d'occupants
  - ✓ Type de système de chauffage
  - ✓ Type de maison

Échantillon pour cette étude : plus de **15,000 logements**, de **439 villes**, dans **8 zones climatiques ASHRAE**, au Canada and aux États-Unis



# ESTIMATION DES CONSTANTES DE TEMPS: MODÈLE 1R1C

- Chaque logement est modélisé comme un réseau résistance-capacitance de premier ordre (une seule capacitance).
- En faisant l'hypothèse de la décroissance (ou la croissance) exponentielle caractéristique d'un système de premier ordre en absence de chauffage, l'équation suivante est valide:



$$T_{in}(t) = T_{ext} + (T_{in_0} - T_{ext})e^{-t/\tau} \quad \dots\text{Pour une température extérieure constante}$$

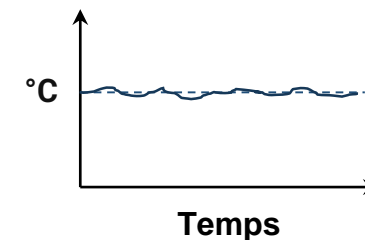
John, C., Vallianos, C., Candanedo, J., Athienitis, A.K. (2018), "Estimating time constants for over 10,000 residential buildings in North America: towards a statistical characterization of thermal dynamics", *7th International Building Physics Conference*, Syracuse (NY), USA, September 23-26.



# SÉLECTION DES PÉRIODES D'ANALYSE

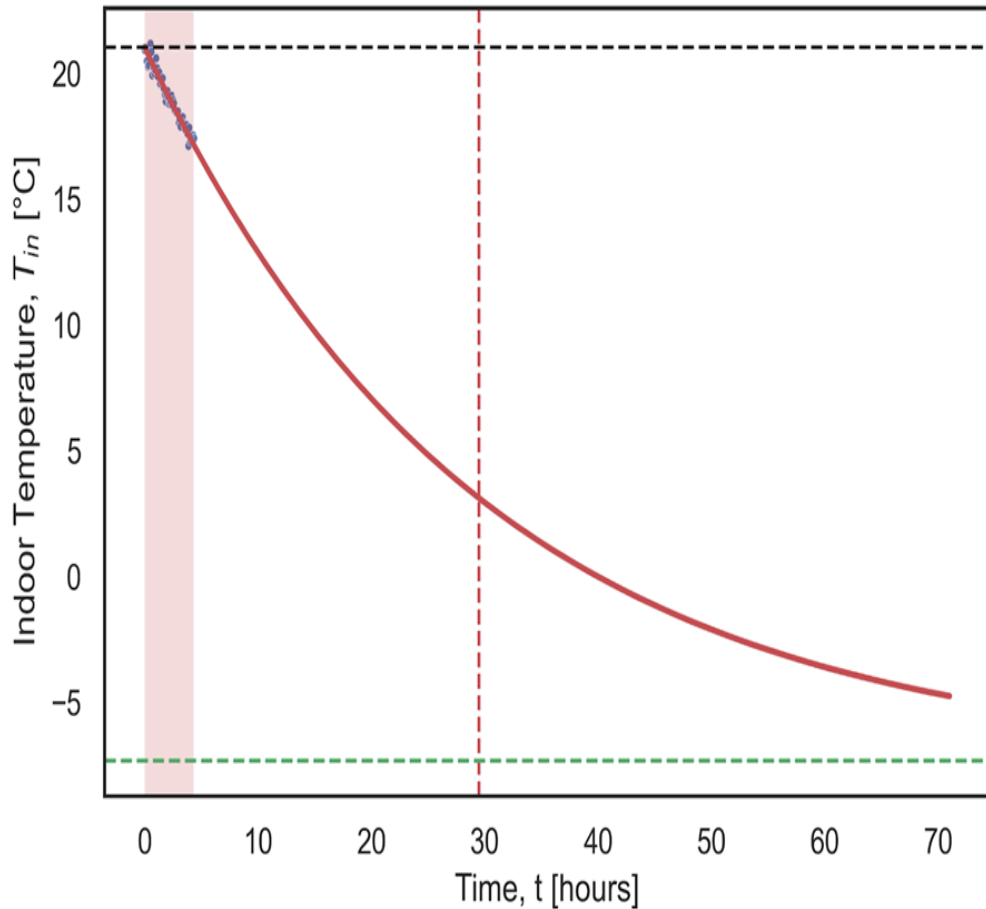
Des périodes d'analyse respectant les critères suivants ont été identifiés pour chaque résidence:

- **Absence de gains de chaleur solaire.** Des périodes entre le coucher et le lever du soleil ont été choisis.
- **Le logement est dans des conditions de température flottante** (c'est-à-dire  $Q_{hvac} = 0$ ). On confirme que le système CVAC a été éteint pendant plus d'une heure.
- **La température extérieure reste relativement constante.** On choisit des périodes  $\Delta T_{ext} \leq 2^{\circ}\text{C}$

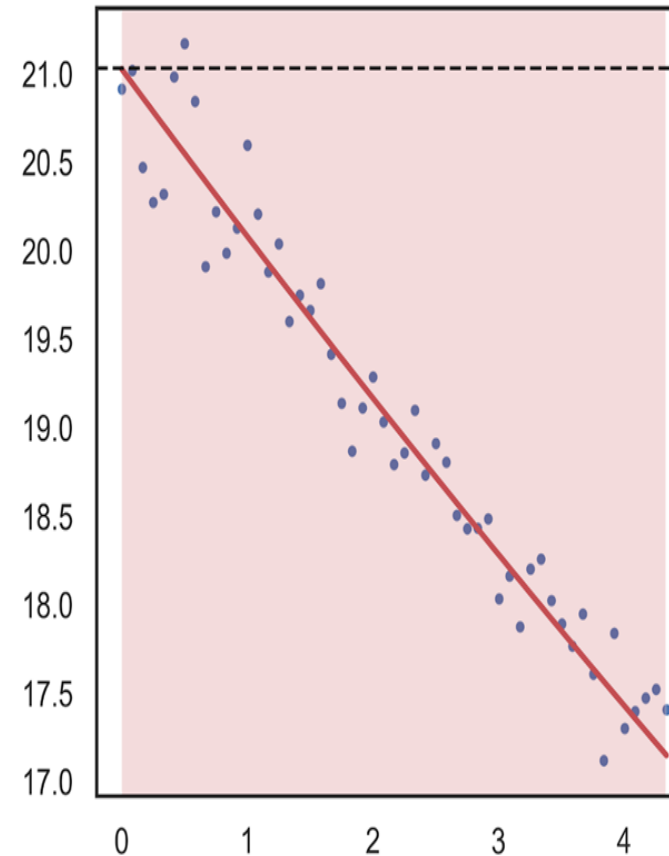


# ANALYSE DE RÉGRESSION POUR LES PÉRIODES IDENTIFIÉES

Example of Best Fit Curve for a Winter Analysis Period



Close-up of Analysis Period



Pour chaque logement  $k$  et pour chaque période  $j$  respectant les critères, on utilise une régression linéaire pour trouver la valeur

