

# Développement d'archétypes pour un modèle de parc virtuel québécois : École Primaire et Secondaire

Caractérisation des écoles primaires et secondaires d'un point de vue énergétique et développement des archétypes

Kato Vanroy, Professionnelle de recherche, M.A.Sc.  
Michaël Kummert, professeur titulaire, ing., M.Sc., Ph.D.

Révision : 2024-11-30

Département de Génie Mécanique  
Polytechnique Montréal

michael.kummert@polymtl.ca

**POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL**



# Nomenclature

|              |   |
|--------------|---|
| ASHRAE       | American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers  |
| CEUD         | <i>Comprehensive Energy Use Database</i> (Base de données complète sur la consommation d'énergie de Ressources Naturelles Canada)   |
| CVCA         | Chauffage, ventilation et conditionnement d'air (parfois connu comme CVAC)  |
| CWEC         | <i>Canadian Weather for Energy Calculations</i> , FMCEG en français (voir ci-dessous)   |
| EUI          | <i>Energy Use Intensity</i> , la consommation énergétique spécifique par m <sup>2</sup> de plancher   |
| FMCEG        | Fichiers météorologiques canadiens pour l'énergie et le génie   |
| HQ           | Hydro-Québec  |
| MELCCFP      | Le ministère de l'environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs   |
| RC           | <i>Relative Compacity</i> (compacité relative)  |
| RSI          | Résistance thermique en unités du Système International (m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> )   |
| SHGC         | <i>Solar Heat Gain Coefficient</i> (coefficient de gain de chaleur solaire, CGCS), coefficient sans dimension qui indique la fraction de l'énergie solaire incidente sur une fenêtre qui se retrouve dans le bâtiment |
| U ou U-value | Coefficient de déperditions thermiques (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ), souvent appelé « valeur U » ( <i>U-value</i> en anglais)   |
| UEF          | Unité d'évaluation foncière   |
| WWR          | <i>Window-to-Wall Ratio</i> , rapport entre la superficie de fenestration et la superficie des murs hors-sol de l'enveloppe extérieure du bâtiment  |

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Nomenclature .....  | i  |
| 1. Contexte et objectifs de l'étude.....  | 4  |
| 2. Méthodologie.....  | 5  |
| 2.1. Sources de données et traitement.....  | 5  |
| 2.1.1. Données géospatiales .....   | 5  |
| 2.1.2. Données sur la consommation énergétique.....   | 6  |
| 2.1.3. Données combinées .....  | 6  |
| 2.2. Logiciel de simulation.....  | 6  |
| 3. Détermination des typologies .....   | 7  |
| 3.1. Données utilisées .....  | 7  |
| 3.2. Partitionnement de données.....  | 8  |
| 3.2.1. Partitionnement : géométrie et systèmes CVCA .....   | 8  |
| 3.2.2. Partitionnement : géométrie .....  | 9  |
| 3.3. Traitement manuel .....  | 9  |
| 3.4. Typologies obtenues .....  | 10 |
| 3.4.1. Typologie 1 : École primaire de petite taille, sans ventilation mécanique .....            | 10 |
| 3.4.2. Typologie 2 : École primaire ou secondaire de taille moyenne, ventilée ou non-ventilée.... | 11 |
| 3.4.3. Typologie 3 : École secondaire de grande taille, avec ventilation/climatisation .....      | 12 |
| 3.4.4. Résumé des typologies .....  | 13 |
| 4. Développent des modèles énergétiques .....   | 13 |
| 4.1. Géométrie du bâtiment .....  | 13 |
| 4.1.1. Fenestration .....   | 13 |
| 4.1.2. Géométries finales.....  | 14 |
| 4.1.3. Zones thermiques .....   | 16 |
| 4.2. Propriétés des fenêtres .....  | 16 |
| 4.3. Propriétés des parois opaques.....   | 18 |
| 4.3.1. Propriétés radiatives .....  | 18 |
| 4.3.2. Propriétés thermiques.....   | 18 |
| 4.3.3. Infiltration.....  | 21 |
| 4.4. Système CVCA.....  | 22 |
| 4.4.1. Chauffage des espaces .....  | 23 |
| 4.4.2. Extraction d'air vicié .....   | 23 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.4.3. | Ventilation naturelle.....   | 23 |
| 4.4.4. | Ventilation mécanique : système à volume constant avec recirculation ..... | 24 |
| 4.5.   | Eau chaude.....  | 26 |
| 4.6.   | Gains internes et leurs horaires.....                                      | 26 |
| 4.6.1. | Stratégies d'éclairage naturel .....                                       | 26 |
| 5.     | Résultats : comparaison préliminaire aux données disponibles .....         | 27 |
| 6.     | Discussion et conclusion.....  | 28 |
| 7.     | Références .....   | 29 |

# 1. Contexte et objectifs de l'étude

Dans le cadre des activités en lien avec la transition énergétique, le ministère de l'environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs (MELCCFP) souhaite disposer d'un outil capable d'analyser l'impact de mesures d'efficacité énergétique, de réglementations ou de programmes de subventions sur la consommation d'énergie, la demande de pointe, et les émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'outil en question est un parc virtuel qui sera représentatif des bâtiments commerciaux, institutionnels et résidentiels du Québec. Il sera donc possible, grâce à des simulations et des mesures d'automatisation, de faire des analyses de consommation énergétique et d'appel de puissance.

L'outil sera basé sur des modèles de bâtiments représentatifs d'une certaine typologie d'usage, par exemple une école, un restaurant, un bâtiment multi-résidentiel. Ces modèles représentatifs, ou archétypes, représenteront dans l'outil de parc virtuel l'ensemble des bâtiments correspondant à la typologie d'usage ciblée. Les archétypes incluront la géométrie du bâtiment, ses caractéristiques d'usage (horaires et densités d'occupation), les propriétés thermiques de l'enveloppe, ainsi que le type et les caractéristiques des systèmes de chauffage, ventilation, et conditionnement d'air (CVCA). Le nombre d'archétypes nécessaires pour représenter une typologie fait partie des questions de recherche du projet.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de ce projet plus large de développement d'archétypes. Elle présente une exploration des méthodologies à appliquer dans le développement des archétypes et le développement des modèles énergétiques pour les écoles primaires et secondaires. Celles-ci seront traitées ensemble vu leur ressemblance sur certains aspects des bâtiments.

Les objectifs spécifiques de l'étude étaient de déterminer le nombre d'archétypes requis pour représenter les écoles primaires et secondaires et d'établir des typologies pour chacun de ces archétypes. Après l'obtention des informations sur les typologies, les archétypes pour chacun sont créés, constitué par une définition d'un modèle thermique de l'enveloppe du bâtiment, des caractéristiques liées à l'occupation et une implémentation du système CVCA.

Le présent rapport accompagne les archétypes développés. Il décrit l'approche suivie, les données utilisées et les paramètres sélectionnés, ainsi qu'une discussion sur les limitations des modèles actuels et les étapes à parcourir pour le développement des futurs archétypes. Des détails sur certaines analyses sont disponible dans un mémoire de maîtrise (Vanroy, 2022).

## 2. Méthodologie

### 2.1. Sources de données et traitement

Plusieurs collections de données couvrant l'ensemble des bâtiments scolaires sont utilisées pour caractériser les bâtiments des écoles primaires et secondaires. Les empreintes au sol des bâtiments ont été obtenues à partir d'une base de données ouvertes publiée par Microsoft sur Github (Microsoft, 2019). Celles-ci ont été croisées avec les unités d'évaluation foncière obtenues via GeoIndex (Université Laval et Bureau de Coopération Interuniversitaire, 2021).

Des données complémentaires répertoriant tous les bâtiments éducatifs avec des informations générales sur les bâtiments, comme la taille et le type de système CVCA, ainsi que la consommation d'énergie pour l'année scolaire 2016-2017, ont également été obtenues (MERN, 2021). Une troisième source importante présente des données d'enquête traitées (Sansregret, 2022) qui fournissent des informations détaillées sur les géométries des bâtiments, les caractéristiques de l'enveloppe, l'occupation et les systèmes CVCA. Cette base de données regroupe les informations recueillies lors de trois études menées par Hydro-Québec entre 1991 et 2007 sur les bâtiments commerciaux et institutionnels.

Il y a également des études menées par Schola.ca (*Schola.ca - Plateforme d'expertise En Architecture Scolaire*, n.d.). Schola a comme objectif de décrire l'état actuel des écoles québécoises et de faire des propositions de rénovations à prioriser pour améliorer les espaces des écoles. Un document important décrit le portrait des écoles primaires (Schola, 2021). On retrouve également sur le site une vidéo qui résume les études en cours pour les écoles secondaires et montre les points principaux du portrait global.

#### 2.1.1. Données géospatiales

Un des objectifs de cette étude est de caractériser les géométries des bâtiments des écoles primaires. L'analyse des géométries des empreintes au sol peut aider à ce but. Deux collections de données géospatiales sont utilisées pour cette étude.

La première base de données, mise à disposition par Microsoft (Microsoft, 2019) contient les géométries des empreintes au sol de tous les bâtiments au Québec. Les géométries mise à disposition par Microsoft sont générées d'une façon automatique à partir des images aériennes et ne contiennent aucune autre information que la forme de l'empreinte au sol du bâtiment et sa géolocalisation. Il n'y a donc pas d'information supplémentaire comme l'usage du bâtiment.

La deuxième base de données contient les Unités d'évaluation foncière (UEF) de tous les terrains au Québec en 2019 (Université Laval et Bureau de Coopération Interuniversitaire, 2021). Les UEF donnent information sur les utilisations principales des terrains. Un code qui indique le « type d'utilisation » nous permet de sélectionner des terrains avec des écoles primaires.

