



NEXT-GENERATION
CITIES INSTITUTE

NEXT-GENERATION CITIES INSTITUTE

Archétypes bâtiments à bureaux

Envoyé à : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

Québec The logo for the Government of Quebec, consisting of the word "Québec" in white and the provincial coat of arms.

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

Par : Institut de Villes de Nouvelle Génération,
Université Concordia

1 Contents

1	Contents	1
1.1	Index de figures.....	2
1.2	Index de tableaux.....	3
2	Objectifs du document	4
3	Antécédents	4
3.1	Contrat Concordia-MELCCFP.....	4
4	Documentation utilisée par Concordia et livré par le Ministère et Hydro-Québec.	4
4.1	Données géospatiales.....	4
4.2	Données constructives.....	4
4.2.1	<i>Données de base</i>	4
4.2.2	<i>Données d'infiltration</i>	5
4.3	Données opérationnelles	6
4.4	Données de systèmes.....	6
4.5	Analyse exploratoire des données	6
5	Méthodologie générale de l'étude	10
6	Étapes de calcul.....	11
6.1	Clusterisation géométrique	11
6.1.1	<i>Méthodologie</i>	11
6.1.2	<i>Résultats</i>	15
6.2	Données proposées pour la partie constructive.....	18
6.2.1	<i>Introduction</i>	18
6.2.2	<i>Utilisation des données des sources officielles</i>	19
6.2.3	<i>Utilisation des données des sources additionnelles</i>	19
6.2.4	<i>Proposition finale constructive</i>	20
6.2.5	<i>Infiltration</i>	24
6.3	Données pour l'usage dans les archéotypes	25
6.3.1	<i>Consommation électrique des appartements</i>	25
6.4	Systèmes CVCA	26
6.4.1	<i>Systèmes de chauffage et de refroidissement centraux</i>	26
6.4.2	<i>Bâtiments à faible hauteur</i>	26
6.4.3	<i>Bâtiments de moyenne et grande hauteur</i>	26
6.5	Modèle final pour les résultats	29

6.5.1	<i>Création automatisée de modèles avec Grasshopper</i>	29
6.5.2	<i>Proposition finale de modèles</i>	30
6.5.3	<i>Simplification du modèle</i>	31
6.5.4	<i>Création of sets constructifs.....</i>	32
6.5.5	<i>Création de systèmes CVC</i>	34
7	References	38

1.1 Index de figures

<i>Figure 1 Distribution de catégories de bâtiment.....</i>	7
<i>Figure 2 Distribution des années de construction</i>	7
<i>Figure 3 Distribution de superficie par groupe</i>	8
<i>Figure 4 Corrélation entre l'année de construction et la superficie du bâtiment</i>	9
<i>Figure 5 Méthodologie détaillé</i>	10
<i>Figure 6: Paramètres utilisés dans le calcul.....</i>	11
<i>Figure 7: Example de calcul de ratio d'aspect et de ratio de compacité.....</i>	12
<i>Figure 8 Procédure pour atteindre les clusters</i>	12
<i>Figure 9 Processus de clusterisation.....</i>	12
<i>Figure 11 carte de corrélation des paramètres des données de bureau</i>	14
<i>Figure 12 échantillon de données affinées à l'aide du processus d'élimination des valeurs aberrantes..</i>	15
<i>Figure 12 résultats du groupe d'immeubles de bureaux de faible hauteur</i>	15
<i>Figure 12 résultats du groupe de Bâtiments de hauteur moyenne</i>	16
<i>Figure 12 résultats du groupe de Bâtiments de grande hauteur.....</i>	17
<i>Figure 17: Capture d'écran du document [10] mentionnant les hypothèses qu'ils ont utilisé pour leur étude</i>	20
<i>Figure 18: Capture d'écran du document [10] mentionnant les hypothèses qu'ils ont utilisé pour leur étude</i>	20
<i>Figure 22 Profils journaliers des différents critères</i>	25
<i>Figure 22 Système central de chauffage et de refroidissement.....</i>	26
<i>Figure 23 Schéma d'un système à volume d'air constant (CAV) typique</i>	27
<i>Figure 24 Schéma d'un système à volume d'air variable (VAV) typique.....</i>	28
<i>Figure 25 : Étape a processus Grasshopper.....</i>	29
<i>Figure 26 : Étape b processus Grasshopper.....</i>	29
<i>Figure 27 : Étape c processus Grasshopper.....</i>	30
<i>Figure 27 : Un des modèles proposés bâtiments à bureaux à faible hauteur.....</i>	30
<i>Figure 27 : Un des modèles proposés bâtiments à bureaux à moyenne hauteur</i>	31
<i>Figure 27 : Un des modèles proposés bâtiments à bureaux à grande hauteur</i>	31

Figure 28 : Bâtiment moyenne hauteur et grande hauteur, avec les divisions d'appartements	32
Figure 29: Schéma de production centralisé dans Open Studio.....	34
Figure 29: Boucle eau froide dans Open Studio	35
Figure 29: Schéma système condensation eau	36
Figure 30: Chauffe-eau électrique décentralisé	37

1.2 Index de tableaux

Tableau 1 résultats du groupe d'immeubles de bureaux de faible hauteur	16
Tableau 2 résultats du groupe de Bâtiments de hauteur moyenne	17
Tableau 3 résultats du groupe de Bâtiments de grande hauteur	18
Tableau 4 : Résumé des données utilisés par l'outil BTAP pour office Buildings.....	19
Tableau 6: Proposition finale constructive pour petits bureaux.....	21
Tableau 6: Proposition finale constructive bureaux taille moyenne	22
Tableau 6: Proposition finale constructive grands bureaux.....	23
Tableau 7: Proposition de valeurs d'infiltration implémentés dans les modèles OSM.....	24
Tableau 7: Proposition de valeurs pour les paramètres essentiels.....	25
Tableau 8: Archétypes proposés.....	29

2 Objectifs du document

Ce document vise à :

- Planifier le développement d'archétypes pour les bâtiments à bureaux pour le projet « Archétypes Québec »
- Établir clairement les hypothèses avant chaque une des étapes

D'accord avec l'équipe du projet Archétypes QC, nous avons laissé la partie de calibration et validation des modèles pour la phase suivante du projet.

Cependant, nous voulons que ce document soit un document vivant et utile pour échanger entre le ministère, l'équipe de Concordia, et l'équipe d'Hydro-Québec. Pour cette raison, au sein des différents chapitres du document apparaîtront des enjeux qui devront être validés par l'équipe du Ministère, afin d'avancer au plus vite vers une constitution d'archétypes.

De même, comme chapitre finale, de nouvelles étapes seront jugées nécessaires pour approfondir le problème.

3 Antécédents

3.1 Contrat Concordia-MELCCFP

Le document présent obéit au deuxième mandat que Concordia et Polytechnique font ensemble avec Hydro-Québec et le Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs pour le développement d'un parc d'archétypes de bâtiments pour le Québec.

4 Documentation utilisée par Concordia et livré par le Ministère et Hydro-Québec.

4.1 Données géospatiales

Les données géospatiales utilisées dans cette étude ont été recueillies pour soutenir le développement d'archétypes géométriques pour les immeubles de bureaux à Montréal. L'ensemble de données a été construit en intégrant de multiples sources, y compris des unités d'évaluation foncière, des données 3D sur les bâtiments, des données Lidar aériennes et des données cadastrales sur les parcelles. Cette approche multi-sources a permis la création d'un fichier geoJSON détaillé qui incorpore les attributs essentiels des bâtiments, tels que la hauteur, le nombre d'étages, le type d'utilisation et l'année de construction. Malgré certaines limites dans la qualité des données et la couverture géographique, en particulier en dehors de Montréal, le jeu de données traitées fournit une base solide pour l'analyse des morphologies et des caractéristiques des bâtiments.

Le processus de nettoyage des données a été décrit au document « Document sur les archétypes des bâtiments résidentiels multi logement à Québec » et nous avons utilisé les mêmes données de base pour créer les archétypes de bureaux.

4.2 Données constructives

4.2.1 Données de base

1. Codes de construction et documents officiels :

- Informations sur les données de simulation pour Openstudio of Federal Codes[1]

- Code de construction du Québec 2015 : Document faisant autorité, le Code de construction du Québec fournit un aperçu détaillé des normes et des exigences légales pour les structures à Montréal et dans l'ensemble du Québec. Le Code a joué un rôle essentiel dans la compréhension des spécifications obligatoires pour la construction de bâtiments dans la région. [7]

2. Reports :

- "Decarbonizing Canada's Large Building: A Pathway Forward": Ce rapport présente une feuille de route détaillée pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des grands bâtiments au Canada. Publié par le Conseil du bâtiment durable du Canada, il identifie les principales stratégies et actions nécessaires pour décarboniser les grands bâtiments commerciaux, institutionnels et résidentiels. [2].
- "Commercial and Institutional Buildings Retrofit Costing 1970s Low-Rise Office": Préparé par Ressources naturelles Canada, il fournit une ventilation détaillée des mesures de rénovation, y compris les stratégies de conservation de l'énergie, les améliorations technologiques et les améliorations de l'enveloppe du bâtiment. [5].

3. Associations professionnelles :

- Canadian Green Building Council (CaGBC): Le CBDCA joue un rôle essentiel dans la promotion des pratiques de construction durable au Canada. En fournissant des normes telles que la norme de construction zéro carbone, en publiant des recherches approfondies et en présentant des projets certifiés, l'organisation offre des ressources précieuses qui garantissent que les ensembles de bâtiments et les pratiques de construction sont conformes aux meilleures pratiques reconnues à l'échelle nationale. Ces contributions soutiennent le développement de bâtiments efficaces sur le plan énergétique, respectueux de l'environnement et conformes aux objectifs du Canada en matière de réduction des émissions de carbone. [8].
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): En fournissant des normes essentielles telles que la norme ASHRAE 90.1 pour l'efficacité énergétique et la norme 62.1 pour la qualité de l'air intérieur, en publiant des recherches approfondies et en proposant des programmes éducatifs complets, l'organisation veille à ce que les ensembles de bâtiments et les pratiques de construction s'alignent sur les meilleures pratiques reconnues à l'échelle internationale. Ces contributions favorisent le développement de bâtiments efficaces sur le plan énergétique, respectueux de l'environnement et conformes aux objectifs mondiaux de durabilité et de réduction des émissions de carbone. [9] [10].

4. Pages web et journaux:

- Sites Web des sociétés d'ingénierie : Un examen des sites Web des principales sociétés d'ingénierie basées à Montréal a permis d'obtenir des études de cas réels et des aperçus détaillés de projets de construction spécifiques, offrant ainsi une perspective pratique sur les ensembles de bâtiments commerciaux.
- Revues académiques : Des revues spécialisées dans les domaines du génie civil et de l'architecture ont été consultées pour trouver des articles sur des systèmes structuraux, des innovations ou des études de cas spécifiques. Ces ressources académiques ont permis d'approfondir la recherche en présentant des développements de pointe et des perspectives historiques sur les bâtiments commerciaux [3] [11][12].

4.2.2 Données d'infiltration

Pour les données d'infiltration, plusieurs documents ont été consultés et plusieurs données analysées :

- Les données d'une étude portant sur 88 bâtiments sont présentées à titre d'orientation pour les ensembles d'enrichissement de la construction en fonction du millésime modélisé. Référence (*RDH Building Science Inc. (2015). Étude de l'étanchéité à l'air des bâtiments de la partie 3. 148.*) [12]
- Plusieurs références concernant l'infiltration, comme [3] ou [14]

4.3 Données opérationnelles

Les données de consommation opérationnelle, encore une couche de la modélisation que nous avons fait, proviendront de deux sources, dans le modèle de simulation :

- Profils NECB, profile A, pour les gains internes, occupation, présence, eau chaude sanitaire
- Consommation électrique quart-horaire de certains groupes de bâtiments :
 - Bâtiments administratifs d'Hydro-Québec (23) et leur consommation électrique quart-horaire avec métadonnées sur l'année de construction et les systèmes énergétiques
 - 37 regroupements de 6 bâtiments à Montréal avec des données quart-horaires de consommation électrique.

Les conclusions de l'analyse détaillé élaboré dans ce document par rapport aux profils de consommation seront utilisées dans la phase de calibration et validation.

4.4 Données de systèmes

Ces informations ont été obtenues auprès de diverses sources crédibles. Les principaux sont :

- Le rapport Decarbonizing Canada's Large Buildings du Conseil du bâtiment durable du Canada [10].
- Le rapport de RNCAN sur l'évaluation des coûts de rénovation des bâtiments commerciaux et institutionnels [11]
- Autres études évaluées par des pairs [12], [13], [14], [15].

Ces sources fournissent une vue d'ensemble des systèmes énergétiques dans le contexte canadien et international, ce qui permet de concevoir des archétypes d'immeubles de bureaux.

4.5 Analyse exploratoire des données

Une analyse exploratoire des données (AED) a été réalisée sur un échantillon de 877 immeubles de bureaux à Montréal afin de mieux comprendre l'ensemble des données. Cette analyse a permis d'obtenir des informations précieuses sur la diversité des types d'immeubles, les tendances en matière de construction et les modèles spatiaux :

- Répartition des catégories d'immeubles
 - Les immeubles de bureaux de Montréal présentent des typologies distinctes en fonction de leur attachement physique aux structures voisines :
 - Immeubles de bureaux détachés : Représentant 53,8 % de l'échantillon, ces immeubles sont des structures autonomes, conçues pour une utilisation indépendante sans lien physique avec les immeubles voisins.
 - Immeubles de bureaux jumelés : Représentant 25,9 % de l'échantillon, ces bâtiments partagent un mur avec une structure voisine.

- Immeubles de bureaux entièrement attenants: Représentant 20,3 % de l'échantillon, ces bâtiments sont entièrement intégrés dans des rangées ou des blocs,

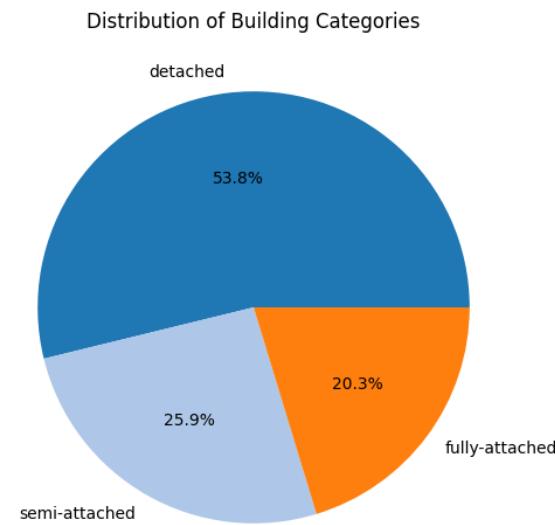


Figure 1 Distribution de catégories de bâtiment

- Tendances des années de construction

- L'analyse des années de construction a révélé une tendance temporelle claire :
- La majorité des immeubles de bureaux ont été construits après 1946, avec une forte augmentation de l'activité de construction entre les années 1950 et 1970, suivie d'un autre pic dans les années 2000, tandis que les immeubles construits avant 1945 sont moins courants et présentent souvent des styles architecturaux uniques et une importance historique.