$$\tau_{j,k}$$

qui donne la courbe exponentielle

$$T_{in}(t) = T_{ext} + (T_{in_0} - T_{ext})e^{-t/\tau_{j,k}}$$

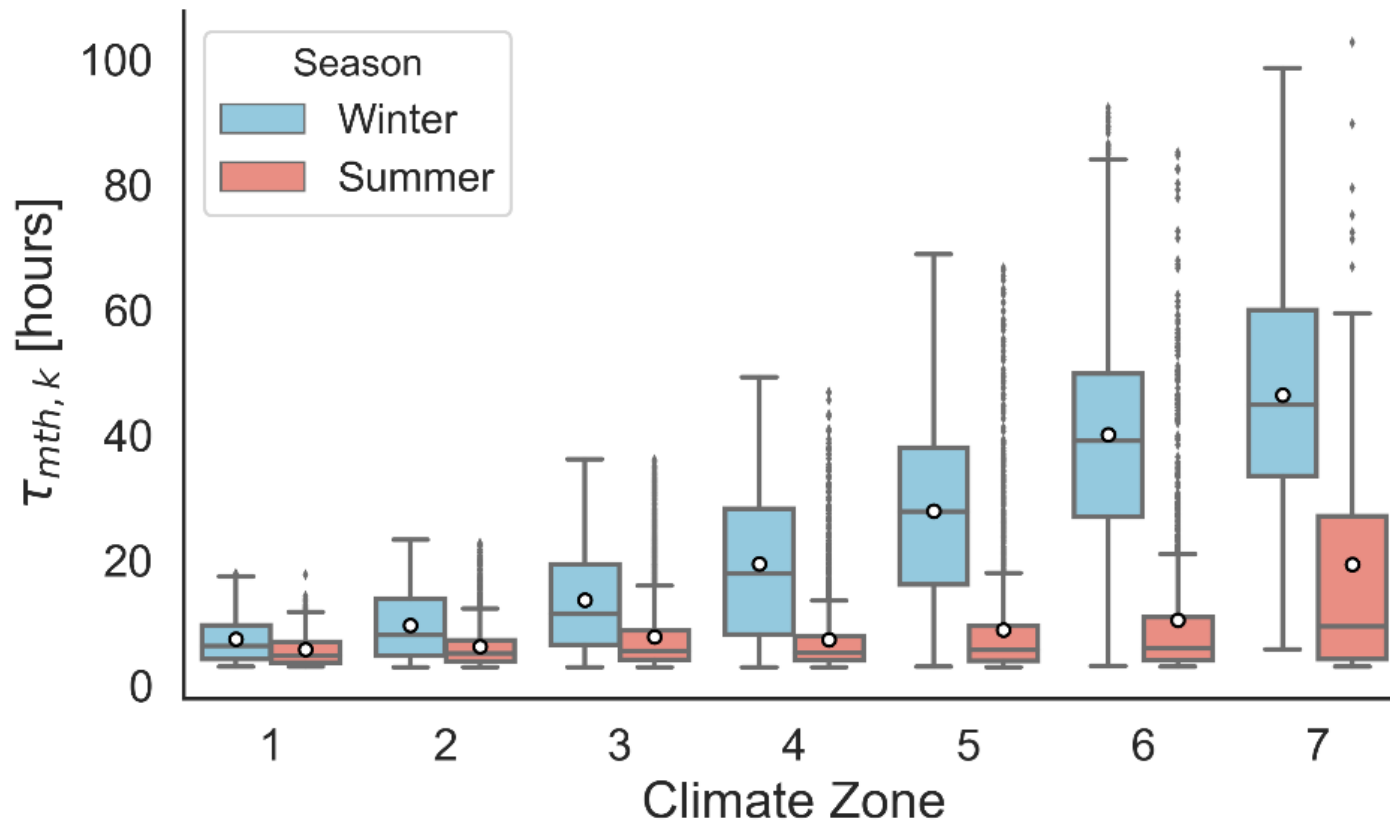
qui correspond le mieux aux données mesurées par le thermostat.

$$k = 1, 2, 3, \dots, 15363$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$



