

Développement d'archétypes pour un modèle de parc virtuel québécois : École primaire

Caractérisation des écoles primaires d'un point de vue énergétique et développement d'un premier archétype pour une école primaire représentative de la typologie la plus fréquente

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

Révision : 2023-10-31

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)
EUI	<i>Energy Use Intensity</i> , la consommation énergétique spécifique par m ² de plancher
HQ	Hydro-Québec
MELCCFP	Le ministère de l'environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs
UEF	Unité d'évaluation foncière

Table des matières

Nomenclature	i
Table des matières	ii
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. Caractérisation des écoles primaires	7
3.1. Géométrie	7
3.1.1. Surface de plancher	7
3.1.2. Type de toiture	9
3.2. Consommation énergétique et les systèmes CVCA	10
3.2.1. Intensité énergétique des bâtiments scolaires	10
3.2.2. Systèmes CVCA	11
4. Développement du modèle énergétique	12
4.1. Géométrie du bâtiment	12
4.1.1. Enveloppe du bâtiment	12
4.1.2. Zones thermiques	13
4.2. Propriétés des parois opaques	14
4.2.1. Propriétés radiatives	15
4.2.2. Propriétés thermiques	15
4.2.3. Infiltration	17
4.3. Système CVCA	17
4.3.1. Chauffage des espaces	17
4.3.2. Extraction d'air vicié	18
4.3.3. Ventilation naturelle	18
4.4. Eau chaude	19
4.5. Gains internes et leurs horaires	19
4.5.1. Stratégies d'éclairage naturel	20
5. Résultats et comparaison aux données disponibles	21

6.	Discussion et conclusion.....	23
7.	Références	24

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 d'un premier archétype représentant une école primaire.

Les objectifs spécifiques de l'étude étaient de déterminer le nombre d'archétypes requis pour représenter les maisons unifamiliales et d'établir des typologies pour chacun de ces archétypes. Après l'obtention des informations sur les typologies, un premier archétype est créé pour une seule typologie, 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 l'archétype développé. Il décrit l'approche suivie, les données utilisées et les paramètres sélectionnés, ainsi qu'une discussion sur les limitations du modèle actuel et les étapes à parcourir pour le développement des futurs archétypes. Des détails sur certaines analyses sont disponibles 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. 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 scolaires, les caractéristiques de l'enveloppe, les caractéristiques liés à 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.

2.1.1. Données géospatiales

Deux collections de données géospatiales sont utilisés 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. 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. 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 sa géolocalisation.

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 pour identifier les bâtiments des écoles primaires, mais 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.

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.

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 combiner les informations. La combinaison de ces bases de données permettrait de faire des analyses plus détaillées et lier des informations sur la forme et 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 est OpenStudio v.3.5.1 pour définir la géométrie et tous les autres aspects du modèle. OpenStudio utilise EnergyPlus (v.22.2) comme moteur de modélisation.

3. Caractérisation des écoles primaires

Plus que 60 % des écoles primaires au Québec ont été construites entre 1945 et 1965. En raison de la mise en place de l'éducation obligatoire et de l'augmentation des taux de natalité pendant cette période, le nombre d'enfants fréquentant l'école a augmenté, ce qui a entraîné la construction d'un grand nombre d'écoles. La construction de ces écoles était axée sur la simplicité et l'efficacité, privilégiant l'éclairage naturel et la ventilation naturelle, et permettant une construction rapide (Schola, 2021).

Les sections suivantes présentent l'analyse qui a été faite sur des données géométriques et des données sur la consommation énergétique afin de caractériser les bâtiments.

3.1. Géométrie

La géométrie des bâtiments scolaires a déjà été le sujet de plusieurs études architecturales, mais ces études n'avaient pas les mêmes objectifs de retirer les caractéristiques qui sont les plus importantes pour la modélisation énergétique. Bien que les informations collectées soient utiles, elles ne prennent pas en compte toutes les informations pertinentes sur la géométrie.

Les données sur les empreintes au sol des bâtiments sont utilisées afin d'inclure certains aspects supplémentaires sur la forme des bâtiments.

3.1.1. Superficie de plancher

En utilisant les informations provenant des empreintes au sol et les données des UEF sur le nombre d'étages, une estimation de la superficie totale du bâtiment peut être calculée. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 1.