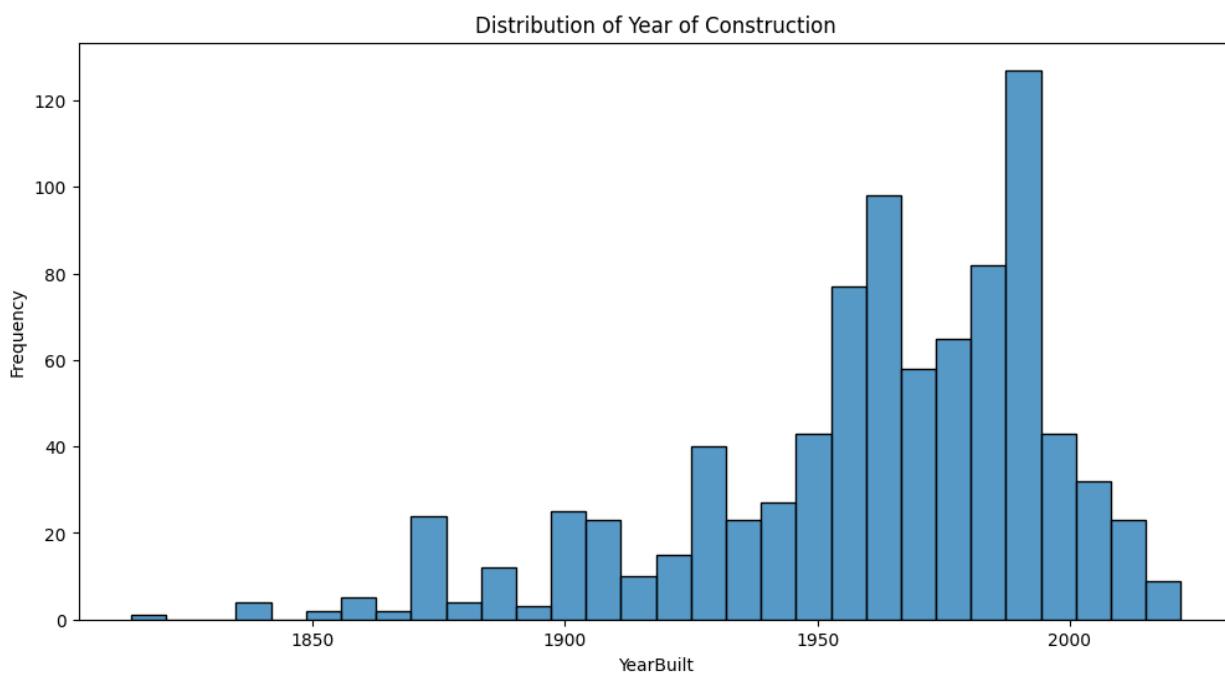


Figure 2 Distribution des années de construction

Ce diagramme illustre la distribution des surfaces de bâtiments dans les différents groupes d'années, classés dans la catégorie « BuildingCategory ». Chaque groupe d'années présente une gamme et une répartition distinctes des surfaces de bâtiments. Les bâtiments des périodes antérieures (par exemple, 1800-1945, 1946-1979 et 1980-2010) présentent des distributions plus larges, indiquant une plus grande variabilité dans la taille des bâtiments. En revanche, les groupes d'années plus récentes (2018-2020 et 2021-2024) présentent des fourchettes beaucoup plus petites et des surfaces médianes généralement plus faibles, ce qui suggère une tendance vers des tailles de bâtiments plus petites et plus cohérentes au cours des dernières années. Notamment, le groupe 2011-2017 conserve une médiane et un intervalle interquartile plus importants, comparables aux périodes précédentes.

- Corrélation entre l'année de construction et la superficie du bâtiment
 - Une corrélation positive a été observée entre l'année de construction et la surface du bâtiment :
 - Les bâtiments plus anciens ont tendance à être plus petits, ce qui reflète les contraintes urbaines historiques et les modèles d'utilisation des sols. Les bâtiments plus récents, en particulier ceux construits entre les années 1980 et 2010, sont plus grands, probablement en raison des progrès des techniques de construction, de la demande croissante d'espaces de bureaux et de l'étalement urbain.

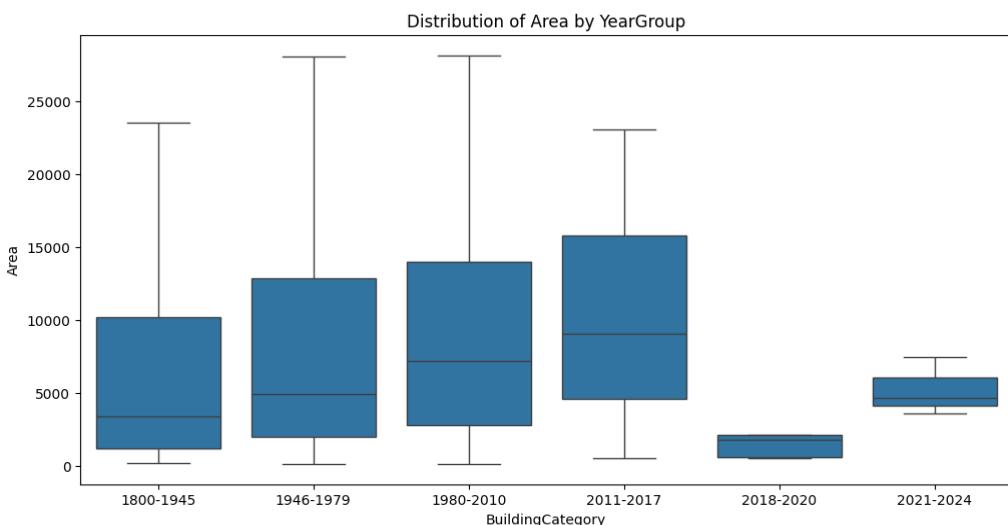


Figure 3 Distribution de superficie par groupe

Corrélation entre l'année de construction et la superficie des immeubles de bureaux

Ce diagramme de dispersion montre la distribution des surfaces des immeubles de bureaux en fonction de l'année de construction. Les bâtiments construits avant le milieu du 20e siècle ont généralement des surfaces plus petites et plus homogènes. Après les années 1950, on observe une nette augmentation de la variabilité, avec l'apparition d'un nombre important d'immeubles de bureaux de grande taille. Cette tendance est particulièrement visible dans les données relatives aux bâtiments individuels, qui présentent les surfaces les plus importantes, tandis que les catégories des bâtiments jumelés et des bâtiments entièrement jumelés conservent des plages plus petites et plus cohérentes. Les données indiquent une évolution notable vers des espaces de bureaux plus grands au cours des périodes de construction les plus récentes.

- Modèles morphologiques : Les caractéristiques morphologiques des bâtiments, telles que

la surface, le rapport d'aspect et le rapport hauteur/emprise au sol, ont été examinées en fonction des périodes de construction et des catégories :

- Bâtiments antérieurs à 1945 : Tendance à être compacts et bas, reflétant les pratiques architecturales historiques.
- Bâtiments d'après 1945 : Les bâtiments d'après 1945 ont tendance à être compacts et de faible hauteur, ce qui reflète les pratiques architecturales historiques.
- La figure 6 des surfaces de bâtiments par période de construction met en évidence l'augmentation de la variabilité et de l'échelle au fil du temps, les bâtiments les plus récents occupant souvent des surfaces plus importantes et comportant plus d'étages.

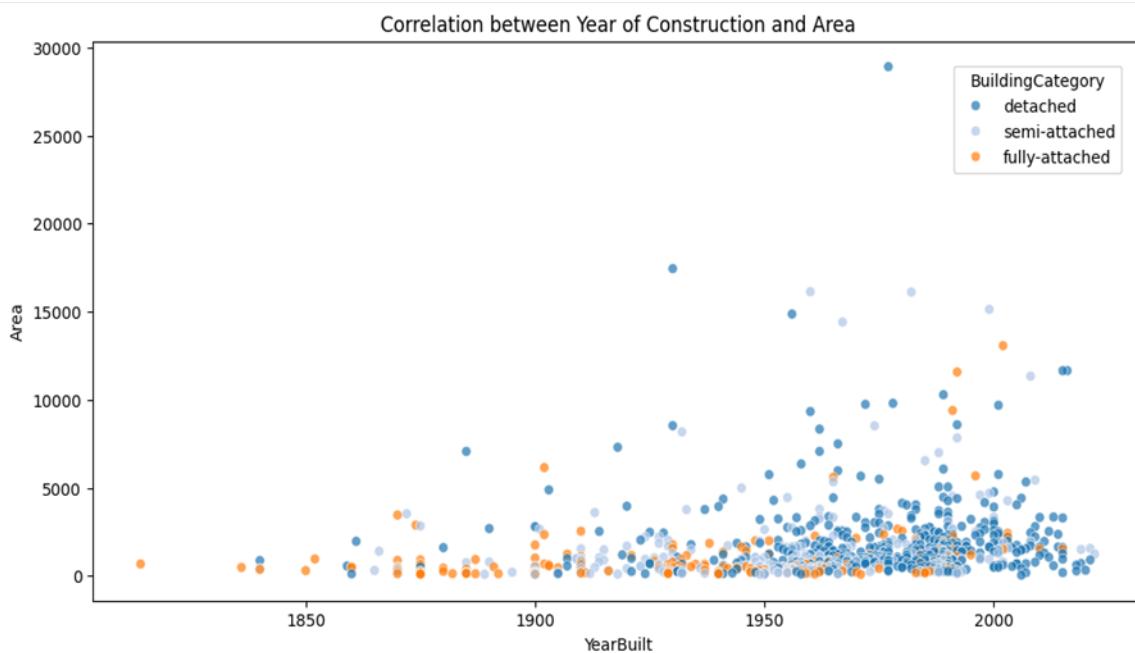


Figure 4 Corrélation entre l'année de construction et la superficie du bâtiment

- Nettoyage et validation des données : L'AED comprenait également des processus de nettoyage et de validation, dans le cadre desquels les enregistrements en double et redondants ont été supprimés, les valeurs spatiales aberrantes et les polygones anormaux ont été filtrés à l'aide de seuils basés sur la superficie, et des améliorations supplémentaires, telles que l'incorporation des centroïdes des bâtiments et des limites administratives, ont permis d'accroître la précision spatiale et la facilité d'utilisation des données.

5 Méthodologie générale de l'étude

La vision générale de la méthodologie suivie est détaillée à la Figure 8. Nous pouvons voir à gauche les données utilisées, les processus de traitement des données, les décisions prises pour la simulation et l'implémentation de ces solutions dans des modèles *Openstudio* et des mesures ruby, qui pourront être utilisés dans l'outil *Parametric Analysis Tool* (PAT) après le projet.

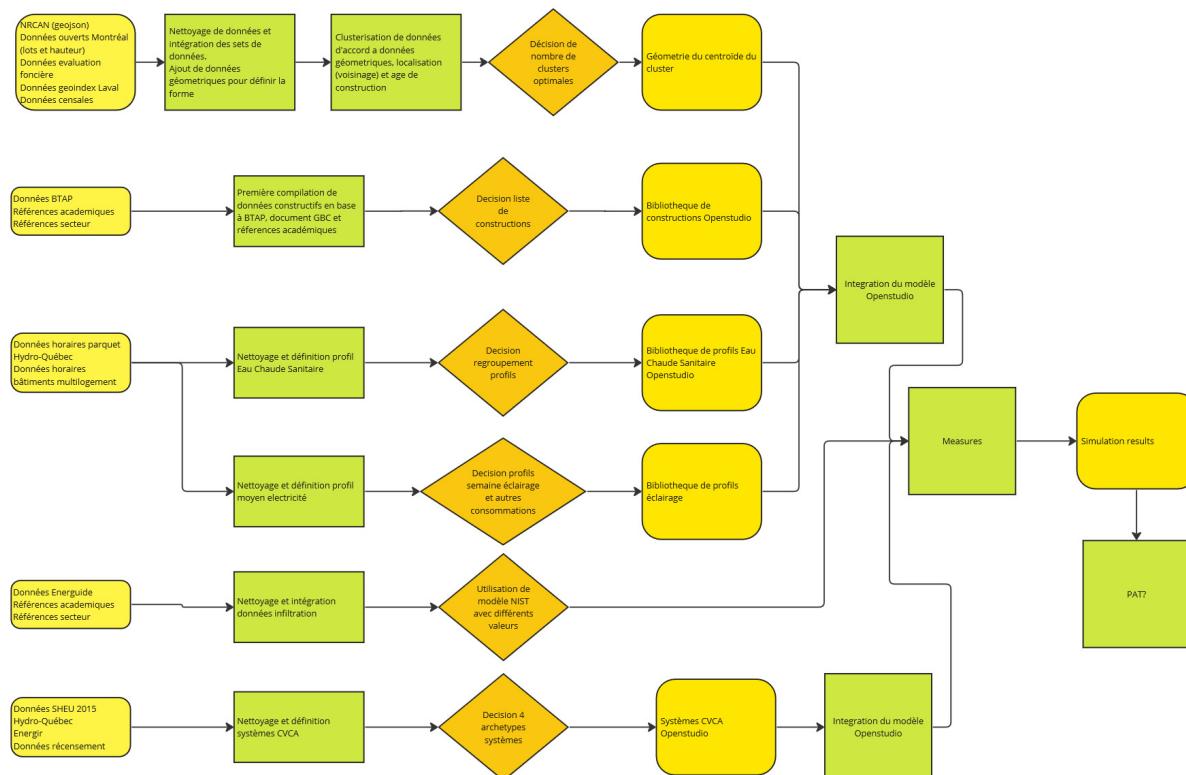


Figure 5 Méthodologie détaillée

6 Étapes de calcul

6.1 Clusterisation géométrique

6.1.1 Méthodologie

Ce rapport présente une mise à jour exhaustive sur l'avancement actuel du projet d'archétypes de bâtiments de bureaux, en détaillant la méthodologie employée et en exposant les livrables finaux prévus. L'objectif principal de ce projet est de développer des archétypes représentatifs pour les bâtiments de bureaux, classés en fonction de leur hauteur et de leur période de construction. Ces archétypes sont essentiels pour soutenir les efforts de modélisation énergétique urbaine et permettre une analyse efficace des schémas de demande énergétique dans les environnements urbains.

Pour atteindre cet objectif, nous utilisons une approche de clustering basée sur les données. La phase initiale de ce processus de clustering implique un raffinement minutieux du jeu de données et l'élimination systématique des valeurs aberrantes. Cette étape est cruciale, car les valeurs aberrantes peuvent altérer de manière significative les résultats des algorithmes de clustering, conduisant à des définitions d'archétypes inexactes. La détection des valeurs aberrantes est basée exclusivement sur des paramètres géométriques, étant donné que le clustering vise à regrouper les bâtiments en fonction de leurs caractéristiques géométriques. Plus précisément, le processus de détection examine des variables telles que la surface de plancher, le volume du bâtiment, la surface d'emprise au sol, le rapport surface-volume et le rapport de forme (aspect ratio). En analysant en profondeur ces valeurs géométriques, nous pouvons identifier les points de données qui s'écartent substantiellement de la norme. L'élimination de ces anomalies garantit que les clusters résultants représentent fidèlement les caractéristiques géométriques inhérentes aux bâtiments de bureaux du jeu de données, améliorant ainsi la validité et la fiabilité des archétypes développés.

Les données que nous avons pu trouver et consolider étaient principalement des données géométriques et des données sur l'année de construction du bâtiment. De nombreuses références font état de l'effet très important des caractéristiques géométriques, les adjacences des bâtiments, et de l'année de construction sur la demande thermique globale des bâtiments, ce qui est notre objectif.

Ces caractéristiques géométriques comprennent le ratio d'aspect et le ratio de compacité.