# RÉSULTATS: EFFET DE LA ZONE CLIMATIQUE ET DE LA SAISON



## Hiver

Valeurs moyennes  
entre 7 et 47 h

## Été

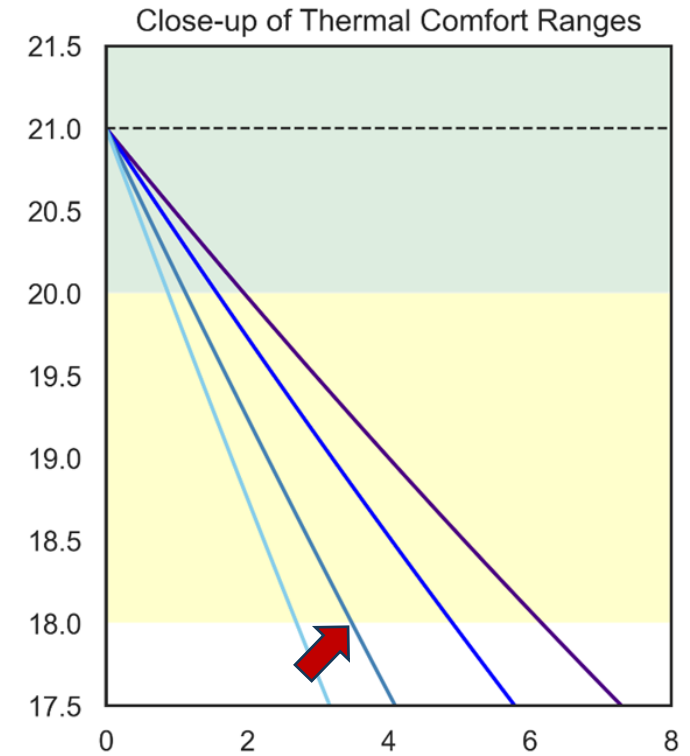
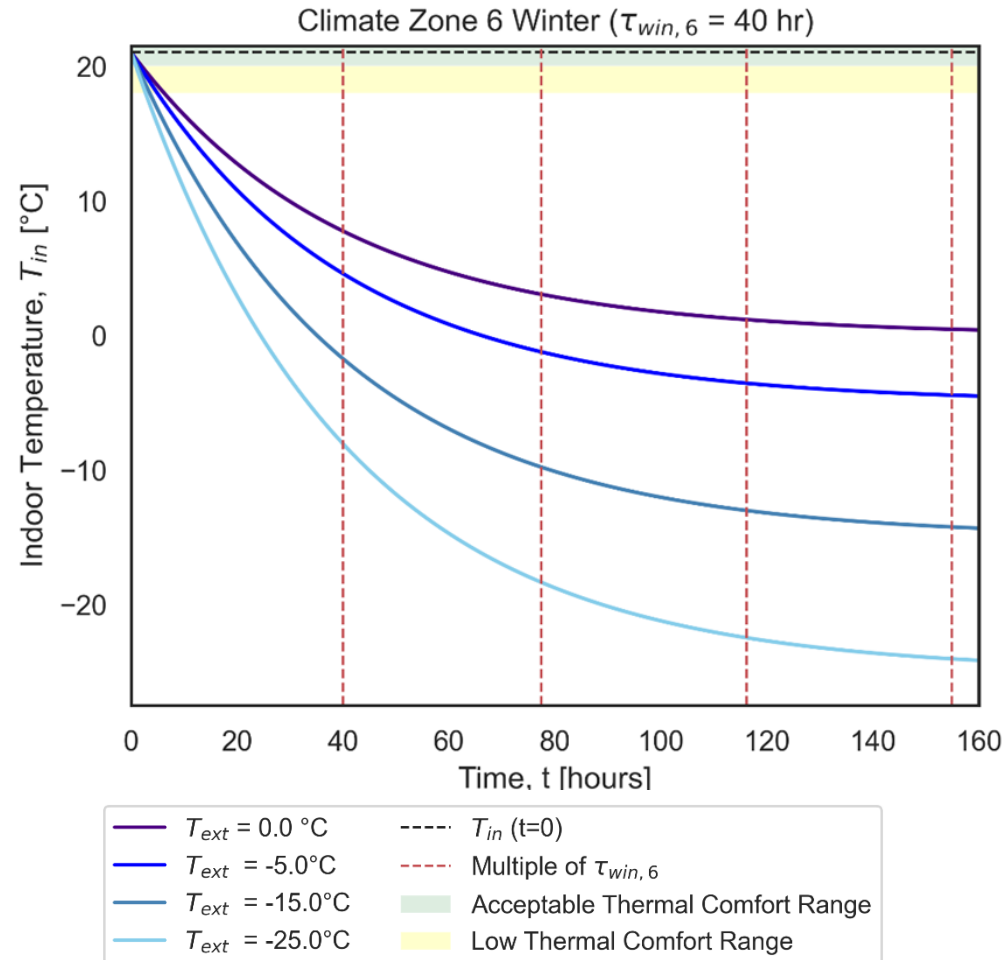
Valeurs moyennes  
entre 6 et 19 h

- La valeur de la constante de temps augmente vers les zones plus froides.
- Ce phénomène reflète des valeurs plus élevées d'isolation thermique et une construction plus "lourde" dans les climats plus froids.

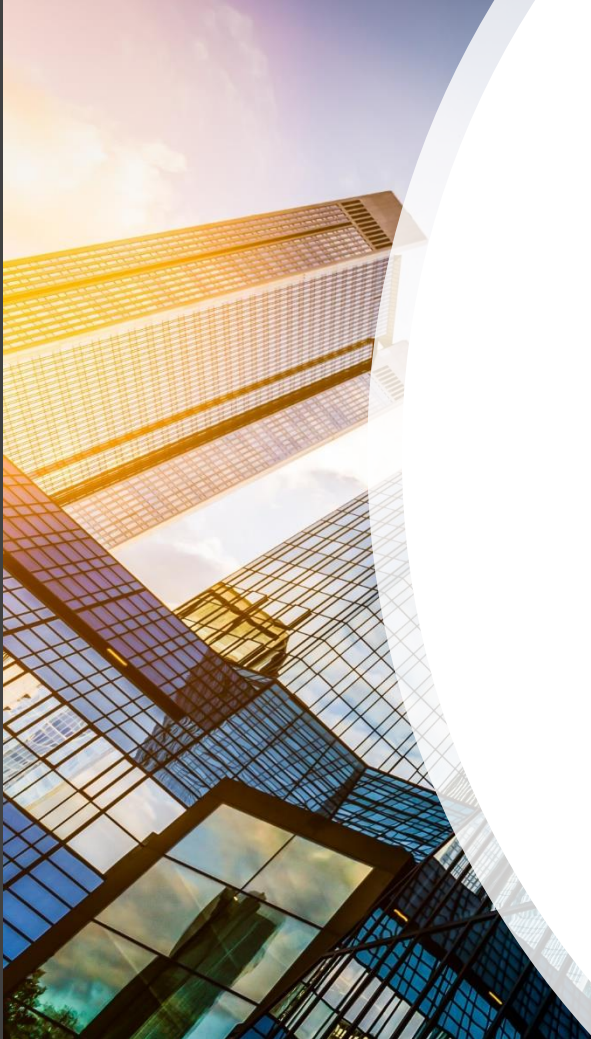
C. John (2021) A Study of Building Thermal Dynamics from Large Data Sets: An Application for Residential Smart Thermostats, *M.Sc. Thesis*, Concordia University.

# APPLICATION: INDICATEUR DE RÉSILIENCE THERMIQUE

- La constante de temps permet d'estimer la résilience du bâtiment en cas d'une coupure de courant.
- Par exemple, lorsque la température extérieure est de  $-15\text{ °C}$ , il faudrait environ 3 h pour ce que la température chute de  $21\text{ °C}$  à  $18\text{ °C}$ .



### 3. CONTRÔLE PRÉDICTIF À GRANDE ÉCHELLE

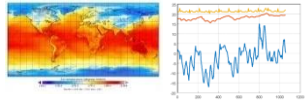


# CONTRÔLE PRÉDICTIF BASÉ SUR LES MODÈLES

## Contrôle prédictif

Données historiques  
(bâtiment, météo)

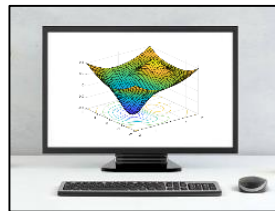
"Perturbations" prévues  
(météo, occupation)



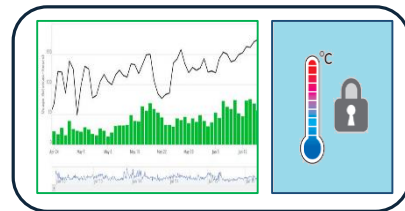
CanMÉTÉ



Modèle du  
bâtiment



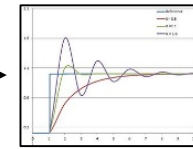
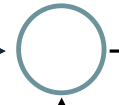
Optimisation