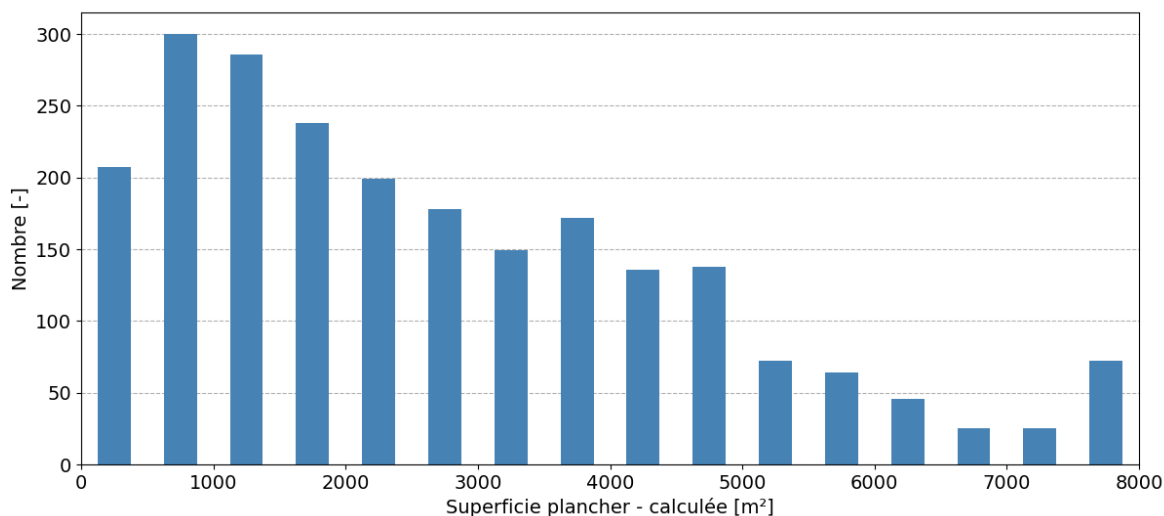


Figure 1 : Un histogramme de la superficie de plancher (superficie totale) en [m²] des écoles primaires, dérivé des empreintes au sol et le nombre d'étages dans les UEF

Nombre d'étages

La distribution du nombre d'étages venant des UEF est montrée dans la Figure 2 pour les écoles primaires et secondaires. Pour les écoles primaires, la grande majorité des bâtiments ont deux étages.

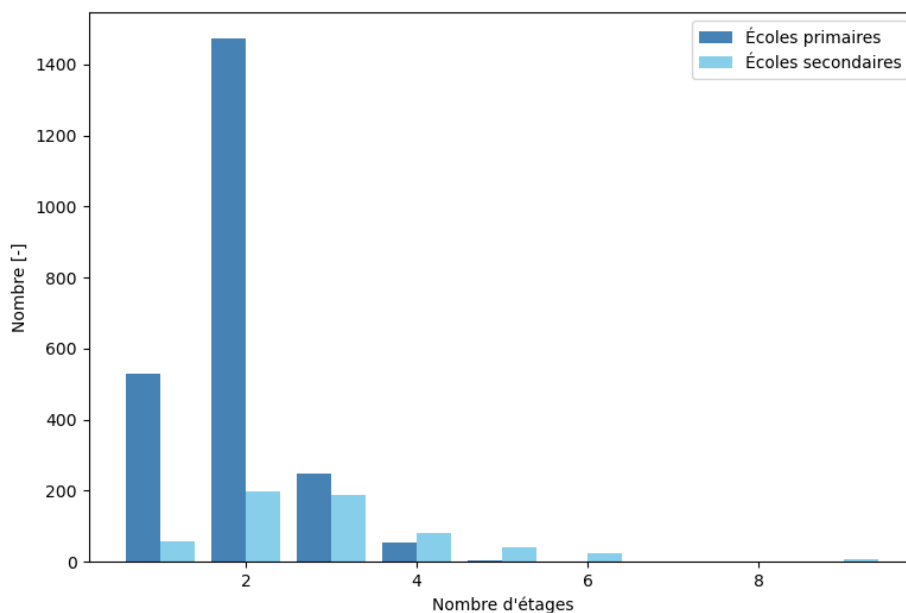


Figure 2 : Un histogramme du nombre d'étages des écoles selon les informations dans les UEF

Forme du bâtiment

La forme du bâtiment a été sujet d'une étude architecturale (Tremblay-Lemieux, 2019). Dans son analyse, Tremblay-Lemieux a principalement regardé la forme du bâtiment en étudiant la position du couloir par rapport aux salles de classe. La configuration dominante, correspondant à 80 % des écoles étudiées, était une configuration avec un couloir central « linéaire ». Cette configuration implique une forme rectangulaire du bâtiment, bien que l'auteure note la présence de plusieurs variations, et par extension inclut les bâtiments avec une circulation en forme de « L » ou « H » dans la catégorie de circulation linéaire.

Cette catégorisation peut être intéressante du point de vue d'une caractérisation architecturale, mais dans le but de caractériser l'enveloppe d'un point de vue de performance énergétique, ces variations devraient être considérées séparément. Une catégorisation plus rigoureuse est effectuée en prenant en compte la relation entre l'enveloppe du bâtiment et son volume.

Un premier essai pour caractériser les variations dans les formes de bâtiment, analyse les empreintes au sol en fonction de leur relation à une forme rectangulaire. En examinant à la fois le périmètre et la superficie des géométries, on essaie de déterminer si une géométrie est « rectangulaire » ou une forme « complexe ». On applique une fonction aux empreintes qui permet d'approximer un polygone arbitraire par un rectangle. Les changes dans le périmètre et la superficie sont analysés pour déterminer à quel point la forme originale se rapproche d'un rectangle. Avec cette classification, environ 50 % des empreintes au sol des bâtiments sont identifiés comme étant rectangulaires. Cela montre que bien que ce soit la forme prédominante, elle ne représente pas une majorité écrasante comme décrit par Tremblay-Lemieux (2019).

Pour les bâtiments rectangulaires, on remarque un aspect intéressant concernant la largeur d'une empreinte au sol. Quand on analyse les empreintes au sol dans cette catégorie, on remarque que la moitié des bâtiments rectangulaires ont une largeur comprise entre 15 et 25 mètres, avec une moyenne d'environ 20 mètres. Ce résultat est conforme aux informations sur l'architecture typique des bâtiments scolaires. Les constructions qui privilégient la ventilation naturelle et l'éclairage sont limitées à un couloir central avec des salles de classe de chaque côté. Étant donné que les salles de classe ont des dimensions standard, cela peut être considérée comme un paramètre contraignant pour la largeur totale du bâtiment.

