

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE  
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT  
M. ing.

PAR  
Laurent CHÉNARD

ÉVALUATION DES APPORTS SOLAIRES À L'ÉCHELLE D'UN QUARTIER URBAIN  
EN PÉRIODE DE CHAUFFE SELON SA TYPOLOGIE, SON ORIENTATION ET SA  
LATITUDE DANS UN CONTEXTE DE DENSIFICATION DE LA VILLE

MONTRÉAL, LE 26 MAI 2014



Laurent Chénard, 2014



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**

**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Frédéric Monette, directeur de mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Benoit Beckers, codirecteur de mémoire  
Laboratoire AVENUES, département du génie des systèmes urbains à l'Université de Technologie de Compiègne

M. Mathias Glaus, président du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Danielle Monfet, membre du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 22 AVRIL 2014**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## **AVANT-PROPOS**

Ce mémoire s'inscrit dans un cadre collaboratif entre l'École de technologie supérieure (ÉTS) et l'Université de Technologie de Compiègne (UTC). Le travail a été réalisé grâce à un stage de recherche d'un an au laboratoire AVENUES en génie des systèmes urbains de l'UTC, département qui collabore régulièrement avec le Département de génie de la construction de l'ÉTS.



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Frédéric Monette, ainsi que mon codirecteur Benoit Beckers, qui m'ont donné la chance de vivre une expérience inoubliable en France. J'ai ainsi pu développer pleinement mes connaissances et mes compétences pour parvenir à produire ce travail grâce à leurs conseils. J'ai également été appuyé par mes collègues du laboratoire AVENUES en génie des systèmes urbains de l'Université de Technologie de Compiègne, merci à Luis pour l'aide offert dans la compréhension et l'explication des différents modèles de ciel. Merci à Thibaut pour l'aide offert pour l'utilisation du logiciel Matlab et diagnostiquer mes problèmes en programmation. Merci aussi, Diana pour la création du modèle géométrique. C'était un réel plaisir d'avoir le privilège de travailler dans cette équipe tant pour le projet de REPA F-4 que le livre et que pour les travaux personnels.

Les rencontres amicales ont été nombreuses en France et je tiens à le souligner puisque les Mathieu, Yacine, Adrien, Victor et compagnie de Compiègne ont rendu l'expérience encore plus enrichissante à l'extérieure des heures de travail. Merci aussi à tous les joueurs du club de hockey de Compiègne, plus particulièrement à Pierre et Luc qui m'ont permis de visiter de façon plutôt inusitée. Avoir la chance de jouer avec vous était toute une expérience

Je veux remercier mes parents qui m'ont encouragé grâce à leur soutien tout au long du déroulement de ce projet et particulièrement pour me pousser à persévéérer.

Enfin merci à mes amis et ma copine qui ont pu comprendre les sacrifices que j'ai effectués pour livrer ce mémoire, mais qui ont joué un rôle de premier ordre pour libérer mon esprit.



# **ÉVALUATION DES APPORTS SOLAIRES À L'ÉCHELLE D'UN QUARTIER URBAIN EN PÉRIODE DE CHAUFFE SELON SA TYPOLOGIE, SON ORIENTATION ET SA LATITUDE DANS UN CONTEXTE DE DENSIFICATION DE LA VILLE**

Laurent CHÉNARD

## **RÉSUMÉ**

La densification des villes constitue un enjeu pour les gestionnaires des villes qui seront appelés par la communauté gouvernementale à prendre des décisions afin de limiter les effets que cette urbanisation peut entraîner sur la qualité de l'environnement des habitants. Les énergies renouvelables seront appelées à être utilisées comme levier afin d'atteindre des objectifs liés au développement durable des villes. L'énergie solaire passive est étudiée dans ce travail afin de déterminer ses effets dans un canyon urbain existant situé dans cinq villes, San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. L'énergie directe et diffuse du soleil est prise en compte à l'aide du modèle solaire de Perez, la radiosité n'est pas utilisée dans ce travail. La demande énergétique en chauffage est calculée à l'aide des degrés-jours. Les études sont faites pendant la période de chauffage de chaque ville. Plusieurs formes de quartier (7) sont créées à partir d'un quartier original afin de valider l'importance de la forme sur le gisement solaire. L'analyse des résultats montre que l'orientation optimale du quartier fait varier le gisement solaire de 5 % par rapport à l'orientation initiale franc sud proposée, cette valeur diminue à chaque fois que des étages sont ajoutés sur tout le contexte. Une rotation par rapport à l'initiale de 90° peut faire varier l'irradiation solaire disponible de 6 à 15 % selon la ville à l'étude. La densification du quartier par l'ajout d'étage montre des effets négatifs au niveau du gisement solaire où une forte diminution de l'énergie reçue au niveau des fenêtres du premier étage est notée. Une baisse du potentiel solaire de 65 % est constatée lorsque trois étages sont ajoutés au contexte original. Les résultats montrent que l'énergie solaire passive à très peu d'impact au niveau du chauffage des bâtiments des années 1960, 5 % de la demande en chauffage est à combler. Par contre pour les constructions de nos jours selon la ville étudiée et le scénario, la demande en chauffage est comblée de 20 à 90 % par les gains solaires.

**Mots clés :** irradiation solaire, directe, diffuse, canyon urbain, demande énergétique en chauffage, solaire passif



**EVALUATION OF THE CONTRIBUTIONS OF THE SOLAR PASSIVE GAINS IN  
AN URBAN DISTRICT FOR THE HEATING PERIOD ACCORDING TO THE  
GEOMETRY OF THE AREA, THE ORIENTATION AND THE LATITUDE IN A  
CONTEXT OF A CITY DENSIFICATION**

Laurent CHÉNARD

**ABSTRACT**

Mass urbanization is a major issue for town administrators. Population increase will have an impact on the quality of the environment for citizens. Government will have to take decisions to limit those effects. Green energies are part of the solution to reach fixed goals by the public administration for sustainable development. Passive solar energy is studied in this work in an urban canopy located in five different towns: San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon and Stockholm. Passive solar energy is calculated in the heating season. Direct and diffuse solar radiation is considered by using the Perez model. Radiosity is not taken into account. Heating demand is calculated by the heating degree day method. Seven urban forms have been created to determine the amount of solar energy entering in every window of the urban canopy while taking into account urban context and forms. Optimal orientation of the canopy shows an increase of 5% of the passive solar radiation from original orientation, 180 degrees rotation from first orientation straight south. This value goes lower when stories are added to the urban context. A rotation of 90 degrees from the first orientation shows a decrease of 6 to 15% in solar passive gain. Densification of the urban canopy by adding stories to the buildings results in a loss up to 65% of the solar gain for the first story. It is showed that solar passive energy has a low ratio of 5% for space heating for old buildings, 1960 constructions. Today's buildings have a difference between passive solar energy and heating demand of 10 to 75% depending on the model and location.

**Keywords:** Solar radiation, urban canopy, direct, diffuse, space heating, solar passive



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART .....	7
1.1    Étude des phénomènes dans une ville.....	7
1.2    Modèles de ciel pour le calcul de l'irradiation solaire.....	8
1.2.1    Modèle de Liu et Jordan .....	8
1.2.2    Modèle de Perez.....	9
1.3    Facteur de vue du ciel / <i>Sky view factor</i> .....	11
1.3.1    Angle solide et théorie .....	11
1.3.2    Applications du Facteur de vue du ciel (FVC) .....	13
1.4    Consommation énergétique des bâtiments.....	14
1.4.1    Méthode de calcul statique versus dynamique.....	14
1.4.2    Degrés-jours et indicateur du climat.....	17
1.5    Présentation des méthodes du calcul des degrés-jours ASHRAE, Allemande et Française .....	18
1.5.1    Méthode ASHRAE .....	19
1.5.2    Méthode allemande.....	19
1.5.3    Méthode française.....	20
1.6    Comparaison des méthodes pour les cinq villes à l'étude .....	21
1.7    Scénarios de projection de la consommation énergétique des bâtiments selon leur année de construction et de rénovation.....	22
1.8    Orientation des bâtiments et énergie consommée.....	24
1.9    Lois et objectifs gouvernementaux .....	32
1.9.1    Canada.....	32
1.9.2    France.....	34
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE .....	37
2.1    Sélection des villes et des quartiers .....	37
2.2    Modèle géométrique du quartier .....	40
2.3    Modification du modèle initial, scénario de densification.....	44
2.3.1    Densification du modèle initial par l'ajout d'un étage (densification uniforme).....	45
2.4    Densification du modèle initial par l'ajout de tours (densification localisée) .....	45
2.5    Simplification des modèles par des prismes rectangulaires pour validation des calculs et niveau de détails.....	46
2.6    Trajet solaire et modèles solaires .....	47
2.6.1    Direction du rayonnement direct par rapport à une surface au sol .....	48
2.6.2    Énergie solaire disponible.....	51
2.6.3    Irradiation directe.....	51

2.6.4	Irradiation diffuse.....	52
2.6.5	Application du trajet solaire et du modèle de Perez sur un quartier .....	54
2.6.6	Application du facteur de vue du ciel ( <i>Sky View Factor</i> ) et de la visibilité.....	55
2.6.7	Limitation de la méthode du calcul de l'irradiation solaire .....	56
2.7	Besoins énergétiques en chauffage .....	57
2.7.1	Exclusions de la méthode de la demande énergétique en chauffage .....	61
CHAPITRE 3 RÉSULTATS .....		63
3.1	Chronologie des simulations.....	63
3.2	Paramètres des simulations et précisions des simplifications.....	64
3.3	Irradiation totale, comparaison entre les modèles et simplification .....	65
3.3.1	Irradiation totale sur le quartier original (scénario 1) .....	65
3.3.2	Irradiation totale sur quartier original densifié par étalement (scénario 3).....	68
3.3.3	Irradiation totale sur le quartier original densifié par ajout de tours (scénario 3).....	70
3.3.4	Analyse des scénarios original, densifié par étalement et par ajout de tours.....	72
3.3.5	Comparaison de l'irradiation selon les modèles .....	74
3.3.6	Irradiation des blocs simplifiés et niveau de détails des modèles.....	77
3.4	Effet d'ajout d'étages sur le quartier densifié par étalement et analyse du premier étage (rez-de-chaussée) .....	81
3.4.1	Irradiation pour ajout de deux et trois étages supplémentaires sur le quartier original et vérification de l'orientation optimale .....	81
3.4.2	Comportement du premier étage (rez-de-chaussée) .....	85
3.5	Irradiation solaire par critère de performance, par $m^2$ de surface vitrée .....	91
3.6	Demande énergétique en besoin de chauffage pour les scénarios et comparaison avec l'irradiation solaire comme chauffage passif.....	94
3.6.1	Paramètres et dimensions pour la demande énergétique .....	95
3.6.2	Énergie solaire passive et demande énergétique .....	101
3.6.3	Analyse des gains solaires en comparaison avec des blocs ayant des performances élevées au niveau des pertes thermiques, maison solaire passive (scénario du futur) .....	106
CHAPITRE 4 DISCUSSIONS .....		111
4.1	Portée des résultats.....	111
4.2	Le modèle géométrique.....	112
4.3	Le modèle solaire.....	113
4.4	Saison de modélisation et position sur le globe terrestre .....	114
4.5	Modélisation de la demande énergétique pour le chauffage .....	114
4.6	Retombés.....	115
CONCLUSION .....		117
ANNEXE I CODE MATLAB GÉOMÉTRIE .....		121

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....137



## LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Comparaison des consommations énergétiques d'un bâtiment selon les données mesurées suivant une méthode statique et une méthode dynamique, avant et après rénovation.....	15
Tableau 2.2	Liste des angles et leur définition par rapport à une surface.....	48
Tableau 2.3	Coefficients de luminosité du modèle de ciel de Perez .....	54
Tableau 3.1	Périodes de chauffe respectives des cinq villes à l'étude .....	64
Tableau 3.2	Dimensions des blocs du modèle original et la simplification des blocs en respectant le volume et la fenestration du modèle original.....	73
Tableau 3.3	Dimensions des blocs du modèle d'étalement et la simplification des blocs en respectant le volume et la fenestration du modèle d'étalement.....	73
Tableau 3.4	FVC moyen des 51 fenêtres de la façade sud du premier étage du bloc sud selon la géométrie du quartier à l'étude .....	91
Tableau 3.5	Résumé des résultats pour la ville de San Francisco pendant la période de chauffe selon son orientation initiale en fonction de l'irradiation solaire totale et l'irradiation par unité de surface vitrée .....	94
Tableau 3.6	Dimensions des paramètres formant les différents quartiers qui influencent la demande énergétique en chauffage .....	95
Tableau 3.7	Propriétés thermiques des matériaux de construction pour les cinq villes à l'étude selon l'année de construction des bâtiments .....	96
Tableau 3.8	Degrés-heures de chauffe pour chacune des villes à l'étude à 18,3°C selon les données de l'ASHRAE (2007).....	97
Tableau 3.9	Présentation de la demande énergétique nécessaire pour les besoins de chauffage pour les cinq villes à l'étude pour le scénario original pour les anciens bâtiments (1950-1960) et ceux d'aujourd'hui (2000 et +), <i>résultat en kWh</i> .....	97
Tableau 3.10	Facteur de gain solaire des vitrages utilisé en fonction des époques de construction pour l'ensemble des villes à l'étude (données tirées de l'ASHRAE, 2010).....	102
Tableau 3.11	Propriétés thermiques des matériaux de construction pour les cinq villes à l'étude pour les bâtiments du futur (2025 et plus) .....	106

Tableau 3.12	Facteur de gain solaire des vitrages (FDGS) utilisé en fonction des bâtiments du futur pour l'ensemble des villes à l'étude (données tirées de l'ASHRAE, 2010).....	107
Tableau 3.13	Présentation de la demande énergétique nécessaire pour les besoins de chauffage pour les cinq villes à l'étude pour le scénario original pour les bâtiments du futur (2000 et +), <i>résultat en kWh</i> .....	107

## LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Relations avec la théorie et les expérimentations avec des coefficients de transmissions ( $\tau_d$ , $\tau_D$ ) entre l'irradiation directe ( $I_{Dh}$ ) et l'irradiation diffuse ( $I_{dh}$ ) pour un ciel dégagé basé sur 28 jours de prises de mesure, $I_{oh}$ , $I_{nh}$ intensité du rayonnement solaire sur une surface horizontale et normale .....	9
Figure 1.2	Composantes nécessaires pour calculer l'irradiation solaire diffuse en effectuant une décomposition du ciel en plusieurs éléments a) ensemble des composantes; b) composante du ciel issue de l'irradiation diffuse; c) composante ‘circumsolaire’ (le contour du soleil) issue de l'irradiation diffuse; d) composante de l'horizon issue de l'irradiation diffuse .....	10
Figure 1.3	Composantes pour le calcul de l'angle solide $\omega$ où $r$ est le rayon de la sphère, $\phi$ l'angle rapporté sur un plan et $\theta$ l'angle par rapport à l'azimut. ..	12
Figure 1.4	Facteur de vue du ciel ( $\Psi_s$ ) qui varie selon l'environnement urbain, $H : W$ étant le rapport hauteur des bâtiments et largeur de la rue .....	14
Figure 1.6	Comparaison des méthodes de calcul de degrés-jours pour les cinq villes à l'étude (ASHRAE, Allemagne et Météo France) .....	21
Figure 1.8	Pourcentage de l'augmentation des charges de chauffage et de climatisation pour une maison unifamiliale orientée vers le nord par rapport au sud aux États-Unis selon trois régions climatiques différentes ..	25
Figure 1.9	Consommation énergétique d'une maison unifamiliale dans la ville de Madison par rapport à une fenestration orientée vers le sud .....	26
Figure 1.10	Illustration de l'angle solaire en hiver afin de disposer correctement la maison solaire passive sans nuire aux autres bâtiments.....	27
Figure 1.11	Visualisation du quartier modélisé de Londres selon différentes teintes illustrant la 3 <sup>e</sup> dimension ainsi que le modèle géométrique tridimensionnel correspondant.....	28
Figure 1.12	Vue en coupe des canyons urbains .....	30
Figure 2.1	Rapport entre la longueur et la largeur des pâtés de maisons .....	39
Figure 2.2	Typologie des bâtiments de rues des quartiers .....	40

Figure 2.3	Rapport entre la longueur et la largeur des pâtés de maisons pour le modèle développé .....	40
Figure 2.4	Nombre d'étages par bâtiments pour le modèle développé .....	41
Figure 2.5	Bâtiments types du modèle .....	41
Figure 2.6	Analyse des façades originales en fonction du pourcentage de fenestration.....	42
Figure 2.7	Pourcentage de fenestration du modèle .....	43
Figure 2.8	Vue en plan du quartier original et vue isométrique.....	44
Figure 2.9	Quartier densifié par l'ajout uniforme d'un étage.....	45
Figure 2.10	Quartier densifié par l'ajout de tours .....	46
Figure 2.11	Trajet solaire avec tous les angles.....	47
Figure 2.12	Composante de l'irradiation solaire : directe et diffuse.....	51
Figure 2.13	Explication du SVF factor .....	56
Figure 3.1	Sens des rotations du quartier à l'étude .....	64
Figure 3.2	Irradiation totale sur les surfaces vitrées du quartier original pour des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective.....	66
Figure 3.3	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario original, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	66
Figure 3.4	Irradiation totale sur la surface vitrée du quartier d'étalement, un étage supplémentaire, pour des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	68
Figure 3.5	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario d'étalement, un étage supplémentaire, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	69
Figure 3.6	Irradiation totale sur la surface vitrée du quartier densifié par ajout de tours pour des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective.....	70