Afin de combiner les deux bases de données, toutes les empreintes au sol dont le centroïde tombe dans une UEF identifié comme établissement scolaire sont sélectionnées comme des empreintes au sol des bâtiments scolaires.

Les UEF sont utilisées premièrement dans le but d'identifier les bâtiments des *écoles primaires et secondaires*, et l'empreinte au sol qui est y associé. La base de données contient également des informations supplémentaires sur les propriétés des bâtiments qui se trouvent sur les terrains, comme le nombre d'étages et l'année de construction.

### 2.1.2. Données sur la consommation énergétique

Une liste a été fournie avec les consommations énergétiques de l'année 2016-2017 de tous les bâtiments scolaires gérés par les commissions scolaires au Québec (maternelle, primaire et secondaire) (MERN, 2021). La liste contient également des informations sur la taille des bâtiments et un code de classification qui indique la source d'énergie principale pour le chauffage des espaces, le type de système CVCA, et une indication des usages énergivores dans le bâtiment, par exemple une piscine.

Cette liste d'informations ne donne aucune indication sur le type d'école (primaire, secondaire, ou mixte). Les seules informations qui permettent d'identifier l'école exactement sont son nom et son adresse. L'utilisation de ces données pour informer nos archétypes d'une façon détaillée nécessite de créer un lien entre les informations dans ce document à une source de données qui indique *le type d'école* du bâtiment concerné. Ce traitement est décrit dans la section suivante.

### 2.1.3. Données combinées

Les données géospatiales et la collection des données de consommation présentent chacune des informations utiles. Les deux bases de données comprennent les adresses des bâtiments, ce qui permet de lier les bases de données.

Pour faire le lien entre les adresses dans les deux bases de données différentes, il faut tenir compte des différences (parfois subtiles) dans la notation de l'adresse : les préfixes des rues, les noms des rues, l'utilisation d'abréviations, la possibilité d'avoir plusieurs numéros civiques liés à un même terrain, etc. Le processus de lier les adresses a été facilité par l'utilisation d'un outil de traitement de bases de données (Linacre et al., 2022). Nous avons obtenu un lien entre les bases de données pour identifier le type d'école pour 70 % des écoles dans la base de données du MERN.

Après avoir établi ce lien, nous sommes en mesure de distinguer la consommation énergétique et les systèmes CVCA pour les différents types d'écoles. La combinaison de ces bases de données permettrait aussi de faire des analyses plus détaillées sur la région où se trouve le bâtiment à la consommation énergétique. Ces analyses ne sont pas encore effectuées dans la présente étude, mais elles représentent une piste intéressante pour les prochaines étapes.

## 2.2. Logiciel de simulation

Le logiciel utilisé pour définir les modèles énergétiques sont SketchUpPro v23.1.329 pour définir la géométrie du bâtiment et OpenStudio Application v 1.7.1 (qui utilise OpenStudio SDK v.3.7.0) pour définir tous les autres aspects du modèle. OpenStudio utilise EnergyPlus (v.23.2) comme moteur de modélisation.

### 3. Détermination des typologies

La première étape de l'étude était d'établir le nombre d'archétypes à développer nécessaire pour représenter l'ensemble des bâtiments des écoles primaires et secondaires. Afin de déterminer les typologies les plus représentatifs, une analyse avec partitionnement de données (*Data Clustering* en anglais) est effectuée. L'objectif est de regrouper des bâtiments avec caractéristiques communes. Cette analyse est complémentée par un traitement manuel pour obtenir les typologies finales.

Dans l'analyse, les écoles primaires et secondaires restent groupées. Ceci permet de se concentrer sur les caractéristiques principales des bâtiments, sans faire intervenir des facteurs moins pertinents dans la décision. Après l'analyse, une réflexion est faite sur les résultats obtenus pour s'assurer que cette approche est justifiée.

La géométrie est un premier aspect qui est à inclure dans cette analyse. En plus, dans l'étude précédente (Vanroy & Kummert, 2023a) nous avons indiqué qu'il y a un lien entre le système CVCA utilisé et l'intensité énergétique d'une école. Il est donc important d'identifier les types de systèmes CVCA dominants et les types d'écoles auxquels ils sont associés. Ce sont donc la géométrie du bâtiment et le type du système CVCA qui seront utilisés dans la classification.

Dans les sections suivantes, le traitement avec partitionnement des données est présenté. Les résultats obtenus sont discutés ainsi et le traitement manuel qui a été nécessaire est décrit.

#### 3.1. Données utilisées

Les géométries utilisées sont les mêmes que pour l'étude précédente. Pour cette étude, les écoles primaires et secondaires ont été regroupées. Il est important de noter que ce traitement utilise le sous-ensemble des données géométriques, vu qu'on utilise la base de données combinée, tel que discuté dans la section 2.1.3.

Pour l'utilisation dans le partitionnement des données, la géométrie doit être caractérisée selon des variables numériques. Les variables disponibles pour cette analyse sont la superficie de l'empreinte au sol, le nombre d'étages et la compacité relative (*Relative Compactness* en anglais ou « RC »). Il est possible de calculer la superficie plancher totale à partir de la superficie de l'empreinte au sol et le nombre d'étages du bâtiment.

La définition de la compacité relative est comme suit. La forme du bâtiment est comparée à une référence qui est la forme la plus compacte, qu'on pourrait avoir avec le même volume que le bâtiment, dans ce cas une sphère. La compacité relative *RC* est un des paramètres-clé influençant la consommation énergétique d'un bâtiment (AlAnzi et al., 2009).

$$RC = \frac{(V/A_{env})_{bâtiment}}{(V/A_{env})_{ref}}$$



Dans l'étude précédente, nous avons aussi indiqué qu'il y a un lien entre le système CVCA utilisé et l'intensité énergétique d'une école. Il est donc important d'identifier les types de systèmes CVCA dominants et comment ils seront représentés dans les archétypes.

## 3.2. Partitionnement de données

La méthodologie utilisée pour le traitement avec partitionnement de données est la même que celle utilisée lors de la première étape du projet. On pourra se référer au précédent rapport pour les détails sur cette méthodologie (Vanroy & Kummert, 2023b).

L'objectif du partitionnement de données est d'identifier les typologies prédominantes qui permettent de représenter l'opération d'une école typique. Ce traitement permet en théorie de faire le processus de classification au complet. Dans ce cas, il faut tenir compte de tous les paramètres qui exercent une influence significative sur la consommation énergétique du bâtiment, tout en gardant en tête les limitations des données auxquelles nous avons accès.

### 3.2.1. Partitionnement : géométrie et systèmes CVCA

Une première analyse est faite en utilisant la superficie de l'empreinte au sol du bâtiment, le nombre d'étages, la compacité relative et les 3 indices associés au système CVCA : la source d'énergie principale utilisée pour le chauffage, le type de système de ventilation (ventilé ou non, climatisé) et la présence des espaces avec un taux élevé de ventilation.

On arrive à 8 *clusters* (groupes) qui vont de « petites écoles avec une superficie plancher d'environ 2000 m<sup>2</sup> sans ventilation mécanique », à des « grandes écoles de 16 000 m<sup>2</sup> avec un système de ventilation avec climatisation et des locaux avec des taux de ventilation élevés ». Ces « locaux avec des taux de ventilation élevés » correspondent par exemple à des cafétérias avec cuisine, des laboratoires ou des ateliers de travail, etc. On retrouve plusieurs *clusters* avec des propriétés qui sont très similaires, mais des tentatives pour réduire le nombre de groupes retenus ont échoué parce qu'elles conduisaient à la perte de groupes jugés importants.

Une analyse simple qui suit l'approche utilisée pour l'étude précédente résulte dans une explosion du nombre de typologies nécessaires si on veut s'assurer de ne pas perdre des typologies clés. Un processus qui traite une gamme de variables de nature différent nécessite un travail laborieux pour bien normaliser les données et s'assurer que les variables ont des poids appropriés dans l'analyse. Vu la particularité des données, la décision a été prise de se limiter à l'aspect géométrique dans le partitionnement des données et de passer à un traitement manuel pour attribuer *a posteriori* les systèmes CVCA appropriés aux typologies géométriques trouvées.

Les résultats de cette première analyse sont utilisés pour s'informer des tendances principales dans les géométries des écoles et leur systèmes CVCA associés.

### 3.2.2. Partitionnement : géométrie

L'analyse qui repose uniquement sur des paramètres géométriques utilise la superficie plancher totale du bâtiment et la compacité relative comme les paramètres de partitionnement.

Ces deux variables encapsulent l'essentiel de la géométrie : sa taille et la compacité de sa forme.

On arrive à 4 clusters qui sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Les résultats du partitionnement de données sur la géométrie des écoles

| Cluster | Compacité Relative [-] | Superficie Plancher [m <sup>2</sup> ] |
|---------|------------------------|---------------------------------------|
| 1       | 0.62                   | 2000                                  |
| 2       | 0.50                   | 3300                                  |
| 3       | 0.42                   | 6000                                  |
| 4       | 0.30                   | 15 000                                |

### 3.3. Traitement manuel

Après avoir obtenu les « clusters » géométriques, on analyse les autres caractéristiques qui y sont associées.

Le premier cluster comprend principalement des écoles primaires avec de formes rectangulaires qui sont relativement compacts, avec des bâtiments sans ventilation.

Le deuxième et troisième cluster représentent des écoles de taille moyenne, avec typiquement des formes moins compactes. On y retrouve des écoles primaires et des écoles secondaires qui peuvent être ventilées ou non.

Le quatrième cluster comprend les grandes écoles avec principalement des formes complexes et des systèmes de ventilation mécanique.