Données géométriques	Données sémantiques	Calculé	
<ul style="list-style-type: none"> Forme du bâtiment Superficie du bâtiment Hauteur 	<ul style="list-style-type: none"> Année de construction 	<ul style="list-style-type: none"> S/V (Superficie de l'enveloppe/Volume) Aspect Ratio (longueur/largeur) 	 <p>par type de bâtiment (Semi-attached, Detached, Attached)</p>

Figure 6: Paramètres utilisés dans le calcul

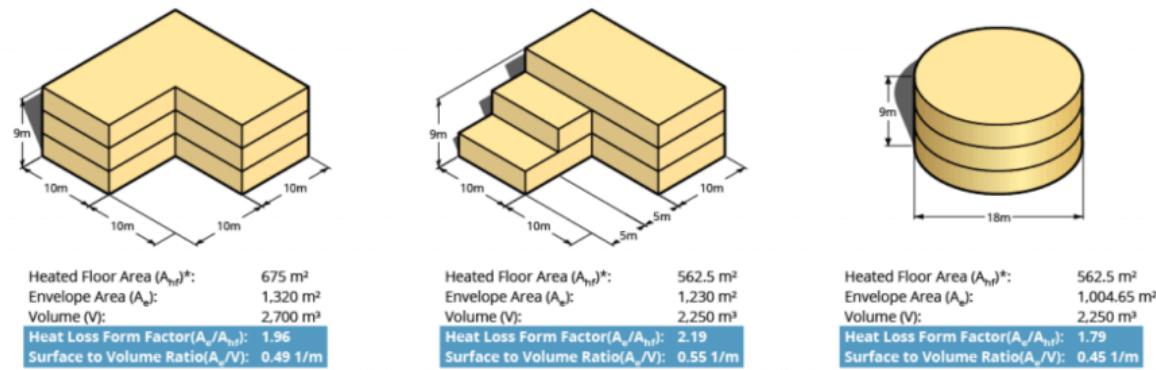


Figure 7: Example de calcul de ratio d'aspect et de ratio de compacité

Notre méthodologie globale est définie par les grandes étapes suivantes. Le premier élément de ségrégation majeur dans l'ensemble de données et qui est très efficace dans la demande d'énergie des bâtiments est le type de contiguïté des bâtiments. Nous les avons divisés en trois catégories principales (structures attachées, détachées et semi-détachées).

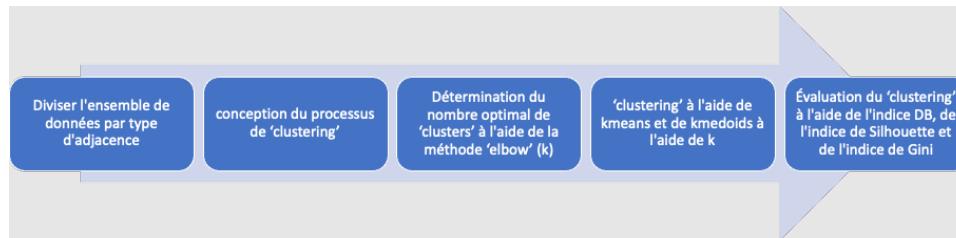


Figure 8 Procédure pour atteindre les clusters

Les méthodes de "clustering" couvrent un grand nombre de types et d'utilisations différents. La méthode la plus couramment utilisée dans l'environnement bâti, d'après la littérature, est celle des "k means". K-means minimise la somme des distances quadratiques à l'intérieur de la classe par rapport à la moyenne de la classe. Le centroïde d'une classe est la moyenne de tous les points de la classe.

L'identification de la valeur de "k" dans la population étudiée est une étape essentielle de la méthode "k means clustering". Ce processus est réalisé à l'aide de plusieurs méthodes, mais la méthode la plus couramment utilisée est la "méthode du elbow". Ensuite, le processus de "clustering" se met en place. La population de données est divisée en groupes plus petits où un centroïde est utilisé pour représenter le groupe.

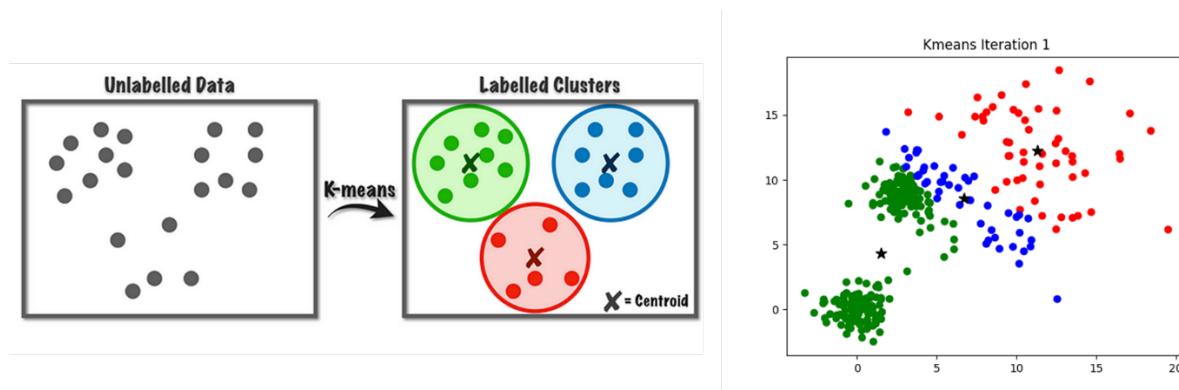


Figure 9 Processus de clusterisation

Dans cette analyse, des variables clés ont été sélectionnées pour guider le processus de clustering, garantissant que les clusters résultants représentent de manière significative différents types de bâtiments de bureaux. Les variables incluent :

- Rapport Surface/Volume (S/V) : Cette mesure fournit un aperçu de la géométrie du bâtiment en reliant sa surface extérieure à son volume interne. Un rapport SA/V plus élevé indique un bâtiment avec une plus grande surface extérieure par rapport à son volume, ce qui peut avoir des implications sur les pertes ou gains de chaleur et, par conséquent, sur l'efficacité énergétique.
- Rapport de forme (Aspect Ratio) : Il s'agit du rapport entre la longueur et la largeur du bâtiment, décrivant la forme globale de l'emprise au sol du bâtiment. Le rapport de forme peut influencer l'éclairage naturel, la ventilation et la répartition des espaces intérieurs, affectant la performance énergétique opérationnelle du bâtiment.
- Période de construction (Vintage) : Cela fait référence à la période de construction ou à l'âge du bâtiment. La période de construction est un facteur critique car les codes du bâtiment, les matériaux de construction et les pratiques de conception ont évolué au fil du temps, impactant les propriétés thermiques et l'efficacité énergétique des bâtiments.

En incorporant ces variables dans l'algorithme de clustering des k-moyennes, nous visons à catégoriser les bâtiments de bureaux en archétypes qui reflètent non seulement leurs caractéristiques géométriques mais prennent également en compte les différences résultant de leurs périodes de construction.

En plus de la sélection des variables clés pour le clustering, les données ont été divisées en trois catégories de bâtiments de bureaux basées sur la hauteur afin de mieux saisir la diversité des types de bâtiments. Ces catégories sont :

- Bâtiments de faible hauteur (1-3 étages) : Ces bâtiments sont généralement de petite envergure et peuvent présenter des schémas d'utilisation énergétique différents par rapport aux structures plus hautes, en raison de facteurs tels que la réduction de l'énergie liée au transport vertical (par exemple, les ascenseurs) et des rapports enveloppe-volume différents.
- Bâtiments de hauteur moyenne (4-10 étages) : Les bâtiments de hauteur moyenne représentent une catégorie de transition, combinant des caractéristiques des structures de faible et de grande hauteur. Ils peuvent présenter des profils énergétiques uniques en raison de leur hauteur modérée et de densités d'occupation accrues.
- Bâtiments de grande hauteur (plus de 10 étages) : Les bâtiments de grande hauteur sont significatifs dans les environnements urbains et disposent souvent de systèmes mécaniques complexes et de demandes énergétiques plus élevées. Leur hauteur substantielle influence des facteurs tels que l'exposition au vent, l'effet de cheminée et l'ombrage solaire, qui peuvent affecter la performance énergétique.

Il faut analyser la corrélation entre les caractéristiques obtenues dans l'ensemble de données. L'idée est ici d'éliminer les caractéristiques fortement corrélées et de n'en conserver qu'une seule afin de ne pas fausser le processus de "clustering".

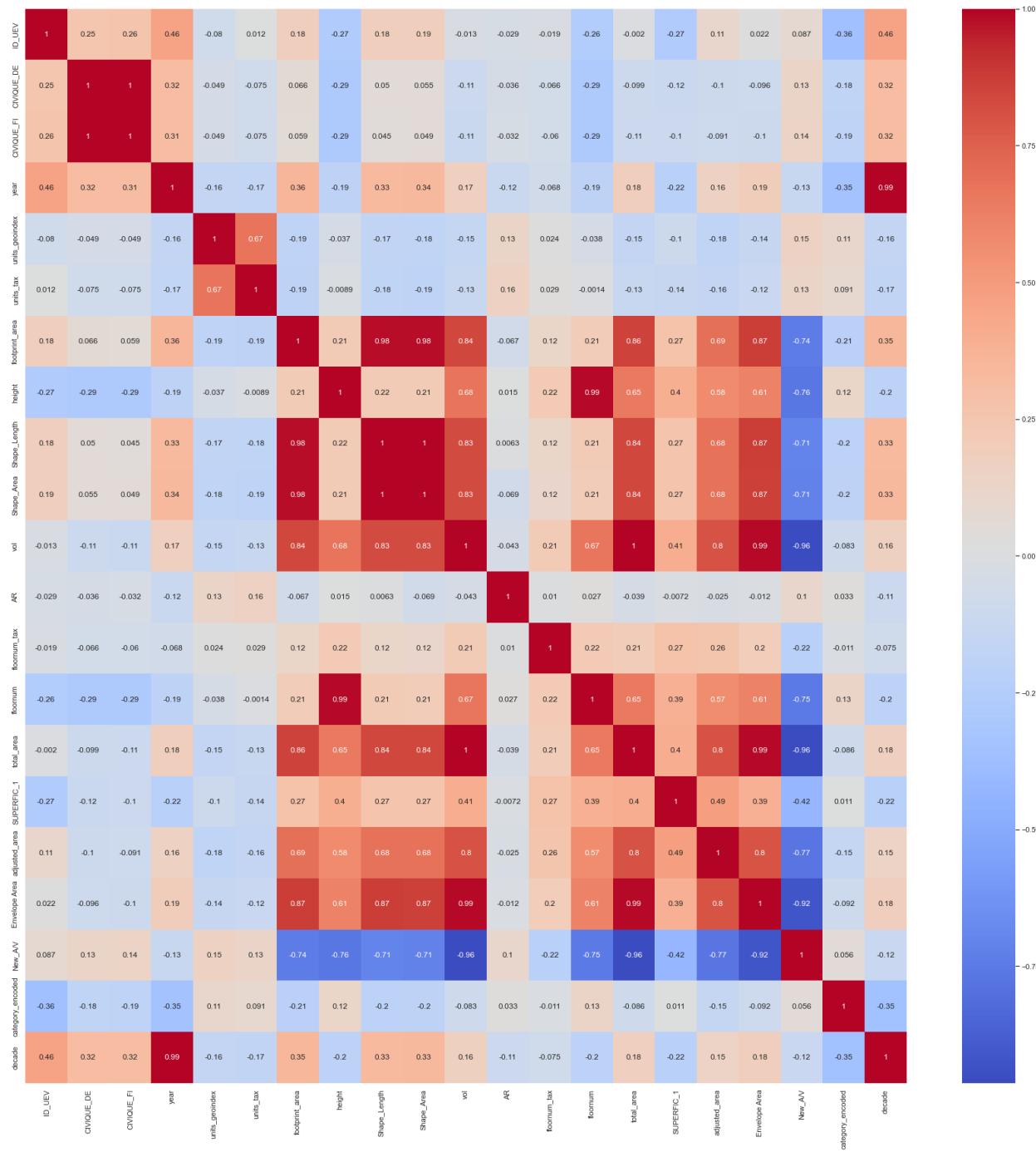


Figure 10 carte de corrélation des paramètres des données de bureau

La première étape du processus de clustering consiste en un raffinement minutieux des données et en l'élimination des valeurs aberrantes. Cette étape est essentielle, car les valeurs aberrantes peuvent altérer de manière significative les résultats des algorithmes de clustering. La détection des valeurs aberrantes est basée exclusivement sur des paramètres géométriques, étant donné que l'objectif principal est de créer des clusters fondés sur les caractéristiques géométriques. Plus précisément, le processus de détection examine des mesures telles que la surface de plancher, le volume du bâtiment, la surface d'emprise au sol, le rapport surface-volume et le rapport de forme (aspect ratio). En analysant ces valeurs géométriques, nous pouvons identifier les points de données qui s'écartent substantiellement de la norme. L'élimination de ces

anomalies garantit que les clusters résultants représentent fidèlement les caractéristiques géométriques inhérentes au jeu de données.

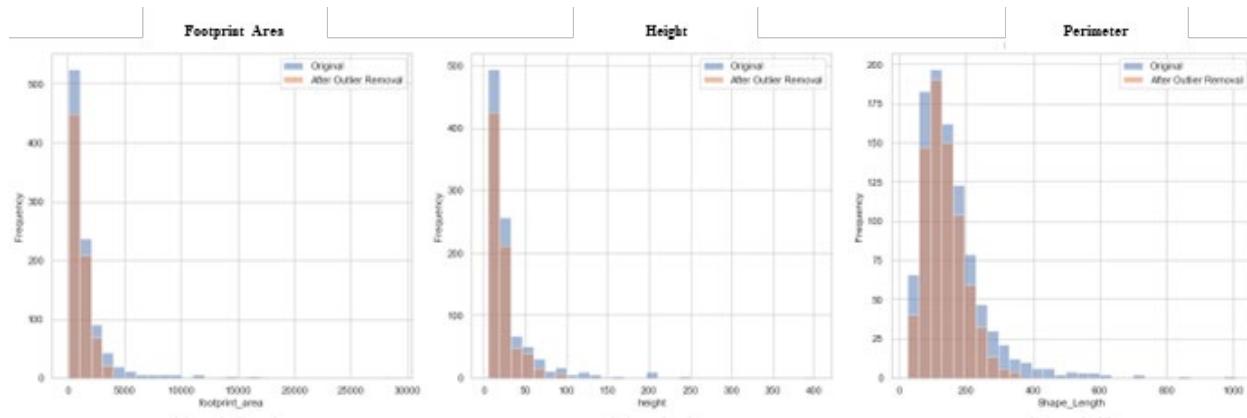


Figure 11 échantillon de données affinées à l'aide du processus d'élimination des valeurs aberrantes

6.1.2 Résultats

6.1.2.1 Bâtiments de faible hauteur (1-3 étages)

- Clusters : 3 - 4
- Périodes de construction :
 - Avant 1945
 - 1946-1983
 - 1984-2010
 - Après 2010

La première partie des résultats se concentre sur la structure de segmentation des bâtiments de bureaux de faible hauteur, en particulier ceux comportant 1 à 3 étages. Dans cette catégorie, l'analyse de clustering a été menée en tenant compte des types d'attachement des bâtiments—détachés, semi-attachés et attachés. Le nombre de clusters variait entre 3 et 4 pour chaque catégorie d'attachement