Les empreintes « complexes » ne sont pas analysées plus en détail en raison d'une grande variété dans les formes qu'on retrouve. Les travaux futurs pourraient se pencher sur la classification des géométries complexes afin de capturer les informations les plus pertinentes sur leur forme et sur la manière dont elles se traduisent en paramètres de modèle énergétique qui représentent au mieux leur impact sur la consommation d'énergie. D'autres considérations sur la compacité des bâtiments sont discutées dans (Vanroy, 2022).

3.1.2. Type de toiture

Deux tiers des écoles primaires ont une toiture plate (Schola, 2021). Ce type de toiture est donc utilisé dans l'archétype.

3.2. Consommation énergétique et les systèmes CVCA

Les données de consommation énergétique qui sont utilisées dans cette analyse comprennent tous les bâtiments scolaires, incluant des bâtiments des maternelles et écoles secondaires. On sait des études sur uniquement les bâtiments des écoles primaires que la présence des systèmes de ventilation mécanique et climatisation dans ces bâtiments est moins commune (Schola, 2021).

Dans la présente étude, il n'a pas encore été possible de distinguer les écoles primaires des autres écoles dans la liste, donc pour interpréter les informations présentées à ce stade il faut en tenir compte. Pour les futurs travaux il est possible de le faire en utilisant les adresses liées aux bâtiments, comme mentionné dans la section 2.1.3.

3.2.1. Intensité énergétique des bâtiments scolaires

La Figure 3 montre la consommation d'énergie spécifique (« *Energy Use Intensity* » ou EUI) des écoles au Québec. La valeur médiane de l'EUI est 0.52 GJ/m^2 . Il y a une variabilité notable dans l'EUI quand on considère l'ensemble des bâtiments scolaires comme étant homogène.

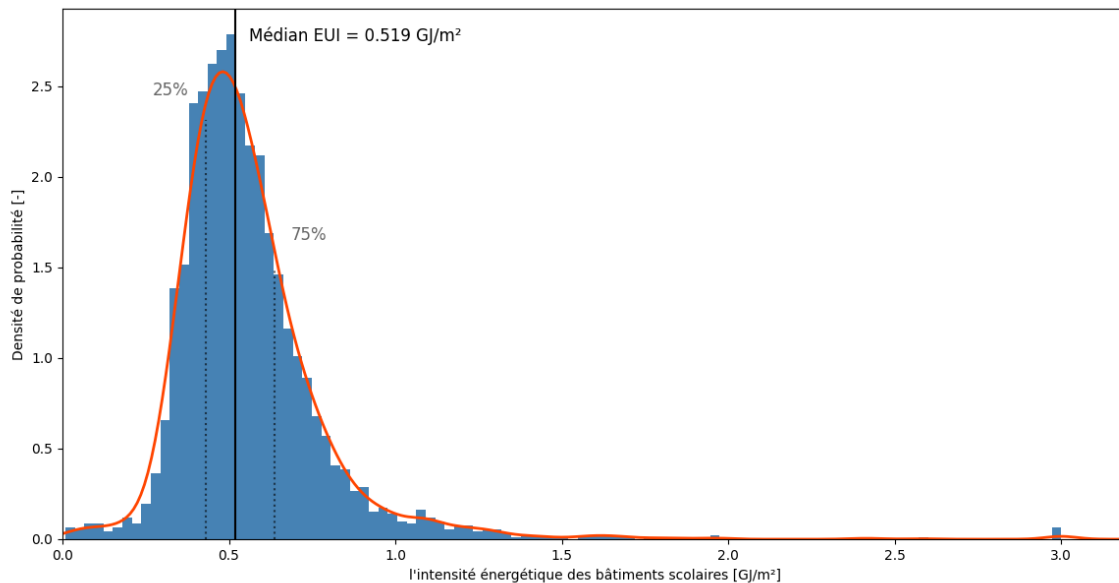


Figure 3 : La distribution de l'intensité énergétique des bâtiments scolaires en GJ/m^2

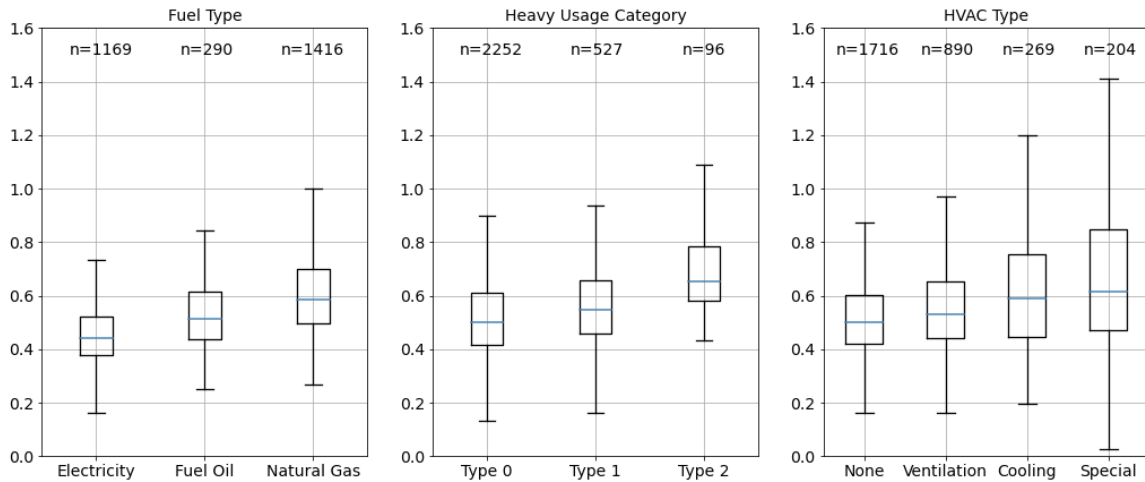


Figure 4 : les intensités énergétiques des bâtiments scolaires, regroupés selon leurs catégorisations dans (MERN, 2021)

Cette variabilité pourrait être attribuée aux nombreuses différences dans les caractéristiques des bâtiments, telles que des variations dans l'enveloppe du bâtiment, les types d'espaces qu'on retrouve dans le bâtiment, mais aussi les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA).