Le traitement proposé place certains bâtiments dans un autre groupe si une ou plusieurs caractéristiques clés ne correspondent pas aux caractéristiques principales de leur *cluster*. Ceci est fait pour obtenir des groupes de bâtiments avec des caractéristiques assez similaires pour pouvoir leur attribuer une typologie. Les caractéristiques moyennes de chaque typologie forment la base du développement des archétypes. Le traitement est comme suit :

1. On enlève les écoles secondaires du premier *cluster* et on établit l'archétype « **École primaire de petite taille, sans ventilation mécanique** »
2. On regroupe le deuxième et troisième *cluster* pour obtenir un archétype de taille moyenne. On y ajoute les écoles secondaires qui étaient retirées du premier *cluster*. On obtient l'archétype « **École primaire ou secondaire de taille moyenne qui peut être ventilée ou non-ventilée** »

- Le quatrième cluster comprend principalement des écoles secondaires. Un nombre d'écoles primaires se sont retrouvées groupées avec ce *cluster* à cause des caractéristiques géométriques particulières : des bâtiments petits mais très « non-compacts ». Ce sont surtout des écoles primaires avec des erreurs dans les données (notamment le nombre d'étages). On les enlève temporairement de l'analyse. Les bâtiments qui restent dans le cluster représentent l'archétype « **École secondaire de grande taille avec ventilation/climatisation** ».

### 3.4. Typologies obtenues

De l'analyse précédente, on arrive à 3 typologies géométriques et leurs caractéristiques connexes. Les caractéristiques des bâtiments qui tombent le plus proche du « centroïde » d'un cluster, et seront donc le plus représentatif pour les bâtiments qui sont y classifié, seront les caractéristiques utilisées pour définir les géométries des archétypes. Les sous-sections suivantes montrent les caractéristiques dominantes de chaque typologie.

#### 3.4.1. Typologie 1 : École primaire de petite taille, sans ventilation mécanique

Les écoles de ce type ont en moyenne une superficie plancher totale de 2000 m<sup>2</sup> et ont une forme compacte (RC = 0.61), qui sont des formes rectangulaires. Les empreintes au sol des bâtiments les plus proche du centroïde du groupe (*cluster*) sont montrés dans la Figure 1.

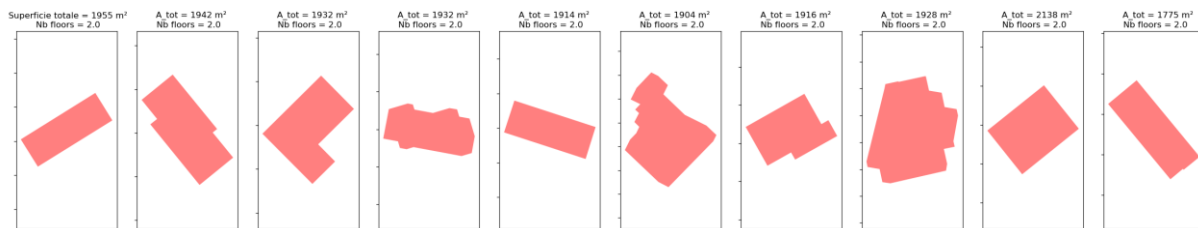


Figure 1 : Les géométries des bâtiments les plus proches du centroïde pour la typologie 1

La Figure 2 montre des exemples de bâtiments de la typologie 1, correspondant aux bâtiments les plus proches du centroïde du *cluster* (groupe).

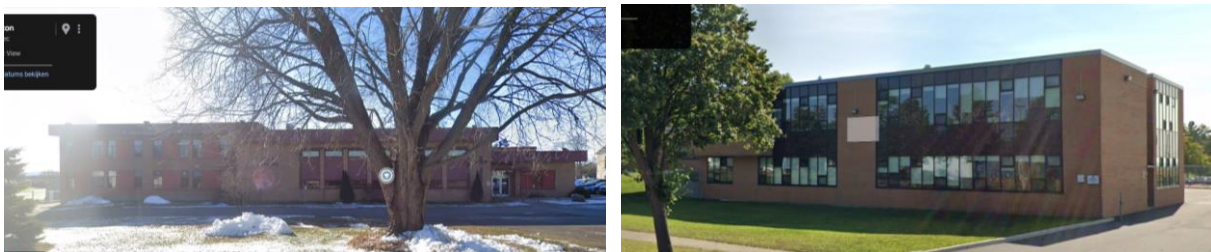


Figure 2 : Exemples de bâtiments de la typologie 1 (Google street view)

La majorité des écoles de cette typologie ont 2 étages (67 %), les autres ont 3 ou 4 étages. Les écoles n'ont typiquement pas de système de ventilation (90 %) et pas d'espaces avec des taux de ventilation très élevées (93 %)

### 3.4.2. Typologie 2 : École primaire ou secondaire de taille moyenne, ventilée ou non-ventilée

Les écoles de ce type ont en moyenne une superficie plancher totale de 3600 m<sup>2</sup> et ont une forme moins compacte (RC = 0.47). Les empreintes au sol des bâtiments qui sont les plus proches du centroïde sont montrées dans la Figure 3. Ces bâtiments ont le plus souvent des formes en « L » ou en « T ».

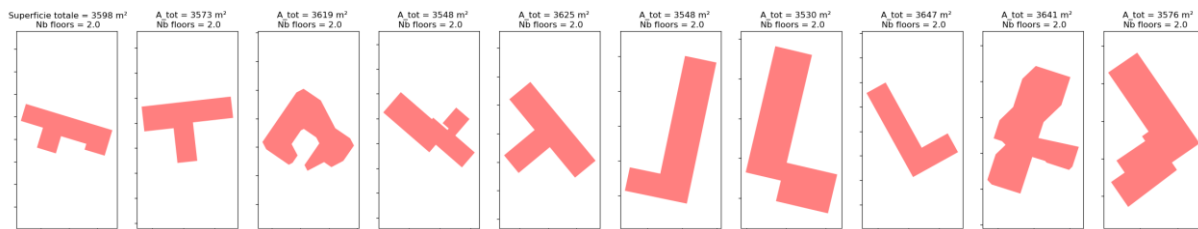


Figure 3 : Les géométries des bâtiments les plus proches du centroïde pour la typologie 2

La Figure 4 montre des exemples d'images des bâtiments proches du centroïde du *cluster* (groupe) correspondant à la typologie 2.



Figure 4 : Exemple d'une empreinte au sol (à gauche) et exemple d'une façade (à droite)  
d'écoles de la typologie 2 (Google street view)

La majorité des écoles de ce typologie ont 2 étages (70 %). Un peu plus que la moitié de ces écoles n'ont pas de système de ventilation (60 %), les autres ont un système de ventilation. La plupart des écoles n'ont pas d'espaces avec des taux de ventilation très élevées (80 %)

### 3.4.3. Typologie 3 : École secondaire de grande taille, avec ventilation/climatisation

Les écoles de ce type ont en moyenne une superficie plancher totale de 24 500 m<sup>2</sup> et ont une forme très non-compacte (RC = 0.30). Les bâtiments qui tombent le plus proche du centroïde sont les suivants, montrés dans la Figure 5. Les formes en soit sont très diverses, mais on y voit souvent plusieurs sections rectangulaires qui sont connectées.

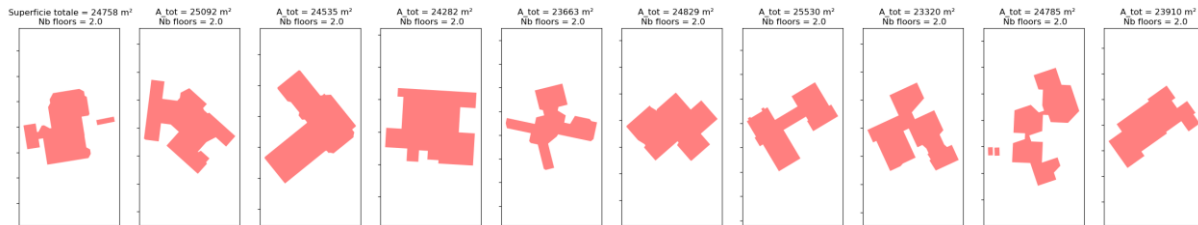


Figure 5 : Les géométries des bâtiments les plus proches du centroïde pour la typologie 3

La Figure 6 montre des exemples d'images des bâtiments proches du centroïde du *cluster* (groupe) correspondant à la typologie 2.



Figure 6 : Exemple d'une empreinte au sol (à gauche) et exemple d'une façade (à droite)  
d'écoles de la typologie 3 (Google street view)

La moitié de ces écoles ont 2 étages, les autres ont 1 ou 3 étages. Il est possible que les données contiennent des erreurs sur le nombre d'étages. Presque tous les écoles de cette typologie ont un système de ventilation (87 %), et à peu près la moitié de celles-ci ont également de la climatisation. Presque toutes les écoles ont des espaces avec des taux de ventilation très élevées (92 %).

3.4.4. Résumé des typologies

Les 3 typologies seront transformées dans les archétypes illustrés dans le Tableau 2. L'archétype 2 aura deux variantes, un sans ventilation mécanique et un avec ventilation mécanique. L'archétype 3 aura un système de ventilation mécanique avec l'option d'activer la climatisation.

Tableau 2 : Illustration des archétypes qui seront développés

| Archétype 1<br>(typologie 1) | Archétype 2<br>(typologie 2) |         | Archétype 3<br>(typologie 3) |
|------------------------------|------------------------------|---------|------------------------------|
| École primaire               | École primaire/secondaire    |         | École secondaire             |
| Non-ventilé                  | Non-ventilé                  | Ventilé | Ventilé (et climatisé)       |

4. Développent des modèles énergétiques

Les sections suivantes donnent d'abord les détails sur les aspects des trois modèles géométriques. La discussion sur les autres caractéristiques sera faite pour l'ensemble des écoles primaires et secondaires, puisqu'elles seront largement les mêmes pour les trois archétypes. Les hypothèses spécifiques à certains archétypes seront spécifiées lorsque nécessaire.