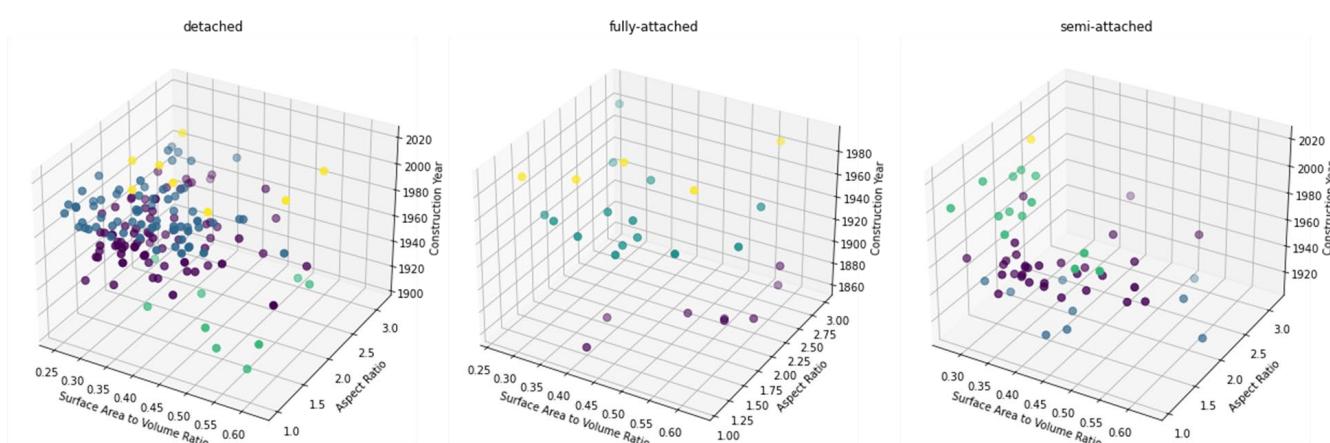


Figure 12 résultats du groupe d'immeubles de bureaux de faible hauteur

Tableau 1 résultats du groupe d'immeubles de bureaux de faible hauteur

Global ID	Aspect Ratio	Surface Area to Volume Ratio	Attachment	Year	Cluster
1004223	1.743	0.359605	Detached	after 2010	3
3113553	1.734	0.437158	Detached	pre 1945	2
4074292	1.713	0.366047	Detached	1946-1983	0
5077080	1.54	0.36879	Detached	1984-2010	1
1097647	1.852	0.402488	Fully-attached	1984-2010	2
1036915	1.947	0.574981	Fully-attached	pre 1945	0
4035774	1.555	0.406361	Fully-attached	1946-1983	1
1008461	1.479	0.358564	Semi-attached	1946-1983	0
1019483	1.483	0.372096	Semi-attached	1984-2010	2
3043070	2.081	0.309545	Semi-attached	after 2010	3

6.1.2.2 Bâtiments de hauteur moyenne (4-10 étages)

- Clusters : 4
- Périodes de construction :
 - Avant 1945
 - 1946-1983
 - 1984-2010
 - Après 2010

La deuxième partie des résultats se concentre sur la structure de segmentation des bâtiments de bureaux de hauteur moyenne, spécifiquement ceux comportant de 4 à 10 étages. Dans cette catégorie, l'analyse de clustering a été menée en tenant compte des types d'attachement des bâtiments—détachés, semi-attachés et attachés. Le nombre de clusters était constamment de 4 pour chaque catégorie d'attachement.

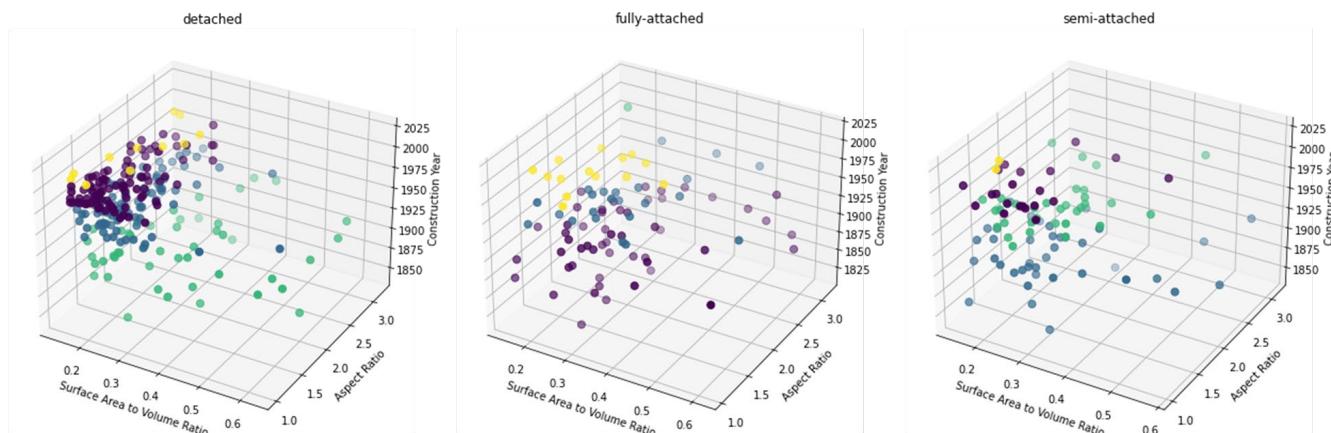


Figure 13 résultats du groupe de Bâtiments de hauteur moyenne

Tableau 2 résultats du groupe de Bâtiments de hauteur moyenne

Global ID	Aspect Ratio	Surface Area to Volume Ratio	Attachment	Year	Cluster
5030608	1.668	0.378539	Detached	pre 1945	2
3057021	1.468	0.248504	Detached	1984-2010	0
5226066	1.894	0.20692	Detached	after 2010	3
3075063	1.61	0.20497	Detached	1946-1983	1
1039140	1.812	0.271429	Fully-attached	1946-1983	1
1020741	2.693	0.212963	Fully-attached	after 2010	2
1000008	1.827	0.3396	Fully-attached	pre 1945	0
1119752	1.708	0.251478	Fully-attached	1984-2010	3
1058718	1.43	0.189271	Semi-attached	after 2010	3
2166333	1.522	0.266427	Semi-attached	1984-2010	0
3046938	1.648	0.277352	Semi-attached	pre 1945	1
3081854	1.753	0.282237	Semi-attached	1946-1983	2

Bâtiments de grande hauteur (plus de 10 étages)

- **Clusters :** 2 - 3
- Périodes de construction :
 - Avant 1945
 - 1946-1983
 - 1984-2010
 - Après 2010

La troisième partie des résultats se concentre sur la structure de segmentation des bâtiments de bureaux de grande hauteur, spécifiquement ceux ayant plus de 10 étages. Dans cette catégorie, l'analyse de clustering a été menée en tenant compte des types d'attachement des bâtiments—détachés, semi-attachés et attachés. Le nombre de clusters variait entre 2 et 3 pour chaque catégorie d'attachement.

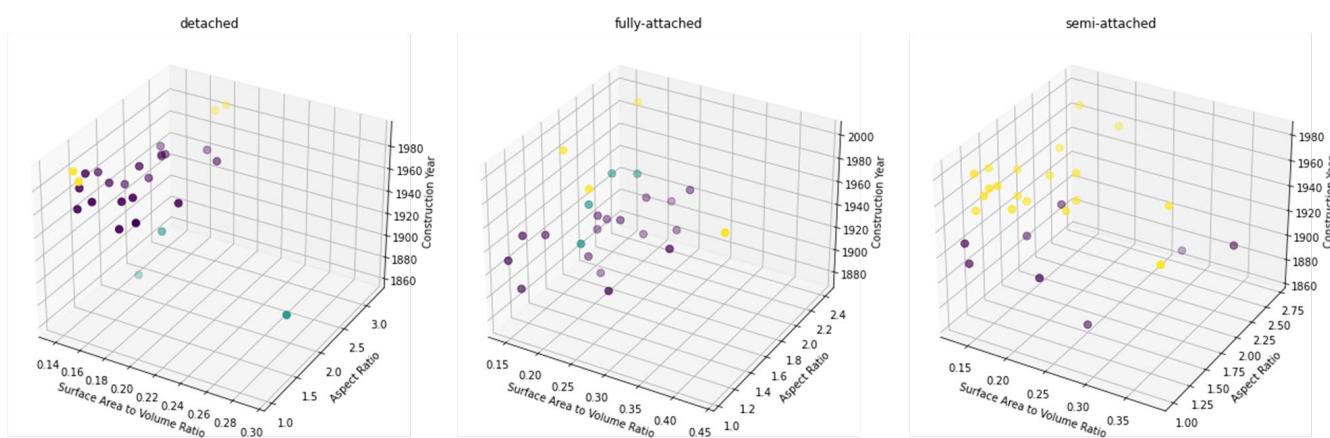


Figure 14 résultats du groupe de Bâtiments de grande hauteur

Tableau 3 résultats du groupe de Bâtiments de grande hauteur

Global ID	Aspect Ratio	Surface Area to Volume Ratio	Attachment	Year	Cluster
1037480	1.573	0.292514	Detached	pre 1945	1
5090176	3.082	0.176944	Detached	1984-2010	2
1040751	1.825	0.168038	Detached	1946-1983	0
5078789	1.477	0.172914	Fully-attached	1984-2010	2
1002602	1.754	0.186234	Fully-attached	pre 1945	0
1039049	1.998	0.216751	Fully-attached	1946-1983	1
1036823	1.669	0.156996	Semi-attached	pre 1945	0
1039341	1.522	0.160134	Semi-attached	1946-1983	1

6.2 Données proposées pour la partie constructive

6.2.1 Introduction

Comprendre les matériaux de construction et les assemblages qui définissent un archétype est une étape essentielle dans l'évaluation de sa performance, de sa durabilité et de sa résilience à long terme. Les archétypes, souvent utilisés pour représenter des types de bâtiments communs dans des régions ou des époques spécifiques, servent de base à l'analyse des performances structurelles et énergétiques des bâtiments. En examinant les couches et les éléments qui composent leur construction, nous obtenons des informations précieuses sur la relation entre les choix de matériaux, les techniques d'assemblage et leur impact sur les résultats environnementaux et fonctionnels.

Dans le contexte du Québec, une région caractérisée par un patrimoine architectural distinct et des conditions climatiques rigoureuses, l'étude des assemblages de construction revêt une importance supplémentaire. Les immeubles de bureaux et les bâtiments commerciaux du Québec, en particulier ceux situés dans les centres urbains, doivent concilier durabilité, esthétique et efficacité énergétique tout en résistant aux fluctuations extrêmes de température, aux fortes chutes de neige et aux problèmes d'humidité. Ces structures, souvent construites pour accueillir un grand nombre d'occupants et des activités à forte consommation d'énergie, nécessitent des méthodes de construction et des matériaux avancés pour optimiser les performances et répondre aux normes énergétiques modernes.

Les assemblages de construction des archétypes de bureaux et de commerces du Québec, qui comprennent des éléments structuraux, des couches d'isolation, des revêtements et d'autres composants, jouent un rôle essentiel dans la détermination de l'efficacité thermique, de la durabilité et de l'adaptabilité d'un bâtiment à son environnement. Chaque couche de ces assemblages contribue de manière unique à la performance globale, reflétant le contexte technologique, culturel et réglementaire de l'époque. Par exemple, de nombreux immeubles de bureaux anciens présentent de grandes façades en verre et des cadres en acier, ce qui, historiquement, donnait la priorité à l'esthétique et à l'ouverture des espaces intérieurs, mais entraînait souvent des demandes énergétiques élevées. Les pratiques modernes de rénovation intègrent des vitrages à haute performance, des coupures thermiques et une isolation avancée pour améliorer l'efficacité énergétique tout en préservant les styles architecturaux emblématiques de ces structures.

Ce rapport se concentre sur l'identification et la caractérisation des matériaux de construction et des assemblages des archétypes d'immeubles de bureaux et commerciaux du Québec, afin de détailler la composition et l'agencement de leurs couches structurelles et thermiques. En analysant systématiquement ces composants, l'étude cherche à fournir une compréhension globale de la façon dont les techniques de construction ont évolué et comment elles influencent

l'interaction de l'archétype avec son environnement. En outre, les résultats de l'étude sont essentiels pour relever des défis majeurs tels que la rénovation d'anciens immeubles de bureaux afin d'améliorer leur efficacité énergétique tout en conservant leur fonctionnalité, ainsi que la conception de nouveaux espaces commerciaux conformes aux objectifs de développement durable du Québec.

6.2.2 Utilisation des données des sources officielles

Les ensembles de données de construction pour le Québec (et pour l'ensemble du Canada) ont utilisé les ensembles de données du NREL et du BTAP comme référence principale pour développer et améliorer les divers assemblages de construction décrits dans ce document. Les ensembles de données du BTAP, utilisés pour tester différents archétypes pour les petits, moyens et grands immeubles de bureaux, présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 4 : Résumé des données utilisés par l'outil BTAP pour office Buildings

Area	Fermetures opaques		Fermetures transparentes	
	Zone thermique	Zone 6A	Zone 7A	Zone 6A
1945-1980	Mur avec une U=0.823 W/m2K Toiture atteignant U=0.267 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=3.822 W/m2K.	Mur avec une U=0.772 W/m2K Toiture atteignant U=0.227 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=3.822 W/m2K.	Fenêtre avec une U combiné de 2.95 W/m2K, SHGC = 0.39	Fenêtre avec une U combiné de 2.95 W/m2K SHGC = 0.49
1980-2005	Mur avec une U=0.426 W/m2K Toiture atteignant U=0.267 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=3.822 W/m2K.	Mur avec une U=0.346 W/m2K Toiture atteignant U=0.227 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=3.822 W/m2K.	Fenêtre avec une U combiné de 2.95 W/m2K, SHGC = 0.39	Fenêtre avec une U combiné de 2.95 W/m2K SHGC = 0.49
2005-2010	Mur avec une U=0.426 W/m2K Toiture atteignant U=0.267 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=3.822 W/m2K.	Mur avec une U=0.346 W/m2K Toiture atteignant U=0.227 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=3.822 W/m2K.	Fenêtre avec une U combiné de 2.95 W/m2K, SHGC = 0.39	Fenêtre avec une U combiné de 2.95 W/m2K SHGC = 0.49
2010-2015	Mur avec une U=0.247 W/m2K Toiture atteignant U=0.183 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=0.183 W/m2K.	Mur avec une U=0.210 W/m2K Toiture atteignant U=0.162 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=0.162 W/m2K.	Fenêtre avec une U combiné de 2.2 W/m2K, SHGC = 0.39	Fenêtre avec une U combiné de 2.2 W/m2K SHGC = 0.49
2015-2024	Mur avec une U=0.240 W/m2K Toiture atteignant U=0.138 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=0.156 W/m2K.	Mur avec une U=0.215 W/m2K Toiture atteignant U=0.121 W/m2K. Sol avec isolation pour arriver à U=0.138 W/m2K.	Fenêtre avec une U combiné de 1.73 W/m2K, SHGC = 0.39	Fenêtre avec une U combiné de 1.73 W/m2K SHGC = 0.49

6.2.3 Utilisation des données des sources additionnelles

D'après les documents susmentionnés, nous constatons que [**] propose les compositions suivantes du rapport fenêtre/mur et des enveloppes opaques et transparentes pour les immeubles de bureaux de faible et de moyenne hauteur.