Si on utilise la catégorisation des bâtiments selon les caractéristiques des types d'espaces, des sources d'énergie utilisées pour le chauffage et leurs systèmes CVCA, on voit une corrélation avec l'intensité énergétique dans les données de consommation, comme montré dans la Figure 4. Cette corrélation indique qu'il est important de bien représenter ces tendances et leur importance relative dans l'ensemble des bâtiments pour capter la variation des profils de consommation dans les bâtiments scolaires.

3.2.2. Systèmes CVCA

Il y a des informations assez détaillées provenant des enquêtes (Sansregret, 2022) sur les systèmes CVCA qu'on retrouve dans les bâtiments scolaires. La base de données comprend des informations sur trois aspects globaux :

- 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.

4. Développent du modèle énergétique

Le premier archétype pour une école primaire n'est pas modélisé se basant sur un bâtiment en particulier mais il comprend les caractéristiques et configurations qui sont les plus courantes au Québec.

4.1. Géométrie du bâtiment

4.1.1. Enveloppe du bâtiment

Comme indiqué dans la section 3.1, la plupart des écoles primaires au Québec ont une forme rectangulaire. Le nombre d'étages et la superficie de l'empreinte au sol déterminent la superficie totale de plancher du bâtiment. Le modèle a une empreinte au sol de 1000 m² et deux étages. Le bâtiment comporte un gymnase qui s'étend sur deux étages, réduisant la superficie totale du bâtiment à 1640 m². Le rapport longueur / largeur du bâtiment est de 2.5.

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 plancher). Ces rapports se situent entre 20-25 %, ce qui correspond à un niveau de fenestration de 40 % (par rapport à la superficie de l'enveloppe) pour cette géométrie.

Le modèle ne prend pas en compte les ombrages provenant des obstructions extérieures ou des dispositifs d'ombrage dans le bâtiment. Seul le cadre extérieur des fenêtres est pris en compte, l'impact des meneaux et traverses (sous-divisions du cadre) n'est pas pris en compte.

La géométrie obtenue est présentée dans la Figure 5.

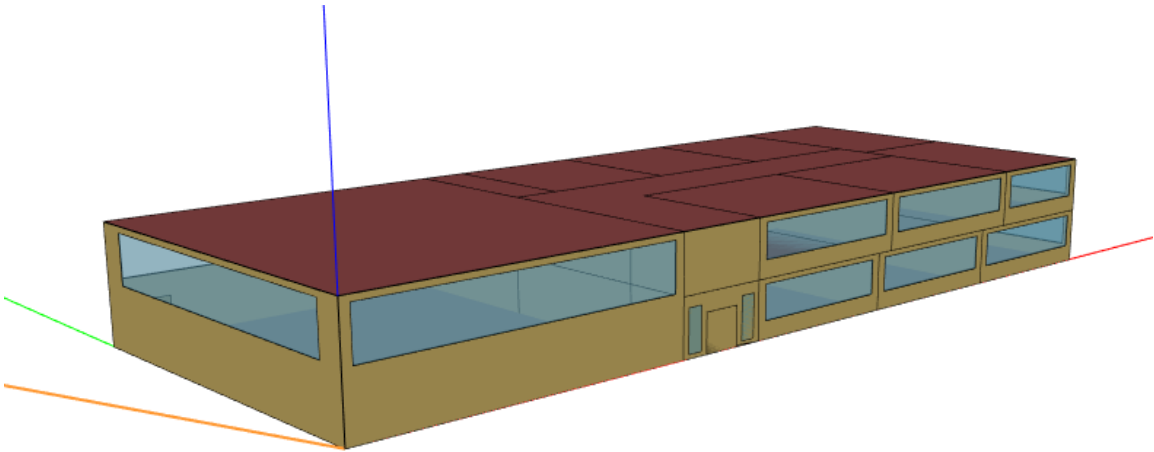


Figure 5 : La géométrie du modèle

4.1.2. Zones thermiques

La Figure 6 montre les zones thermiques du modèle. Les types d'espaces qui se trouvent dans le bâtiment sont basés sur les informations venant des enquêtes (Sansregret, 2022). Les tailles et placements des zones dans le bâtiment sont basés sur des directives du gouvernement de Québec (DGFE-DES, 2006) et des études faites sur l'architecture des écoles (Schola, 2021; Tremblay-Lemieux, 2019).