4.1. Géométrie du bâtiment

La géométrie de chaque archétype est un résultat direct de l'analyse des typologies. Les typologies établies dans la section 3 nous donnent non seulement la superficie au sol du bâtiment, mais aussi le nombre d'étages et des exemples des formes typiques. Les géométries des typologies 1 et 2 sont assez homogènes et on peut facilement extraire des dimensions typiques qui composent la forme. Ceci est plus difficile à faire pour la typologie 3, vu la diversité dans les formes. Pour cette typologie on base la géométrie sur un seul bâtiment parmi les 10 présentant les caractéristiques les plus typiques.

En plus du nombre d'étages, nous avons besoin de définir la hauteur de l'étage. Les écoles primaires ont typiquement des hauteurs d'étage ente 2.5 m et 3.5 m (Schola, 2021), et on choisit donc une hauteur « moyenne » de l'étage à 3 m pour les archétypes 1 et 2. Pour la grande école (archétype 3), on suppose une hauteur d'étage de 4 m, ce qui correspond à une hauteur représentative des bâtiments institutionnels de plus grande tailles possédant un système de ventilation.

4.1.1. Fenestration

Étant donné que les écoles construites pendant la période du « boom de l'éducation » privilégiaient l'éclairage naturel et la ventilation naturelle, le niveau de fenestration est élevé. Les sources (Schola, 2021) et (Sansregret, 2022) documentent la superficie des ouvertures en proportion de la superficie plancher du



bâtiment (rapport superficie des fenêtres – superficie de plancher). Ces rapports se situent entre 20 et 25 %. La transformation en pourcentage de fenestration par rapport à la superficie de façade, ou « *window-to-wall ratio* », dépend de la forme du bâtiment. Les écoles documentées dans Schola (Schola, 2021), qui sont uniquement les écoles primaires, correspondent aux formes des archétypes 1 et 2. On peut donc avec confiance transformer la valeur à un pourcentage de fenestration, qui arrive à un niveau de fenestration (*window-to-wall ratio*) de 40 % pour ces géométries.

Nous n’avons pas trouvé de source de données précise pour caractériser les écoles secondaires, qui correspondent à l’archétype 3. Selon les bâtiments centroïdes qui ont été trouvé dans la section 0, le pourcentage de fenestration semble globalement moins élevé. Vu le manque de données, on suppose un pourcentage de fenestration de 20 %.

Le modèle ne prend pas en compte les ombrages provenant des obstructions extérieures ou des dispositifs d’ombrage dans le bâtiment. Les fenêtres sont modélisées d’une façon simplifiée avec un objet EnergyPlus qui représente les propriétés de la fenêtre au complet : le vitrage et le cadre. La valeur U (coefficient de déperditions thermiques, en  $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ) et le SHGC (coefficient de gain de chaleur solaire, CGCS, adimensionnel) sont donc ajustés pour tenir compte de l’impact du cadre extérieur, des meneaux et des traverses (sous-divisions de cadre).

4.1.2. Géométries finales

Les géométries des archétypes 1, 2 et 3 sont présentées dans la Figure 7, la Figure 8 et la Figure 9 respectivement.

Les caractéristiques principales des géométries sont résumés dans le Tableau 3. On remarque que la superficie plancher totale est plus faible que la superficie plancher totale obtenue dans l’analyse des typologies. Ceci est dû au fait que la superficie plancher considérée dans l’analyse de *clustering* est obtenue par un simple calcul qui prend la superficie au sol du bâtiment et la multiplie par le nombre d’étages. Dans les écoles, il y a souvent des espaces qui couvrent plusieurs étages (par exemple espaces à double hauteur) comme le gymnase, ou une salle polyvalente. Ceci explique la différence pour l’archétype 1 et 2. Dans le cas de l’archétype 3 la différence est plus grande. L’école qui a été modélisée comprend plusieurs sections du bâtiment qui n’ont qu’un seul étage. Seul le « bâtiment principal » a deux vrais étages. C’est souvent le cas pour les grandes écoles, et cela explique l’écart plus grand entre la superficie obtenue dans l’analyse des typologies et la superficie des archétypes.

Tableau 3 : Résumé des caractéristiques des géométries

|  | Archétype 1         | Archétype 2         | Archétype 3                     |
|--|---------------------|---------------------|---------------------------------|
| Superficie plancher  | 1640 m <sup>2</sup> | 3050 m <sup>2</sup> | 17 204 m <sup>2</sup>           |
| Nombre d’étages  | 2                   | 2                   | 2<br>(1 pour certaines parties) |
| Hauteur des étages   | 3 m                 | 3 m                 | 4 m                             |
| Pourcentage de fenestration<br>( <i>window-to-wall ratio</i> ) | 40 %                | 40 %                | 20 %                            |

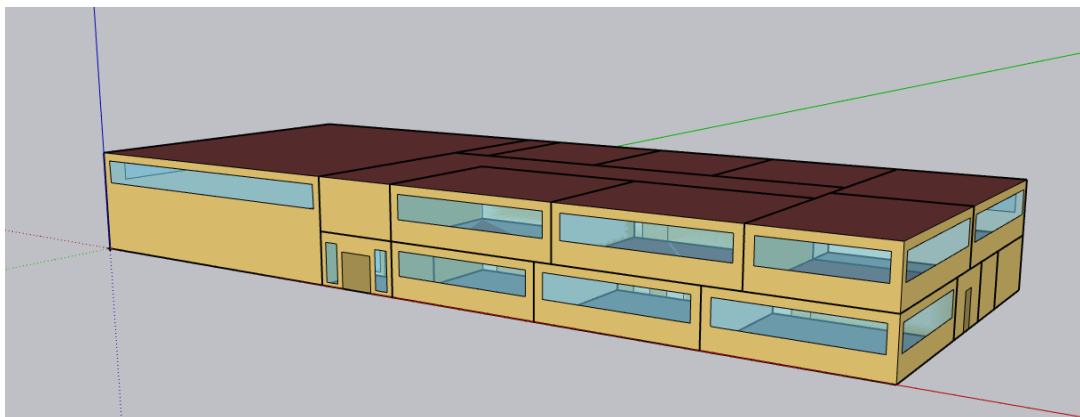


Figure 7 : Géométrie de l'archétype 1

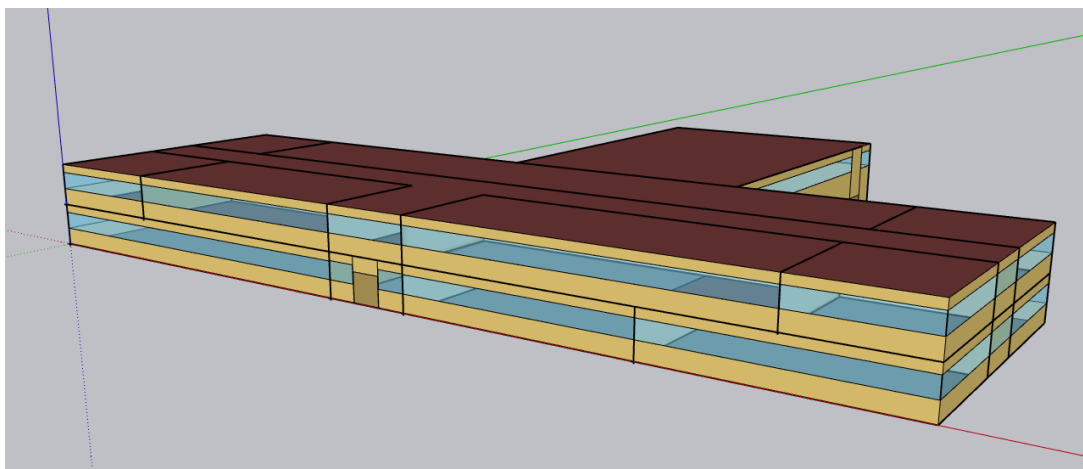


Figure 8 : Géométrie de l'archétype 2

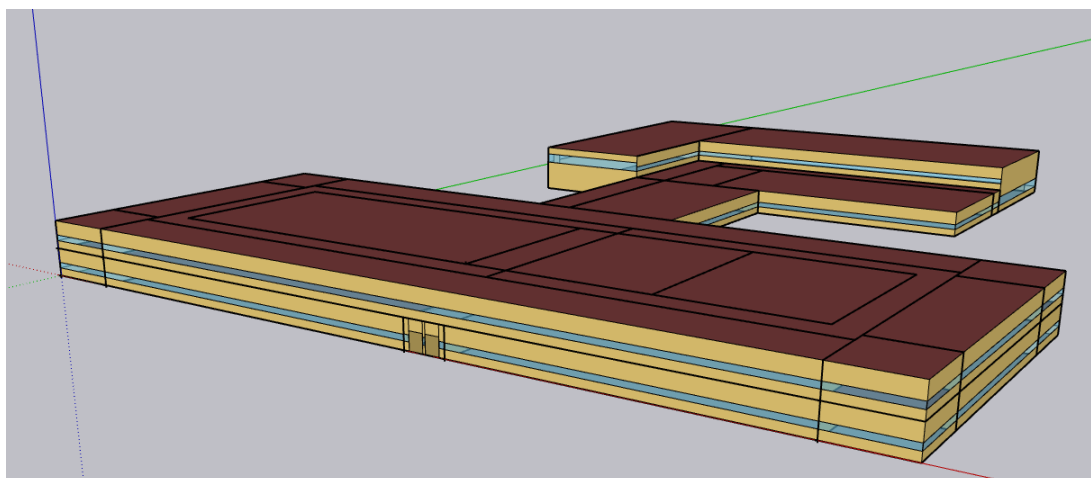


Figure 9 : Géométrie de l'archétype 3



4.1.3. Zones thermiques

Les types d'espaces qui se trouvent dans le bâtiment sont basés sur les informations venant d'enquêtes (Sansregret, 2022). La taille et le placement des zones dans le bâtiment sont basés sur des directives du gouvernement du Québec (DGFE-DES, 2006) et d'études sur l'architecture des écoles (Schola, 2021; Tremblay-Lemieux, 2019).