Table 25 Baseline building assumptions for low-rise office archetype in Montreal

	1970s	1990s
Enclosure		
Walls	Steel stud wall w/batt insulation, effective overall RSI-2.11 m ² -K/W.	Steel stud wall w/batt insulation, effective overall RSI-2.11 m ² -K/W.
Windows	Single glazed, non-thermally broken aluminum frames, USI – 5.68 W/m ² -K, SHGC-0.80.	Double glazed, non-thermally broken aluminum frames, USI – 3.52 W/m ² -K, SHGC-0.66.
Window-to-wall ratio	40%	65%

Figure 15: Capture d'écran du document [10] mentionnant les hypothèses qu'ils ont utilisé pour leur étude

Table 31 Baseline building assumptions for mid-rise office archetype in Montreal

	1970s	1990s
Enclosure		
Walls	Steel stud wall w/batt insulation, effective overall RSI-1.4 m ² -K/W.	Reinforced concrete frame with double glazed, thermally broken curtain wall, USI – 3.42 W/m ² -K, SHGC– 0.62, and spandrel panel, USI – 1.32 W/m ² -K.
Windows	Double glazed, non-thermally broken aluminum frames, USI – 3.52 W/m ² -K, SHGC – 0.66.	
Window-to-wall ratio	40%	

Figure 16: Capture d'écran du document [10] mentionnant les hypothèses qu'ils ont utilisé pour leur étude

D'autres sources ont été utilisées pour recueillir des informations sur les couches et les assemblages de l'enveloppe, notamment les références suivantes [3], [11] et [12].

6.2.4 Proposition Final constructive

En base a toutes les considérations mentionnées, nous avons créé une dizaine de sets constructifs qui pourront être utilisés ensemble avec les modèles géométriques de OpenStudio, et changés à travers des mesures ruby dans l'outil Openstudio.

Tableau 6: Proposition finale constructive bureaux taille moyenne

			Bureaux de taille moyenne			
			6		7A	
			Valeur U	Valeur U	Couches	
Avant 1945	Assemblée	Mur	1.1 (3)	1.1 (3)	Brique/pierre : 0,3 m, bloc de béton : 0,3 m, plâtre appliquée directement : 0,013 m (3)	
		Toit	2.75 (3)	2.75 (3)	Isolation en panneaux de fibres : 0,02, ossature bois : 0,1, pont en acier léger/métal : 0,15, béton : 0,2 (3)	
		Plancher	3.822 (3)	3.822 (3)	ossature bois non isolée (3)	
	Fenestration	Dans l'ensemble	10% (3)			
		Fenêtre	1.02 (3)		Simple vitrage (3), cadres en aluminium non thermiques (3)	
	ACH 50	SHGC	0.82 (3)	0.82 (3)		
		Taux d'infiltration	11.24 (3)			
1945-1980	Assemblée	Mur	0.823 (1)	0.772 (1)	Structure en acier/mur-rideau, Revêtement en briques/pierres : 0,1, Béton : 0,1, Plâtre : 0,013 (3,4)	
		Toit	0.267 (1)	0.227 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)	
		Plancher	3.822 (1)	3.822 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)	
	Fenestration	Dans l'ensemble	33-40% (1,2)			
		Fenêtre	2.95 (1)		Simple vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)	
	ACH 50	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)		
		Taux d'infiltration	7.5 (3)			
1980-2005	Assemblée	Mur	0.426 (1)	0.346 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)	
		Toit	0.267 (1)	0.227 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)	
		Plancher	3.822 (1)	3.822 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)	
	Fenestration	Dans l'ensemble	33-40% (1,2)			
		Fenêtre	2.95 (1)		Double vitrage (1,2), cadres en aluminium non thermiques (2,3)	
	ACH 50	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)		
		Taux d'infiltration	3.5 (3)			
2005-2010	Assemblée	Mur	0.426 (1)	0.346 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)	
		Toit	0.267 (1)	0.227 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)	
		Plancher	3.822 (1)	3.822 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)	
	Fenestration	Dans l'ensemble	33-40% (1,2)			
		Fenêtre	2.95 (1)		Double vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)	
	Étanchéité à l'air	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)		
		Taux d'infiltration	3.5 (3)			
2010-2015	Assemblée	Mur	0.247 (1)	0.210 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)	
		Toit	0.183 (1)	0.162 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)	
		Plancher	0.183 (1)	0.162 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)	
	Fenestration	Dans l'ensemble	33-40% (1,2)			
		Fenêtre	2.2 (1)		Double vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)	
	Étanchéité à l'air	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)		
		Taux d'infiltration	1.5*			
2015-2024	Assemblée	Mur	0.240 (1)	0.215 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)	
		Toit	0.138 (1)	0.121 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)	
		Plancher	0.156 (1)	0.138 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)	
	Fenestration	Dans l'ensemble	33-40% (1,2)			
		Fenêtre	1.73 (1)		Double vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)	
	Étanchéité à l'air	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)		
		Taux d'infiltration	0.5*			

Tableau 7: Proposition finale constructive grands bureaux

					Grands bureaux
			6	7A	Couches
			Valeur U	Valeur U	
Avant 1945	Assemblée	Mur	1.1 (3)	1.1 (3)	Brique/pierre : 0,3 m, bloc de béton : 0,3 m, plâtre appliquée directement : 0,013 m (3)
		Toit	2.75 (3)	2.75 (3)	Isolation en panneaux de fibres : 0,02, ossature bois : 0,1, pont en acier léger/métal : 0,15, béton : 0,2 (3)
		Plancher	3.822 (3)	3.822 (3)	ossature bois non isolée (3)
	WWR	Dans l'ensemble	10% (3)		
		Fenêtre	1.02 (3)		Simple vitrage (3), cadres en aluminium non thermiques (3)
	Fenestration	SHGC	0.82 (3)	0.82 (3)	
		ACH 50	Taux d'infiltration	11.24 (3)	
1945-1980	Assemblée	Mur	0.823 (1)	0.772 (1)	Structure en acier/mur-rideau, Revêtement en briques/pierres : 0,1, Béton : 0,1, Plâtre : 0,013 (3,4)
		Toit	0.267 (1)	0.227 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)
		Plancher	3.822 (1)	3.822 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)
	WWR	Dans l'ensemble	40% (5)		
		Fenêtre	2.95 (1)		Simple vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)
	Fenestration	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)	
		ACH 50	Taux d'infiltration	3.5 (3)	
1980-2005	Assemblée	Mur	0.426 (1)	0.346 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)
		Toit	0.267 (1)	0.227 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)
		Plancher	3.822 (1)	3.822 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)
	WWR	Dans l'ensemble	40% (5)		
		Fenêtre	2.95 (1)		Double vitrage (1,2), cadres en aluminium non thermiques (2,3)
	Fenestration	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)	
		Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration	0.69 (4)	
2005-2010	Assemblée	Mur	0.426 (1)	0.346 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)
		Toit	0.267 (1)	0.227 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)
		Plancher	3.822 (1)	3.822 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)
	WWR	Dans l'ensemble	40% (5)		
		Fenêtre	2.95 (1)		Double vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)
	Fenestration	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)	
		Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration	3.5 (3)	
2010-2015	Assemblée	Mur	0.247 (1)	0.210 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)
		Toit	0.183 (1)	0.162 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)
		Plancher	0.183 (1)	0.162 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)
	WWR	Dans l'ensemble	40-65% (5,*)		
		Fenêtre	2.2 (1)		Double vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)
	Fenestration	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)	
		Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration	1.5*	
2015-2024	Assemblée	Mur	0.240 (1)	0.215 (1)	Mur-rideau avec placage ou revêtement préfabriqué : 0,1 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m, enduit intérieur en plâtre : 0,013 m. / Revêtement métallique : 0,006 m, enduit de gypse : 0,013 m, Isolation (par exemple, isolation en panneaux rigides) : 0,10 m - 0,12 m. (3,4)
		Toit	0.138 (1)	0.121 (1)	Membrane du toit : 0,002 m, panneau de couverture en asphalte : 0,01 m, Isolation rigide (par exemple, laine de verre MW) : 0,10 m - 0,12 m, fermes en acier, poutrelles, ponts en béton, fermes et poutrelles à cordes parallèles (3,4,5)
		Plancher	0.156 (1)	0.138 (1)	Béton coulé : 0,1, Plancher en bois : 0,01 (4)
	WWR	Dans l'ensemble	40-65% (5,*)		
		Fenêtre	1.73 (1)		Double vitrage (1,2,5), cadres en aluminium non thermiques (2,3)
	Fenestration	SHGC	0.39 (4)	0.49 (4)	
		Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration	0.5*	

6.2.5 Infiltration

6.2.5.1 Description du concept

L'infiltration désigne le flux involontaire d'air extérieur dans un bâtiment par des fuites dans l'enveloppe du bâtiment, notamment des fissures, des interstices et des éléments mal étanches tels que les fenêtres, les portes et les pénétrations mécaniques. Ce phénomène a un impact significatif sur la performance thermique et l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux et des bâtiments commerciaux, car il introduit de l'air non traité dans les espaces climatisés, ce qui augmente la demande en systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation pour maintenir le niveau de confort intérieur. Dans certains cas, les pertes par infiltration peuvent représenter une proportion substantielle de la demande totale d'énergie, en particulier dans les régions aux conditions climatiques extrêmes comme le Québec.

Malgré son importance, l'infiltration est souvent négligée ou simplifiée dans les simulations énergétiques des bâtiments. De nombreux modèles s'appuient sur des valeurs de référence fixes ou des hypothèses génériques qui peuvent ne pas représenter avec précision les caractéristiques spécifiques des bâtiments commerciaux, telles que leurs volumes plus importants, leurs géométries complexes et leurs divers modèles d'occupation. En outre, ces valeurs génériques sont souvent dérivées d'études menées dans des conditions qui diffèrent considérablement du contexte local, comme les différentes typologies de bâtiments, les pratiques de construction et les conditions climatiques.

Alors que les tests d'étanchéité à l'air, tels que les tests d'infiltrométrie, sont une pratique courante pour évaluer les infiltrations dans les bâtiments résidentiels, ils sont moins répandus dans les immeubles de bureaux et les bâtiments commerciaux. Cette lacune est largement attribuée à la complexité technique et aux défis logistiques liés à la réalisation de ces tests sur des structures plus importantes, ainsi qu'à une sous-estimation générale de l'impact de l'infiltration sur la performance énergétique dans ces types de bâtiments. En outre, dans de nombreuses régions, les cadres réglementaires n'imposent pas de tests d'étanchéité à l'air pour les bâtiments commerciaux, ce qui en limite encore l'application.

Nous avons proposé les valeurs d'infiltration suivantes en fonction de l'année de construction du bâtiment.

Tableau 8: Proposition de valeurs d'infiltration implémentées dans les modèles OSM

0	ACH @75
Pre-1950	11.25
1950-1980	7.5
1980-2005	3.5
2005-2010	3.5
2010-2015	1.5
2015-2024	0.5

6.3 Données pour l'usage dans les archétypes

6.3.1 Consommation électrique des appartements

1. Liste de paramètres utilisés

Paramètres normalisés pour la modélisation énergétique, y compris les points de consigne de température, la densité des occupants, la densité de l'éclairage et la charge des équipements.

Tableau 9: Proposition de valeurs pour les paramètres essentiels

Value	
Disposition des zones	5 zones
Consigne de chauffage	22 °C
Consigne de refroidissement	24 °C
Température d'abaissement	18 °C
Air frais par personne	12 L/s
Niveaux d'éclairage	500 lx
Densité d'éclairage (W/m ²)	10.8 (NECB_A)
Charge de branchement (W/m ²)	8.7
Densité d'occupation (m ² /occupant)	25
Charge de chauffage de l'eau sanitaire (W/occupant)	90

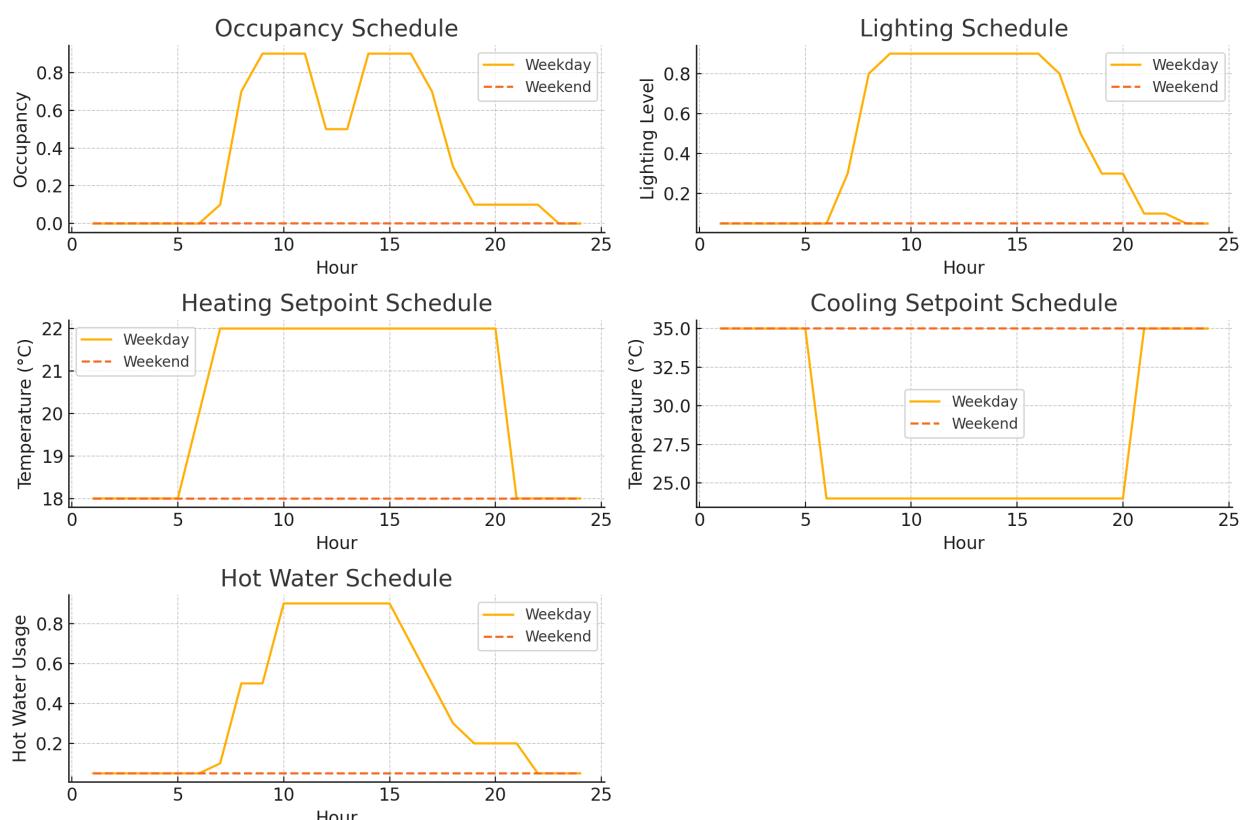


Figure 17 Profils journaliers des différents critères

6.4 Systèmes CVCA

Les systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation sélectionnés pour les bâtiments de faible, moyenne et grande hauteur sont présentés dans les figures. Ces systèmes représentent des configurations typiques observées dans les immeubles de bureaux existants. Pour les bâtiments de faible hauteur, les systèmes centraux de chauffage et de refroidissement ainsi que les systèmes de ventilation et de distribution sont détaillés, en mettant l'accent sur les boucles hydroniques et les unités de toit (RTU).