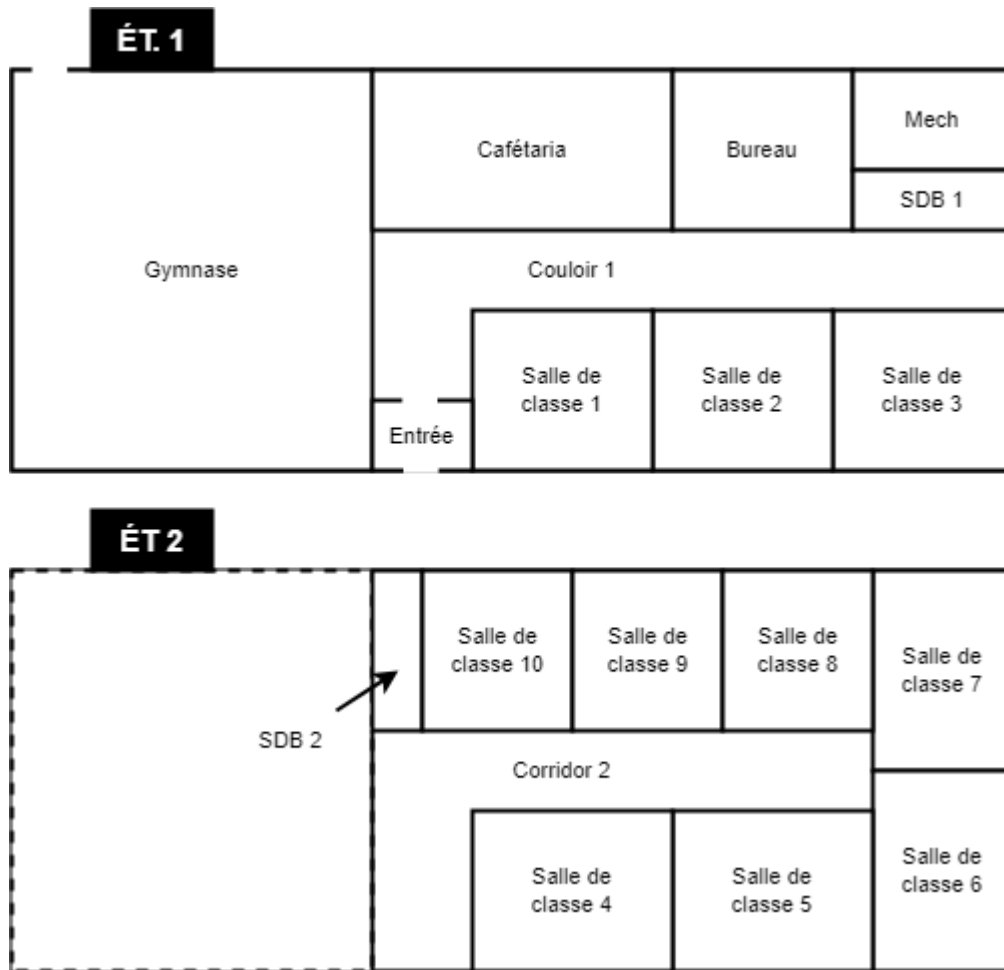


Figure 6 : Les zones thermiques du modèle

4.2. 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 le plus courants.

Pour cet archétype, on suppose une construction en béton. 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.

4.2.1. 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).

4.2.2. Propriétés thermiques

Note : les couches d'étanchéité à l'eau, à l'air et à la vapeur (films plastiques et membranes) sont négligées

4.2.2.1. Dalle sur sol

Tableau 1 : Propriétés thermiques de la dalle du sous-sol

	e	k	c_p	ρ
	mm (in)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	kg m^{-3}
Béton lourd	304.8 (12'')	1.31	837	2240
Carrelage du sol	$R_{SI} = 0.13 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$			

4.2.2.2. Murs extérieurs

Tableau 2 : Propriétés thermiques des murs extérieurs – de l'extérieur vers l'intérieur

	e	k	c_p	ρ
	mm (in)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	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	26 (1'')	0.03	1214	29
Panneau de gypse	16 (0.6'')	0.16	837	800

4.2.2.3. Toiture

Tableau 3 : Propriétés thermiques de la toiture – de l'extérieur vers l'intérieur

	e	k	c_p	ρ
	mm (in)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	kg m^{-3}
Gravier du toit	12.7 (0.5")	1.44	1675	880
Isolation polystyrène	112 (4.4")	0.12	1210	544
Béton léger	51 (2")	0.36	837	1280

4.2.2.4. Murs intérieurs

Tableau 4 : Propriétés thermiques des murs intérieurs

	e	k	c_p	ρ
	mm (in)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	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

4.2.2.5. Planchers intérieurs

Tableau 5 : Propriétés thermiques des murs intérieurs

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

4.2.2.6. Résistances thermiques – résumé

Tableau 6 : tableau récapitulatif des résistances thermiques des parois

	Résistance thermique (RSI) [m ² .K/W]
Dalle sur sol	0.5
Murs extérieurs	1.2
Toiture	3.5
Murs intérieurs	0.4
Planchers intérieurs	0.5

4.2.3. 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. Les coefficients A, B, C et D dans l'équation (1) sont fixés à 0, 0, 0.224 et 0, respectivement, conformément aux recommandations pour modéliser l'infiltration dans le logiciel DOE-2. La valeur de I_{design} est ajustée pour obtenir un débit d'infiltration moyen de $0.25 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, correspondant à la valeur (constante) définie pour l'infiltration dans SIMEB (Hydro-Québec, 2013). Cette adaptation est spécifique au fichier météo (fichier CWEC pour l'aéroport à Montréal) et entraîne $I_{design} = 0.87 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

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

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.

D'autres détails sur l'enveloppe sont présentés dans (Vanroy, 2022).