Afin de simplifier le modèle énergétique, il est possible de regrouper des zones thermiques dans la modélisation quand les charges internes, l'opération des systèmes CVCA et l'exposition des murs à l'extérieur sont homogènes. Le regroupement des zones thermiques est fait en suivant les directives de l'ASHRAE (Goel et al., 2023).

Dans une école, il y a une diversité importante dans l'utilisation des espaces, et il y a donc moins d'opportunités pour regrouper des zones thermiques ensemble que pour d'autres types d'usage, surtout dans des petits bâtiments. Le regroupement est fait pour les archétypes d'école de taille moyenne et de la grande école, qui sont des modèles plus complexes et qui bénéficient d'une telle simplification. Pour la petite école, chaque espace a sa propre zone thermique, étant donné les faibles possibilités de simplification.

La Figure 13 montre le plan d'étage indiquant les zones thermiques de la typologie 1. Les différents types d'espaces ont une couleur associée, qui est réutilisée dans les plans d'étages des autres typologies. La Figure 14 et Figure 15 montrent les plans de la typologie 2 et 3 respectivement.

4.2. Propriétés des fenêtres

Les fenêtres sont modélisées par des constructions simples qui imposent une valeur  $U$  [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ] et un SHGC pour l'ensemble de la fenêtre. On suppose des propriétés uniformes pour les bâtiments existants. Les propriétés pour la nouvelle construction proviennent des exigences du code de construction du Québec (CNRC-RBQ, 2020). Les propriétés sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Propriétés des fenêtres

|                                 | Bâtiments<br>Existants | Nouvelle<br>Construction |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|
| U-value [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ] | 3.5                    | 2.0                      |
| SHGC                            | 0.41                   | 0.41                     |

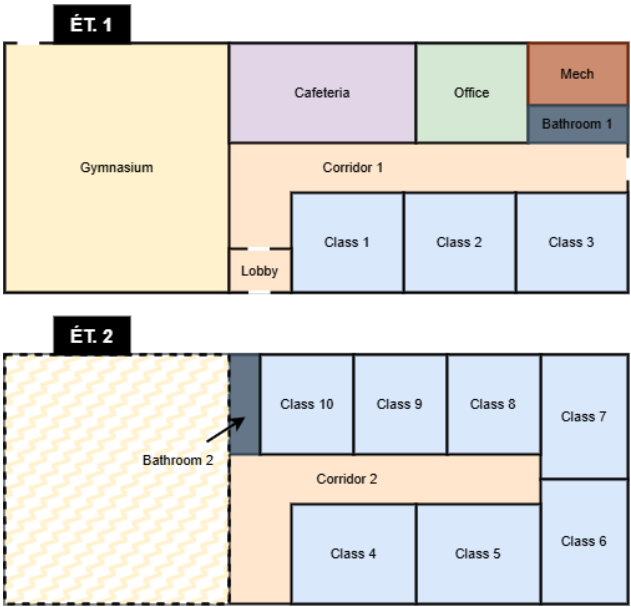


Figure 10 : Plan d'étage de l'école de typologie 1

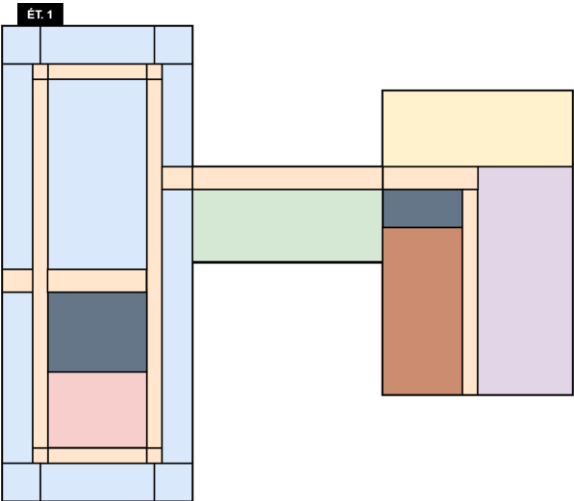


Figure 11 : Plan d'étage de l'école de typologie 3

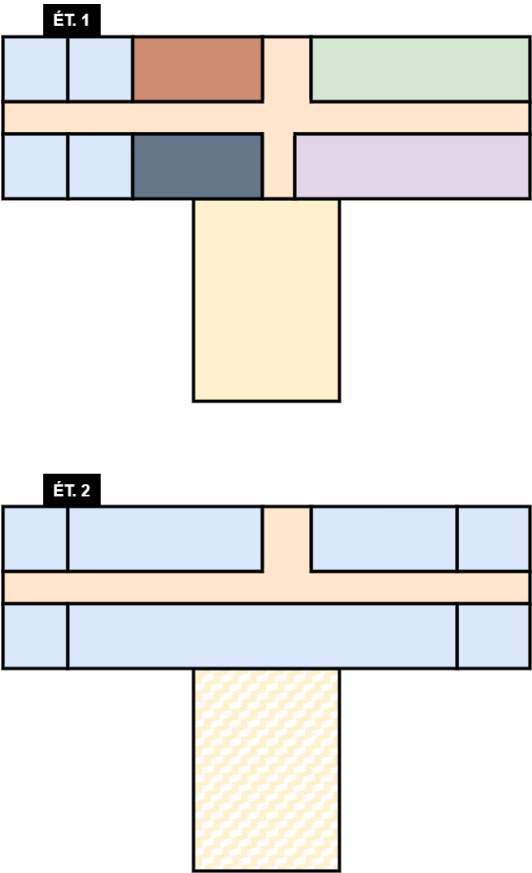


Figure 12 : Plan d'étage de l'école de typologie 2

### 4.3. Propriétés des parois opaques

Les types de construction qu'on retrouve le plus dans des écoles primaires sont documentés dans (Schola, 2021). Le document indique que les constructions en bois, béton et acier sont utilisées au fil des années avec des périodes différentes montrant une dominance de différents types de construction. Pendant la période de 1945 à 1965, les constructions en bois et béton étaient les plus courantes; pour les périodes plus récentes, la construction en acier domine.

Trois périodes de construction distinctes sont définies aux fins de la simulation, correspondant aux périodes pour lesquelles les données nous permettent d'attribuer des types de construction spécifiques :

- Bâtiments existants construits avant 1970 : « *Pre-1970* » : construction en bois ou en béton
- Bâtiments existants construits entre 1970-2012 « *Post-1970* » : construction en acier
- Nouvelle construction : construction en acier

Les typologies obtenues correspondent plus à des bâtiments qui seraient construits en béton, on décide donc d'opter pour une construction typique en béton pour la période de construction avant 1970.

Pour des constructions en béton, on voit souvent une façade en brique (Schola, 2021). Les données présentées dans (Sansregret, 2022) nous donnent une estimation des résistances thermiques des murs, la dalle et la toiture. Jusqu'à 1980, la dalle sur sol était généralement non-isolée (Sansregret, 2022). SIMEB (Hydro-Québec, 2013) comprend une base de données des différents types de construction et nous permet de retrouver les différentes couches nécessaires pour capter les propriétés thermiques des parois. Les détails sur les constructions sont donnés sous forme de tableau dans les sous-sections suivantes.

#### 4.3.1. Propriétés radiatives

L'émissance pour les grandes longueurs d'onde (appelée *thermal absorptance* dans EnergyPlus) vaut 0.9 pour toutes les surfaces.

L'absorptance solaire dépend de la couleur. Pour les briques de parement, elle est mise par défaut à 0.6, ce qui est une valeur moyenne qu'on trouve pour des briques rouges (0.5 à 0.7). Pour le gravier du toit elle est mise à 0.7. Pour les surfaces intérieures, on suppose une couleur claire avec une absorptance de 0.3 pour toutes les surface sauf les planchers qui sont supposés de couleur plus foncée (0.5).

L'absorptance dans la gamme visible est mise par défaut à 0.5, sauf pour les planchers intérieurs (0.2).

#### 4.3.2. Propriétés thermiques

Note : les couches d'étanchéité à l'eau, à l'air et à la vapeur (films plastiques et membranes) sont négligées. Les tableaux suivants présentent les couches de chaque type de paroi. Les mêmes matériaux sont utilisés pour les constructions de 1970 à 2012 et pour les nouvelles constructions, seule la couche isolante change entre ces deux versions. Les informations sont présentées dans un seul tableau avec deux épaisseurs d'isolant différents.

## 4.3.2.1. Dalle sur sol

On suppose une dalle sur sol sans isolation pour les bâtiments existants, uniquement pour la nouvelle construction, on ajoute une couche isolante.