Figure 3.7	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario des tours, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	71
Figure 3.8	Pourcentage de l'irradiation solaire totale du quartier d'étalement, un étage supplémentaire, en comparaison au quartier original, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	75
Figure 3.9	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale du quartier des tours en comparaison au quartier original, selon les villes à l'étude et leur .....	76
Figure 3.10	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale du quartier des tours en comparaison au quartier densifié par étalement, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	77
Figure 3.11	Irradiation totale sur les surfaces vitrées du quartier formé de deux prismes simplifiés par rapport au quartier original pour des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	77
Figure 3.12	Irradiation totale sur les surfaces vitrées du quartier formé de deux prismes simplifiés par rapport au quartier densifié par étalement pour des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective .....	77
Figure 3.13	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire entre les blocs simplifiés et le quartier original, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	80
Figure 3.14	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale entre les blocs simplifiés (densifiés par étalement) et le quartier densifié par étalement, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	80
Figure 3.15	Irradiation solaire totale pour des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> sur le quartier densifié par ajout de deux étages supplémentaires, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	82
Figure 3.16	Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario d'ajout de deux étages supplémentaires, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	83
Figure 3.19	Irradiation solaire sur le premier étage (rez-de-chaussée) du bloc situé au sud sur la façade sud du scénario original, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	86

Figure 3.20	Irradiation solaire sur le premier étage (rez-de-chaussée) du bloc situé au sud sur la façade sud du scénario deux étages ajoutés, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	87
Figure 3.21	Irradiation solaire sur le premier étage (rez-de-chaussée) du bloc situé au sud sur la façade sud du scénario de trois étages ajoutés, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective .....	87
Figure 3.22	Irradiation solaire au premier étage du bloc situé au sud sur la façade sud, selon les scénarios original, deux et trois étages supplémentaires pour la ville de Bordeaux selon son orientation.....	89
Figure 3.23	Heures de visibilité comparées à l'irradiation solaire sur des fenêtres de 1 m <sup>2</sup> au premier étage du bloc situé sud de la façade sud sur le scénario original pour la ville de Bordeaux pendant la période de chauffe .....	90
Figure 3.24	Irradiation solaire en kWh/m <sup>2</sup> de la surface vitrée pour la ville de San Francisco selon son orientation pour les scénarios original, ajout de tours, ajout d'un, deux et trois étages supplémentaires, pendant la période de chauffe.....	92
Figure 3.25	Irradiation solaire totale reçue en kWh pour l'ensemble de la surface vitrée pour la ville de San Francisco selon son orientation pour les scénarios original, ajout de tours, ajout d'un, deux et trois étages supplémentaires, pendant la période de chauffe .....	93
Figure 3.26	Demande énergétique annuelle en chauffage pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon l'année de construction des bâtiments et les codes de construction locaux de l'époque (1960 et 2000).....	98
Figure 3.27	Demande énergétique annuelle en chauffage par surface habitable pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon l'année de construction des bâtiments et les codes de construction locaux de l'époque (1960 et 2000).....	100
Figure 3.28	Demande énergétique pour combler les pertes d'énergie par infiltration pour les villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon les bâtiments des années 1960 et les codes de construction locaux de l'époque .....	101
Figure 3.29	Énergie nécessaire pour le chauffage (à gauche) en comparaison avec les gains solaires passifs effectifs (à droite) pour la ville de Montréal en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon les bâtiments des années 1960 et 2000, selon une orientation de 180° par rapport à la position initiale .....	103

Figure 3.30	Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffe pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon l'année de construction des bâtiments et les codes de construction locaux de l'époque, selon une orientation de 180° par rapport à la position initiale .....	104
Figure 3.31	Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffe pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires pour les constructions récentes (2000) selon l'orientation initiale .....	105
Figure 3.33	Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffe pour les blocs à Montréal et Stockholm en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires pour les constructions du futur (2025 et +) selon l'orientation de 90°.....	109



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AIE	Agence internationale de l'énergie
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers
Déperditions	Pertes thermiques au travers de l'enveloppe du bâtiment
DJ	Degrés-jours
EIA	Energy information administration
FDVC	Facteur de vue du ciel
GES	Gaz à effets de serre
Heliodon2	Logiciel pour le calcul du Sky View Factor
Irradiation diffuse	Énergie provenant du ciel
Irradiation directe	Énergie provenant de du rayonnement direct du soleil
IWEC	International Weather for Energy Calculations
MatLab	Logiciel de programmation mathématique
Modèle de Perez	Modèle utilisé pour quantifier l'énergie diffuse
NOVOCLIMAT	Norme de construction des bâtiments au Québec
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ONU	Organisation des Nations Unies
SHGR	Solar Heat Gain Ratio
SVF	Sky View Factor
TMY	Typical Meterological Year
WMO	World Meteorological Organization
WYEC	Weather Year for Energy Calculations



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

DJ	Degré-jours de chauffage
F1	Coefficient d'éclat du ciel
Gsc	Constante solaire : 1367 W/m <sup>2</sup>
h	heures
Ib	Irradiation directe
Id	Irradiation diffuse
Itb	Irradiation totale directe
kW	Unité de puissance instantanée, kilowatt
kWh	Unité d'énergie, kilowattheure
kWh/m <sup>2</sup>	Unité d'énergie par unité de surface
Lloc	Longitude locale à l'étude
Lst	Longitude standard
m	mètre
m <sup>2</sup>	Mètre carré unité de surface
n	Journée de l'année à l'étude
PF	Pourcentage de fenestration sur un mur
Rb	Éclat du soleil
U	Coefficient de transmission thermique, W/m <sup>2</sup>



## INTRODUCTION

### **Mise en contexte de l'évolution du milieu urbain**

Les populations en milieux urbains sont de plus en plus importantes partout dans le monde. La communauté scientifique a établi des modèles statiques montrant que la population vivant en milieu urbain équivaut maintenant à la moitié de la population sur la terre et que l'exode des milieux ruraux vers les milieux urbanisés continuera d'augmenter d'ici 2050. Le département des affaires sociales et de l'économie de l'Organisation des Nations Unies (ONU) publie des projections de la population et met en lumière l'évolution de celle-ci pour les années à venir. Bien que la plus grande augmentation en milieu urbain sera observée en Asie, il en demeure pas moins qu'une densification des milieux urbains est prévue partout sur la planète d'ici 2050 (United Nations, 2012)

L'augmentation des habitants en milieu urbain fera augmenter inévitablement la consommation et la demande en ressources. L'accroissement de la population en ville est dû à des objectifs des familles qui doivent se trouver un travail proche de leur résidence en liant leurs principaux intérêts. De nos jours, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les villes sont responsables de 60 % de la consommation énergétique mondiale (Hoeven, 2012). Cette consommation a un impact immédiat sur la santé des habitants des villes à cause notamment des émissions de particules qui polluent l'atmosphère ainsi que la qualité de l'air. . L'administration de l'information de l'énergie américaine (EIA, *U.S. Energy Information Administration*) établit des scénarios au niveau planétaire pour la consommation énergétique d'aujourd'hui jusqu'à l'an 2040 (Administration, 2013). Elle prévoit une augmentation de 56 % de la consommation énergétique d'ici 2040 dans le monde. Elle prédit aussi qu'en 2040, les pays non membres de l'Organisation de Coopération et de développement Économiques (OCDE) consommeront le plus d'énergie sur la planète à comparer aux pays membres de l'OCDE. L'EIA tente aussi d'établir des scénarios de projections du coût des différentes sources d'énergie disponibles; malgré des scénarios optimistes et pessimistes, elle en conclut qu'il y aura toujours une augmentation des prix de l'énergie d'ici 2040. C'est pour ces

raisons que l'AIE somme les gouvernements d'établir des politiques énergétiques à l'échelle des villes à cause de leur rôle sur la consommation des ressources énergétiques. L'AIE vise plusieurs secteurs de la ville où il serait profitable d'effectuer des mesures visant à améliorer et réduire l'utilisation d'énergie non renouvelable. Trois secteurs intéressants sont les suivants :

- la planification urbaine;
- l'efficacité énergétique des bâtiments;
- la génération d'énergie renouvelable en milieu urbain.

Selon l'AIE, la planification urbaine a un impact immédiat sur la consommation énergétique d'un quartier, que ce soit au niveau du transport ou afin de limiter l'utilisation d'énergie non renouvelable comme le gaz naturel ou le charbon par exemple afin de combler les besoins en chauffage en favorisant les apports (gains) solaire par exemple. Des bâtiments plus efficaces permettront une utilisation plus censée de l'énergie et la génération d'énergie urbaine pourrait réduire les coûts de transport de l'énergie et ainsi stabiliser la demande énergétique d'une ville.

Les énergies renouvelables sont donc un moteur pour atteindre les objectifs de l'AIE. L'énergie solaire est disponible partout à travers le monde et de plus en plus d'outils et de mesures sont maintenant disponibles afin de modéliser l'énergie émise par le soleil. L'énergie solaire peut être utilisée de manière active en générant de l'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques, mais également de manière passive en laissant passer le rayonnement solaire au travers une façade vitrée d'un bâtiment en plein hiver pour combler les besoins de chauffage.

Souvent négligée dans le passé, l'évolution de la technologie qui permet de réduire la demande en chauffage des bâtiments fait en sorte que les architectes, les ingénieurs, les urbanistes, les constructeurs, et autres intervenants en milieu urbain doivent maintenant tenir compte de l'énergie solaire. En effet, l'augmentation de la population en milieu urbain

poussera les villes à planifier la façon dont elles vont accueillir les nouveaux citadins. De nouveaux quartiers et agrandissements de bâtiments existants devront être réalisés. Les planificateurs urbains seront appelés à créer des concepts où la demande énergétique des bâtiments sera réduite grâce à l'utilisation des nouvelles technologies d'isolation tout en travaillant avec la réalité d'une ville qui se densifie.

### **Objectifs, orientation et hypothèses des présents travaux**

Le présent travail de recherche vise à définir si les apports solaires passifs peuvent avoir un impact significatif en milieu urbain sur la demande en chauffage des bâtiments. Le rayonnement solaire constitue un élément central de l'étude puisque l'amélioration de la technologie porte à croire que la thermique des bâtiments d'aujourd'hui et du futur sera grandement améliorée. Le solaire passif, qui n'avait probablement que peu de poids dans les apports énergétiques des bâtiments, deviendra un élément considérable pour les nouveaux quartiers. L'amélioration des outils de modélisation permet aussi une meilleure compréhension du rayonnement solaire.

Le contexte urbain est étudié, car il est permis de croire que celui-ci peut offrir des gains et un levier considérables au niveau du développement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables que l'étude de la simple habitation. Un cas test urbain a ainsi été créé dans le présent travail dans le but de pouvoir simuler des variables d'étude particulières. Un modèle géométrique d'un quartier hybride a alors été créé. Le modèle se retrouve à mi-chemin entre un véritable quartier existant et celui élaboré de toute pièce. Créer un quartier réel est une tâche considérable qui n'est applicable qu'à un seul endroit dans le monde. Les bases de comparaison du modèle deviennent plus complexes, car il n'existe pas d'autre modèle sur lequel il est possible de se baser. À l'inverse, le quartier créé de A à Z constitue un modèle hypothétique et souvent trop simplifié, qui demeure vrai seulement pour les conditions imposées; les comparaisons avec la réalité deviennent alors distordues. La création de ce modèle hybride permet d'établir des sous-objectifs.

Le programme (code) créé dans le cadre du présent travail permet de situer le quartier à n'importe quelle latitude dans le monde. Ainsi, cinq villes ont été choisies. Le choix des villes de Montréal, Bordeaux et Lyon, qui sont tous près de la latitude 45°N, permettra de soulever les différences météorologiques particulièrement au niveau de l'ennuagement, puisque le trajet solaire est sensiblement le même pour ces trois villes. Il est ainsi supposé que l'apport solaire sera différent pour chaque ville. Les villes de San Francisco et Stockholm sont sélectionnées afin de montrer les différences du rayonnement solaire à cause de leur latitude plus basse et plus élevée qui entraîneront des variations au niveau du rayonnement solaire (par rapport à Montréal, Bordeaux et Lyon), particulièrement important en hiver. De plus, la sélection des villes de San Francisco et Stockholm amène un élément au niveau du climat et de la demande en chauffage. Les villes de Montréal et Stockholm ont toutes les deux des hivers semblables et plus froids que celui des villes de Bordeaux et Lyon. Quant à la sélection de San Francisco, elle fait état du climat le plus doux des cinq villes lorsqu'il est question de demande en chauffage. Cette dernière est intimement liée avec la température extérieure qui est un élément physique très concret pour l'humain. Le choix de lier la demande en chauffage avec le solaire passif permettra d'apporter un élément compréhension au concept du rayonnement solaire qui est souvent encore abstrait.

Le quartier à l'étude subira des rotations afin de déterminer son orientation optimale de et maximiser son rayonnement solaire. En effet, la géométrie du quartier aura une importance au niveau du gisement solaire disponible. Ce concept théorique permettra de aux concepteurs de nouveaux quartiers dans une ville, de saisir l'importance de l'orientation de façades vitrées des bâtiments par rapport aux formes des bâtiments. Le fait d'effectuer des rotations permet également de cartographier l'énergie solaire disponible en fonction de l'orientation et d'un point donné sur un mur extérieur d'un bâtiment. Ainsi, le présent travail pourrait servir de « guide » pour à peu près n'importe quel quartier dans le monde selon l'orientation des rues pour ainsi obtenir une idée de grandeur du gisement solaire disponible à cet endroit.

Une simplification du quartier est effectuée pour valider la possibilité réduire le niveau de détail géométrique du quartier et obtenir une approximation du gisement solaire disponible

pour le secteur résidentiel à l'étude. Réduire le niveau de détail permet de diminuer les temps de calcul de façon notable. Cette simplification permet également de valider les résultats du rayonnement solaire obtenus, car une symétrie doit être observée lorsqu'une rotation de 180° est effectuée par exemple.

Enfin, des scénarios de densification du quartier sont étudiés pour montrer les effets bénéfiques ou néfastes d'une augmentation du nombre d'étages sur un quartier. L'objectif est de montrer les limites de la densification qui amène une augmentation évidente de rayonnement solaire total reçu sur les fenêtres (augmentation de leur nombre), mais également l'effet de l'ajout d'étages sur le rayonnement solaire disponible pour les habitants du rez-de-chaussée. Les résultats sont aussi comparés par unité de surface vitrée.

L'orientation d'un quartier, de par sa forme géométrique, a un effet important sur le gisement solaire disponible. Une grande tour créera automatiquement de l'ombrage sur un groupe de bâtiments. Ce groupe subira alors une réduction de son apport solaire disponible. Il est permis de croire que la densification par des tours sera plus nuisible qu'une densification par étagement (ajout d'étages) en raison de l'importance que l'ombrage celle-ci créera. Il est entendu que l'ajout d'étages comme moyen de densification aura un effet réel sur les étages inférieurs.

Les apports solaires passifs sur les vieux bâtiments auront peu d'impact sur la facture de chauffage. Toutefois, l'orientation des bâtiments du futur constituera certainement un enjeu majeur, car l'énergie solaire deviendra leur première source d'énergie.

Le travail se divise en quatre chapitres. Le chapitre 1 présente l'état de l'art et fait une revue des travaux de recherche effectués dans le domaine. Le chapitre 2 explique la méthodologie générale et les méthodes utilisées afin d'obtenir les résultats. Le chapitre 3 montre l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail. Le chapitre 4 discute des résultats obtenus dans une perspective plus large, tandis qu'une conclusion assortie de recommandations complètes le travail.



## CHAPITRE 1

### ÉTAT DE L'ART

Le chapitre suivant fait état des travaux scientifiques importants dans le domaine de l'énergie solaire et le calcul des besoins en chauffage des bâtiments en portant une attention particulière sur les études effectuées en milieu urbain.

#### 1.1 Étude des phénomènes dans une ville

Comprendre le comportement physique des villes pour en faire un bilan énergétique exige une méthode bien définie. Des travaux sur le sujet sont proposés par Oke (1982). Oke propose ainsi une méthodologie pour comprendre les phénomènes des villes selon quatre étapes :

- reconnaître et observer un phénomène;
- lier statistiquement des facteurs à ce phénomène;
- étudier le processus engendrant ce phénomène;
- construire un modèle pour prédire le comportement d'un phénomène.

Oke mentionne que la majorité des travaux antérieurs (depuis 1850) observaient les phénomènes en essayant d'y relier des statistiques sans pour autant proposer un processus et un modèle associé. Les études étaient donc aux niveaux un et deux de la méthodologie proposée. Oke s'est intéressé à cette méthode afin de créer un des premiers modèles du comportement des îlots de chaleur urbain. Deux conclusions découlent de la méthodologie proposée par Oke : Il faut éléver le niveau d'enquête et que la précision d'un modèle dépend en majorité de la compréhension du processus. Plus précisément, pour les travaux d'étude du comportement des villes face à leur environnement, Oke explique trois difficultés qui influencent la modélisation d'un système ville-environnement : i) la complexité d'un système atmosphère-ville qui dépend de facteurs anthropiques et naturels; ii) le manque de cadre

théorique sur le sujet de recherche; iii) la difficulté d'observation d'une ville. Ces difficultés alimentent encore à ce jour de nombreux travaux de recherche.