6.4.1 Systèmes de chauffage et de refroidissement centraux

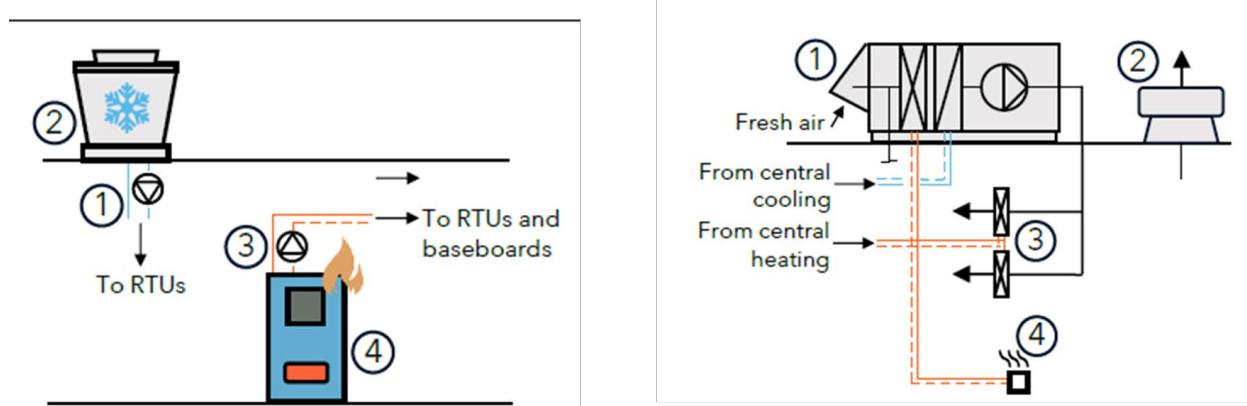


Figure 18 Système central de chauffage et de refroidissement

1. Distribution du froid : Le système utilise une boucle hydronique reliée à une pompe à vitesse constante qui fournit de l'eau glacée aux unités de toit (RTU). Cette boucle hydronique est maintenue à une température constante de 6,5°C (44°F) pour assurer un refroidissement efficace dans tout le bâtiment.
2. Distribution du chauffage : Une boucle hydronique est également utilisée pour le chauffage, où une pompe à vitesse constante fournit de l'eau chauffée aux unités de toit et aux dispositifs terminaux tels que les plinthes hydroniques et les serpentins de réchauffage. Cette boucle de chauffage est maintenue à 82°C (180°F).

6.4.2 Bâtiments à faible hauteur

1. Unités de ventilation en toiture : Le bâtiment est équipé de deux unités de toit à volume constant, chacune contenant une batterie de refroidissement hydronique et une batterie de préchauffage. Ces unités assurent la fourniture d'un débit d'air frais et de refroidissement adéquat pour le bâtiment.
2. Ventilation par extraction : Des ventilateurs d'extraction dédiés assurent l'évacuation de l'air afin de maintenir la qualité de l'air et des taux de ventilation appropriés.
3. Batteries de réchauffage : Situées au niveau de la zone, ces batteries contribuent à chauffer des zones spécifiques du bâtiment en fonction des besoins.
4. Plinthes hydroniques : Elles fournissent un chauffage supplémentaire, en particulier pour l'enveloppe du bâtiment, assurant un confort thermique constant.

6.4.3 Bâtiments de moyenne et grande hauteur

Les immeubles de moyenne et grande hauteur se caractérisent par des variations dans les unités de traitement de l'air (UTA) et le chauffage hydronique, avec des différences notables entre les millésimes des années 1970 et 1990, comme le montrent les figures.

Tout d'abord, les systèmes à volume d'air constant (CAV) décrits ci-dessous (figure 24) sont des configurations couramment utilisées pour les immeubles de bureaux de ce type:

1. Centrales de traitement d'air (CTA) :
 - o CTA à volume constant avec des serpentins de chauffage hydronique pour le préchauffage et des serpentins de refroidissement pour la climatisation.
 - o L'air d'alimentation est maintenu à une température constante (55°F) et distribué à plusieurs zones.
2. Chauffage par zone :
 - o Des plinthes hydroniques et des serpentins de réchauffage sont installés au niveau de la zone pour fournir un contrôle localisé de la température.
3. Sources de chaleur et de froid :
 - o Une chaudière à gaz d'une efficacité de 80 % est utilisée pour le chauffage.
 - o Un refroidisseur à eau avec un coefficient de performance (COP) de 5,2 est utilisé pour le refroidissement.
4. Evacuation et reprise d'air :
 - o L'air évacué est traité par un ventilateur de retour, ce qui maintient la circulation et la qualité de l'air.

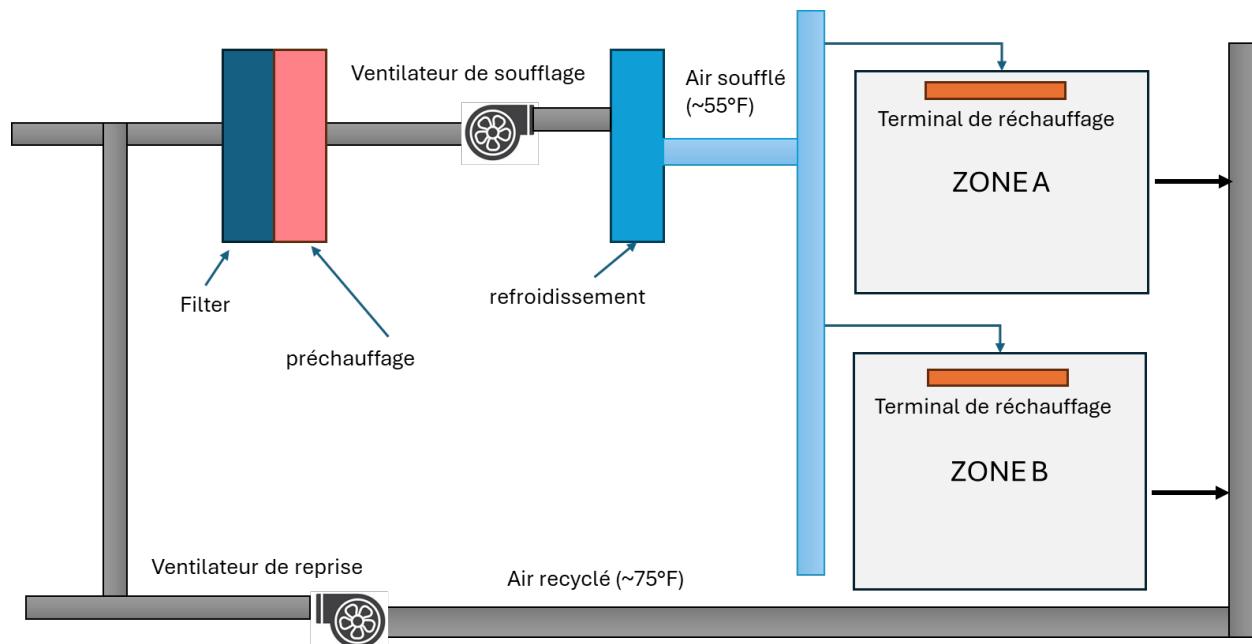


Figure 19 Schéma d'un système à volume d'air constant (CAV) typique

Deuxièmement, le système de volume d'air variable (VAV) () :

1. Centrales de traitement d'air (CTA) :
 - Les CTA à volume variable sont équipés de serpentins de chauffage hydronique pour le préchauffage et de serpentins de refroidissement pour la climatisation.
 - Le ventilateur de soufflage fonctionne à vitesse variable pour ajuster le débit d'air en fonction de la demande dans chaque zone.
2. Chauffage par zone :
 - Les boîtes terminales VAV avec des serpentins de réchauffage fournissent un chauffage localisé et permettent un apport d'air variable pour répondre aux besoins thermiques spécifiques des différentes zones.
3. Sources de chaleur et de froid :
 - Similaire au système CAV, cette configuration utilise une chaudière à gaz (efficacité de

80 %) et un refroidisseur à eau (COP 5,2).

4. Évacuation et reprise de l'air :

- Un ventilateur de retour à vitesse variable assure une circulation équilibrée de l'air et une évacuation efficace.

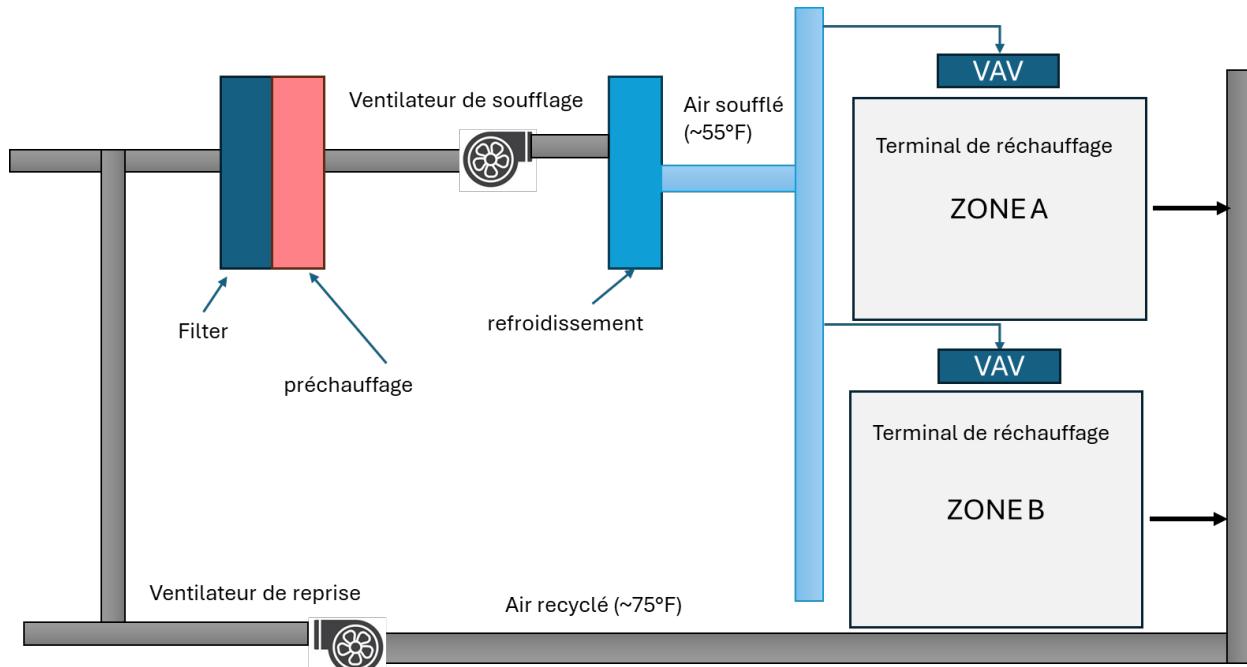


Figure 20 Schéma d'un système à volume d'air variable (VAV) typique

Pour les immeubles de grande hauteur, des principes similaires s'appliquent, mais ils sont généralement adaptés aux dispositions verticales. Les systèmes comprennent souvent (pourraient être abordés à l'avenir) :

1. Systèmes centraux : Un système central de chauffage et de refroidissement plus robuste utilisant des refroidisseurs à eau et des chaudières à gaz pour une distribution efficace de l'énergie sur plusieurs étages.
2. CTA distribuées : Des CTA réparties par étage avec des serpentins de chauffage et de refroidissement hydroniques permettent de répondre individuellement aux besoins de chaque étage en matière de chauffage et de refroidissement.
3. Contrôles à haut rendement : Des systèmes de contrôle avancés optimisent le fonctionnement des systèmes VAV ou CAV, assurant une circulation et une évacuation équilibrées de l'air, ainsi qu'un confort au niveau de la zone.

6.5 Modèle final pour les résultats

6.5.1 Création automatisée de modèles avec Grasshopper

Tableau 10: Archétypes proposés

Software	Utilisation
Rhino	Modélisation 3D pour ajouter l'empreinte au sol/le zonage interne
Grasshopper	Créer un flux de travail automatisé
ShrimpGIS	Permettre l'utilisation de l'empreinte du bâtiment GeoJSON
Ladybug Tools	Créer le modèle énergétique analytique initiale
OpenStudio	Enrichissement avec données constructifs
OpenStudio	Enrichissement avec données utilisation et profils
OpenStudio	Créer des systèmes CVC
OpenStudio	Implanter des mesures additionnelles

Étapes suivies : Voici les étapes de la création des modèles énergétiques pour l'étude :

1. Définition des propriétés du bâtiment :

- a. Sélection du cluster : Le groupe de bâtiments approprié est sélectionné

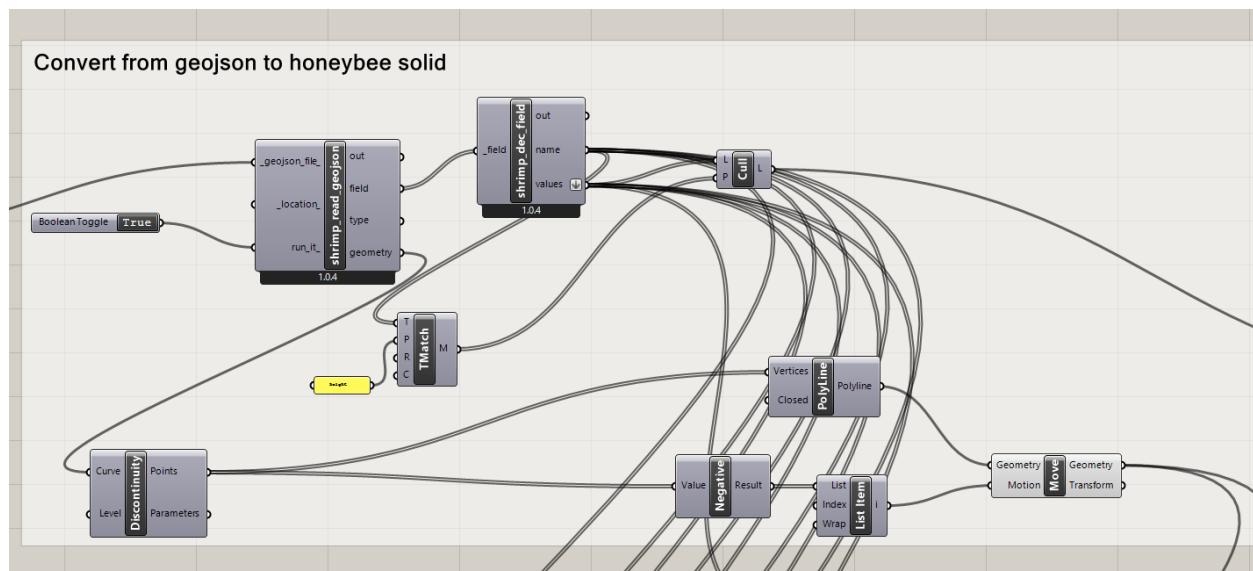


Figure 21 : Étape a processus Grasshopper

- b. La hauteur du bâtiment, le zonage intérieur et la hauteur d'étage à étage sont définis :

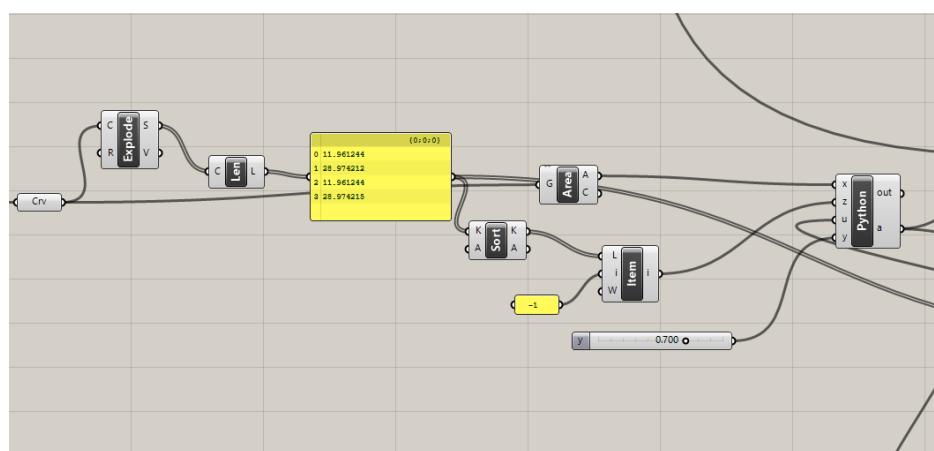


Figure 22 : Étape b processus Grasshopper

- c. La hauteur d'étage à étage sont définis pour le bâtiment :

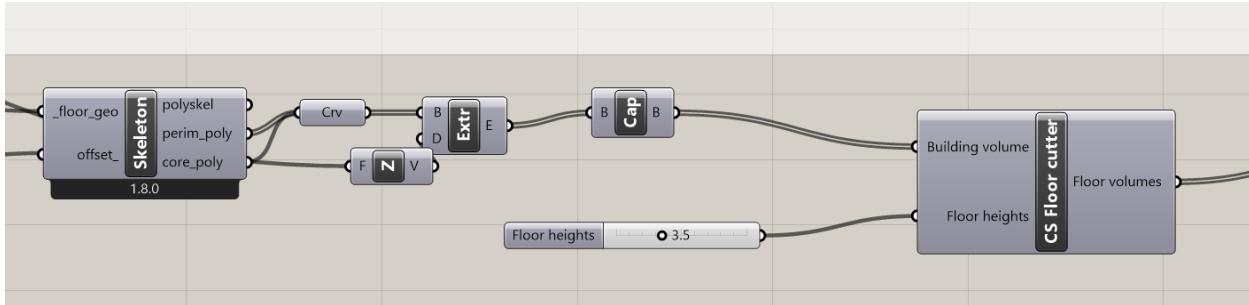


Figure 23 : Étape c processus Grasshopper

- d. Enfin, le modèle est transféré à OSM pour définir plus précisément les systèmes de construction et de chauffage, de ventilation et de climatisation.