Tableau 5 : Propriétés thermiques de la dalle du sous-sol

|                       | $e$   | $k$                             | $c_p$                            | $\rho$             |
|-----------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
|                       | mm (in)                                     | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{kg m}^{-3}$ |
| Isolation polystyrène | 91.4 (3.6'')                                | 0.03                            | 1214                             | 29                 |
| Béton lourd           | 304.8 (12'')                                | 1.31                            | 837                              | 2240               |
| Carrelage du sol      | $R_{SI} = 0.13 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ |                                 |                                  |                    |

## 4.3.2.2. Murs extérieurs - Béton

Tableau 6 : Propriétés thermiques des murs extérieurs – de l'extérieur vers l'intérieur

|                       | $e$         | $k$  | $c_p$                            | $\rho$             |
|-----------------------|-------------|--|----------------------------------|--------------------|
|                       | mm (in)     | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$              | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{kg m}^{-3}$ |
| Brique de parement    | 101.6 (4'') | 1.31   | 921                              | 2080               |
| Lame d'air            | 19 (0.75'') | $R_{SI} = 0.157 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ |                                  |                    |
| Isolation polystyrène | 31 (1.2'')  | 0.03   | 1214                             | 29                 |
| Maçonnerie de béton   | 140 (5.5'') | 0.96   | 880                              | 1400               |
| Panneau de gypse      | 16 (0.6'')  | 0.16   | 837                              | 800                |

## 4.3.2.3. Murs extérieurs – Acier

La présence de l'acier dans la construction a peu d'impact sur les propriétés des matériaux à part de la résistance thermique effective de l'ensemble. Vu que le mur est modélisé avec une résistance thermique cible, les impacts de l'acier sur la densité de l'ensemble et la capacité thermique ont été négligés.

Le tableau montre les deux couches d'isolant, celui de 80 mm pour la période de construction de 1970, celui de 115 mm pour la nouvelle construction.

Tableau 7 : Propriétés thermiques des murs extérieurs – de l'extérieur vers l'intérieur

|                       | $e$                           | $k$  | $c_p$                            | $\rho$             |
|-----------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|--------------------|
|                       | mm (in)                       | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$              | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{kg m}^{-3}$ |
| Brique de parement    | 101.6 (4'')                   | 1.31   | 921                              | 2080               |
| Lame d'air            | 19 (0.75'')                   | $R_{SI} = 0.157 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ |                                  |                    |
| Isolation polystyrène | 80.7 (3.2'')<br>114.2 (4.5'') | 0.03   | 1214                             | 29                 |
| Panneau de gypse      | 16 (0.6'')                    | 0.16   | 837                              | 800                |

## 4.3.2.4. Toiture

Tableau 8 : Propriétés thermiques de la toiture – de l'extérieur vers l'intérieur

|                       | $e$   | $k$                             | $c_p$                            | $\rho$             |
|-----------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
|                       | mm (in)   | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{kg m}^{-3}$ |
| Gravier du toit       | 12.7 (0.5'')                                    | 1.44                            | 1675                             | 880                |
| Isolation polystyrène | 121.1 (4.7'')<br>183.5 (7.2'')<br>189.0 (7.4'') | 0.12                            | 1210                             | 544                |
| Béton léger           | 51 (2'')  | 0.36                            | 837                              | 1280               |

## 4.3.2.5. Murs intérieurs

Tableau 9 : Propriétés thermiques des murs intérieurs

|                  | $e$          | $k$                             | $c_p$                            | $\rho$             |
|------------------|--------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
|                  | mm (in)      | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{kg m}^{-3}$ |
| Panneau de gypse | 12.7 (0.5'') | 0.16                            | 1090                             | 800                |
| Panneau de gypse | 12.7 (0.5'') | 0.16                            | 1090                             | 800                |

## 4.3.2.6. Planchers intérieurs

Tableau 10 : Propriétés thermiques des murs intérieurs

|                  | $e$   | $k$                             | $c_p$                            | $\rho$             |
|------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
|                  | mm (in)                                     | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\text{kg m}^{-3}$ |
| Béton lourd      | 102 (0.75'')                                | 1.31                            | 837                              | 2240               |
| Carrelage du sol | $R_{SI} = 0.13 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$ |                                 |                                  |                    |

#### 4.3.2.7. Résistances thermiques – résumé

Les résistances thermiques présentés ici sont les valeurs de la résistance thermique effective, qui tient compte des ponts thermiques mineurs et qui comprend la résistance des films d'air.

Tableau 11 : tableau récapitulatif des résistances thermiques des parois

| Résistance thermique (RSI)<br>[m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> ] | Avant 1970 | Après 1970 | Nouvelle<br>Construction |
|---|------------|------------|--------------------------|
| Dalle sur sol   | 0.5        | 0.5        | 2.6                      |
| Murs extérieurs   | 1.4        | 2.8        | 3.6                      |
| Toiture   | 3.6        | 5.5        | 5.5                      |
| Murs intérieurs   | 0.4        | 0.4        | 0.4                      |
| Planchers intérieurs  | 0.5        | 0.5        | 0.5                      |

#### 4.3.3. Infiltration

L'infiltration dans l'archétype applique un modèle typiquement utilisé pour modéliser l'infiltration des bâtiments commerciaux et institutionnels. En utilisant l'équation (1), un débit nominal défini par l'utilisateur est corrigé en fonction des influences de la température intérieure et extérieure, ainsi que la vitesse du vent. Il y a plusieurs modèles disponibles qui définissent les coefficients A, B, C et D dans l'équation (1). Nous utilisons les coefficients d'infiltration de NIST (Ng et al., 2018, 2021). Les coefficients de NIST ont été déterminé par des simulations CONTAM pour les différents types de bâtiments C&I. NIST propose des coefficients qui dépendent de s'il y a un système de ventilation en marche ou non. La valeur de  $I_{design}$  est également donné par l'étude de NIST et qui est différent pour des bâtiments avec et sans pare-air. Les valeurs des coefficients et de  $I_{design}$  sont données dans le Tableau 12.

$$I = (I_{design})[A + B|T_{zone} - T_{amb}| + C(V_{wind}) + D(V_{wind})^2] \quad (1)$$

Une infiltration supplémentaire est ajoutée au hall d'entrée pour prendre en compte l'air qui rentre dans le bâtiment en raison de l'ouverture de la porte d'entrée. Ce taux d'infiltration est modifié avec un horaire pour correspondre aux heures de début et de fin des journées d'écoles. Plus de détails sur la modélisation de l'infiltration par la porte ont été présentés dans (Vanroy, 2022).

Tableau 12 : les coefficients et la valeur du débit nominal de l'infiltration comme déterminé par NIST

|                          |                          | Sans pare-air | Avec pare-air |
|--------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
|                          | $I_{design} [L/(s.m^2)]$ | 0.569         | 0.359         |
| <b>Sans système CVCA</b> | <b>A</b>                 | 0             | 0             |
|                          | <b>B</b>                 | 0.0056        | 0.0056        |
|                          | <b>C</b>                 | 0             | 0             |
|                          | <b>D</b>                 | 0.0305        | 0.0305        |
| <b>Avec système CVCA</b> | <b>A</b>                 | -0.0043       | -0.0143       |
|                          | <b>B</b>                 | 0.0030        | 0.0022        |
|                          | <b>C</b>                 | 0             | 0             |
|                          | <b>D</b>                 | 0.0215        | 0.0201        |

#### 4.4. Système CVCA

Comme mentionné dans l'étude précédente, des enquêtes disponibles présentent des informations détaillées sur les systèmes CVCA qu'on retrouve dans les bâtiments scolaires (Sansregret, 2022). La base de données comprend des informations sur trois aspects des systèmes :

- Le type de système central
- La présence de climatisation
- Le type de système de ventilation

La plupart des bâtiments n'ont pas de système de ventilation mécanique et ils opèrent soit avec une chaudière centrale, ce qui implique la présence des radiateurs ou convecteurs à eau chaude, ou sans système central, ce qui implique l'utilisation des plinthes électriques.

Les archétypes fonctionnent soit sans système de ventilation mécanique, soit avec un système de ventilation mécanique. Une description globale des deux types de systèmes est donnée ci-dessous. Des détails sur les composants des systèmes seront donnée dans les sections suivantes.

Tous les équipements du système sont dimensionnés automatiquement en utilisant la fonction « *Auto Sized* » d'EnergyPlus, pour les conditions de design de Montréal.

##### **Bâtiments sans système de ventilation mécanique :**

Suivant la discussion dans la section 3.4, certains modèles ne sont pas équipés d'un système de ventilation mécanique. Pour le chauffage des espaces, chaque zone est équipée avec des plinthes à eau chaude alimentées par une chaudière électrique centrale.

Pour assurer une certaine qualité de l'air, les salles de bains, le caféteria et le gymnase ont une extraction de l'air vicié. Ces modèles auront aussi une implémentation de ventilation naturelle qui permet d'obtenir

un rafraîchissement dans les salles de classes pendant des périodes plus chaudes, ainsi que d'avoir un minimum d'apport d'air frais pendant l'hiver.

#### **Bâtiments avec système de ventilation mécanique :**

Les bâtiments avec ventilation mécanique opèrent un système à volume constant avec recirculation. Les zones périmétriques ont également des plinthes à eau chaude pour assurer le chauffage des espaces. Dans l'archétype 2, le système de ventilation n'assure pas la climatisation du bâtiment. L'archétype 3 aura l'option d'inclure ce mode d'opération.

##### **4.4.1. Chauffage des espaces**

Les plinthes utilisées dans le modèle énergétique sont des plinthes 100 % convectives. Il est possible de modéliser des plinthes avec une fraction radiative spécifié par l'utilisateur, mais la fraction radiative est difficile à estimer. De plus, l'utilisation de ce composant augmente le temps de calcul et l'impact sur les résultats de simulation est limité (Kang & Strand, 2010).

Le point de consigne est de 22 °C pendant la journée. Un abaissement de la consigne est présent dans la majorité des écoles (Sansregret, 2022), la température de consigne est donc réglée à 18 °C en dehors les périodes d'occupation.