## **1.2 Modèles de ciel pour le calcul de l'irradiation solaire**

L'étude de l'irradiation solaire est nécessaire pour quantifier les apports qui peuvent être reçues par une ville. Pour y arriver, il est important d'évaluer les modèles d'irradiation et de ciel disponible.

### **1.2.1 Modèle de Liu et Jordan**

Liu et Jordan (1960) furent parmi les premiers à créer un modèle de ciel dans le but de déterminer l'énergie provenant de l'irradiation solaire sur une surface horizontale en tenant compte de l'irradiation diffuse sous ciel couvert. Leurs études ont été effectuées dans le but de donner des outils aux professionnels (architectes, ingénieurs, etc.) qui voulaient mieux comprendre les phénomènes de l'irradiation solaire, lesquels constituent un enjeu important sur les bâtiments des quartiers et pour les usagers. Parmelee (1954) avait réalisé des travaux en 1954, mais ceux-ci tenaient compte uniquement de l'irradiation solaire en l'absence de couvert nuageux. Contrairement au travail de Parmelee (1954), Liu et Jordan (1960) font état des nouvelles mesures physiques disponibles prises dans les villes qui permettent d'élaborer de nouvelles stratégies de calcul d'irradiation sous couvert nuageux. Ces mesures prises dans 98 localisations aux États-Unis et au Canada permettent enfin d'établir des comparaisons de leur modèle avec des données précises. L'émergence des technologies disponibles à cette époque aide les auteurs à effectuer des calculs complexes à l'aide d'ordinateurs et de logiciels de calcul, même s'ils font état des limitations au niveau du calcul des composantes diffuses. La composante diffuse de l'irradiation solaire n'est donc pas calculable directement. En effet, Liu et Jordan (1960) effectuent des relations entre l'irradiation solaire directe et diffuse et le niveau d'ennuagement. Ils essaient ainsi de décomposer les éléments de l'irradiation solaire totale de différentes façons, soit selon le ciel dégagé, le ciel couvert et les heures d'ensoleillement, comme le montre la Figure 1.1.

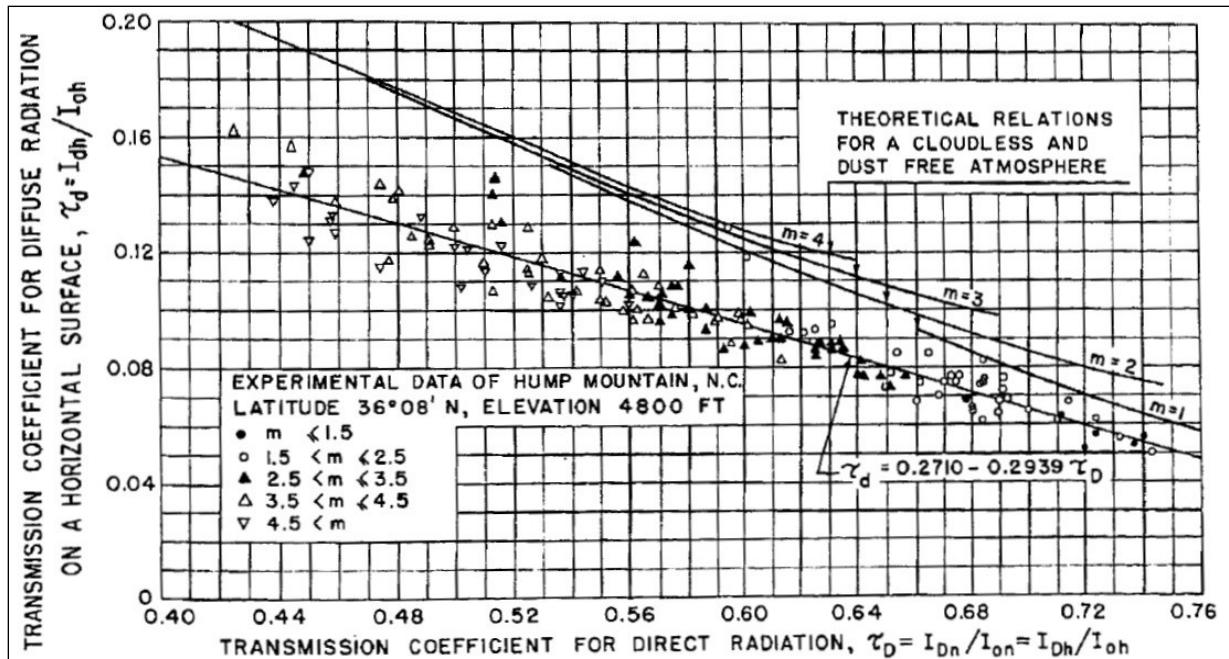


Figure 1.1 Relations avec la théorie et les expérimentations avec des coefficients de transmissions ( $\tau_d, \tau_D$ ) entre l'irradiation directe ( $I_{Dh}$ ) et l'irradiation diffuse ( $I_{dh}$ ) pour un ciel dégagé basé sur 28 jours de prises de mesure,  $I_{oh}, I_{nh}$  intensité du rayonnement solaire sur une surface horizontale et normale

Tirée de Liu et Jordan (1960)

Des relations ont ainsi pu être établies entre l'irradiation diffuse et directe sans couvert nuageux. Ce travail montre que la composante diffuse est surtout influencée par la latitude et la qualité de l'atmosphère (pollution et masse de l'air, fonction de la température de l'air et de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air). Liu et Jordan (1960) émettent des réserves face à leur modèle puisqu'il ne tient pas compte de la réflexion solaire autour des points de mesures ainsi que de la pollution atmosphérique. Pour ces raisons, les courbes théoriques établies ne peuvent représenter parfaitement la réalité.

### 1.2.2 Modèle de Perez

Le modèle de ciel de Perez *et al.* (1987) est largement utilisé pour calculer l'irradiation solaire sur une surface en tenant compte de l'irradiation diffuse et directe. Ces chercheurs montrent que la distribution de l'énergie diffuse dans le ciel est anisotrope, chaque point dans

le ciel émettant vers la terre une quantité d'énergie distincte. Perez *et al.* (1987) utilisent les principes de calculs d'éléments finis. Ils proposent ainsi une sommation des composantes de leur modèle pour calculer l'énergie diffuse en fonction de la luminosité et de la position du soleil. La Figure 1.2 a) montre les composantes de l'énergie diffuse.

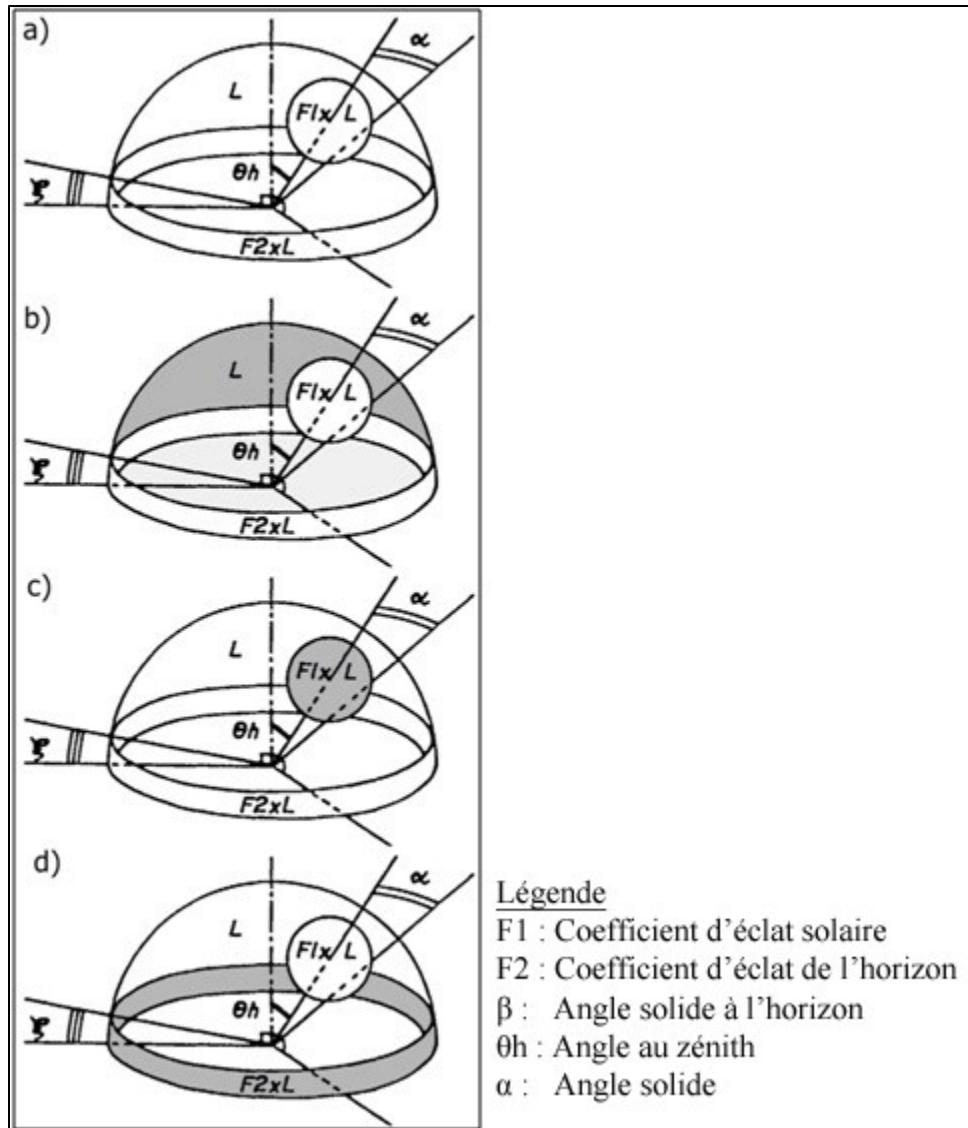


Figure 1.2 Composantes nécessaires pour calculer l'irradiation solaire diffuse en effectuant une décomposition du ciel en plusieurs éléments a) ensemble des composantes; b) composante du ciel issue de l'irradiation diffuse; c) composante 'circumsolaire' (le contour du soleil) issue de l'irradiation diffuse; d) composante de l'horizon issue de l'irradiation diffuse

Adaptée de (Perez *et al.*, 1987)

Perez *et al.* (1987) divisent l'énergie diffuse en trois composantes. La Figure 1.2 b) montre l'énergie provenant du ciel, celle-ci étant la plus commune. Elle est alors calculée selon la position du soleil en évaluant des facteurs de luminosité selon le couvert nuageux. Ensuite, ils établissent la composante autour du soleil qui se nomme circumsolaire (Figure 1.2 c)) et celle à l'horizon (Figure 1.2 d)).

La contribution circumsolaire et l'énergie provenant de l'horizon sont deux apports du travail de Perez *et al.* (1987) et ces éléments montrent bien l'anisotropie de la distribution de l'irradiation solaire diffuse. Le reste de l'irradiation diffuse provient du ciel selon la position du soleil et selon des facteurs de luminosité dépendant du couvert nuageux et des propriétés atmosphériques. Les variables importantes de la Figure 1.2 sont: F1 Coefficient d'éclat solaire, F2 coefficient d'éclat de l'horizon,  $\alpha$  angle solide,  $\beta$  angle solaire à l'horizon,  $\theta_h$  est l'angle pour positionner le soleil.

### 1.3 Facteur de vue du ciel / *Sky view factor*

La section suivante présente la théorie derrière le facteur de vue du ciel (FVC) ainsi que des applications. Le facteur de vue du ciel (FVC) est un élément important à considérer pour quantifier l'énergie solaire en milieu urbain. Le FVC est tout d'abord un élément géométrique qui étudie un point par rapport à son contexte

#### 1.3.1 Angle solide et théorie

.Le FVC part du principe de l'angle solide. L'angle solide est issu des travaux de recherche sur les domaines de l'illumination et la radiosité. Sa définition est que l'angle solide est la projection d'une surface d'un point sur sa propre sphère, le point étant le centre de la sphère (Sillion et Puech, 1994). En version mathématique simplifiée, la valeur de l'angle solide est la surface projetée sur la sphère divisée par le rayon au carré de la sphère. Dans le domaine de l'énergie, il est commun d'utiliser la définition de l'angle solide à l'aide des coordonnées sphériques (Figure 1.3).

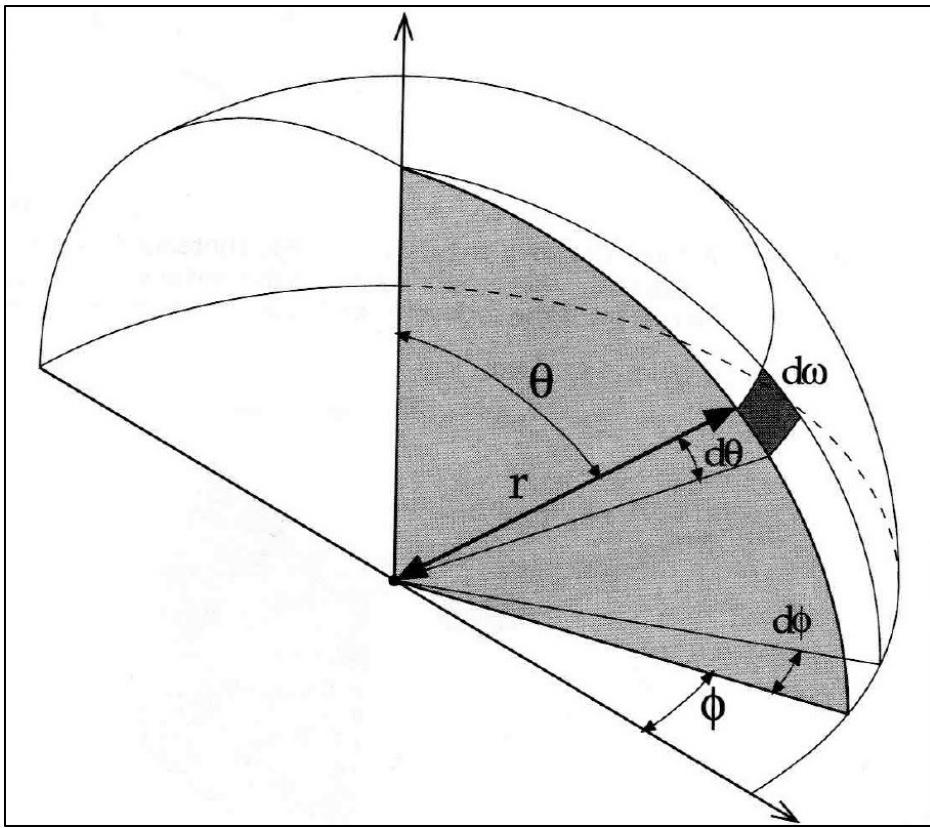


Figure 1.3 Composantes pour le calcul de l'angle solide  $\omega$  où  $r$  est le rayon de la sphère,  $\phi$  l'angle rapporté sur un plan et  $\theta$  l'angle par rapport à l'azimut.

Tirée de Sillion et Peuch (1994)

Comme le montre la Figure 1.3 précédente, le calcul différentiel peut être utilisé pour le calcul de l'angle solide. Ceci est utile en milieu urbain lorsqu'il y a plusieurs obstacles géométriques comme un bâtiment avant de pouvoir projeter un point sur une sphère. L'angle solide présent sur la sphère est souvent vulgarisé comme une surface sur le ciel présent sur un hémisphère. C'est l'angle solide qui permet de quantifier la portion du ciel disponible. Plus simplement, l'angle solide permet de montrer quel est l'ordre de grandeur de la largeur de la surface projetée d'un objet par rapport à un point donné.

C'est donc l'angle solide qui permet de trouver le facteur de vue du ciel. Le FVC ramène l'unité de surface de l'angle solide calculée à une valeur comprise entre 0 et 1. Le 1 serait une valeur obtenue dans un endroit où il n'y aurait aucun obstacle entre l'observateur et le

ciel, par exemple un champ. La valeur 0 ou proche de 0 serait lorsqu'un observateur à un point ne peut voir le ciel ou à peine.