Contrôle optimal  
(points de consigne)

Point de  
consigne

+



Contrôleur



Actuateur



Bâtiment

Perturbations réelles  
(météo, occupants)

Feedback

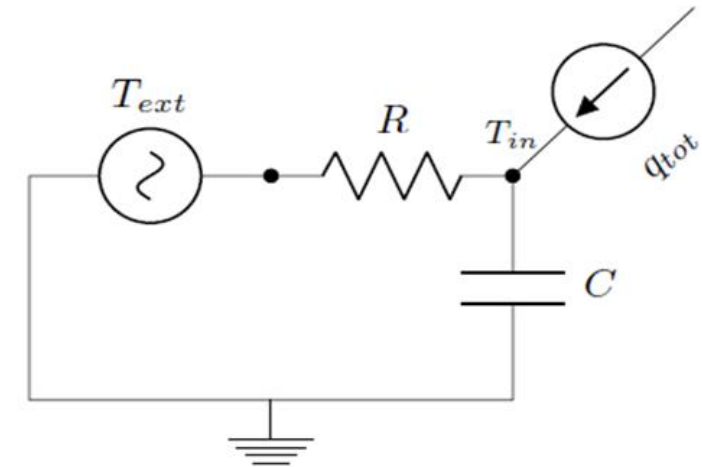
*Un des plus grands obstacles pour l'adoption généralisée du contrôle prédictif est le fait que la création d'un modèle approprié pour le contrôle prend un effort et un temps considérables.*



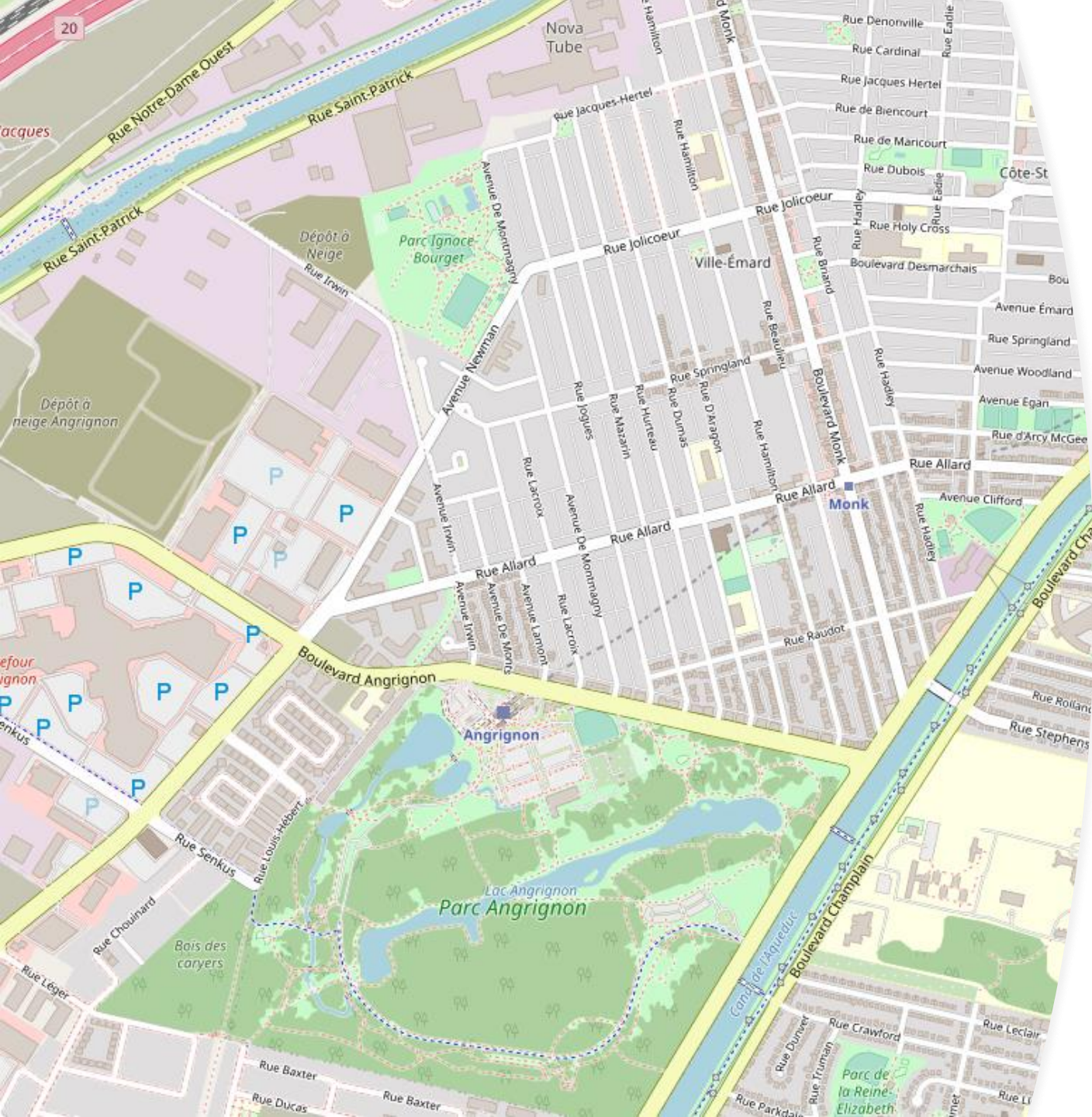
# MODÈLES SIMPLIFIÉS POUR CONTRÔLE PRÉDICTIF

**Objectif** : tirer parti des données et des métadonnées des bâtiments résidentiels pour étudier le potentiel de mise en œuvre du MPC à grande échelle dans les bâtiments résidentiels

- Application à grande échelle du contrôle prédictif dans les maisons équipées de thermostats intelligents.
- **Échantillon initial: 7,500 résidences** au Québec et en Ontario (base de données Ecobee).
- Étant donné que l'on ignore le niveau d'isolation thermique et la capacité installée des systèmes de chauffage, il est impossible de déterminer tous les paramètres du modèle de chaque maison.
- Cependant, il est possible de déterminer **les économies d'énergie par kW de chauffage installé.**



Vallianos, C., Candanedo, J., Athienitis, A.K. (2022), Large-scale deployment of model predictive control in the residential sector: proposed methodology and assessment of aggregated impact, *17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)*, Paphos, Cyprus, November 6-10.