4.3. Système CVCA

Suivant la discussion dans la section 3.2, le modèle n'est pas équipé d'un système de ventilation mécanique. Pour assurer une certaine qualité d'air, les salles de bains, le cafétaria et le gymnase ont une extraction de l'air vicié.

Pour le chauffage des espaces, chaque zone thermique est équipée avec des plinthes électriques, bien que les radiateurs thermiques soient également répandus dans les bâtiments scolaires, voire légèrement plus fréquents. La modélisation d'un système hydronique avec des radiateurs augmente le temps de calculs de la simulation et introduit la nécessité de poser de nouvelles hypothèses sur la boucle d'eau et sa régulation. Dans la modélisation, l'utilisation des plinthes électriques au lieu de radiateurs à eau chaude a un impact négligeable sur les besoins thermiques sur une année. Cette hypothèse a des impacts sur le profil de besoins à cause des différences dans l'émission de chaleur (radiatif / convectif) en plus de l'impact de l'inertie d'un système hydronique. Cependant pour cette première version d'archétype, ces impacts sont jugés acceptables par rapport aux autres approximations et inconnues.

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

4.3.1. Chauffage des espaces

Les plinthes électriques utilisés dans le modèle énergétique sont des plinthes 100 % convectives. Il est possible de modéliser des plinthes avec une fraction radiative spécifiée 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.

4.3.2. 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 une résistance thermique pour une alimentation d'air frais à température neutre.

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

4.3.3. 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 m² 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 d'influence.

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 réduite pendant l'hiver, et plus élevée 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 de 6.5 % 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 les actions qu'on sait que les occupants prennent, mais il n'a pas pu être validé en termes de taux de ventilation qui en résulte. Le niveau de ventilation naturelle, surtout pendant l'hiver, peut être plus grand ou plus petit que l'estimation actuel. 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. Eau chaude

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

Le chauffe-eau est supposé être électrique. Il n'y a pas de données explicites sur ce sujet, mais les consommation 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.

4.5. Gains internes et leurs horaires

Les gains internes viennent des occupants, des charges d'éclairage et des charges aux prises présents dans une espace. Les valeurs nominales utilisées dans la définition de l'archétype sont présentées dans le Tableau 7. Les horaires appliqués pour chacun sont montrés dans la Figure 7.

La densité d'occupation est tirée de (Schola, 2021). L'horaire d'occupation est pris de SIMEB (Hydro-Québec, 2013). La densité d'éclairage est une valeur adaptée de (Sansregret, 2022), tenant compte des avancements dans l'efficacité de l'éclairage depuis le moment où l'enquête a été menée. L'horaire pour l'éclairage est également pris de SIMEB (Hydro-Québec, 2013).

La densité des charges aux prises est retirée d'une étude faite sur les charges aux prises dans des écoles aux États-Unis (Srinivasan et al., 2011) et des valeurs présentées dans (Pless et al., 2007). L'horaire est ici aussi pris de SIMEB (Hydro-Québec, 2013).

Les horaires sont appliqués pendant les journées de semaine. Pendant la fin de semaine et les vacances, on suppose qu'il n'y a pas d'occupants et les valeurs des horaires sont donc mises à leur minimum pendant ces périodes.

Tableau 7 : Les valeurs nominales pour l'occupation, l'éclairage et les prises aux charges

Occupation des salles de classe	[m ² /personne]	3.4
Densité d'éclairage, salles de classe	[W/m ²]	14

Densité d'éclairage, autres espaces	[W/m ²]	8
Densité des charges aux prises, salles de classe	[W/m ²]	11

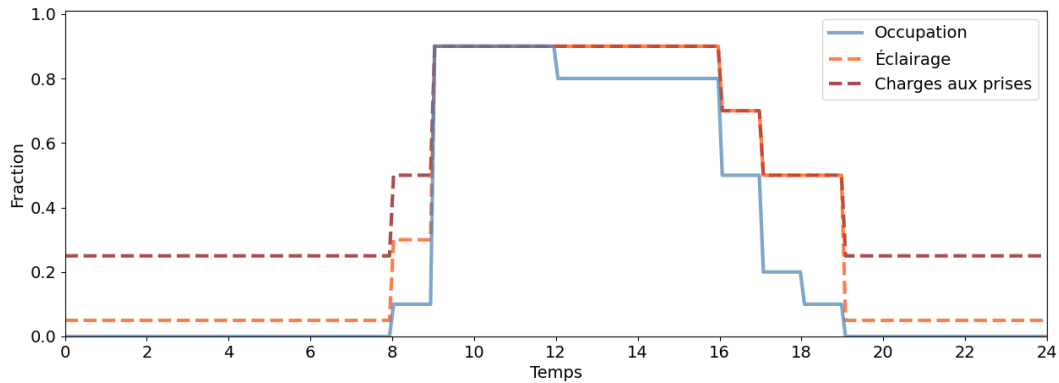


Figure 7 : Les horaires de l'occupation, de l'éclairage et des charges aux prises

4.5.1. Stratégies d'éclairage naturel

Comme mentionné précédemment, l'accès à la lumière naturelle est une des caractéristiques clés de ce type d'école. Des preuves anecdotiques suggèrent qu'il est peu probable d'avoir un contrôle automatisé de l'éclairage dans les écoles primaires, mais l'accès à la lumière naturelle aura néanmoins un impact sur la consommation d'électricité en raison du comportement des occupants. Une étude sur le comportement des occupants dans une salle de classe au Québec a documenté le comportement des occupants en relation de l'éclairage (Mercier, 2009). Les résultats de cette étude ont été utilisés pour concevoir un contrôle adapté pour l'éclairage dans EnergyPlus.