### 1.3.2 Applications du Facteur de vue du ciel (FVC)

C'est le FVC qui permet de valider le pourcentage disponible au sol (ou sur des parois) de l'énergie diffuse provenant du ciel. Le facteur de vue du ciel est issu des études en milieu urbain où la géométrie d'un quartier influence l'apport solaire disponible. Les travaux de Watson et Johnson (1987) mettent en évidence plusieurs variantes de calculs du facteur de vue du ciel en milieu urbain. Leur travail y compare l'énergie reçue sur une surface horizontale à plusieurs endroits dans une ville et à une surface qui est placée dans un champ proche de la ville à l'étude où il n'y a pas d'obstruction de la vue du ciel. Les auteurs suivant [Sakakibara (1996), Chen et Ng (2011), Unger (2004) Parry (1967)] dans le texte ont par la suite tenté d'établir des liens entre le facteur de vue du ciel et des phénomènes observés. Dans une majorité de cas, ces chercheurs cherchaient à quantifier l'énergie absorbée par un quartier ou un canyon à l'aide du FVC pour étudier les phénomènes d'ilot de chaleur urbain. C'est ce que fait Sakakibara (1996) en validant le comportement de l'ilot de chaleur urbain sous différentes géométries de bâtiment. Il utilise le FVC pour démontrer que la forme des bâtiments d'un quartier a un impact sur la formation d'îlots de chaleur urbains. Parfois le FVC est utilisé pour modéliser la quantité de lumière qui entre dans un quartier. Les travaux de Chen et Ng (2011) utilisent le FVC afin de faire une classification du climat urbain de la ville de Hong Kong pour définir un confort urbain dans une ville à haute densité. Plusieurs des études sont basées sur les notions d'Oke (1982). En particulier, les travaux de Unger (2004) expliquent l'historique des études qui s'intéressent aux relations entre le FVC et certains phénomènes spécifiques, et plus particulièrement les îlots de chaleur. Ainsi, en 1967, Parry avait cherché à établir des relations entre six stations météorologiques dans la ville de Reading au Royaume-Uni en mesurant la température moyenne minimum journalière à cet endroit et en prenant des photos du ciel. Parry (1967) a remarqué que selon le type d'ombrage sur le site, la température moyenne journalière variait. La Figure 1.4 montre des

exemples de photos prises pour quantifier le facteur de vue du ciel. Ainsi, plus l'ouverture vers le ciel est grande, plus le FVC est élevé.

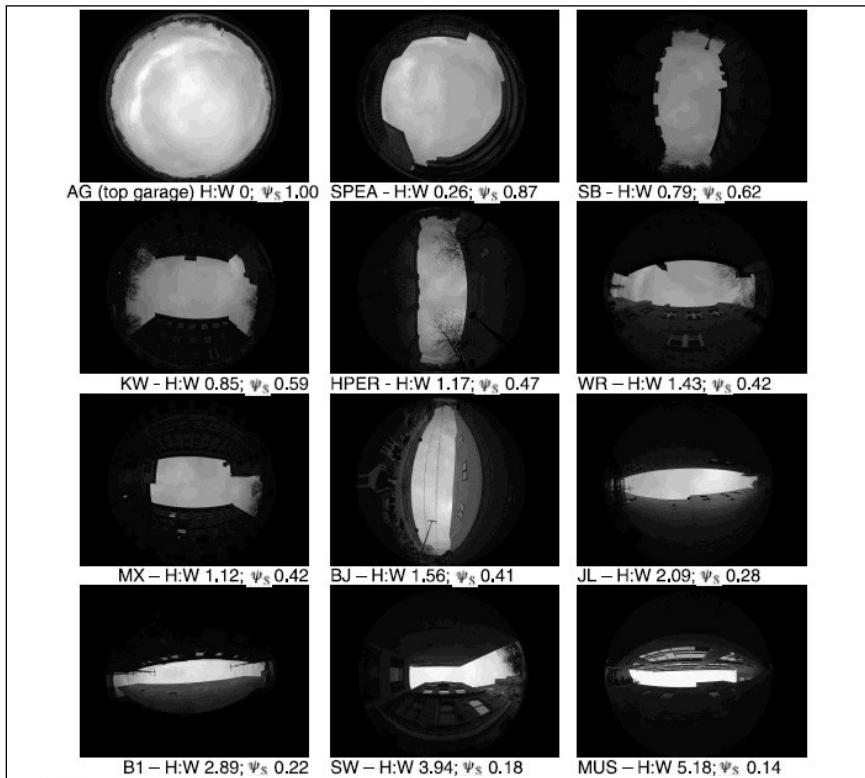


Figure 1.4 Facteur de vue du ciel ( $\Psi_s$ ) qui varie selon l'environnement urbain, H :W étant le rapport hauteur des bâtiments et largeur de la rue  
 Tirée de (Grimmond et al., 2001)

## 1.4 Consommation énergétique des bâtiments

La section suivante présente les méthodes de calcul qui existent pour quantifier les besoins énergétiques en chauffage pour des bâtiments. Elle tient compte de technique dynamique et statique en fonction de l'année de construction des bâtiments.

### 1.4.1 Méthode de calcul statique versus dynamique

Il existe plusieurs méthodes ou approches pour simuler la consommation énergétique des bâtiments. La méthode peut être abordée selon deux approches, l'une dynamique, l'autre

statique. Les méthodes dynamiques offrent une évaluation en détail du comportement d'un bâtiment et de ses usagers selon une multitude d'hypothèses (types de gains solaires, types d'infiltration d'air, zones passives et actives des pièces, etc.) et de paramètres (température des pièces, performance des murs, fenêtres, horaires, etc.) à définir. La plupart du temps, les calculs se font par des évaluations à une échelle de temps horaire. Les méthodes statiques se veulent plus simples. Elles servent à donner un ordre de grandeur sous de longues périodes, par exemple une année complète ou période donnée de chauffe ou encore à réaliser des études comparatives suivant différentes situations (pourvu que l'échelle de temps soit suffisamment longue). Les degrés-heures de chauffe ou de climatisation sont souvent utilisés pour les méthodes statiques. Les degrés-heures sont calculés annuellement ou mensuellement. En 24 heures un degré-jours est obtenu.

Plusieurs études ont permis de comparer les méthodes statiques et dynamiques. Les travaux de Murray, Rocher et O'Sullivan (2012) ont ainsi comparé les deux méthodes sur un bâtiment construit en 1910 sur le campus de leur université en Irlande suivant deux scénarios de rénovation afin d'améliorer ses performances énergétiques. Le bâtiment étudié est celui du département de génie civil. Il comprend principalement des bureaux, des classes et des laboratoires pour une superficie totale de planchers de 2 000 m<sup>2</sup>. Ces travaux comprenaient une phase de mesure sur site pour comparer les résultats aux simulations statiques et dynamiques. Le Tableau 1.1 montre les résultats obtenus suite aux différentes simulations et mesures.

Tableau 1.1 Comparaison des consommations énergétiques d'un bâtiment selon les données mesurées suivant une méthode statique et une méthode dynamique, avant et après rénovation  
Tiré de Murray, Rocher et O'Sullivan (2012)

Scénario	Consommation avant les rénovations (kWh)	Consommation après les rénovations (kWh)	Économie (%)
Mesuré (réel)	511 965	227 410	55,6
Méthode statique	558 412	260 965	53,3
Méthode dynamique	445 012	258 921	41,8

Comme ces travaux sont souvent des études de cas, ils ne sont pas directement transposables à d'autres cas compte tenu de la diversité des caractéristiques des bâtiments et des conditions climatiques régionales. Dans cette étude, la méthode statique s'est avérée globalement plus représentative de la réalité que la méthode dynamique. Cela ne signifie pas que la méthode statique est meilleure, mais dans ce cas précis, elle était simplement plus représentative. La méthode dynamique est plus complexe, demande de nombreuses hypothèses et plusieurs paramètres à définir, ce qui peut parfois conduire à davantage d'incertitudes. Il est ainsi important de bien choisir la méthode qui sera utilisée lors des simulations de consommation énergétique sur des bâtiments avec des scénarios d'amélioration de performances (Aste et Pero, 2013).

En effet, les études statiques sont utiles pour effectuer des calculs de base et pour obtenir une idée de grandeur des résultats, par exemple pour connaître rapidement l'effet de l'ajout d'isolation dans une toiture. Les travaux d'Aste et Pero (2013) utilisent les degrés-jours afin d'évaluer l'impact des mesures proposées sur un bâtiment construit en Italie en 1997 qui comprend une tour et une partie moins haute pour un volume total de 45 500 m<sup>3</sup>. Les méthodes statiques, comme celle des degrés-jours, comprennent plusieurs simplifications volontaires, et ignorent l'humidité relative, la vitesse du vent, et ce, dans le but d'obtenir un résultat de simulation de calcul rapidement à comparer à une méthode dynamique. Les degrés-jours demeurent un outil encore utile et fiable, mais il est nécessaire de porter une attention particulière lors d'étude des bâtiments modernes à basse consommation énergétique, car les réponses peuvent être distordues. En effet, les travaux de Mohareb *et al.* (2011) ont montré qu'une corrélation existe entre les degrés-jours d'une ville et la consommation énergétique d'un bâtiment. Cependant, ils ont découvert que la corrélation utilisée entre les degrés-jours et la consommation énergétique ne fonctionne plus lorsqu'un bâtiment à basse consommation énergétique est étudié.

Les méthodes dynamiques servent quant à elles à mieux comprendre le comportement de la consommation (Aste et Pero, 2013). En choisissant le pas de temps (calcul en heures, minutes, etc.), il est possible d'évaluer par exemple comment les apports internes d'un

bâtiment évolueront tout au long de la journée. Ce type de méthode permet d'examiner en détail les hypothèses posées avec les calculs statiques. Il est faisable, par exemple, d'y faire une sélection précise d'un matériau à utiliser. La clé d'un calcul dynamique demeure dans la calibration du modèle qui doit être fait rigoureusement et qui demande du temps. Cette calibration doit se faire en faisant des procédés itératifs entre les valeurs simulées et de valeurs mesurées dans la réalité afin de confirmer les nombreuses hypothèses utilisées (Tronchin et Fabbri, 2008).

Depuis plus de 50 ans, une multitude de logiciels de calculs dynamiques ont été développés afin de mieux modéliser les environnements des bâtiments. Le niveau de détails de chacun des logiciels est souvent différent de l'un à l'autre, ce qui rend leur utilisation parfois contraignante. Il faut donc bien connaître le logiciel de simulation lors de leur utilisation afin de bien établir les limites de ceux-ci (Crawley et al., 2008) et ce, sans en oublier les hypothèses sous-jacentes.

#### **1.4.2 Degrés-jours et indicateur du climat**

Les degrés-jours sont fréquemment employés parce qu'ils correspondent au niveau de détail suffisant pour la simulation de la consommation énergétique, mais également pour l'information qu'ils permettent de rapidement obtenir au niveau du climat d'une ville (ENERGY-STAR, 2011). Un degré-jours correspond à la différence entre la température extérieure et la température à partir de laquelle un bâtiment nécessite des besoins en chauffage. Le degré-jours est l'addition des 24 degrés-heures d'une journée. Par exemple un bâtiment qui a des besoins de chauffages à partir de 13°C exposé à une température extérieure de 10°C aura une journée de 72 degrés-jours  $[(13^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C}) *24\text{h}]$ . Plusieurs corrélations existent entre les degrés-jours de chauffage ou de climatisation et la rigueur d'un climat. Pour des maisons de construction standard, il est habituellement admis que plus les degrés-jours de chauffage sont élevés, plus la consommation énergétique sera importante. La Figure 1.5 illustre cette relation.

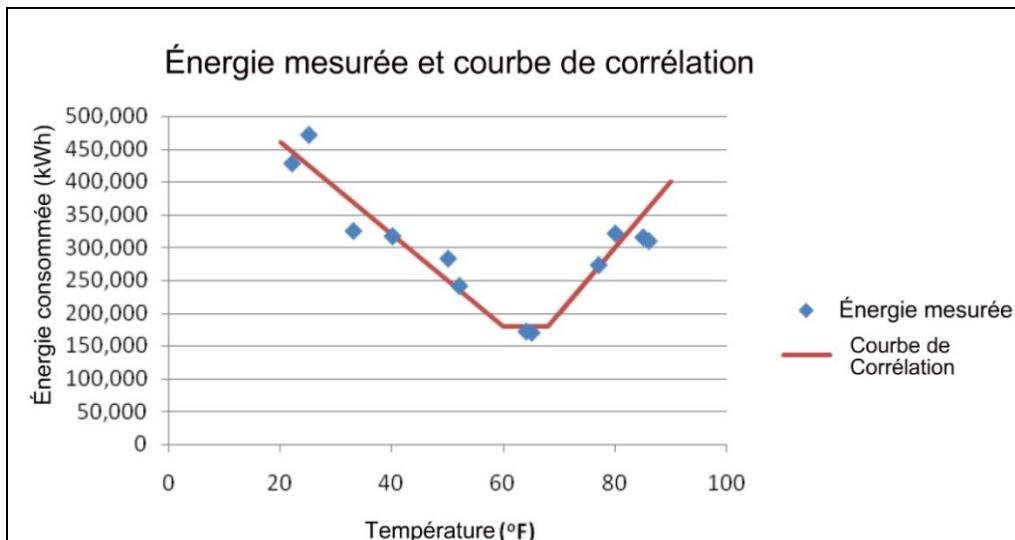


Figure 1.5 Courbe de corrélation entre la température extérieure et l'énergie consommée pour des mesures réelles d'un bâtiment aux États-Unis  
Adaptée de ENERGY-STAR (2011)

## 1.5 Présentation des méthodes du calcul des degrés-jours ASHRAE, Allemande et Française

Il existe plusieurs moyens pour effectuer des estimations de demande énergétique pour le chauffage des bâtiments. Il y a des méthodes dynamiques, selon un horaire d'occupation, et des méthodes statiques. L'utilisation des degrés-jours est un moyen répandu dans plusieurs pays pour calculer les déperditions (par l'enveloppe et l'infiltration) d'un bâtiment ( $D$ ) de manière statique. Comme les degrés-jours jouent un rôle important sur le calcul de la demande énergétique en chauffage et vue que plusieurs villes du monde sont considérées dans le présent travail, l'étude des méthodes disponibles de calcul s'avère importante. L'équation (1.1) montre la relation.

$$D = U_{BAT} \cdot DJ \quad (1.1)$$

où :

$D$  : demande en chauffage (kWh)

$U_{BAT}$  : coefficient de déperdition du bâtiment (W/K)

$DJ$  : degrés-jours (K)

### 1.5.1 Méthode ASHRAE

Il existe plusieurs définitions des degrés-jours selon les normes de chaque pays. Pour un même bâtiment, il est donc possible d'avoir des déperditions différentes selon la méthode de calcul des degrés-jours. La plus connue est celle suggérée par les standards de (ASHRAE, 2007). L'équation (1.2) montre son fonctionnement.

$$DJ = \sum_{Jours} (t_{bal} - t_o)^+ \quad (1.2)$$

où :

$DJ$  : degrés-jours

$t_o$  : température extérieure moyenne de la journée (établie à l'aide d'une base de données de température moyenne horaire sur une base de 30 ans)

$t_{bal}$  : température d'équilibre du bâtiment (18,3°C)

Par définition, cette température tient compte des apports internes d'un bâtiment, mais elle peut être modifiée en modélisant les apports internes d'un bâtiment. Si  $t_o$  est plus grande que  $t_{bal}$ , les degrés sont égaux à 0.

### 1.5.2 Méthode allemande

La méthode allemande (Olonoscheck, Holsten et Kropp, 2011) d'évaluation des degrés-jours est différente de celle proposée par l'approche ASHRAE (2007). L'équation (1.3) montre son fonctionnement.

$$DJ = \sum_{Jours} (20 - t_o) \quad (1.3)$$

Ici, 20°C équivaut à la température de confort à l'intérieur du bâtiment et  $t_o$  à la température extérieure comme dans l'ASHRAE (2007). Cependant, la différence en termes d'approche

par rapport à l'ASHRAE (2007) réside dans le fait de ne pas calculer les degrés-jours si  $t_o$  est inférieure à 12°C.

### 1.5.3 Méthode française

La méthode française (Météo France, 2005) est la plus complexe, puisqu'il y a plusieurs conditions à respecter pour effectuer le calcul. De plus, contrairement aux autres méthodes, la méthode française suggère d'utiliser la température maximum ( $T_x$ ) et la température minimum ( $T_n$ ) enregistrées dans la journée. La méthode française utilise un seuil  $S$  qui présente la même définition que celui de l'ASHRAE. Les équations (1.4) à (1.7) montrent son fonctionnement.

$$T_{moy} = \frac{(T_x - T_n)}{2} \quad (1.4)$$

Si le seuil ( $S = 18,3^\circ\text{C}$ ) est plus grand que  $T_x$  ( $S > T_x$ ) :

$$DJ = S - T_{moy} \quad (1.5)$$

Si le seuil ( $S=18,3^\circ\text{C}$ ) est plus petit ou égal à  $T_n$  ( $S \leq T_n$ ) :

$$DJ = 0 \quad (1.6)$$

Si le seuil ( $S=18,3^\circ\text{C}$ ) se situe entre  $T_n$  et  $T_x$  :

$$DJ = (S - T_n) \cdot (0,08 + 0,42 \cdot (T_x - T_n) / (T_x - T_n)) \quad (1.7)$$

## 1.6 Comparaison des méthodes pour les cinq villes à l'étude

Une analyse a été effectuée dans le but de comparer les trois méthodes proposées. Les cinq villes à l'étude sont sélectionnées pour l'analyse : Montréal, Bordeaux, Lyon, Stockholm et San Francisco. Les analyses sont effectuées à l'aide de fichier météo (US Department of Energy, 2011) obtenu en récupérant les températures moyennes horaires sur une période d'au moins 30 ans. Les fichiers sont standardisés selon le WMO (*World Meteorological Organization*). Les calculs ont donc été effectués pour les cinq villes et la Figure 1.6 montre les résultats obtenus.