6.5.2 Proposition finale de modèles

Les 10 modèles géométriques proposés ont été divisés en bâtiments de faible hauteur, de hauteur moyenne et de grande hauteur afin de mieux représenter le parc d'immeubles de bureaux au Québec.

Bâtiments de faible hauteur (jusqu'à 3 étages)

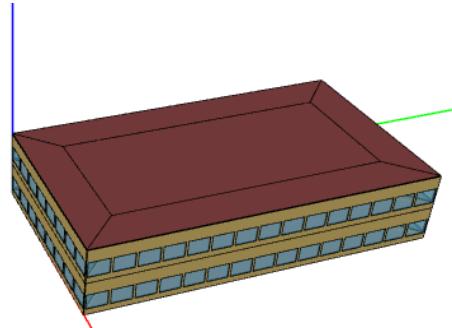


Figure 24 : Un des modèles proposés bâtiments à bureaux à faible hauteur

Bâtiments de moyenne hauteur (4 à 10 étages)

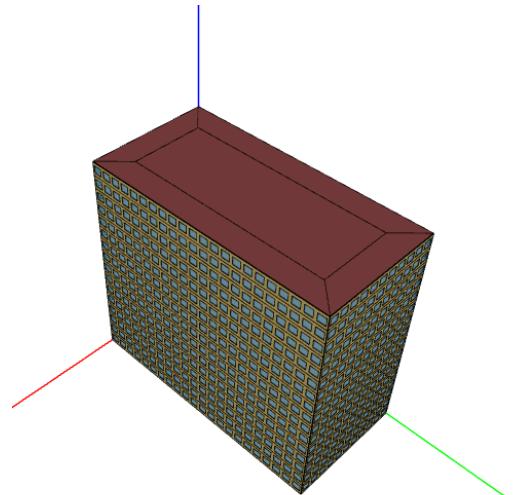


Figure 25 : Un des modèles proposés bâtiments à bureaux à moyenne hauteur

Immeubles de grande hauteur (plus de 10)

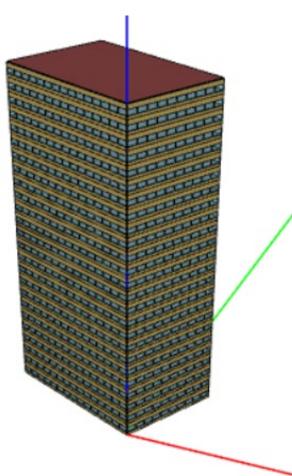


Figure 26 : Un des modèles proposés bâtiments à bureaux à grande hauteur

6.5.3 Simplification du modèle

L'image suivante montre le processus de simplification d'un modèle de bâtiment en identifiant et en supprimant les étages en double. Dans OpenStudio, les étages répétitifs sont consolidés et catégorisés en types distincts : rez-de-chaussée, premier étage, étage type et étage de toit. Cette approche réduit la complexité des calculs tout en préservant les détails essentiels pour la modélisation ou la simulation énergétique.

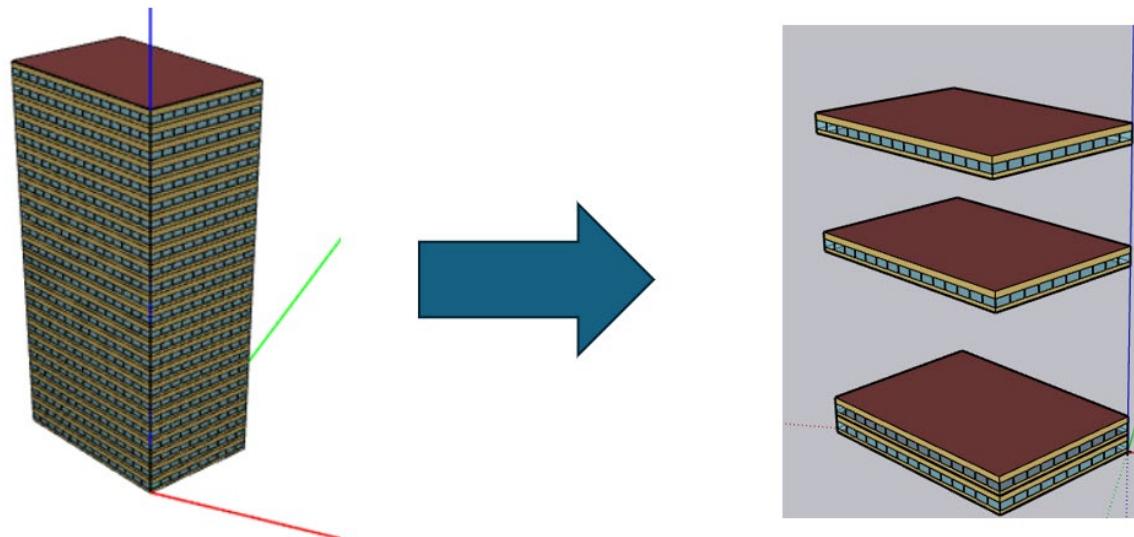


Figure 27 : Bâtiment moyenne hauteur et grande hauteur, avec les divisions d'appartements

6.5.4 Crédit de construction

Le développement de jeux de construction est un processus fondamental dans la modélisation et la simulation énergétique des bâtiments. Les jeux de construction définissent les assemblages par défaut et les matériaux utilisés dans un bâtiment, ce qui permet d'évaluer de manière cohérente et efficace la performance thermique et la consommation d'énergie. Dans le cadre de ce projet, une méthodologie structurée a été employée pour créer des jeux de construction adaptés à des époques de construction et à des zones climatiques spécifiques, garantissant ainsi la précision et la pertinence des données de simulation.

6.5.4.1 Définition des ensembles de construction

Comme indiqué précédemment, des ensembles de construction ont été créés pour différents millésimes de bâtiments et zones climatiques, ce qui permet une représentation complète du parc immobilier. Les ensembles de construction définis comprennent les catégories suivantes, basées sur l'année de construction :

- Pre-1950
- 1950–1980
- 1980–2010
- 2011–2020
- Post-2020

Chaque kit de construction comprend :

- - Propriétés thermiques : Valeurs U pour les murs, les toits et les planchers, conformes aux normes d'isolation de chaque époque.
- - Spécifications des couches : Descriptions détaillées des matériaux, de l'épaisseur et des types d'isolation pour les murs, les toits et les sols.
- - Caractéristiques du fenêtrage : Valeurs du coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC), types de vitrage et détails des cadres.
- - Étanchéité à l'air et taux d'infiltration : Valeurs spécifiques au millésime pour refléter les progrès des technologies de l'enveloppe du bâtiment.

Ces catégories ont été appliquées à deux zones climatiques, la zone 6A et la zone 7A, ce qui a donné un total de dix ensembles de construction distincts. Chaque ensemble de construction a été méticuleusement conçu pour refléter les matériaux, les propriétés thermiques et les pratiques de construction typiques de son millésime et de ses conditions climatiques respectives.

6.5.4.2 Méthodologie pour la création et l'intégration des jeux de construction

La création et l'intégration des ensembles de construction dans les cadres de modélisation énergétique ont suivi une approche systématique et structurée. Ce processus combine la collecte de données, la définition des propriétés des matériaux, la création d'ensembles de construction et l'utilisation de scripts avancés pour l'automatisation afin d'assurer la cohérence, la précision et l'efficacité des simulations énergétiques.

6.5.4.1 Collecte des données

La première étape a consisté à examiner les données historiques sur la construction et les codes du bâtiment afin d'identifier les matériaux et les pratiques de construction typiques pour les différentes époques de construction. Ces informations ont permis de définir des ensembles de construction qui reflètent l'évolution des technologies du bâtiment au fil du temps.

6.5.4.1 Définition des propriétés des matériaux

Sur la base des données collectées, les propriétés des matériaux telles que les valeurs R, les valeurs U et la masse thermique ont été définies pour tous les matériaux utilisés dans les murs, les toits, les sols et les autres composants du bâtiment. Cette étape a permis de s'assurer que les caractéristiques thermiques et structurelles de chaque matériau étaient représentées avec précision, constituant ainsi la base de la construction de modèles de bâtiments efficaces sur le plan énergétique.

6.5.4.2 Création de scripts et de fichiers pour l'intégration de modèles

Pour rationaliser l'intégration de ces ensembles de construction dans le cadre de modélisation, le scripting a joué un rôle crucial dans l'automatisation des processus clés :

1. **Importation de matériaux à partir de CSV** : un script a été développé pour lire les détails des matériaux de construction directement à partir du fichier CSV (ensemble de données *Novoclimat*), garantissant la cohérence des données et minimisant les erreurs manuelles.
2. **Création de fichiers IDF** : Le script a généré des **fichiers de données d'entrée EnergyPlus (IDF)** en intégrant les données de construction, facilitant ainsi les simulations énergétiques.
3. **Création de fichiers OSM** : Le script a également produit des fichiers **OpenStudio Model (OSM)**, permettant aux ensembles de construction d'être chargés en tant que bibliothèques réutilisables pour divers modèles archétypaux. Cette approche a permis de garantir la flexibilité dans l'application des normes de construction à différents millésimes de bâtiments.

En automatisant ces tâches, le processus de script a amélioré l'efficacité de la création et de l'intégration des modèles, permettant des simulations plus rapides et plus précises.

6.5.4.1 Intégration de la simulation

Les jeux de construction créés ont été intégrés dans la bibliothèque OpenStudio, où ils ont pu être appliqués de manière transparente aux modèles de construction. Cette intégration a permis aux jeux de construction d'être accessibles en tant que bibliothèques prédéfinies, ce qui simplifie leur application à différents archétypes et scénarios de construction.

6.5.5 Création de systèmes CVC

Dans ces configurations, les systèmes CVC modélisés comprennent un système à volume d'air constant (VAC) avec des serpentins de réchauffage pour le chauffage et des serpentins de refroidissement pour la climatisation. Comme le montrent les schémas, le côté alimentation comprend une batterie d'eau glacée pour le refroidissement et une batterie d'eau chaude pour le chauffage. Le côté demande est constitué d'unités terminales équipées de serpentins de réchauffage qui desservent des zones individuelles. Le ventilateur de la VCA fonctionne en continu, assurant un apport d'air constant, tandis que les serpentins de réchauffage se modulent pour répondre à la charge de chauffage de chaque zone. Chaque zone est reliée au système par un terminal séparé, ce qui permet un contrôle thermique précis. Cette configuration est idéale pour maintenir un apport d'air constant tout en permettant des ajustements de chauffage localisés pour répondre aux besoins des différentes zones. La pression du ventilateur est de 40 Pa et l'efficacité de 60 % ont été ajustées pour correspondre aux caractéristiques opérationnelles du système.

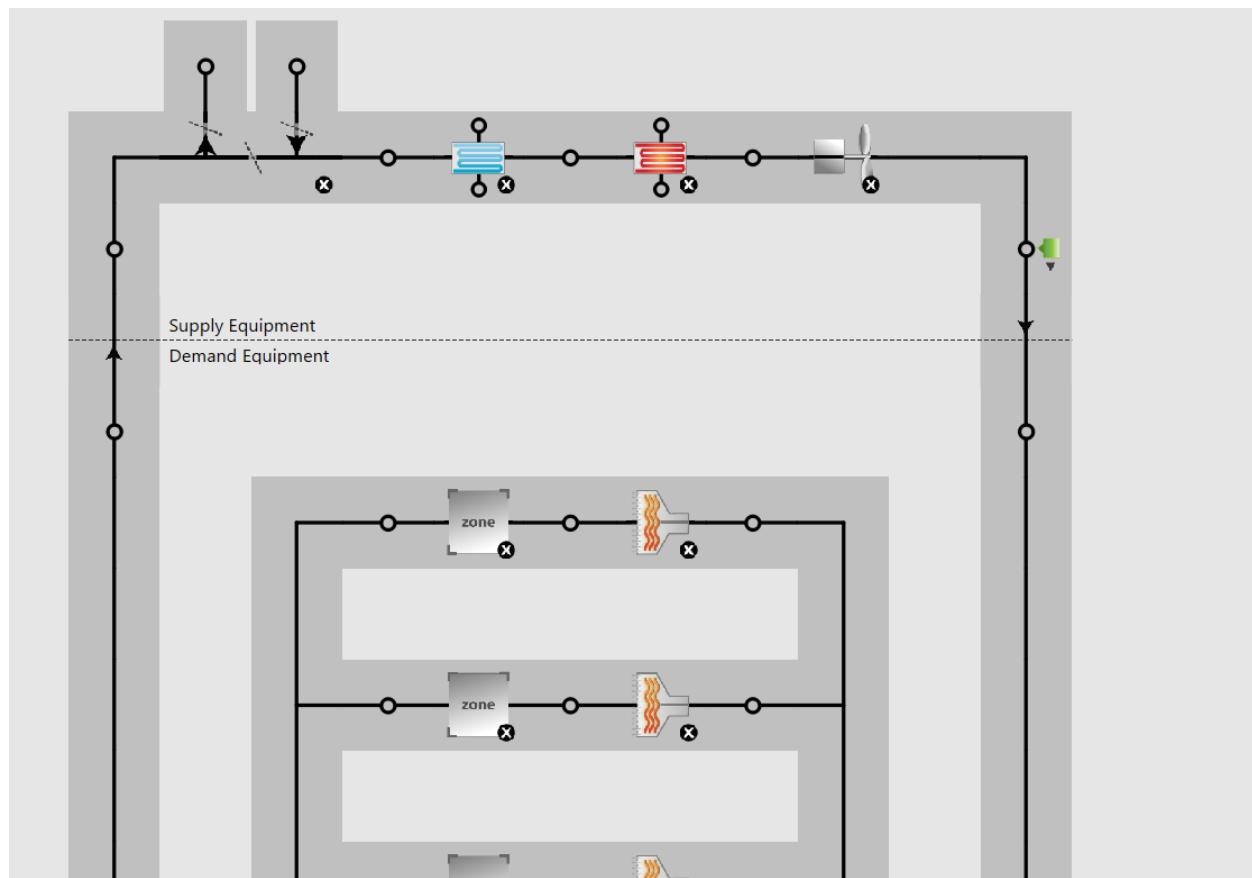


Figure 28: Schéma de production centralisé dans Open Studio

Dans cette configuration, le système représente une boucle d'eau glacée conçue pour répondre aux charges de refroidissement de plusieurs zones. L'équipement d'alimentation comprend un refroidisseur et les pompes associées pour faire circuler l'eau glacée dans la boucle. Du côté de la demande, chaque zone est équipée d'une batterie d'eau glacée, qui fournit le refroidissement

en extrayant la chaleur de l'eau glacée en circulation. La boucle est modélisée de manière à inclure des connexions du côté de l'offre et de la demande, ce qui garantit un transfert de chaleur efficace entre le refroidisseur et l'équipement terminal.