EnergyPlus permet de définir des contrôles sur l'éclairage qui tiennent compte des décisions des occupants en utilisant des probabilités. L'utilisateur peut définir la probabilité selon laquelle les lumières seront éteintes si l'éclairage naturel est suffisant (selon un niveau d'éclairage spécifié par l'utilisateur), sinon l'éclairage sera supposé être réglé par un horaire. Quand le niveau d'éclairage naturel tombe en dessous du seuil défini, les lumières seront toujours rallumées.

Le réglage des lumières est ON/OFF avec une probabilité de 70% que l'éclairage artificiel sera éteint quand le niveau d'éclairement est supérieur à 300 lux (Reinhart, 2014) au fond de la salle de classe.

5. Résultats et comparaison 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 CWeC, *Canadian Weather for Energy Calculations*), dans leur version mise à jour en 2020 (ECC Canada, 2020).

La consommation annuelle du modèle est 236 500 kWh, ce qui revient à une intensité énergétique de 0.52 GJ/m^2 . Pour les écoles dans la base de données de (MERN, 2021) on retrouve, pour des bâtiments chauffés à l'électricité et sans système CVCA centralisé, en moyenne une intensité énergétique de 0.43 GJ/m^2 et 50 % des bâtiments ayant une intensité énergétique entre 0.37 GJ/m^2 et 0.50 GJ/m^2 . 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).

La Figure 8 montre les fractions des utilisations finales pour le modèle en comparaison avec les statistiques provinciales pour des bâtiments d'enseignement (RNCAN-OEE, 2020). Cette catégorie comprend aussi les cégeps et universités, qui sont globalement équipés des systèmes CVCA centralisés, ce qui explique le profil assez différent. Une autre comparaison est ajoutée avec l'estimation des charges liées au chauffage, qui est calculé à partir des données de consommation de (MERN, 2021). Pour les bâtiments qui sont catégorisés comme utilisant principalement des sources d'énergie fossiles pour le chauffage, la partie de la consommation qui est de source fossile est 67 % de la consommation totale du bâtiment. Ce pourcentage varie principalement entre 50 et 75 % pour cette catégorie de bâtiments.