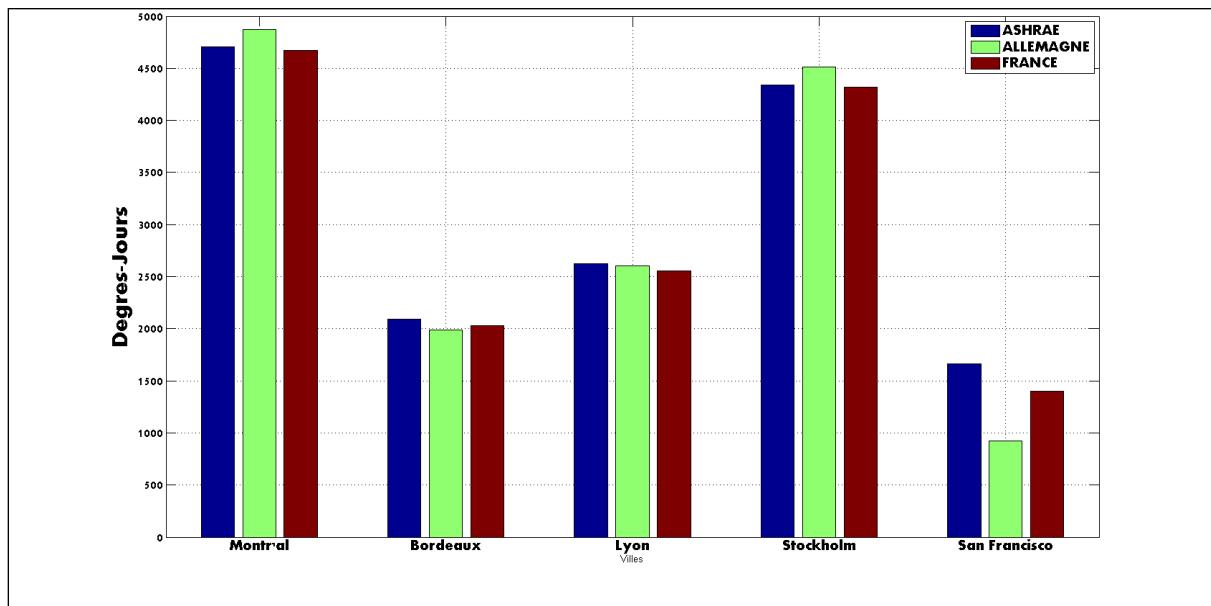


Figure 1.6 Comparaison des méthodes de calcul de degrés-jours pour les cinq villes à l'étude (ASHRAE, Allemagne et Météo France)

Les résultats montrent que la méthode de l'ASHRAE surestime légèrement les degrés-jours à comparer à la méthode française. Étant donné que la méthode française considère davantage de conditions, il est normal que cette technique soit plus fine dans le calcul que celle de l'ASHRAE étant donné que ces deux méthodes sont évaluées sous le même seuil où  $t_{bal}$  est égal à 18.3°C. Cependant, la différence entre les résultats des deux techniques est de moins

de 5 %. D'autres tests seraient nécessaires pour valider si les deux modèles sont valables dans d'autres climats.

La méthode allemande est différente dans son approche, puisqu'elle tient compte d'une température de confort intérieur de 20°C et un seuil faible à 12°C comparativement à celui de 18,3°C considérés par les deux autres méthodes. Pour les climats froids (Montréal et Stockholm), la méthode allemande surestime les degrés-jours par rapport aux méthodes américaine et française. Pour les climats plus chauds (Bordeaux et San Francisco), la méthode sous-estime les degrés-jours de chauffe. La méthode allemande semble peu valable pour les climats plus chauds, surtout au niveau de San Francisco où les résultats sont respectivement 55 et 66 % inférieurs à ceux suggérés par l'ASHRAE et par Météo France. En effet, en période hivernale, la température moyenne à San Francisco est de 12,6°C, ce qui est au-dessus du seuil proposé par la méthode allemande qui est de 12°C. Il y a donc d'avantage de probabilité de négliger des données par cette méthode de calcul. À Bordeaux, la température moyenne hivernale est de 6,5°C, ce qui explique que la méthode allemande donne des résultats plus proches de ceux des deux autres méthodes considérées.

## **1.7 Scénarios de projection de la consommation énergétique des bâtiments selon leur année de construction et de rénovation**

Les études de rénovations de bâtiments sont intéressantes pour valider les économies possibles en énergie sur un parc immobilier ou bien un quartier de maisons. Ces économies en énergie se traduisent toujours en flux monétaire selon le prix régional de la ressource énergétique. Souvent, les scénarios d'amélioration des bâtiments sont liés à des objectifs environnementaux décrétés par des gouvernements.. Des rapports sur l'impact des projets de rénovation consistent le plus fréquemment à des études de cas pour des bâtiments publics existants et les méthodes utilisées varient considérablement d'une étude à l'autre (Ma *et al.*, 2012).

Lors d'étude de la consommation énergétique de bâtiments construits à différentes époques, les scénarios courants de rénovation proposés résidents à des changements de la fenestration

et de l'isolation de la toiture ou des murs (Chidiac *et al.*, 2011). Dans ce cas, il est d'usage de (Chidiac *et al.*, 2011) :

- définir le type de simulation énergétique qui sera utilisé;
- déterminer les propriétés des matériaux de construction de chaque époque dans les codes de constructions en vigueur;
- définir une stratégie de simulation où il est possible d'observer un paramètre à la fois afin de cibler certains éléments.

Il en ressort de ces trois points une meilleure organisation et une plus grande rapidité et dans les simulations énergétiques. Ainsi, il est alors aisé de modifier les années de construction des bâtiments, de valider le comportement de certains matériaux individuellement comme, par exemple, le poids des pertes thermiques des fenêtres dans le bilan global.

## 1.8 Orientation des bâtiments et énergie consommée

Ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la façon d'étudier l'irradiation solaire émise sur des bâtiments en établissant des relations avec la consommation énergétique, la morphologie du quartier et des bâtiments ainsi qu'en analysant le comportement des usagers et des matériaux de fabrication. Le climat influence toujours les résultats obtenus et il est ainsi nécessaire de tenir compte des spécificités régionales. Si le même bâtiment est placé à différents endroits dans le monde, différents scénarios seront obtenus pour l'ensoleillement et le couvert nuageux et, conséquemment, différentes consommations énergétiques. Une étude aux États-Unis (Andersson *et al.* 1985) a été menée dans les années 1980 dans le but de valider l'orientation optimale d'une maison unifamiliale typique dans 25 villes américaines, tant pour des besoins de chauffage que de climatisation. L'orientation de la maison a été étudiée pour chaque pas de 45°. La Figure 1.7 illustre l'orientation de la maison unifamiliale.

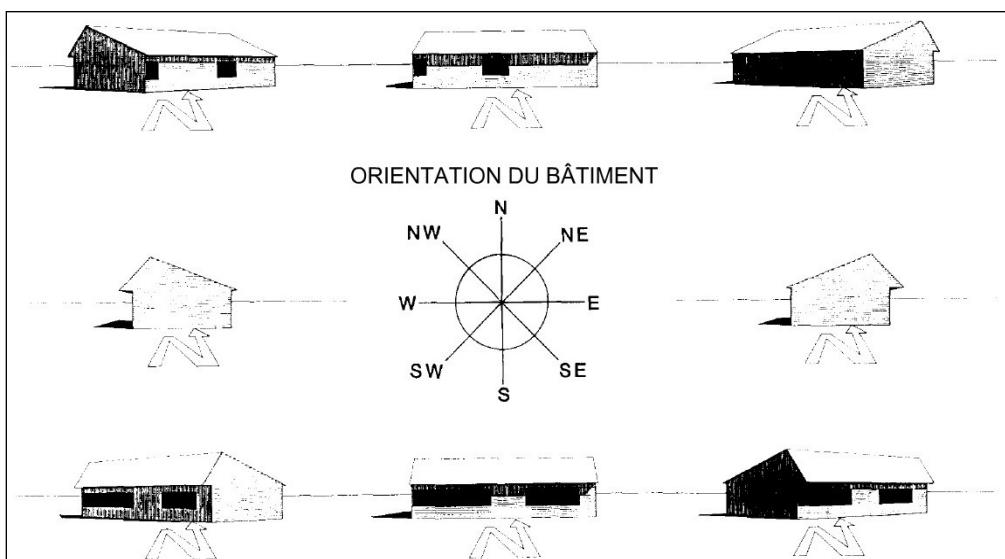


Figure 1.7 Orientation de la maison  
Adaptée de Andersson *et al.* (1985)

Les conclusions de l'étude indiquent clairement que dans la plupart des cas, une orientation de la fenestration vers le sud contribue à abaisser les charges de chauffage et de climatisation.

La Figure 1.8 montre la différence en pourcentage de la consommation énergétique d'une façade orientée vers le nord par rapport à une façade vers le sud selon trois zones climatiques des États-Unis, dans chaque lieu le climat est pris en compte ainsi que la latitude. Le cas d'une maison unifamiliale située à Madison est également présenté à la Figure 1.9. Cette figure met en évidence la consommation énergétique d'un bâtiment selon son orientation en ayant le sud comme orientation de référence.

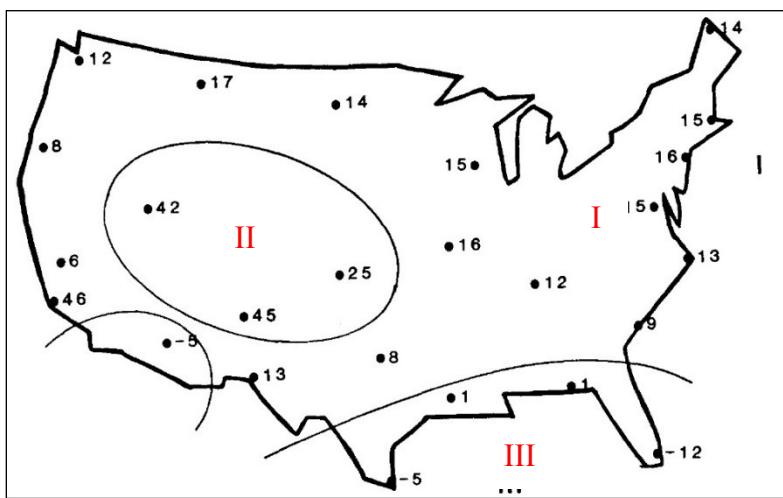


Figure 1.8 Pourcentage de l'augmentation des charges de chauffage et de climatisation pour une maison unifamiliale orientée vers le nord par rapport au sud aux États-Unis selon trois régions climatiques différentes  
Adaptée de Andersson *et al.* (1985)

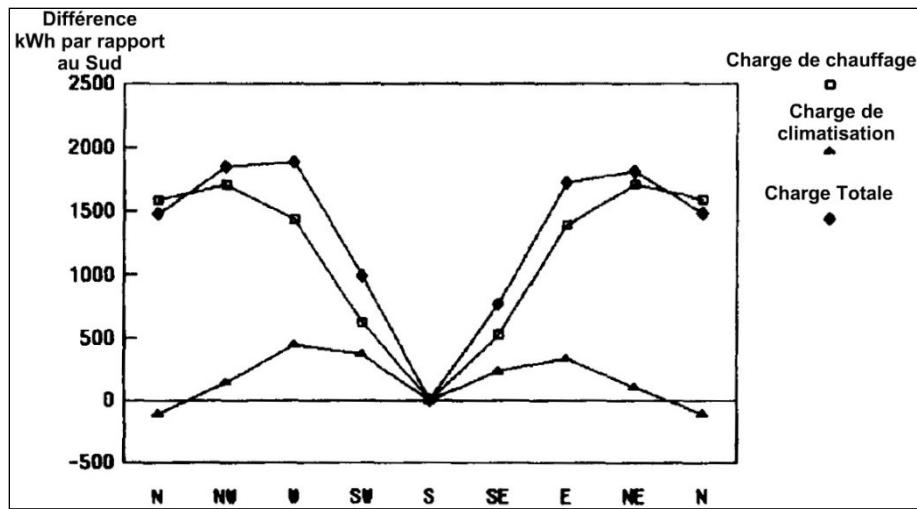


Figure 1.9 Consommation énergétique d'une maison unifamiliale dans la ville de Madison

par rapport à une fenestration orientée vers le sud

Adaptée de Andersson *et al*, (1985)

Les travaux sur la simulation du bilan énergétique à l'échelle urbaine sont assez récents. Les maisons passives, le rayonnement solaire et les modèles 3D d'un quartier constituent des sujets de plus en plus étudiés dans la communauté scientifique les prochains auteurs cités traient de ce sujet. La majorité des outils développés lors des dernières années visaient principalement le bâtiment lui-même, sans tenir compte de son environnement. C'est vers la fin des années 1990 que certains travaux de recherche se sont concentrés sur le comportement des édifices dans un quartier (Littlefair, 1998). En effet, Littlefair (1998) a effectué une revue des outils disponibles pour le calcul du rayonnement solaire et de l'éclairage naturel qui entrent dans un bâtiment. Il évoque l'importance de faire des études approfondies dans le domaine pour bien concevoir les maisons passives solaires. La difficulté principale liée à l'utilisation d'outils à l'échelle urbaine est de pouvoir considérer les nombreuses obstructions (effets de masques par les bâtiments voisins), surtout pour des villes situées à haute latitude à cause du faible angle solaire hivernal. La Figure 1.10 montre l'importance de bien calculer l'angle solaire le plus désavantageux pour trouver l'espacement optimal entre les bâtiments afin de ne pas nuire au chauffage passif. Littlefair (1998) tire ainsi des conclusions sur l'importance de faire de la modélisation à l'échelle urbaine puisqu'il évoque que le domaine de l'étude sur l'accès au solaire passif dans les quartiers étalés a été

bien traité, tout en citant la conscience environnementale qui vise à faire limiter des phénomènes comme l'étalement urbain qui ont un impact majeur sur l'utilisation de l'espace. Ses constats font état des avancements importants au niveau des outils disponibles pour prédire l'accès direct au soleil et au ciel dans des sites restreints. De plus, Littlefair (1998) indique que des méthodes de calcul de gains solaires en milieu urbain devront être développées ainsi que des manuels de la disponibilité de l'énergie solaire dans les villes du monde. Enfin, il précise que les chercheurs et les professionnels ont suffisamment d'outils en main pour modéliser et optimiser les gains solaires dans de nouveaux quartiers ou pour quantifier les pertes solaires d'un nouveau quartier causées par de nouvelles constructions.

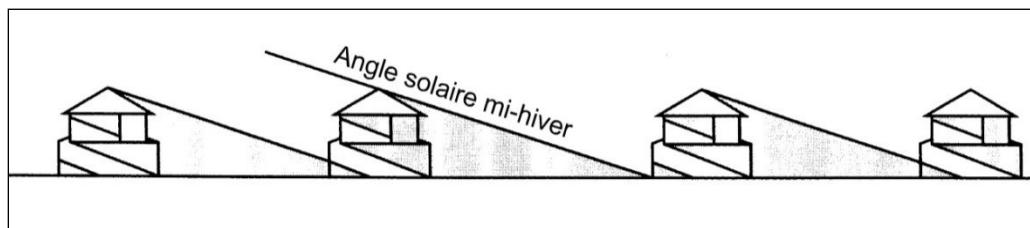


Figure 1.10 Illustration de l'angle solaire en hiver afin de disposer correctement la maison solaire passive sans nuire aux autres bâtiments

Adaptée de Littlefair (1998)

L'évolution de la technologie a mené à des résultats intéressants à l'échelle urbaine (Ratti, Baker et Steemers, 2005). Ratti et ses collègues expliquent que l'influence de la performance des équipements thermiques ainsi que le comportement des usagers sur la consommation énergétique d'un bâtiment sont bien connus. Ils évoquent toutefois que peu d'études se sont concentrées sur l'influence de la morphologie d'un quartier sur la consommation énergétique. Dans cette perspective, les auteurs se sont intéressés à l'étude de trois quartiers à Londres, Berlin et Toulouse et en ont fait ressortir différents paramètres (surface au sol, volume construit, surface des façades, orientation de la fenestration, surface non construite dans le quartier) afin d'établir différentes classifications des performances énergétiques et de la morphologie optimale d'un quartier.

Les modèles de ces quartiers destinés aux simulations ont été créés à l'aide d'images en deux dimensions (2D) et de la vue en plan du quartier. L'utilisation de teintes sur l'image sert à illustrer la hauteur des bâtiments, donc la troisième dimension. Cette simplification est utile afin d'alléger le calcul matriciel utilisé pour déterminer l'énergie solaire entrant dans le quartier ainsi que la consommation énergétique. La Figure 1.11 montre la visualisation du quartier modélisé de Londres selon les différentes teintes illustrant la 3<sup>e</sup> dimension ainsi que le modèle géométrique tridimensionnel correspondant.