##### **4.4.2. Extraction d'air vicié**

L'extraction d'air vicié est supposée dans les salles de bains, le cafétaria et le gymnase pour éliminer l'humidité et les odeurs. Dans les salles de bains, on suppose que l'extraction d'air est compensée par l'infiltration. Pour le cafétaria et le gymnase, une entrée d'air extérieur est modélisée. L'air est préchauffé par un élément de chauffage pour une alimentation d'air frais à température neutre.

L'extraction d'air est en accord avec la norme ANSI/ASHRAE 62.1-2007 (ASHRAE, 2007) et fonctionne uniquement quand il y a des occupants présents dans le bâtiment.

##### **4.4.3. Ventilation naturelle**

Étant donné qu'une grande partie des écoles ne sont pas équipées de ventilation mécanique (MERN, 2021; Sansregret, 2022; Schola, 2021), pour garantir un certain niveau de qualité d'air dans les salles de classes, les espaces sont ventilés en ouvrant les fenêtres. Le niveau de ventilation naturelle dans une salle de classe est influencé par des décisions faites par les occupants (Mercier, 2009). Cette dimension ajoute une complexité à la modélisation de la ventilation.

EnergyPlus permet de modéliser la ventilation naturelle de différentes manières, toutes prenant en compte les conditions extérieures et intérieures mais avec des niveaux de complexité différents. L'approche jugée la plus appropriée est une approche qui tient compte de la température intérieure et extérieure, la vitesse du vent et la direction du vent par rapport à l'orientation de la fenêtre et qui s'appelle « *ZoneVentilation:WindandStackOpenArea* ». La superficie d'ouverture des fenêtres est mise à 2.56 m<sup>2</sup> pour chaque salle de classe, conforme aux directives dans le Code National des Bâtiments (NRC, 2017).



Le modèle d'EnergyPlus utilise un algorithme simple qui est uniquement capable de décider *quand* les fenêtres sont ouvertes, en se basant sur les conditions extérieures et intérieures. Cette stratégie de commande simple ne correspond pas aux manipulations des vrais occupants, qui peuvent faire varier le niveau d'ouverture et le nombre de fenêtres ouvertes à un moment donné selon plusieurs facteurs.

Une stratégie de commande spécifique est conçue en tenant compte de plus de facteurs. La fraction de l'ouverture est variée selon la température extérieure; quand il fait trop froid, les élèves vont ouvrir un minimum de fenêtres pour avoir une qualité d'air acceptable. La fraction est aussi variée selon l'heure de la journée : plus de temps les élèves ont passé dans la salle de classe, plus ils auront besoin d'air frais. Pendant l'été, l'algorithme permet d'ouvrir un maximum de fenêtres pour bénéficier de la ventilation naturelle pour refroidir l'espace. La nouvelle stratégie de commande entraîne un taux de ventilation naturelle réduit pendant l'hiver, et plus élevé pendant l'été, par rapport à l'algorithme d'origine.

L'inclusion de cet algorithme a surtout un impact sur les températures des zones pendant le printemps et l'été, mais il y a aussi une différence dans la consommation énergétique, qui augmente légèrement si on compare avec une simulation sans ventilation naturelle. L'inclusion d'un algorithme qui tient compte de la ventilation naturelle est jugé nécessaire vu son impact sur le profil de consommation, mais l'utilisation de cet algorithme amène d'autres défis. L'algorithme conçu est uniquement basé sur des actions des occupants documentées ou observées anecdotiquement, mais il n'a pas pu être validé en termes de taux de ventilation résultant. Le niveau de ventilation naturelle, surtout pendant l'hiver, peut être plus grand ou plus petit que l'estimation actuelle. Un autre point important est que la stratégie de commande est basée entre autres sur les conditions à l'intérieur du bâtiment; quand la température dans la zone tombe en-dessous du point de consigne, on suppose que les occupants vont fermer les fenêtres. La capacité de maintenir la température d'un espace à son point de consigne dépend du système CVCA. La quantité de ventilation naturelle, et donc l'impact sur la consommation énergétique, est donc sensible à ces paramètres.

#### 4.4.4. Ventilation mécanique : système à volume constant avec recirculation

L'utilisation d'un système à volume constant avec recirculation est courant pour des écoles au Québec (Sansregret, 2022).

Le schéma dans la Figure 13 montre comment le système est modélisé. La boucle d'air centrale se trouve à droite sur le diagramme. Le débit d'air frais apporté est déterminé par les besoins d'air frais définis pour chaque type d'espace présent dans la zone. Il y a également une extraction d'air vicié dans les laboratoires. Les valeurs des besoins d'air frais sont en accordance avec la norme ANSI/ASHRAE 62.1-2007 (ASHRAE, 2007) et sont présentées dans le Tableau 13. Les besoins d'extraction d'air vicié suivent également cette norme et les valeurs utilisés se trouvent dans le Tableau 14.

L'air de la boucle centrale passe par des serpentins de climatisation et de chauffage qui assurent une température d'alimentation de 13 °C. Le serpentin de climatisation n'est pas présent dans l'archétype 2, et dans l'archétype 3 il est désactivé par défaut (mais peut être activé optionnellement). Dans ce cas, la consigne ne peut pas être assurée si la température extérieure est au-dessus de 13 °C. L'air est ensuite distribué dans les zones individuelles par des unités terminales à volume constant. Les unités terminales ont des serpentins d'eau chaude pour chauffer l'air jusqu'à son point de consigne qui est déterminé pendant la simulation selon les charges thermiques de chaque zone.

Les serpentins de chauffage sont des serpentins à eau chaude qui sont connecté à une boucle d'eau chaude alimentée par une chaudière électrique.

Le gymnase et le caféteria ne sont pas connectés au système central et ont une entrée d'air simple comme dans les modèles sans système de ventilation centralisé (voir section 4.4.2).

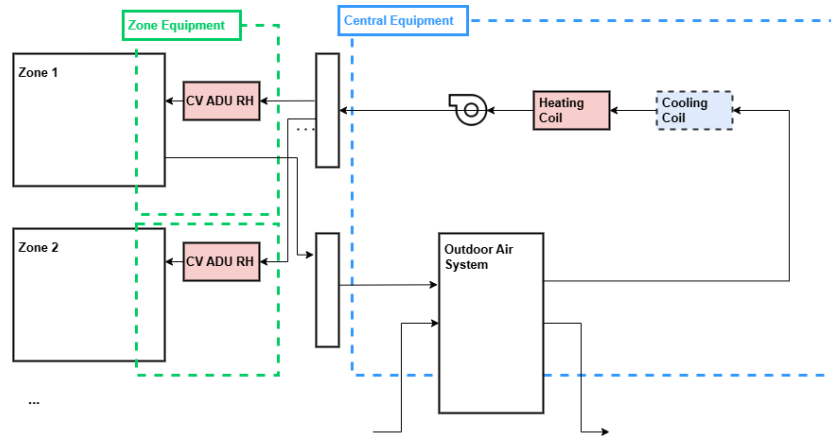


Figure 13 : Schéma du système de ventilation à volume constant avec recirculation

Tableau 13 : Besoins d'air frais par type d'espace

|                  | Air frais par personne<br>[L s <sup>-1</sup> personne <sup>-1</sup> ] | Air frais par superficie<br>[L s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ] |
|------------------|---|--|
| Salle de classe  | 7   | 0.6  |
| Laboratoire      | 8.6   | 0.9  |
| Gymnase          | 0   | 1.5  |
| Cafétéria        | 4.7   | 0.9  |
| Salle polyvalent | 4.1   | 0.3  |
| Corridor         | 0   | 0.3  |
| Administration   | 8.5   | 0.3  |

Tableau 14 : Besoins d'extraction d'air vicié par type d'espace

|               | Air frais par superficie<br>[L s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ] |
|---------------|--|
| Salle de bain | 10 <sup>(1)</sup>  |
| Laboratoire   | 5  |

<sup>1</sup> Le besoin d'extraction d'air vicié est défini en fonction du nombre de toilettes. On suppose une superficie de 3.5 m<sup>2</sup> par toilette (en tenant compte de l'espace de couloir et les éviers) pour arriver à une valeur en [L s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>].

### 4.5. Eau chaude

La modélisation de l'utilisation d'eau chaude utilise les valeurs suggérées par l'*ASHRAE handbook of HVAC applications* (ASHRAE, 2019). Une consommation journalière de 2.6 L/étudiant est implémentée avec un horaire fractionnel selon le profil moyen horaire présenté par l'ASHRAE.

Le chauffe-eau est supposé être électrique. Il n'y a pas de données explicites sur ce sujet, mais les consommations énergétiques (MERN, 2021) indiquent qu'une grande fraction des écoles n'ont pas de consommation de sources fossiles, indiquant l'utilisation d'électricité pour tous les usages finaux.

### 4.6. Gains internes et leurs horaires

Les gains internes viennent des occupants, des charges d'éclairage et des charges aux prises présents dans un espace. Les valeurs nominales utilisées dans la définition de l'archétype sont présentées dans le Tableau 15.

La densité d'occupation est tirée de (Schola, 2021). La densité d'éclairage est une valeur calculée à partir des exigences du CNEB (NRC, 2017). La densité des charges aux prises provient également du CNEB, comme les horaires d'occupation, d'éclairage et des charges aux prises.

Tableau 15 : Les valeurs nominales pour l'occupation, l'éclairage et les prises aux charges

|  |  |     |
|--|--|-----|
| Occupation des salles de classe                  | [m <sup>2</sup> personne <sup>-1</sup> ] | 3.4 |
| Densité d'éclairage, salles de classe            | [W m <sup>-2</sup> ]                     | 8   |
| Densité des charges aux prises, salles de classe | [W m <sup>-2</sup> ]                     | 5   |

#### 4.6.1. Stratégies d'éclairage naturel

Dans l'étude précédente, des stratégies d'éclairage naturel étaient mise en place dans le modèle de la petite école. La raison principale était que l'accès à la lumière naturelle est une des caractéristiques clés de ce type d'école, réduisant le besoin d'éclairage artificiel.