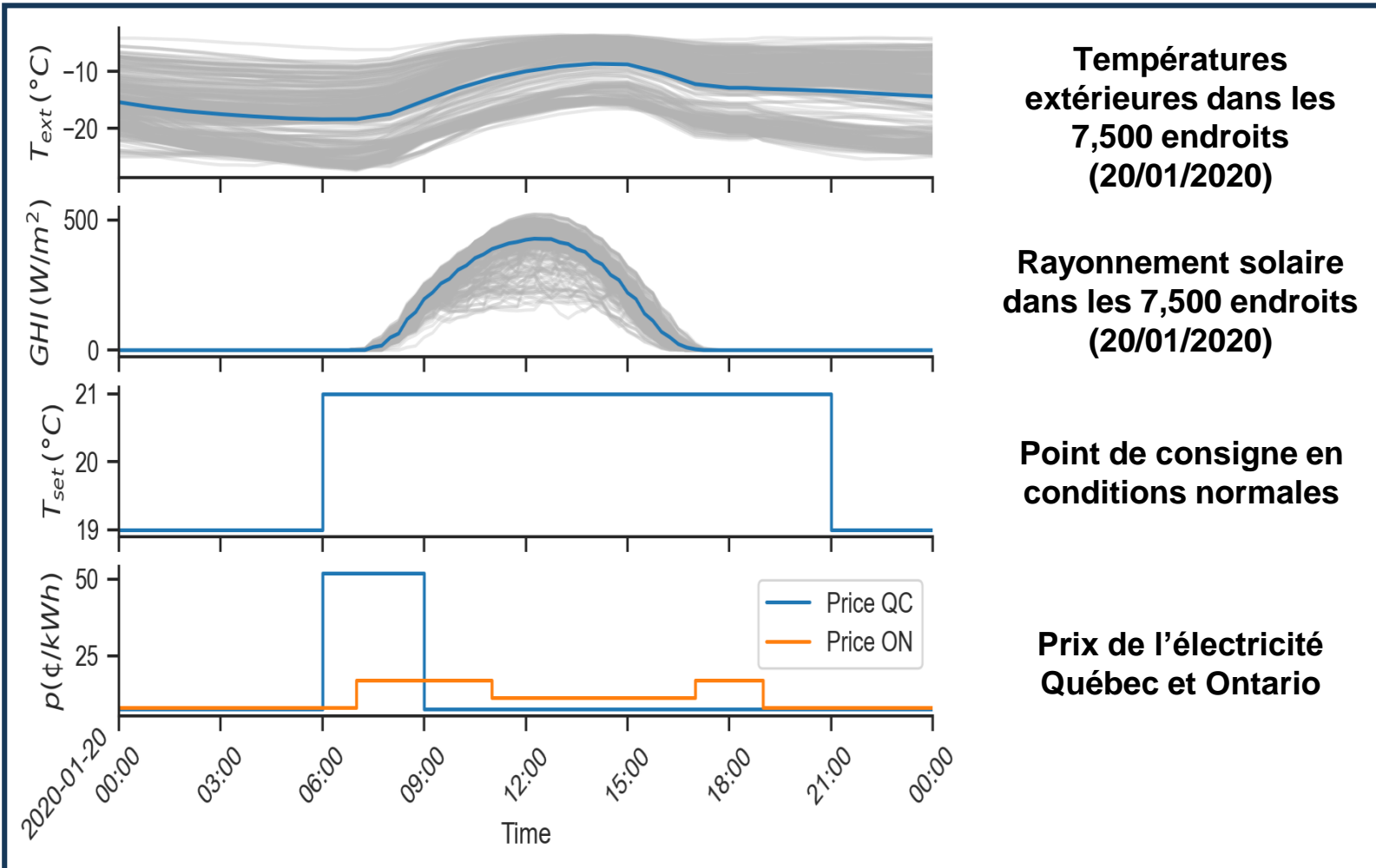


# ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

- En plus des données provenant de la base de données Ecobee, deux autres variables ont été incorporées dans la création des modèles:
  - **Latitude et longitude** estimées (*geopy + Nominatim*)
  - **Rayonnement solaire** (*National Solar Radiation Database, NREL*)



# SCÉNARIO POUR TESTS DE CONTRÔLE



**Températures extérieures** oscillent entre -20 et -10 °C.

**Rayonnement solaire horizontal** a un pic de 430 W/m<sup>2</sup>.

## Coût de l'électricité

### Québec:

- 51,967 ¢/kWh, entre 6h-9h,
- 7,65 ¢/kWh sinon

### Ontario

- 8,2 ¢/kWh, de 19h à 7h
- 11,3 ¢/kWh, de 11h à 17h
- 17 ¢/kWh, de 7h à 11h, et de 17h à 19h

## Contrôle de référence

ON/OFF avec "deadband" de 0.55 °C.