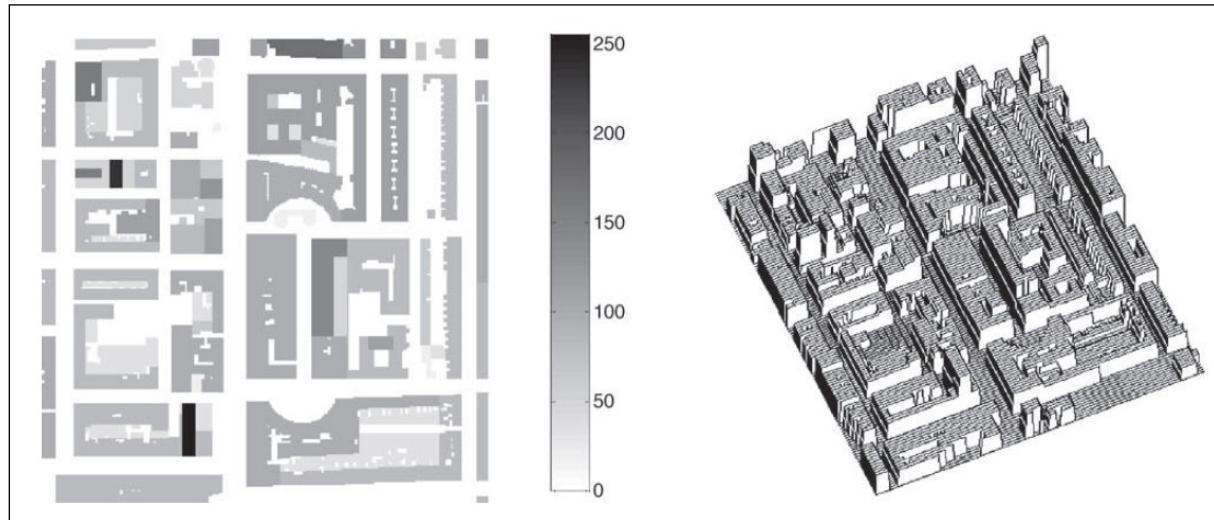


Figure 1.11 Visualisation du quartier modélisé de Londres selon différentes teintes illustrant la 3<sup>e</sup> dimension ainsi que le modèle géométrique tridimensionnel correspondant  
Tirée de Ratti, Baker et Steemers (2005)

Avec ces analyses d'images, Ratti cherchait à établir différentes classifications pour décomposer ses résultats. Premièrement, en utilisant le rapport « surface au sol : volume du bâtiment » (*surface to volume ratio*), une première classification de performances des quartiers a pu être effectuée. Les auteurs (Ratti, Baker et Steemers, 2005) utilisent ce paramètre puisqu'il fournit des informations importantes sur la forme d'un quartier (comparaison de la surface au sol du site au volume construit). En considérant ce paramètre, il est possible de conclure que le quartier ayant le plus petit ratio aura le moins de pertes thermiques au travers ces bâtiments. Toutefois, cette affirmation n'est que théorique puisqu'il faut évaluer les critères météorologiques tel que l'ensoleillement et la température

extérieure ainsi que l'influence des usagers et de la mitoyenneté des bâtiments. Les quartiers sont donc également évalués par une technique de zones passives de bâtiment. Les résultats sont interprétés à l'aide de la méthode LT (*lighting and thermal*) qui tient compte du rayonnement solaire, de la radiosité et des apports internes de façon dynamique (Baker et Steemers, 1996). Sur la base d'une simplification de l'ensemble du quartier et de ses bâtiments (par de simples cubes), les résultats de l'étude montrent que, dans les trois villes à l'étude (Londres, Berlin et Toulouse), la morphologie d'un quartier a une influence de 10 % sur le bilan énergétique du secteur. Dans leurs conclusions Ratti, Baker et Steemers (2005) évoquent l'importance d'étudier la morphologie urbaine puisque dans le futur, les systèmes seront de plus en plus efficaces et les usagers de plus en plus éduqués, ce qui fait en sorte que le facteur de forme deviendra de plus en plus important.

Aujourd'hui, de nombreux logiciels sont accessibles pour effectuer des modélisations à l'échelle urbaine, tant sur un quartier que sur un canyon urbain. Des chercheurs danois ont fait une étude de cas sur un canyon urbain à l'aide d'outils de simulations (Strømann-Andersen et Sattrup, 2011). Ils ont utilisé un canyon urbain typique en faisant varier sa largeur, sa hauteur ainsi que son orientation pour valider les consommations énergétiques totales d'un groupe de bâtiments. La géométrie utilisée pour la largeur et la hauteur des bâtiments correspond aux bâtiments typiques danois selon les années de constructions. Toutefois, dans le cadre de leur étude, le même type de bâtiment est utilisé et il n'y a pas de variété dans les matériaux de construction selon les années de construction, éléments qui influencent la consommation énergétique. Les auteurs ont utilisé le logiciel ECOTECT™, pour les apports solaires pour le chauffage et le logiciel RADIANCE™ pour les apports en lumières naturelles. Ils ont ainsi pu réaliser un bilan énergétique dynamique à l'aide d'un fichier météo (\*epw *EnergyPlus weather file format*). Les auteurs soulignent que la densification d'un milieu urbain doit être planifiée rigoureusement avant la construction lorsque le critère du gisement solaire est pris en compte seulement. Selon eux, la hauteur des étages à ajouter dans un quartier doit se faire conjointement avec la réglementation thermique danoise afin d'optimiser le rayonnement solaire sur le canyon urbain. Cette réglementation qui entrera en vigueur en 2015 exige des consommations en énergie primaire pour les

nouvelles constructions de 35 kWh/m<sup>2</sup> pour les bâtiments résidentiels et de 50 kWh/m<sup>2</sup> pour les bâtiments commerciaux. Cette étude montre qu'une mauvaise planification de bâtiments (bâtiment en milieu rural qui serait fortement densifié) à faible consommation énergétique peut faire grimper la consommation de 19 % si l'accès à l'énergie solaire est bloqué. Le même bâtiment, selon son orientation et qui se retrouve dans un milieu fortement urbanisé, verra sa consommation énergétique augmenter de 30 % (Strømann-Andersen et Sattrup, 2011).

Des chercheurs hollandais se sont concentrés sur le chauffage passif d'un groupe de bâtiments (van Esch, Looman et de Bruin-Hordijk, 2012). Les travaux visaient à mettre en évidence les différences de consommations énergétiques (dues au chauffage) entre une maison passive et une maison conventionnelle, et ce, pour trois différentes journées dans l'année, deux aux solstices (21 décembre, 21 mars) et l'une à l'équinoxe d'été (21 juin). Van Esch *et al.* ont fait varier la largeur de la rue, le type de toit ainsi que l'orientation du canyon. La Figure 1.12 ainsi que la Figure 1.13 montrent respectivement les trois types de canyon à l'étude (vue en coupe) et la disposition des bâtiments formant le canyon (disposition qui montre une même uniformité).

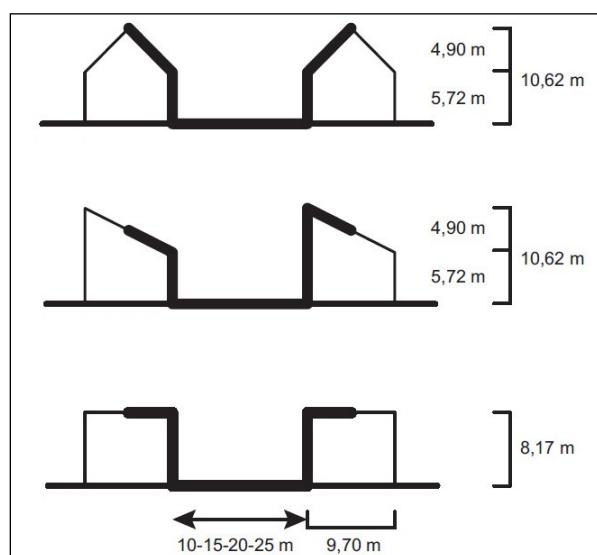


Figure 1.12 Vue en coupe des canyons urbains  
Adaptée de van Esch, Looman et Bruin Hordijk (2012)

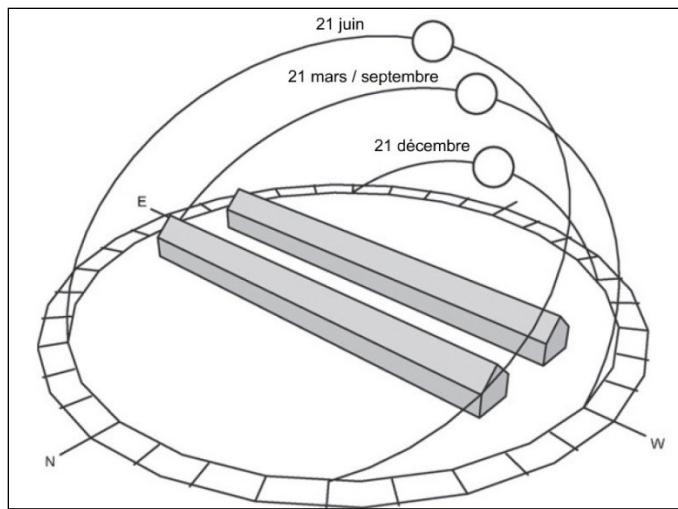


Figure 1.13 Uniformité du canyon urbain selon l'étude de van Esch  
Adaptée de van Esch, Loosman et Bruin Hordijk (2012)

Les auteurs utilisent le logiciel TRNSYST<sup>TM</sup> pour effectuer une simulation dynamique ainsi qu'un fichier météo horaire typique de la Hollande pour calculer le rayonnement mensuel moyen direct et diffus. Cette étude permet de saisir l'importance des effets de la géométrie des bâtiments dans un canyon urbain par rapport au rayonnement solaire disponible.

Une autre méthode d'estimation de demande en chauffage à l'échelle urbaine consiste à utiliser un modèle 3D complet d'un quartier urbain ayant un certain niveau de détail. Une étude menée à l'Université de sciences appliquées de Stuttgart en Allemagne (Strzalka *et al.*, 2011) montre certains développements dans ce domaine. Strzalka *et al.* ont créé un modèle 3D du quartier de Scharnhauser Park à Stuttgart qui tient compte de l'extrusion des bâtiments au niveau du sol tout en tenant compte de la mitoyenneté des murs. De cette façon, ils ont pu décomposer les surfaces de tous les bâtiments de la ville. Le principal objectif de leurs travaux consistait à comparer la consommation énergétique en chauffage des bâtiments à l'aide de leur modèle 3D aux consommations réelles du quartier. Les consommations réelles ont été obtenues de la centrale de cogénération qui fournit toute l'énergie nécessaire pour le chauffage du quartier. Les températures extérieures et le rayonnement solaire horaire du site ont été obtenus pour les années à de l'étude soit de 2008 à 2010. Deux simulations sur le modèle 3D ont été effectuées, l'une ne prenant en compte que des déperditions et l'autre

considérant les apports internes selon une valeur fixe ( $5 \text{ W/m}^2$ ). Les résultats de leurs travaux montrent que leur modèle est efficace pour donner une valeur raisonnable de la déperdition lorsque les apports internes sont pris en compte ainsi que les infiltrations d'air selon une valeur fixe. Cette méthode de simulation de la demande énergétique selon un calcul statique montre une sous-évaluation allant de 13 à 20 % entre les données prises directement sur leur site d'essais tandis que la méthode dynamique dénote une surévaluation et une sous-évaluation allant de 10 à 5 % par rapport à la réalité. Enfin, les chercheurs s'interrogent sur la pertinence de valider le modèle selon un horaire d'occupation en ayant des apports internes variables et en tenant compte de l'inertie des bâtiments, et ce, à cause de la performance du modèle par rapport aux données mesurées.

Le travail de Hachem, Athienitis et Fazio (2011) présente une réflexion sur la densification d'un quartier en y évaluant le potentiel solaire. Des liens sont faits entre la forme d'un groupe de bâtiments et le potentiel solaire. Hachem, Athienitis et Fazio (2011) montrent que la densité d'un quartier (donc la forme du quartier) peut faire varier le potentiel solaire, l'orientation optimale d'un quartier sur une rue en courbe fait augmenter le potentiel solaire de 34 % à comparer à un quartier orienté directement sud une rue droite. Hachem, Athienitis et Fazio (2011) montrent que la forme rectangulaire d'une maison qui est généralement la plus performante côté demande énergétique en chauffage et climatisation n'est pas la forme optimale lorsqu'on évalue le potentiel solaire.

## **1.9        Lois et objectifs gouvernementaux**

La section suivante présente les réglementations thermiques pour les bâtiments en vigueur au Canada, plus particulièrement dans la province du Québec, et en France.

### **1.9.1      Canada**

Le Canada est moins sévère que les pays européens au niveau de sa législation en matière de consommation énergétique de tout type. En effet, une étude réalisée par Hofman et Li (2009) précise que le Canada augmentera sa production d'énergie primaire de 52 % et sa

consommation énergétique de 34 % pour la période de 2004 à 2025. Selon les travaux de Hofman et Li (2009), la mise en œuvre de politiques énergétiques axée sur les énergies renouvelables permettrait de limiter la consommation énergétique afin de limiter l'utilisation de ressource énergétique non renouvelable.

Malgré que le secteur du bâtiment à longtemps été négligé au Canada au niveau de l'efficacité énergétique, des avancées sont tout de même observées. En avril 2011, le gouvernement du Canada a adopté une réglementation axée sur l'efficacité énergétique des bâtiments dans son code de construction (Canada, 2013) qui fait en sorte que les nouvelles constructions devront rencontrer des standards minimums au niveau de la consommation énergétique. Ce code qui traite d'efficacité énergétique est intimement relié, à quelques différences près, à la norme américaine ASHRAE 90.1 (ASHRAE 2007). La norme ASHRAE 90.1, créée par la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, indique les lignes directrices afin de garantir un minimum d'efficacité énergétique pour un bâtiment tant au niveau de sa conception qu'au niveau de la sélection des critères de performances des matériaux de construction (ASHRAE, 2010). L'AHSRAE est un conseil où siègent plusieurs chercheurs et professionnels partout dans le monde dans le domaine de la consommation énergétique du bâtiment. La première norme ASHRAE est apparue en 1975. Le code de construction du Canada a toujours utilisé ces standards, mais n'a jamais mis une emphase plus exigeante que la norme sur l'efficacité énergétique.

Pour la province de Québec, le volet d'efficacité énergétique a été inséré dans le code de construction du Québec en août 2012. Selon l'Agence de l'efficacité énergétique du Québec, les nouvelles constructions seront plus performantes et pourront réduire la consommation énergétique jusqu'à 25 % par rapport aux exigences de l'ancien code de construction. Ces exigences sont issues des standards émis par le gouvernement du Canada, mais également des ceux créés par le gouvernement du Québec tel que le programme NOVOCLIMAT. Ainsi, c'est la province de Québec qui a la juridiction de l'appliquer (Québec, 2011b).

Il existe des programmes plus exigeants au Québec en matière d'économie d'énergie. En effet, il est possible sur une base volontaire d'obtenir une certification NOVOCLIMAT qui existe depuis 1999 et qui est mises à jour régulièrement. Cette certification est souvent accompagnée d'une aide financière pour avoir un effet incitatif. La certification NOVOCLIMAT repose sur des économies d'énergie d'au moins 25 % selon les applications choisies et vise un meilleur confort à l'intérieur des habitations (Québec, 2011a).

### 1.9.2 France

La France a effectué une vaste évaluation environnementale pour se donner un cadre législatif afin d'atteindre des objectifs audacieux au niveau du développement durable. C'est la Loi du Grenelle environnement. En effet, la France s'est donné un objectif au niveau de la réduction de ces gaz à effet de serre, soit celui de réduire ses émissions par un facteur de quatre d'ici 2050 afin de contenir le réchauffement climatique. Sur la base des émissions de gaz à effet de serre, la consommation énergétique issue du secteur du bâtiment est reconnue comme l'un des plus grands pollueurs en France. Le gouvernement français fait état que ce secteur est responsable de 25 % des GES en France et de 40 % de la consommation énergétique française (Charlier et Risch, 2012). La France présente également un historique de réglementations thermiques pour la construction des bâtiments. En 1975, avec la crise pétrolière et l'explosion des coûts énergétiques, la France a décidé de créer une réglementation thermique en imposant, par exemple, l'isolation des nouveaux bâtiments. Voulant atteindre son nouvel objectif, la France a modifié en 2012 sa réglementation thermique la plus récente (2005) afin de limiter la consommation énergétique à 50 kWh/(m<sup>2</sup>·an) pour les nouveaux bâtiments en construction.

Le gouvernement français soutient donc aujourd'hui de nombreux projets de recherche dans le domaine du bâtiment afin de cadrer dans ses objectifs. Par exemple, une étude sur l'ensemble des maisons de retraites en France a été effectuée de manière à évaluer comment ce secteur pourrait réduire par un facteur de quatre sa consommation énergétique d'ici 2050 (Beckers, Merino et Rodriguez, 2012).

Plus récemment, la France s'est dotée de programmes de recherche spécifiques, par exemple, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a lancé un programme axé sur la recherche scientifique sur les villes durables, qui s'intéressent au comportement des villes dans le but de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Il existe maintenant une certification de quartier écologique (France, 2010). Pour la France, il est maintenant établi que l'ensemble d'une ville jouera un rôle important sur la lutte aux changements climatiques.



## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE

Le chapitre suivant présente la méthode utilisée pour concevoir les quartiers tests à l'étude ainsi que les calculs et équations nécessaires à effectuer pour quantifier l'irradiation solaire et les besoins en chauffage d'un bâtiment.

#### 2.1 Sélection des villes et des quartiers

Cinq villes ont été choisies dans le cadre du présent projet de recherche : San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. Différents critères ont été considérés pour leur sélection : latitudes et climat, densité de population et morphologie de ses quartiers ainsi que les caractéristiques des bâtiments. Ces critères visaient à mettre en évidence l'effet du gisement solaire sur les besoins en chauffage d'un quartier test d'étude. La confection du quartier repose sur la méthode utilisée par le laboratoire AVENUES de l'université de technologie de Compiègne (Beckers, 2012).