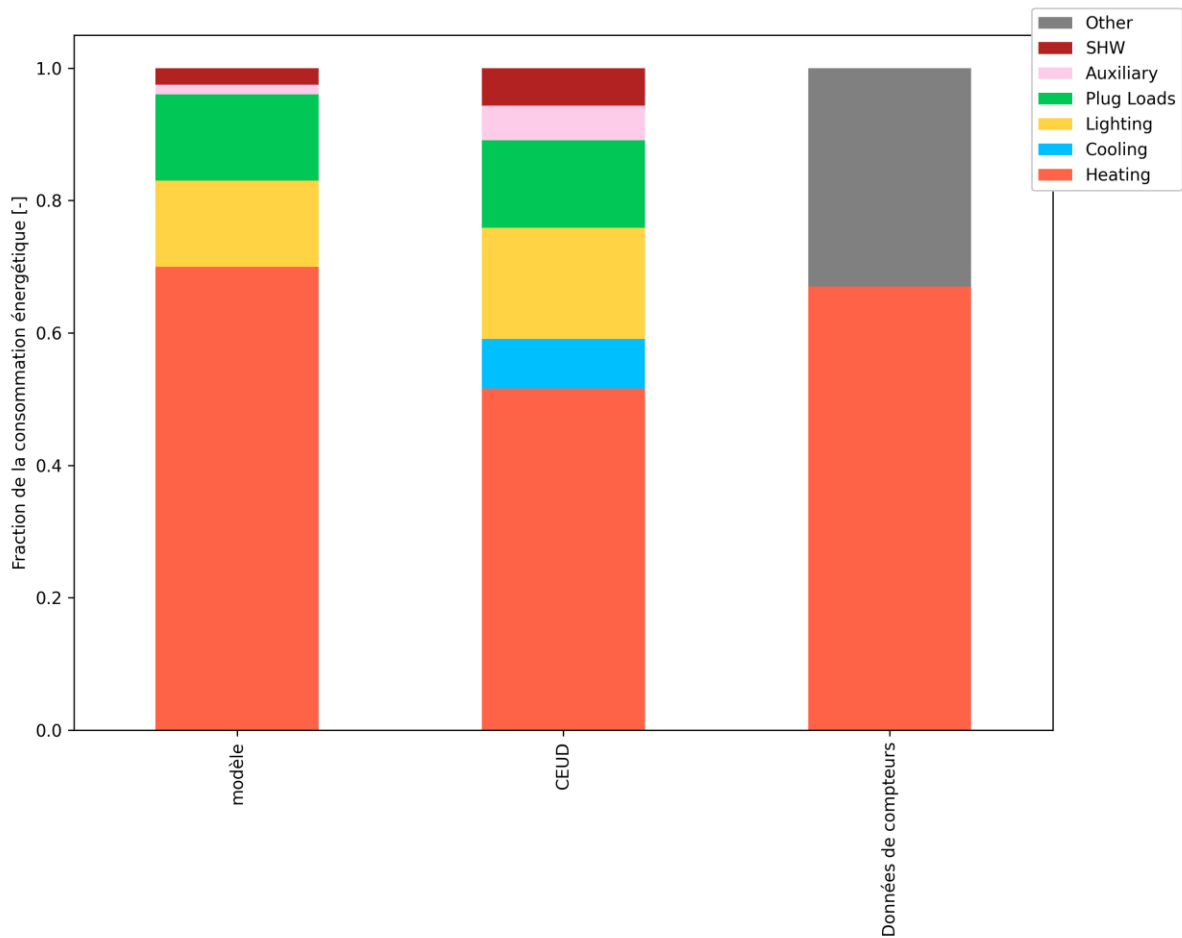


Figure 8 : La fraction de la consommation énergétique par utilisation finale pour le modèle, les statistiques provinciales selon le CEUD (RNCAN-OEE, 2020) et pour les données de la consommation énergétique des bâtiments scolaires de (MERN, 2021).

Les données de consommation nous donnent aussi des informations sur la pointe électrique des bâtiments. De nouveau, on regarde uniquement les bâtiments scolaires qui sont chauffés à l'électricité et sans système CVCA. Pour chaque bâtiment, la pointe électrique est mise à l'échelle par rapport à la taille du bâtiment. On observe en moyenne une pointe électrique relative de 0.05 kW/m^2 , ce qui revient à une pointe électrique de 80 kW pour la taille du bâtiment modélisé.

La pointe électrique pendant la simulation est de 160 kW, avec une pointe électrique de 130 kW pour le chauffage. Cette pointe est deux fois plus grande que ce qu'on voit dans les données des compteurs, ce qui indique que le modèle n'est actuellement pas capable de bien estimer le comportement dynamique des systèmes. Une des causes peut être une surestimation de la capacité installée dans les écoles par l'algorithme du dimensionnement des systèmes (*auto-sizing* d'EnergyPlus). Une autre cause peut être liée aux potentielles mesures prises dans les écoles pour réduire la pointe électrique, qui ne sont pas prises en compte dans le modèle énergétique.

6. Discussion et conclusion

L'étude présente une caractérisation des écoles primaires en se concentrant sur la typologie qui représente le plus grand nombre de bâtiments scolaires : l'école primaire construite entre 1945 et 1965 selon les principes de simplicité et d'efficacité de l'époque, privilégiant l'éclairage naturel et la ventilation naturelle, et permettant une construction rapide.

Un premier archétype est développé pour cette typologie. Le modèle a une géométrie rectangulaire avec couloir central et des salles de classe de chaque côté. Le niveau de fenestration est élevé (40 %), permettant l'éclairage naturel et la ventilation naturelle, qui sont également pris en compte dans le modèle énergétique. Les autres caractéristiques liées à l'occupation et au système CVCA sont ajoutées.

Une comparaison entre les résultats de simulation et les données de consommation d'écoles réelles nous indique qu'on obtient une bonne estimation de la consommation annuelle, mais qu'il y a un grand écart entre la simulation de la pointe électrique et la pointe électrique mesurée.

Le modèle actuel présente des limitations qui devront être abordées dans la suite du projet de développement des archétypes :

- L'archétype développé représente la typologie la plus fréquente. L'analyse des données disponibles a cependant montré qu'il serait nécessaire de développer plusieurs archétypes pour bien représenter le parc des écoles primaires québécoises.
- Bien que représentant le type d'école primaire le plus fréquent au Québec, l'archétype développé n'est probablement pas adapté à l'évaluation de certaines mesures d'efficacité énergétique en raison de l'absence de système de ventilation mécanique. En cas de rénovation majeure, l'installation potentielle d'un système de ventilation mécanique changerait vraisemblablement la « signature énergétique » de l'archétype développé.
- L'algorithme utilisé pour la ventilation naturelle n'est pas encore validé et peut être responsable d'une sous- ou surestimation des charges de chauffage dans le modèle énergétique. De plus, l'algorithme est sensible au fonctionnement du système CVCA, il ne pourrait donc pas être utilisé tel quel dans des études visant à évaluer l'impact de modifications du système CVCA.
- Une validation plus complète du modèle pourra être réalisée avec des données de consommation aux 15 minutes.

7. Références

- 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.
- DGFE-DES, (Direction générale du financement et de l'équipement). (2006). *Capacité d'accueil d'une école primaire-secondeaire*. 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
- Hydro-Québec. (2013). *SIMEB* (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.
- 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>
- NRC. (2017). *National Energy Code of Canada for Buildings 2017*. National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction.
- Pless, S., Torcellini, P., & Long, N. (2007). *Technical Support Document: Development of the Advanced Energy Design Guide for K-12 Schools—30% Energy Savings (Report NREL/TP-550-42114)*. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/918448>
- Reinhart, C. F. (2014). *Daylighting Handbook. Volume I: Fundamentals, Designing with the Sun*. Building Technology Press. <http://www.buildingtechnologypress.com>
- RNCan-OEE. (2020). *Secteur commercial et institutionnel Québec—Tableau 15: Consommation d'énergie secondaire et émissions de GES des services d'enseignement par utilisation finale*. Base de Données Nationale Sur La Consommation d'énergie; Ressources Naturelles Canada, Office de l'Efficacité Énergétique. <https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=res&juris=qc&rn=35&year=2020&page=3>
- 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.
- Srinivasan, R. S., Lakshmanan, J., Santosa, E., & Srivastav, D. (2011). Plug-load densities for energy analysis: K-12 schools. *Energy and Buildings*, 43(11), 3289–3294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.030>
- 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.