**Résultats présentés** en termes de puissance installée

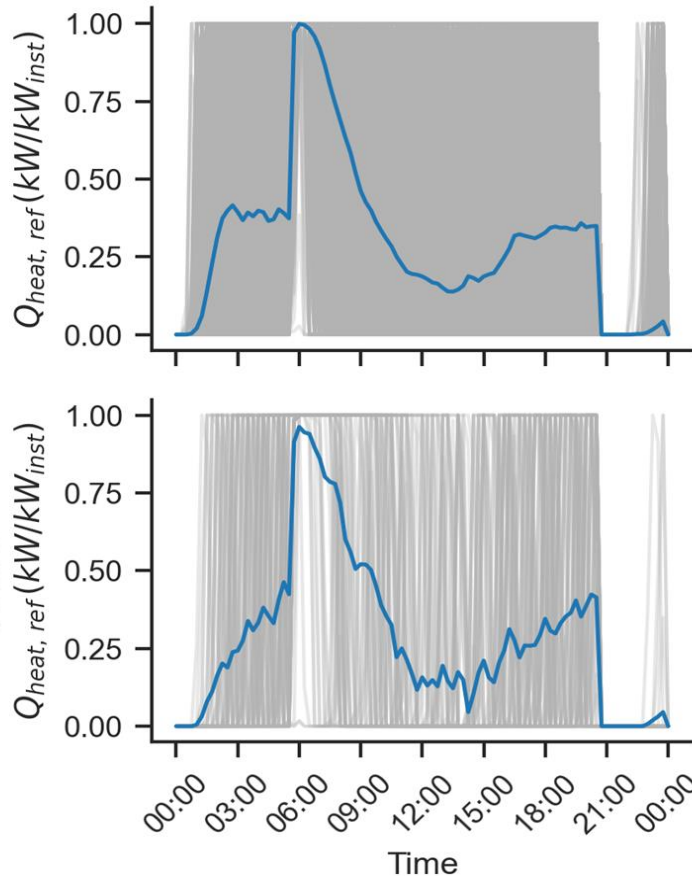


# RÉSULTATS DU CONTRÔLE PRÉDICTIF (1)

Ontario



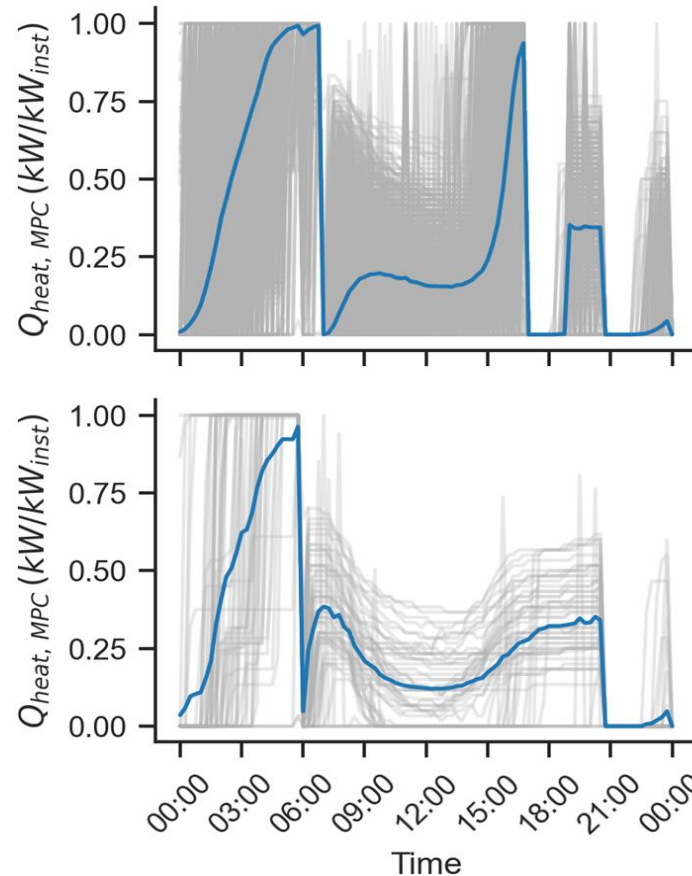
Référence (avant)



Québec



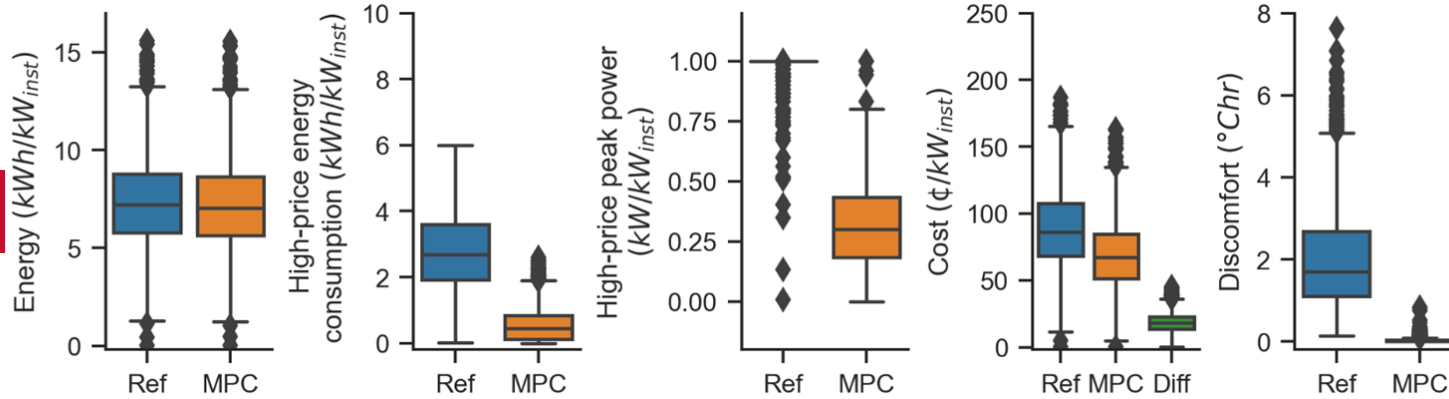
Contrôle prédictif (après)



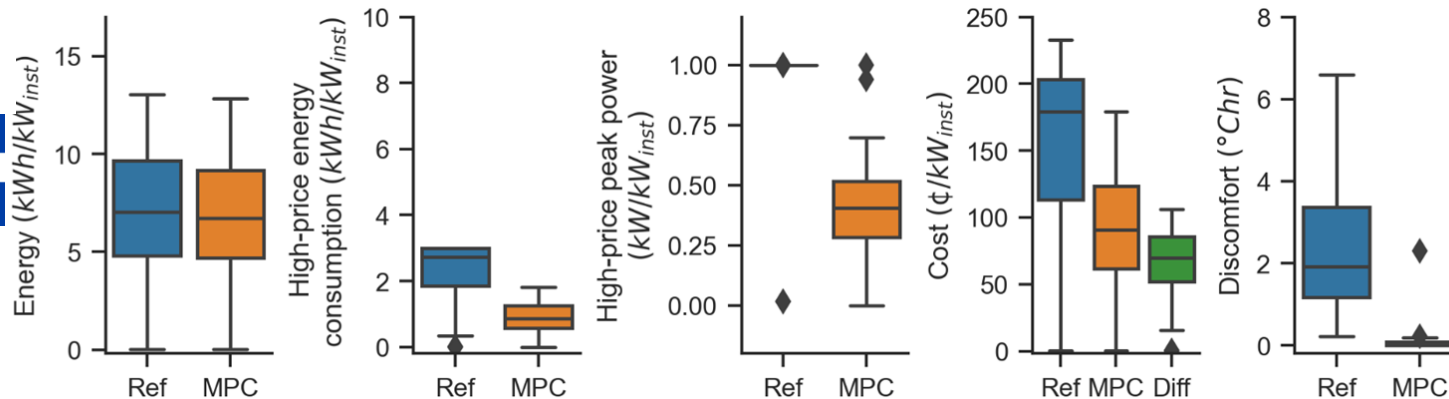
- Après un exercice de calibration pour garantir la fiabilité des modèles, on obtient:
  - **1,588** maisons en Ontario
  - **94** maisons au Québec.
- Le contrôle prédictif réduit de façon significative **l'appel de puissance pendant les heures critiques.**
- Par contre, **le problème est déplacé vers d'autres périodes.**

# RÉSULTATS DU CONTRÔLE PRÉDICTIF (2)

Ontario



Québec



## Énergie

- La consommation de chauffage quotidienne est similaire pour le MPC et le cas de référence