L'analyse initiale visait d'abord à identifier un certain nombre de villes ayant la même latitude et des quartiers présentant des morphologies et des densités de population voisines. Les villes de Montréal, Bordeaux et Lyon ont ainsi été sélectionnées puisqu'elles se situent tous au voisinage de la latitude de 45°0' nord, tout en offrant quartiers de caractéristiques semblables. Ces villes ayant presque le même trajet solaire présenteront des résultats différents en termes de gisement solaire en raison des conditions météo locales, voire l'ennuagement. Pour comparer les résultats et mettre en évidence une différentiation de la latitude sur le gisement solaire, une ville nordique et une plus au sud ont été choisies : Stockholm et San Francisco. La ville de Stockholm (59°4' de latitude nord) présente un climat assez similaire à celui de Montréal au niveau de la demande en chauffage (voir degrés-jours de chauffage, Tableau 2.1), mais un trajet solaire peu avantageux en période hivernale. Quant à la ville de San Francisco (37°4' de latitude nord), elle montre un climat

méditerranéen et un trajet solaire avantageux en période hivernale. Le Tableau 2.1 résume les caractéristiques des villes à l'étude.

Tableau 2.1 Villes sélectionnées et caractéristiques

Ville	Latitude	Densité (hab/km <sup>2</sup> )	Climat	Classification Koppen du climat	Degré-heures de chauffe
Montréal, Canada	45°28'	13 379	Continental humide	Dfb	4 428
Bordeaux, France	44°49'	4 845	Climat océanique	Cfb	2 008
Lyon, France	45°43'	10 101	Semi continental	Dfa	2 389
Stockholm, Suède	59°39'	4 600	Continental humide	Dfb/Cfb	4 286
San Francisco, É-U	37°37'	6 632	Climat méditerranéen	Csb	1 504

**Légende (classification Koppen du climat) :**

Première lettre : C : Humide; D : Continental.

Deuxième lettre minuscule : f : humide; s : été sec.

Dernière lettre : a : été très chaud; b : été chaud.

<http://www.thesustainabilitycouncil.org/resources/the-koppen-climate-classification-system/>

La sélection des quartiers reposait principalement sur la base d'une morphologie comparable ainsi que d'une bonne similarité de typologie de bâtiments. La recherche a été faite sur la base d'images satellites pour comparer les aménagements des rues et des bâtiments des différentes villes ciblées. La Figure 2.1 a), b) et c) présente la morphologie des quartiers de Lyon, Bordeaux et Montréal choisies. Ces quartiers montrent des rapports longueur/largeur variant entre 2,88 et 3,38. La Figure 2.2 montre quant à elle la typologie des bâtiments de deux rues des quartiers d'études, soit celles de Montréal et de Bordeaux.

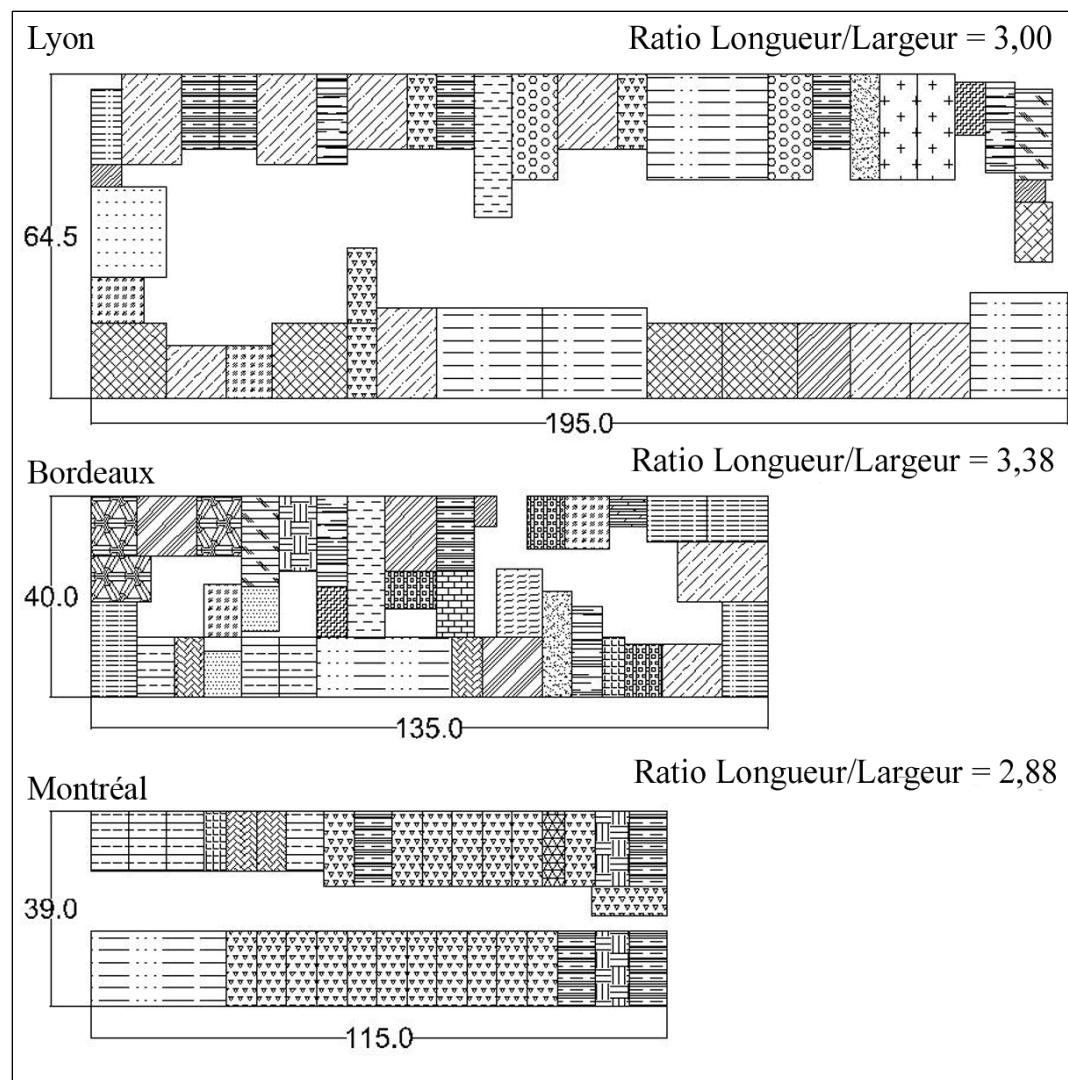


Figure 2.1 Rapport entre la longueur et la largeur des pâtés de maisons  
pour les villes de Lyon, Bordeaux et Montréal  
Adaptée de Beckers (2012)

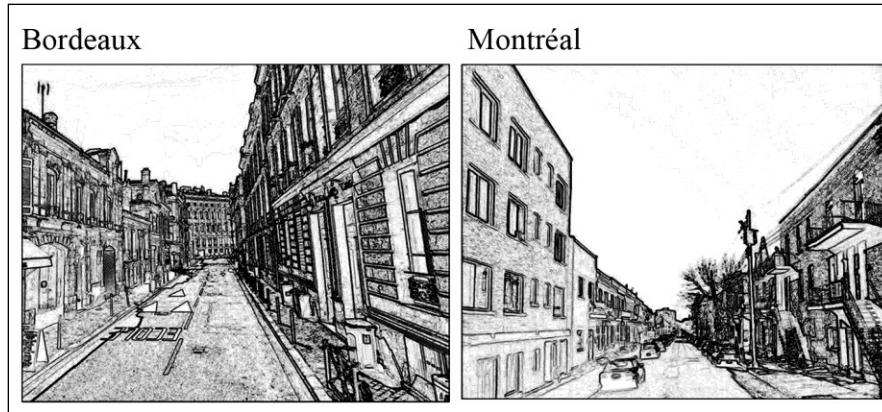


Figure 2.2 Typologie des bâtiments de rues des quartiers d'études de Bordeaux et de Montréal vue de la rue  
Adaptée de Beckers (2012)

## 2.2 Modèle géométrique du quartier

La conception du modèle morphologique (quartier test d'étude) a été principalement basée sur la considération de la longueur et largeur des rues, de l'empreinte au sol des bâtiments des quartiers de Montréal, Bordeaux et Lyon. Le modèle représentatif développé est présenté à la Figure 2.3 où un rapport longueur/largeur du bloc de 3,0 a été sélectionné.

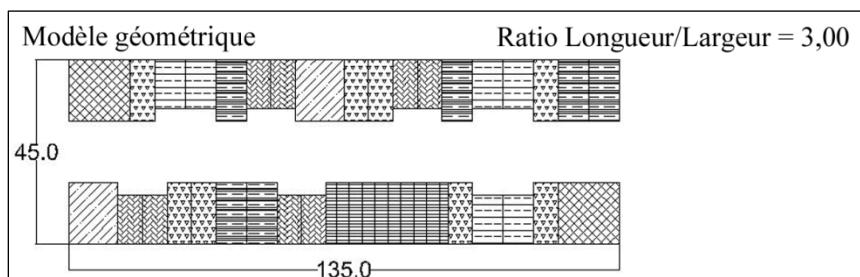


Figure 2.3 Rapport entre la longueur et la largeur des pâtés de maisons pour le modèle développé  
Adaptée de Beckers (2012)

La mise en plan 3D du quartier a été réalisée grâce à une analyse des caractéristiques des bâtiments en portant une attention particulière sur le nombre d'étages ainsi que le pourcentage de fenestration pour les quartiers des villes de Montréal, Bordeaux et Lyon. Des toitures plates ont été choisies pour le modèle aux fins d'uniformisation, mais également de

simplification. Ainsi, la Figure 2.4 montre le modèle utilisé qui contient des bâtiments de deux à quatre étages ayant une hauteur de 3 m/étage et 1,5 m de plus sur le dernier étage. La Figure 2.5 montre, quant à elle, tous les bâtiments utilisés qui s'intègrent à la morphologie du modèle.

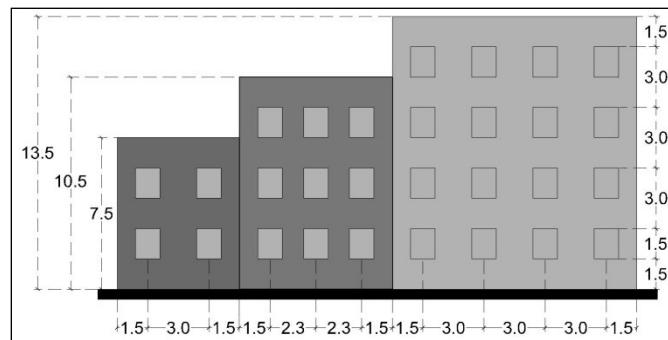


Figure 2.4 Nombre d'étages par bâtiments pour le modèle développé  
Tirée de Beckers (2012)

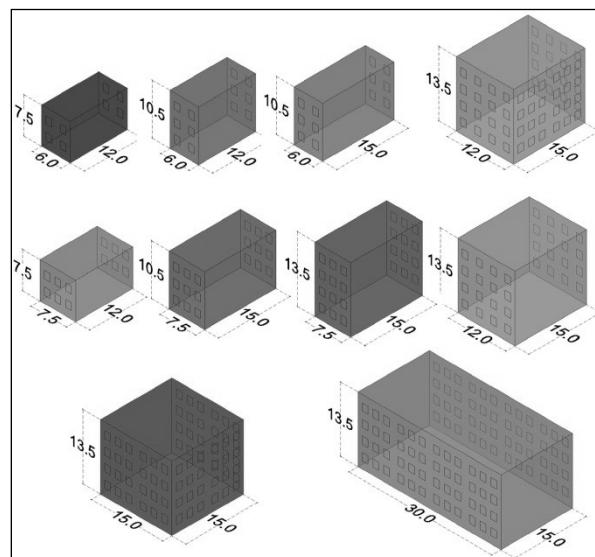


Figure 2.5 Bâtiments types du modèle  
Tirée de Beckers (2012)

Le même genre de travail que pour la morphologie a été fait pour sélectionner le pourcentage de fenestration. La Figure 2.6 montre la disposition réelle des fenêtres en fonction des bâtiments existants.

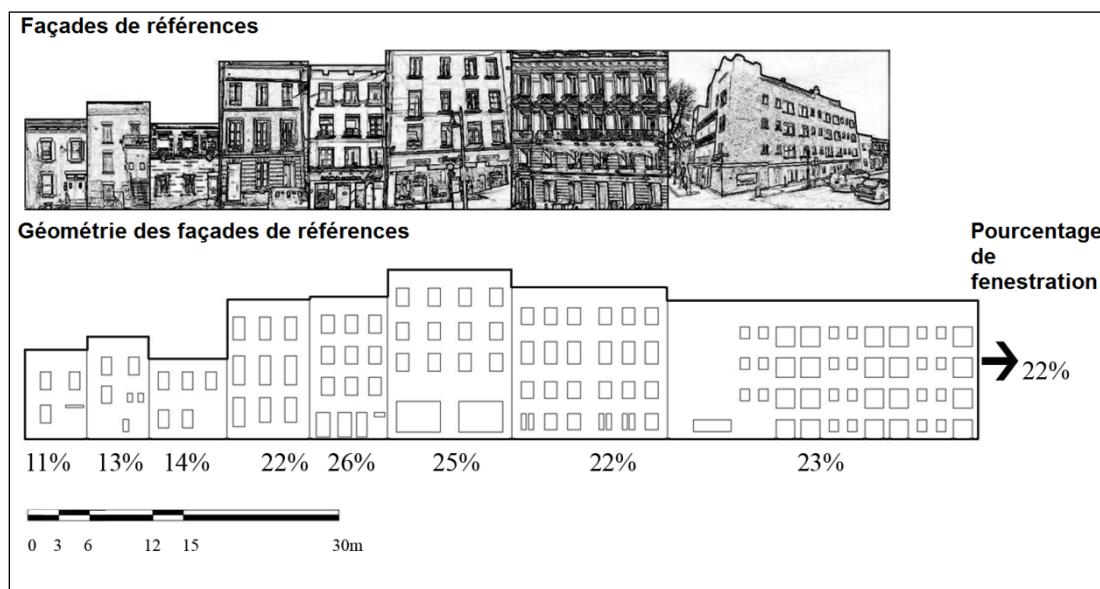


Figure 2.6 Analyse des façades originales en fonction du pourcentage de fenestration  
Adaptée de Beckers (2012)

Une distribution uniforme des fenêtres a par la suite été appliquée sur tous les murs extérieurs (sauf exception pour un mur d'extrémité d'îlot) avec des dimensions unitaires de fenêtres de 1,2 m par 1,5 m tel que présenté sur le modèle de la Figure 2.7. Le pourcentage moyen de fenestration des façades a été fixé à 20 %. Cette simplification symétrique était nécessaire afin de réduire le temps de calcul de l'irradiation solaire et obtenir des résultats dans un délai réaliste.

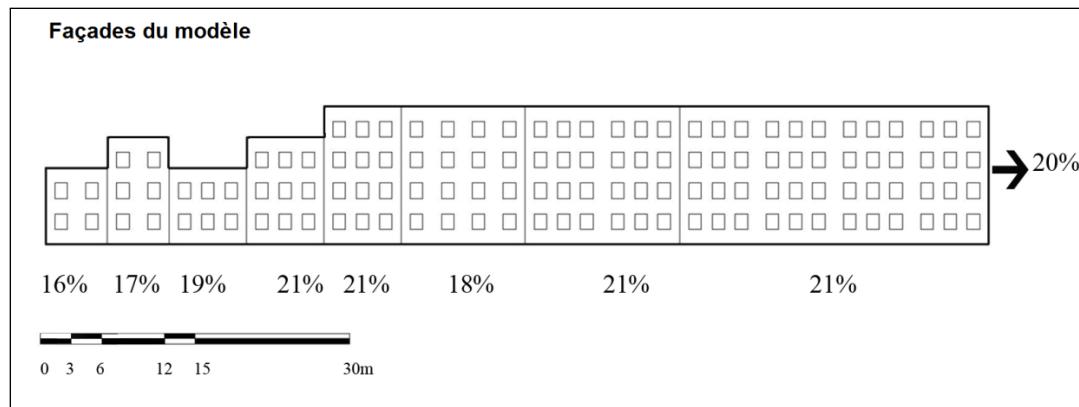


Figure 2.7 Pourcentage de fenestration du modèle  
Tirée de Beckers (2012)

Pour ce modèle, les textures des façades n'ont pas été considérées puisque ce niveau de détail n'est pas jugé important au niveau de l'influence sur les résultats recherchés dans la présente étude (qui se concentre sur l'influence du contexte urbain d'un canyon urbain sur l'irradiation solaire). Les fenêtres sont donc considérées dans le même plan que celui des murs extérieurs, c'est-à-dire sans insertion dans le mur.

Le modèle final développé se compose d'un bloc de 33 bâtiments résidentiels. La Figure 2.8 montre les caractéristiques du modèle comprenant les dimensions, le pourcentage de fenestration sur les façades, la surface habitable ainsi que le contexte urbain dans lequel le canyon se trouve. Les bâtiments autour du canyon sont pris en compte lors des différentes simulations. Le contexte urbain, qui tient compte du voisinage, a pour sa part été considéré comme uniforme. Il est représenté par des blocs rectangulaires qui suivent la hauteur moyenne des bâtiments du quartier à l'étude. Ces masques sont peu détaillés afin de réduire le temps de simulation.