La stratégie de contrôle a été retirée du modèle afin de privilégier une modélisation plus standardisée avec des définitions des charges mieux encadrées.

## 5. Résultats : comparaison préliminaire aux données disponibles

Pour une première approche, la station de l'aéroport de Montréal, située à proximité des plus grands centres urbains du Québec, a été choisie pour la simulation. Le fichier de données utilisé est celui des « fichiers météorologiques canadiens pour l'énergie et le génie » (FMCEG, connus en anglais sous l'acronyme CWeather, *Canadian Weather for Energy Calculations*), dans leur version mise à jour en 2020 (ECC Canada, 2020).

Les résultats des simulations avec le type de construction pre-1970 sont résumés dans le Tableau 16. Ce type a été choisi parce qu'il représente le plus grand nombre des écoles.

L'archétype de la petite école a maintenant une consommation annuelle de 170 369 kWh, ce qui revient à une intensité énergétique de 0.37 GJ/m<sup>2</sup>. Comme mentionnée dans le rapport précédent, l'intensité énergétique d'une école de la même typologie a en moyenne une intensité énergétique <sup>2</sup>de 0.43 GJ/m<sup>2</sup> et plus que la moitié des bâtiments ont une intensité énergétique entre 0.37 GJ/m<sup>2</sup> et 0.50 GJ/m<sup>2</sup>.

L'archétype a une consommation qui est plutôt basse par rapport à la moyenne. Ceci vient en partie de la nouvelle hypothèse de la modélisation de l'infiltration.

Tableau 16 : Résultats de simulation des archétypes : la consommation annuelle et l'intensité énergétique

|  | Construction Avant 1970           |  |
|--|-----------------------------------|--|
|  | Consommation annuelle<br>kWh (GJ) | Intensité énergétique<br>kWh/m <sup>2</sup> (GJ/m <sup>2</sup> ) |
| Archétype 1 :<br>Petite école primaire                 | 170 369 (613.3)                   | 103.9 (0.37)   |
| Archétype 2 :<br>École de taille moyenne - non-ventilé | 500 792 (1 802.9)                 | 164.2 (0.59)   |
| Archétype 2 :<br>École de taille moyenne - ventilé     | 728 833 (2 623.8)                 | 239.0 (0.86)   |
| Archétype 3 :<br>Grande école secondaire               | 4 503 000 (16 210.8)              | 261.7 (0.94)   |

Les autres résultats de simulation montrent des tendances auxquelles nous nous attendons. La consommation annuelle des autres archétypes est néanmoins élevée par rapport aux données disponibles sur des écoles réelles. Une calibration et validation plus approfondie suivra dans une prochaine étape.

La pointe électrique reste un point faible du modèle. On fait référence au rapport de l'étape précédente pour plus de détails.

<sup>2</sup> La simulation suppose des conditions météorologiques d'une année typique qui ne sont pas les mêmes que celles pour l'année 2016-2017, donc les résultats ne sont pas directement comparables, mais nous donnent une idée de la gamme des consommations spécifiques (EUI).

## 6. Discussion et conclusion

L'étude présente une caractérisation des écoles primaires et secondaires. Les typologies les plus représentatives de l'ensemble des écoles québécoises sont déterminées avec une approche qui utilise le partitionnement de données (*clustering*) pour la caractérisation géométrique et un traitement manuel pour attribuer les caractéristiques des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA).

La méthode aboutit à 3 typologies principales, dont la typologie qui a été le sujet de la première étape de l'étude : la petite école primaire. La deuxième typologie est une école de taille moyenne qui peut être une école primaire ou secondaire, avec ou sans ventilation mécanique. La troisième typologie est une grande école secondaire avec une forme complexe qui a un système de ventilation mécanique. Les typologies forment la base pour la définition du modèle géométrique. Les autres caractéristiques, l'utilisation du bâtiment et le système CVCA sont associés aux archétypes selon les configurations les plus typiques observées dans les données disponibles.

Les résultats préliminaires de simulation montrent les tendances attendues mais mettent toutefois en lumière la nécessité d'une calibration et d'une validation plus poussée afin d'améliorer notamment la représentation de la demande de pointe en électricité. L'utilisation des profils de consommation d'écoles réelles devrait permettre d'identifier des points faibles du modèle qui pourraient expliquer certains écarts dans la consommation annuelle ainsi que la pointe électrique.

L'apport d'air frais est un des premiers paramètres à regarder pendant la validation. C'est un facteur dominant dans la charge de chauffage pour des bâtiments ventilés. Une grande partie des écoles ont été construites avant l'introduction de normes spécifiques concernant l'apport d'air neuf, ou lorsque des versions obsolètes de ces normes étaient appliquées. Il est donc difficile d'avoir une estimation précise des taux d'air frais qui sont effectivement appliqués dans l'opération des systèmes des écoles existantes.

La suite du travail concernant les écoles primaires et secondaires visera à utiliser des données détaillées de consommation électrique de plusieurs écoles pour calibrer des paramètres thermiques et de contrôle des systèmes CVCA et valider les résultats obtenus pour la consommation annuelle et la demande de pointe.

## 7. Références

- AlAnzi, A., Seo, D., & Krarti, M. (2009). Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 822–828. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.033>
- ASHRAE. (2007). *Ventilation for acceptable indoor air quality (Standard 62.1-2007)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2019). Chap. 51: Service water heating. In *Ashrae Handbook of HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- CNRC-RBQ. (2020). *Code de construction du Québec, Chapitre I.1 – Efficacité énergétique du bâtiment, et Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada 2015 (modifié)*. Conseil national de recherches du Canada; Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies; Ressources naturelles Canada; Régie du bâtiment du Québec. <https://doi.org/10.4224/40002018>
- DGFE-DES, (Direction générale du financement et de l'équipement). (2006). *Capacité d'accueil d'une école primaire-secondaire*. Education, Loisir et Sport Québec.
- ECC Canada. (2020). *Canadian Weather Energy and Engineering Datasets (CWEEDS) and Canadian Weather Year for Energy Calculation (CWECE)—2020 update* [Computer software]. Environment and Climate Change Canada. [https://climate.weather.gc.ca/prods\\_servs/engineering\\_e.html](https://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html)
- Goel, S., Rosenberg, M., Mets, E., & Eley, C. (2023). *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019 Performance Rating Method Reference Manual*. PNNL.
- Hydro-Québec. (2013). *SIMEB* (Version 3.1) [Computer software]. Laboratoire des Technologies de l'Énergie, Hydro-Québec. <https://www.simeb.ca>
- Kang, D., & Strand, R. (2010). A new model for calculating the convective and radiant impact of radiators and baseboards in EnergyPlus. *Proc. of SimBuild 2010, Fourth National Conference of IBPSA-USA*. SimBuild, New York, NY, USA.
- Linacre, Lindsay, Manassis, Slade, & Hepworth. (2022). *Splink: Data linkage at scale* (Version v4.0.0) [Computer software]. <https://github.com/moj-analytical-services/splink>
- Mercier, S. J. C. (2009). *La température agréable: Manipulation des fenêtres et dynamique du confort environnemental dans une salle de classe climatisée naturellement*. Université Laval.
- MERN. (2021). *Données de consommation des bâtiments institutionnels québécois, année 2016-2017*. Ministère de l'énergie et des ressources naturelles, gouvernement du Québec.
- Microsoft. (2019). *Computer generated building footprints for Canada (CanadianBuildingFootprints)* [Computer software]. Microsoft. <https://github.com/microsoft/CanadianBuildingFootprints>
- Ng, L. C., Dols, W. S., & Emmerich, S. J. (2021). Evaluating potential benefits of air barriers in commercial buildings using NIST infiltration correlations in EnergyPlus. *Building and Environment*, 196, 107783. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107783>
- Ng, L. C., Ojeda Quiles, N., Dols, W. S., & Emmerich, S. J. (2018). Weather correlations to calculate infiltration rates for U. S. commercial building energy models. *Building and Environment*, 127, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.029>
- NRC. (2017). *National Energy Code of Canada for Buildings 2017*. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction.
- Sansregret, S. (2022). *Caractérisation des bâtiments commerciaux et institutionnels québécois pour le logiciel SIMEB (Personal communication)*.

- Schola. (2021). *L'ABC de la rénovation scolaire au Québec*. Schola.ca, plateforme d'expertise en architecture scolaire. Université Laval.
- Schola.ca—Plateforme d'expertise en architecture scolaire. (n.d.). Retrieved November 28, 2022, from <https://schola.ca/>
- Tremblay-Lemieux, S. (2019). *Vers une caractérisation du parc immobilier des écoles primaires publiques du Québec: Une exploration de la combinaison des méthodes d'analyse de la typomorphologie et de la syntaxe spatiale* [Maîtrise en sciences de l'architecture, Université Laval]. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/37477>
- Université Laval et Bureau de Coopération Interuniversitaire. (2021). *Géoindex*. <https://geoapp.bibl.ulaval.ca/>
- Vanroy, K. (2022). *Developing a prototype building energy model for a Quebec primary school and assessing the importance of detailed HVAC system modeling*. Polytechnique Montréal.
- Vanroy, K., & Kummert, M. (2023a, 31). *Développement d'archétypes pour un modèle de parc virtuel québécois: École primaire*.
- Vanroy, K., & Kummert, M. (2023b, 31). *Développement d'archétypes pour un modèle de parc virtuel québécois: Maisons unifamiliale*.