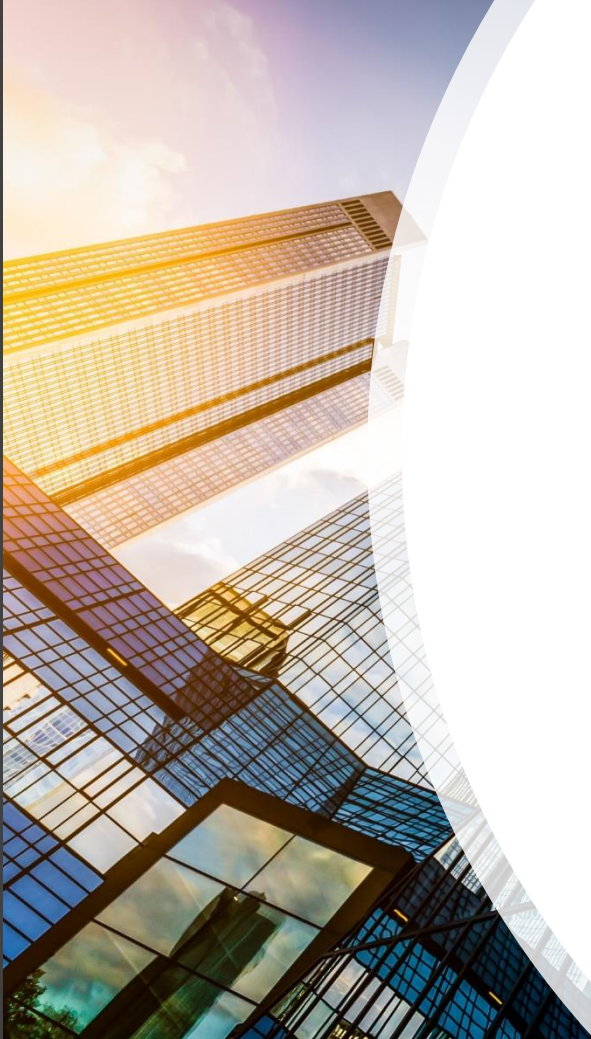
## Pendant les périodes critiques

- Réduction de l'appel de puissance de 0,3 kW/kW<sub>inst</sub>
- Réduction de coût de 21% en Ontario et de 42% au Québec

## Exemple

- En supposant, dans une maison avec une puissance de chauffage de 12 kW<sub>e</sub>, cela correspond *par jour* à des économies:
  - \$2,28 en Ontario
  - \$7,92 au Québec

# REMARQUES FINALES



# QUELQUES PROJETS DE CONTRÔLE AVANCÉ À CANMETÉNERGIE



**Centre CanmetÉNERGIE à Varennes (QC)**  
Chaudières électrique et au gaz naturel  
Réduction de la consommation de gaz de 20%



**École, région de Montréal (QC)**  
Chaudières électrique et au gaz naturel  
Réduction de la consommation de gaz de 30%



**École, région de Montréal (QC)**  
Pompes à chaleur, plancher radiant, stockage d'énergie  
Réduction de la pointe électrique de 10%



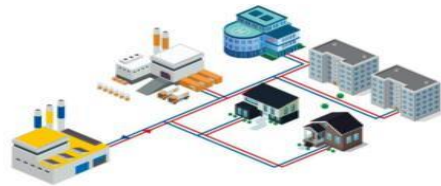
**Indoor Air Research Laboratory, Ottawa (ON)**  
Chauffage électrique, panneaux PV, batteries  
Réduction des coûts d'énergie de 10%



**Bâtiment commercial, Montréal (QC)**  
Plinthes électriques et refroidisseurs centraux  
Réduction de la consommation d'énergie (en cours)



**Bâtiment institutionnel, St-Hubert (QC)**  
Chaudières électrique et au gaz naturel  
Réduction de la consommation de gaz de 51%



**Réseaux de partage d'énergie (QC, ON)**  
Chaudières au gaz naturel  
Réduction de la consommation de gaz (en cours)



**Communauté solaire de Drake Landing (AB)**  
Capteurs solaires, stockage thermique, chaudière au gaz  
Réduction de la consommation d'énergie primaire de 30%



# ANNEXE 81 – « DATA-DRIVEN SMART BUILDINGS »

## EBC Annex 81 – Bâtiments intelligents basés sur les données

- Initiative sous l'égide de *Mission Innovation* (un projet de collaboration du G20)
- Comment tirer parti de l'abondance de données pour fournir des solutions pratiques pour améliorer le fonctionnement des bâtiments.
- L'utilisation des « données » dans l'exploitation des bâtiments est un changement de paradigme.

## Sous-tâches

- A. Plateformes de données
- B. Contrôle prédictif
- C. Applications et services (FDD, interaction réseau-bâtiments)
- D. Cas d'études

## Échéancier

- 1 an de préparation (2019-2020);
- 3 années de recherche (2020-2023);
- 1 an pour rapports finaux (2023-2024)

## Travaux en cours

- Préparation de rapports en langage accessible et de plusieurs publications scientifiques (FDD, plateformes de données, contrôle prédictif)
- Compilation de cas d'étude et des bases de données
- Pour la dernière année: rapport axé sur les politiques