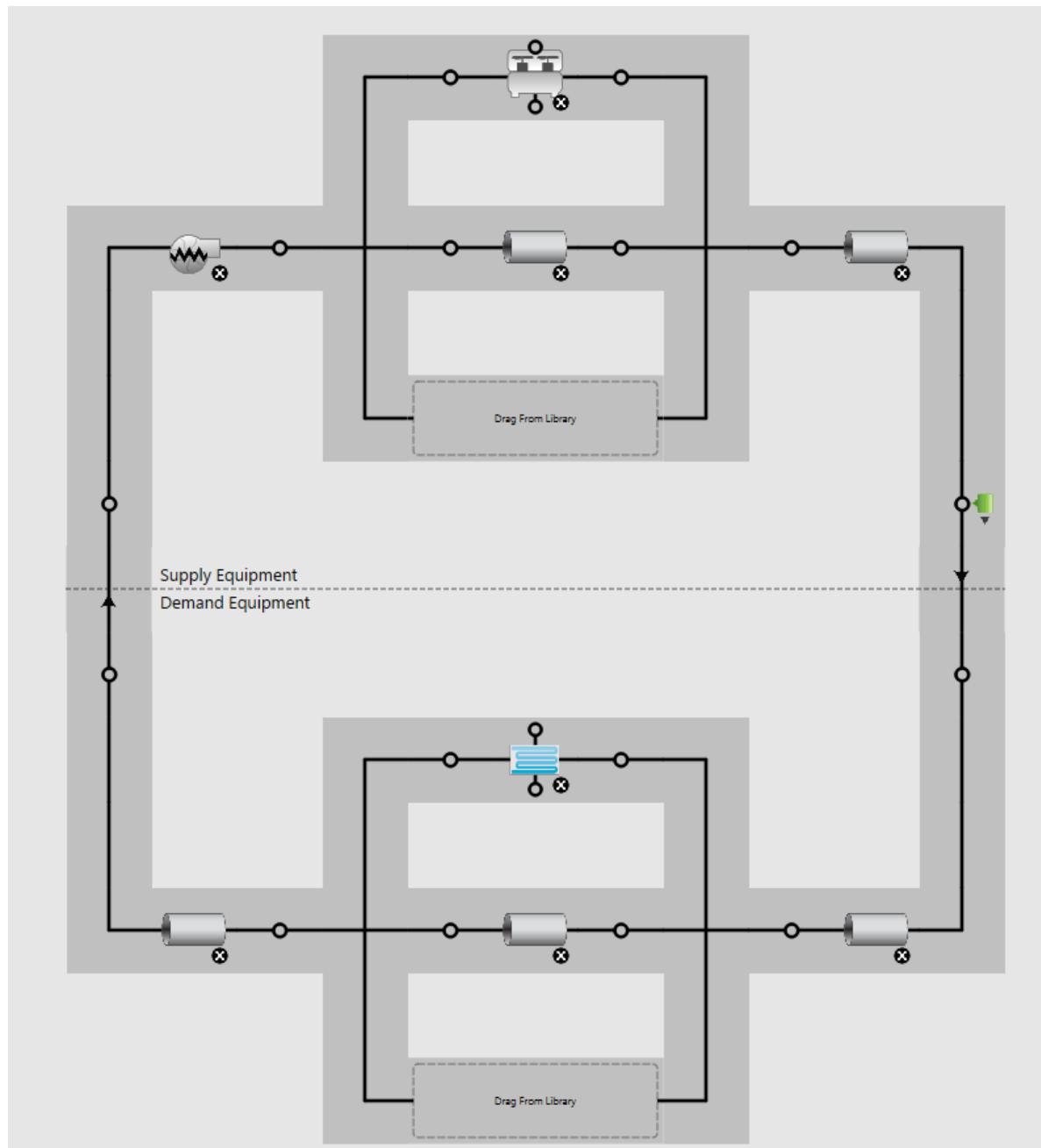


Figure 29: Boucle eau froide dans Open Studio

Ce schéma illustre une boucle d'eau de condensation conçue pour rejeter la chaleur dans le système de refroidissement d'un bâtiment. Le côté alimentation se compose d'une tour de refroidissement (n° 1), qui rejette la chaleur dans l'air ambiant, et d'une pompe (n° 2) configurée pour faire circuler l'eau dans le système. La tour de refroidissement fonctionne avec un débit d'air de 3 000 m³/h et un débit d'eau de 150 m³/h, adaptés à la charge thermique du système. Le côté demande comprend les refroidisseurs (n° 3), qui transfèrent la chaleur du bâtiment dans l'eau de circulation. La pompe est calibrée pour maintenir un débit de 150 m³/h et une pression de 30 kPa, adaptés au fonctionnement de la tour de refroidissement et du refroidisseur. La boucle du condenseur fonctionne avec une température de l'eau de 35°C à la sortie de la tour de refroidissement et de 29°C au retour, ce qui garantit un rejet de chaleur et une efficacité optimale.

pour le système. Cette configuration garantit un refroidissement efficace et des performances stables du système.

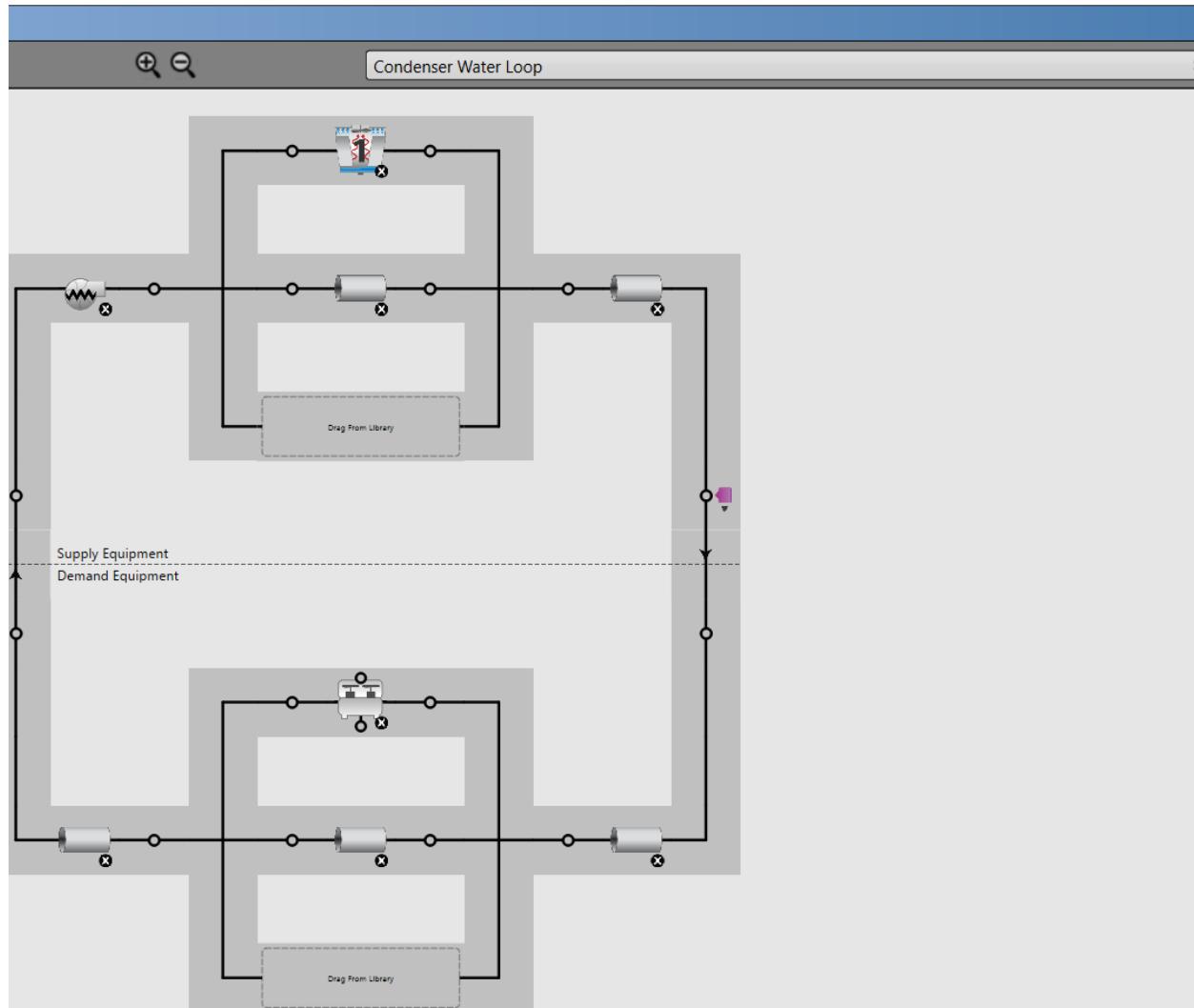


Figure 30: Schéma système condensation eau

L'archétype 2 intègre un système de chaudière à gaz central, fournissant à la fois les besoins de chauffage et d'eau chaude domestique, complété par des systèmes AC unitaires pour le refroidissement. Le système de chauffage comprend un système de boucle d'eau unique propulsé par une chaudière à gaz naturel, dirigeant de l'eau chauffée vers un composant Open Studio Coil Heating Water. Un système de boucle d'air subséquent a été conçu pour garantir la rénovation d'air dans les espaces.

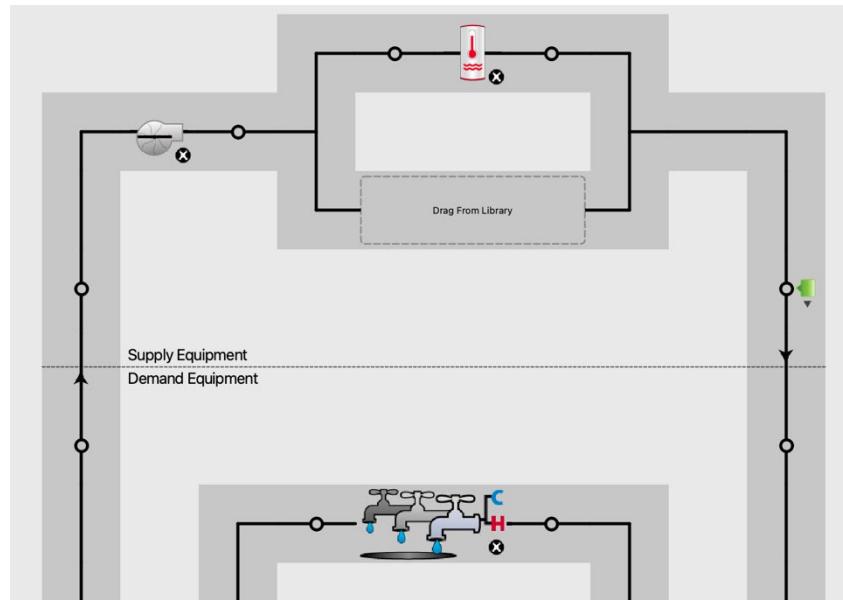


Figure 31: Chauffe-eau électrique décentralisé

7 References

- [1] *OpenStudio-Standards*. (Oct. 02, 2023). Ruby. National Renewable Energy Laboratory. Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/NREL/openstudio-standards>
- [2] 'Code de construction - Régie du bâtiment du Québec'. Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.r bq.gouv.qc.ca/lois-reglements-et-codes/code-de-construction-et-code-de-securite/code-de-construction/>
- [3] 'necb-2011-baselines/simulations.tar.002 at master · canmet-energy/necb-2011-baselines', GitHub. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/canmet-energy/necb-2011-baselines/blob/master/simulations.tar.002>
- [4] A. Nilson, D. Darwin, and C. Dolan, *Design of Concrete Structures*, 14e édition. Singapore: McGraw-Hill Education, 2009.
- [5] C. Salmon, J. Johnson, and F. Malhas, *Steel Structures: Design and Behavior*, 5e édition. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2008.
- [6] 'Product', CSA Group. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.csagroup.org/store/product/A23.3-14/>
- [7] 'Study of Part 3 Building Airtightness - Resources', RDH Building Science. Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.rdh.com/resource/study-of-part-3-building-airtightness/>
- [8] P. S. and P. C. Government of Canada, 'Air leakage characteristics, test methods and specifications for large buildings : report / prepared by Gary Proskiw and Bert Phillips. : NH18-1/109-2001E-PDF - Government of Canada Publications - Canada.ca'. Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://publications.gc.ca/site/eng/390559/publication.html>
- [9] G. Finch, E. Burnett, and W. Knowles, 'Energy consumption in mid and high rise residential buildings in british columbia', Apr. 2010.
- [10] 'Decarbonizing Canada's Large Buildings', Canada Green Building Council (CAGBC). Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.cagbc.org/news-resources/research-and-reports/decarbonizing-canadas-large-buildings/>
- [11] Dunsky Energy + Climate Advisors and Natural Resources Canada, 'Commercial and Institutional Buildings Retrofit Costing'.
- [12] Ö. Duran and K. J. Lomas, 'Retrofitting post-war office buildings: Interventions for energy efficiency, improved comfort, productivity and cost reduction', *J. Build. Eng.*, vol. 42, p. 102746, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102746.
- [13] G. Luddeni, M. Krarti, G. Pernigotto, and A. Gasparella, 'An analysis methodology for large-scale deep energy retrofits of existing building stocks: Case study of the Italian office building', *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, pp. 296–311, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.038.
- [14] S. E. Chidiac, E. J. C. Catania, H. L. Perry, E. Morofsky, and S. Foo, 'Computational tools for selecting energy conservation measures for retrofitting existing office buildings', *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 40, no. 5, pp. 445–459, May 2013, doi: 10.1139/L2012-037.
- [15] S. E. Chidiac, E. J. C. Catania, E. Morofsky, and S. Foo, 'A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings', *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 614–620, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.002.

- [16] M. Charbonneau, 'Simulating the effects of enclosure retrofits on post-war high-rise apartment buildings in cold climates', 2011. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115059299>
- [17] L. C. Ng, N. Ojeda Quiles, W. S. Dols, and S. J. Emmerich, 'Weather correlations to calculate infiltration rates for U. S. commercial building energy models', *Build. Environ.*, vol. 127, pp. 47–57, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.10.029.
- [18] L. C. Ng, W. S. Dols, and S. J. Emmerich, 'Evaluating potential benefits of air barriers in commercial buildings using NIST infiltration correlations in EnergyPlus', *Build. Environ.*, vol. 196, p. 107783, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107783.



**NEXT-GENERATION
CITIES INSTITUTE**

concordia.ca/research/cities-institute.html

nextgencities@concordia.ca

2155 Rue Guy
14th Floor
Montreal, Quebec H3G 1M8