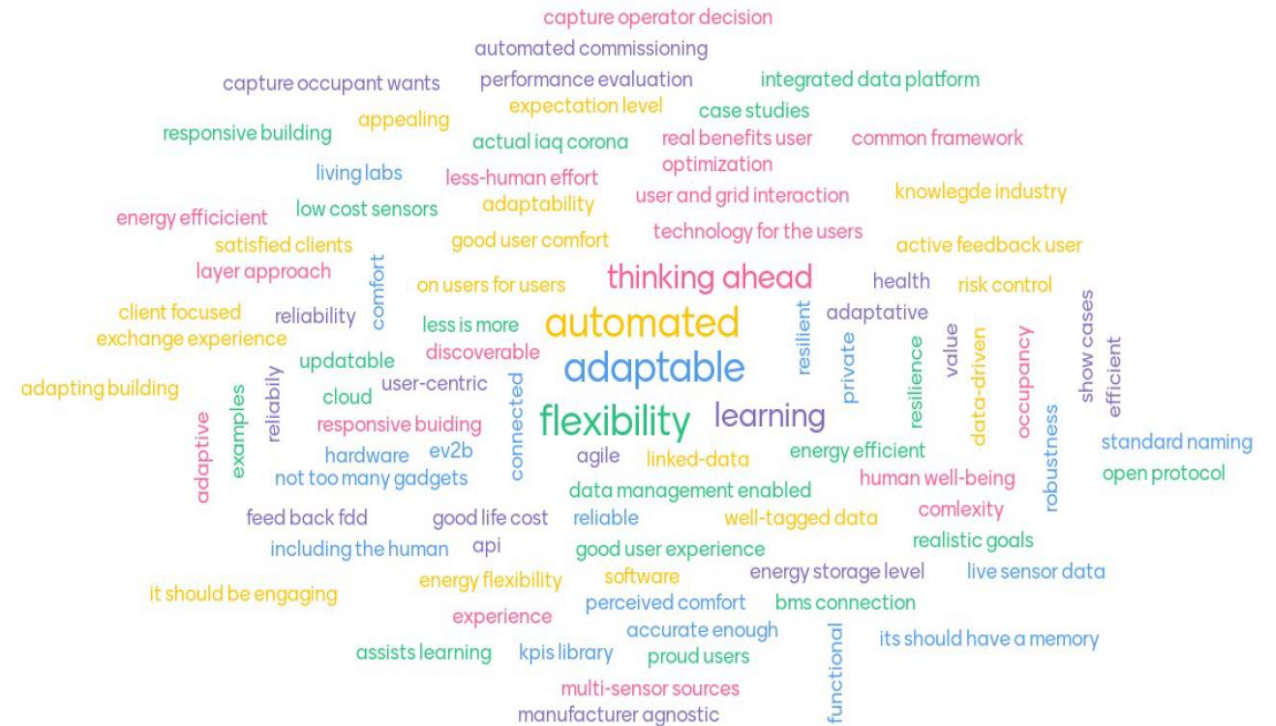
Site: <https://annex81.iea-ebc.org/>

Rencontre à Gothenburg  
(Suède), Octobre 12-14, 2022



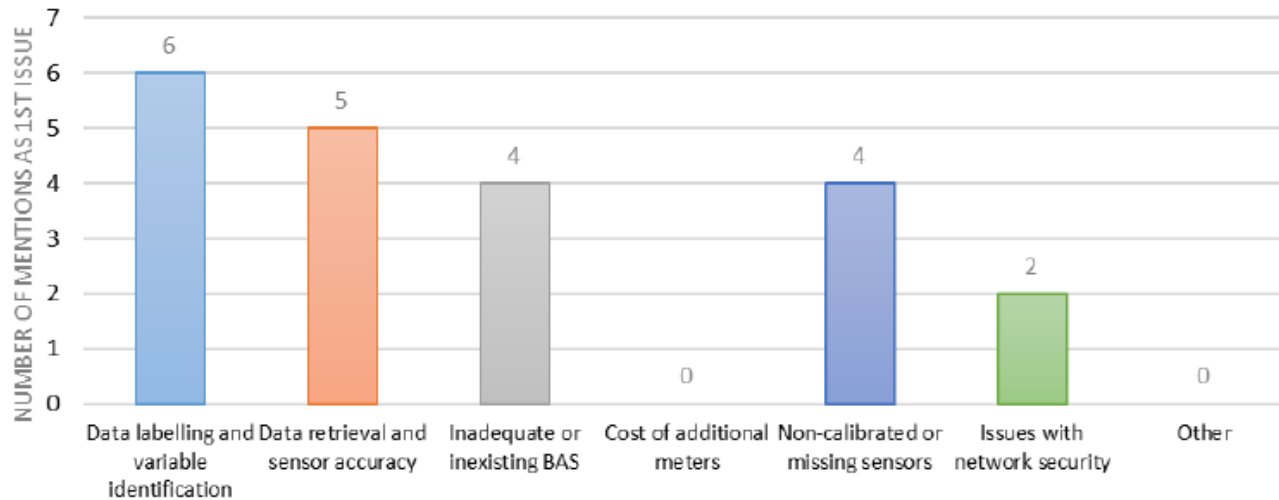
# QU'EST-CE QU'UN BÂTIMENT INTELLIGENT BASÉ SUR LES DONNÉES ?

- Le matériel et les logiciels interagissent en temps quasi réel pour offrir de la valeur
  - Automatisation/contrôle
  - Capacité d'apprentissage et de prédiction
- Le bâtiment a des "tuyaux de données" et gère la qualité des données.
- Applications potentielles:
  - Décarbonation
  - MPC, FDD, Confort adaptatif, IEQ, M&V
- Opportunités émergentes
  - Détection d'occupation et comportement de l'utilisateur
  - IoT et données beaucoup plus volumineuses
  - Coordination de plusieurs bâtiments/systèmes



# RÉSULTATS DU SONDAGE PRÉLIMINAIRE

Mentioned as #1 (i.e. most important issue)





# REMARQUES FINALES

- L'interaction **bâtiment-réseau** est un moteur majeur pour les applications de contrôle basé sur les données.
- Rôle important de la **décarbonation du parc immobilier**, l'adoption de **véhicules électriques**, et l'incorporation des systèmes de **stockage** et des **énergies renouvelables** sur site.
- Les données peuvent être utilisées pour évaluer la **flexibilité**, la **résilience** et développer des solutions de **contrôle prédictif**.
- Des **moteurs technologiques clés** incluent la normalisation de l'ontologie du bâtiment, les plates-formes pour faciliter l'accès aux données, et les technologies IoT.
- Bien qu'il reste des obstacles importants à la mise en œuvre, nous ne faisons **qu'effleurer la surface** de ce qui peut être fait avec les données pour l'exploitation des bâtiments.



# REMERCIEMENTS

Les travaux de N. Morovat, H. Vallianos et C. John ont été réalisés sous la codirection de A. Athienitis et J. Candanedo, avec le soutien financier et technique de *la Chaire de recherche industrielle CRSNG-Hydro-Québec en exploitation optimisée et en efficacité énergétique : Vers des bâtiments à haut rendement énergétique*. Nous remercions le soutien du programme Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE) de RNCAN.

Les auteurs sont reconnaissants envers le Laboratoire des Technologies de l'Énergie (Hydro-Québec), Ecobee, Régulvar et du Centre Scolaire de la Seigneurie des Mille Îles (CSSMI). Les commentaires et suggestions de nos collègues de CanmetÉNERGIE à Varennes sont grandement appréciés.



THANK YOU!



QUESTIONS?



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

Canada

# SUIVEZ-NOUS ET CONTACTEZ-NOUS



## **CANMET**

[jose.candanedo@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:jose.candanedo@nrcan-rncan.gc.ca)

[radu.platon@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:radu.platon@nrcan-rncan.gc.ca)

[etienne.saloux@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:etienne.saloux@nrcan-rncan.gc.ca)

## **CONCORDIA**

[navidmorovat@gmail.com](mailto:navidmorovat@gmail.com)

[hvallianos@gmail.com](mailto:hvallianos@gmail.com)

[andreask.athienitis@concordia.ca](mailto:andreask.athienitis@concordia.ca)

[camille.john@mail.concordia.ca](mailto:camille.john@mail.concordia.ca)



1615 boul. Lionel-Boulet  
Varenes (QC) J3X 1P7  
Téléphone: +1.450.652.4621  
[canmetenergy@nrcan.gc.ca](mailto:canmetenergy@nrcan.gc.ca)



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada 

Canada 

© Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of Natural Resources, 2021