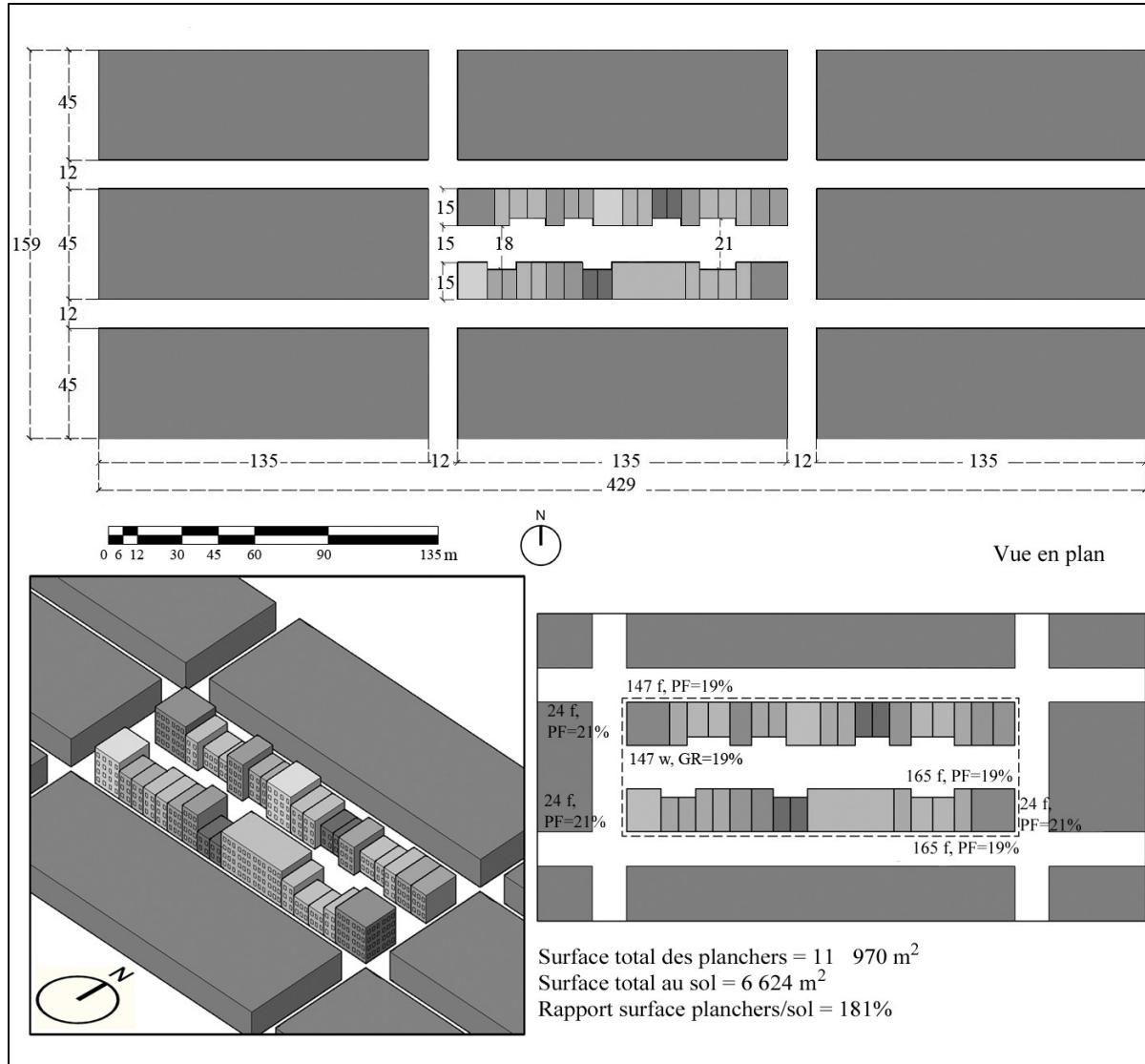


Figure 2.8 Vue en plan du quartier original et vue isométrique  
 (f pour nombre de fenêtres et PF pour pourcentage fenestration)  
 Adaptée de Beckers (2012)

### 2.3 Modification du modèle initial, scénario de densification

Deux autres modèles ont été construits pour comparer les gisements solaires suite à une densification d'un quartier. Deux scénarios ont été élaborés, un par densification à l'aide d'un étage sur tout le quartier et l'autre par l'intégration de tours. Bien que les types de densifications sont différents l'un de l'autre, ils restent similaires puisqu'ils sont du même

ordre de grandeur. Les densifications présentent la même empreinte au sol puisque les deux modèles partent du scénario initial. Les surfaces de plancher des deux cas de densification sont voisines l'une de l'autre, soit  $15\ 741\ m^2$  pour la densification par étage et  $15\ 795\ m^2$  pour la densification par tours. Avec une même surface au sol, un ratio de la surface des planchers sur la surface au sol de 238 % est obtenu pour les deux cas.

### 2.3.1 Densification du modèle initial par l'ajout d'un étage (densification uniforme)

Le modèle de densification par étage est construit par l'ajout d'un étage supplémentaire sur tous les bâtiments du modèle original. C'est donc une densification à distribution uniforme. Il faut noter que le voisinage augmente également d'un étage pour respecter le concept de la densification. La Figure 2.9 montre le modèle du quartier.

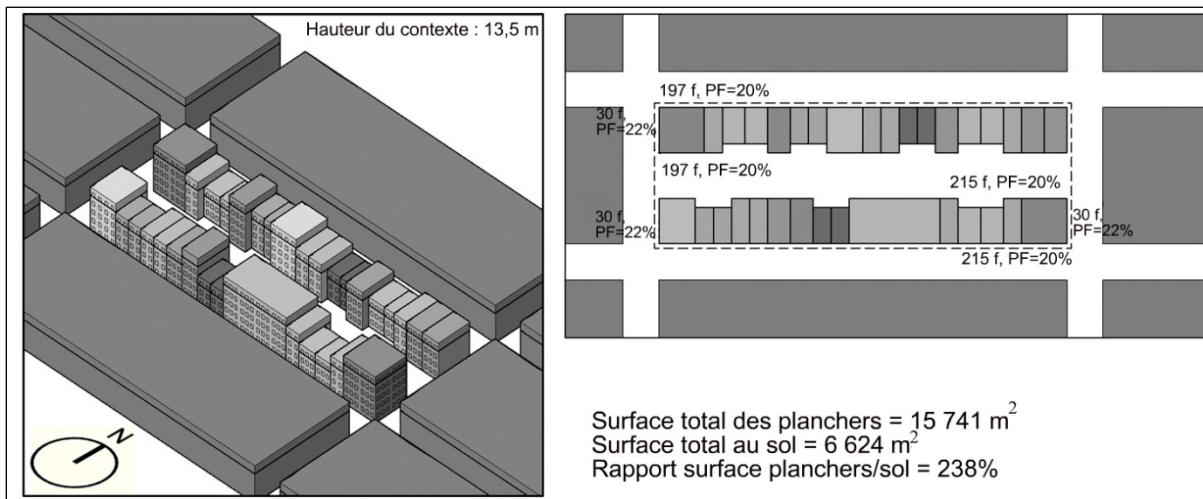


Figure 2.9 Quartier densifié par l'ajout uniforme d'un étage  
 (f pour nombre de fenêtres et PF pour pourcentage fenestration)

Adaptée de Beckers (2012)

### 2.4 Densification du modèle initial par l'ajout de tours (densification localisée)

La densification par tours consiste à implanter des bâtiments en hauteur dans le modèle original. Dans ce scénario, deux tours sont ajoutés dans le canyon urbain ainsi que quatre

tour dans le contexte urbain, le voisinage. La Figure 2.10 montre l'implantation des différentes tours au quartier.

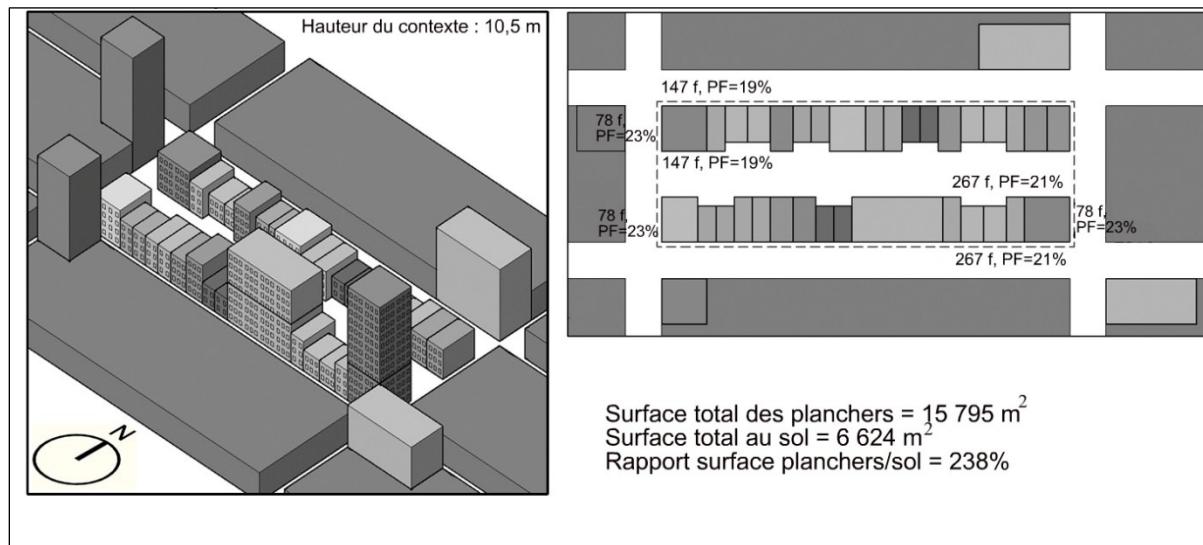


Figure 2.10 Quartier densifié par l'ajout de tours  
 Adaptée de Beckers (2012)

## 2.5 Simplification des modèles par des prismes rectangulaires pour validation des calculs et niveau de détails

Deux quartiers inspirés du modèle original et du modèle densifié uniformément sont fabriqués. Ces quartiers sont créés avec une simplification à l'aide de deux prismes rectangulaires dans le but de valider si la simplification du niveau de détail peut donner des résultats avec une erreur acceptable. Deux prismes pondérés devront montrer un rayonnement solaire comportant les mêmes tendances que les quartiers d'origines si le quartier tourne de 180° à comparer à la position initiale à cause de la symétrie de la géométrie.

## 2.6 Trajet solaire et modèles solaires

La méthode choisit pour estimer le trajet solaire s'appuie principalement sur les travaux de Duffie et Beckman (2006). Ces calculs permettront de localiser la position du soleil par rapport à une position sur la terre à tout moment de l'année et ainsi calculer l'irradiation solaire sur une surface, soit l'énergie en  $\text{W/m}^2$  qu'une surface recevra du soleil. Le soleil est constitué d'une masse de gaz chaud ayant un diamètre de  $1,39 \times 10^9 \text{ m}$  et est situé à environ  $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$  de la terre. Il est convenu que le soleil émet une puissance de  $1367 \text{ W/m}^2$  sur une surface perpendiculaire avant l'entrée dans l'atmosphère (constante solaire  $G_{sc}$ ).

Pour être en mesure de calculer l'irradiation solaire sur une surface, il est nécessaire de considérer le trajet solaire. En effet, tout au long de l'année, le soleil est situé à différentes positions dans le ciel, ce qui fait en sorte que les journées sont plus courtes en hiver et plus longues en été. La Figure 2.11 montre tous les angles importants à considérer pour être en mesure de calculer l'énergie solaire reçue sur une surface. Le Tableau 2.2 résume les différentes variables (angles) présentées à la Figure 2.11 et aux sections qui suivent.

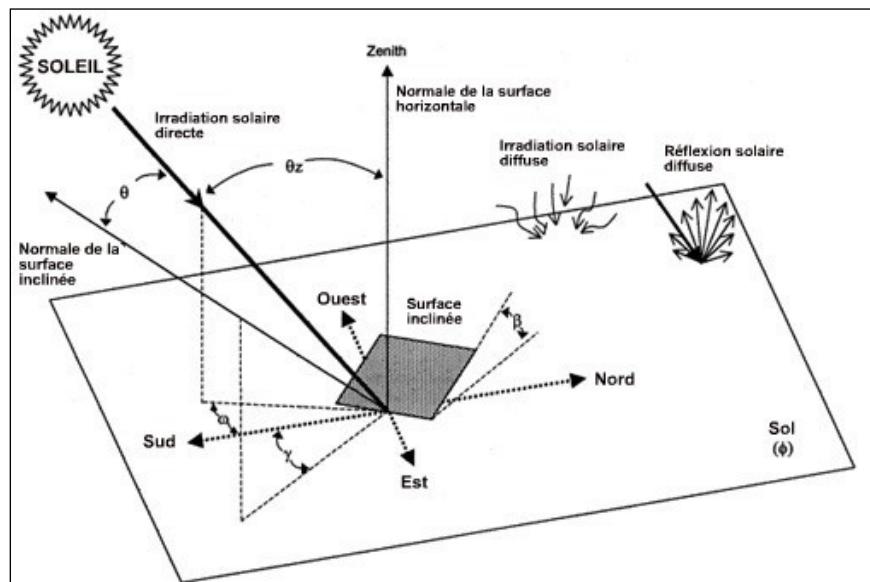


Figure 2.11 Trajet solaire avec tous les angles  
Adapté de Molina, Grima et al. (1999)

Tableau 2.2 Liste des angles et leur définition par rapport à une surface

Angle	Définition
$\phi$ , Latitude	Latitude du lieu à l'étude, nord positif et sud négatif de -90 à 90°
$\delta$ , Déclinaison solaire	Angle solaire à midi
$\beta$ , Inclinaison	Inclinaison de la surface à l'étude par rapport à l'horizontale
$\gamma$ , Angle de surface azimut	Angle par rapport au sud de la projection horizontale du tracé du soleil, 0° étant le sud et $\gamma$ est entre -180 et 180° (vers l'ouest positif, vers l'est négatif)
$\omega$ , Angle solaire	Déplacement angulaire du soleil à l'est ou à l'ouest du méridien local à cause de la rotation de la terre sur son axe qui est de 15° par heure. (valeur négative le matin et positive en après-midi)
$\theta$ , Angle d'incidence	Angle entre le faisceau du rayonnement direct et la normal de la surface à l'étude
$\theta_z$ , Angle Zénith	Angle par rapport au zénith et le faisceau direct du soleil
$\alpha_s$ , Angle solaire de l'altitude	Angle par rapport à l'horizontale et le faisceau direct du soleil
$\gamma_s$ , Angle solaire de l'Azimut	Angle par rapport au sud de la projection au sol du faisceau direct (Ouest positif et est négatif)

À partir de ces angles, plusieurs équations sont utilisées pour positionner le soleil à toute heure d'une journée dans l'année. Dans le cas du présent travail, ce calcul est important puisque les surfaces à l'étude sont des fenêtres verticales.

### 2.6.1 Direction du rayonnement direct par rapport à une surface au sol

Pour positionner le soleil, il faut faire une distinction entre l'heure légale et le temps solaire. Selon un point étudié sur la Terre, le soleil n'est pas toujours situé au Zénith à midi, tout dépendant du lieu à l'étude. L'équation (2.1) permet d'obtenir le temps solaire par rapport à une longitude locale et la longitude standard par rapport au méridien de Greenwich. Il est établi que le soleil prend 4 minutes pour parcourir une longitude.

$$\text{Temps solaire} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E + \text{Temps standard} \quad (2.1)$$

où :

$L_{st}$  : longitude standard ( $^{\circ}$ )

$L_{loc}$  : longitude locale à l'étude ( $^{\circ}$ )

$E$  : équation du temps qui établit une correction pour chaque jour de l'année (min)

La longitude standard  $L_{st}$  est obtenue par l'équation (2.2) en considérant le fuseau horaire à l'étude.

$$L_{st} = 4 \cdot \text{fuseau horaire} \quad (2.2)$$

L'équation du temps est donnée par l'équation (2.3)

$$E = 229.2(0,000075 + 0,001868 \cdot \cos(B) - 0,032077 \cdot \sin(B) - 0,014615 \cdot \cos(2B) - 0,04089 \cdot \sin(2B)) \quad (2.3)$$

où :

$B$  : fonction du jour de l'année et donnée par l'équation (2.4)

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.4)$$

où :

$n$  : journée de l'année (n<sup>e</sup> jour)

En connaissant le temps solaire, il est possible de modéliser le trajet du soleil à toute période de l'année en calculant les angles donnés au Tableau 2.2. L'angle d'incidence  $\theta_z$  du rayonnement direct est donné par l'équation (2.5).

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.5)$$

où :

$\delta$  : déclinaison solaire ( $^{\circ}$ ) donnée par l'équation (2.6)

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2.6)$$

La déclinaison solaire est due au fait que la distance entre le soleil et la terre varie continuellement au cours d'une année. L'équation du temps permet ainsi de corriger l'heure solaire. L'angle solaire se calcule selon l'équation (2.7).

$$\omega = (\text{heure solaire} - 12) \cdot 15 \quad (2.7)$$

Un angle négatif correspond au matin et positif l'après-midi. La valeur de 15 de l'équation (1.7) tient compte du fait que le soleil prend une heure pour traverser 15° en longitude.

L'angle du lever de soleil  $\omega_s$  peut être calculé selon l'équation (2.8). La valeur obtenue permet ensuite de calculer le nombre d'heures d'ensoleillement  $N$  pour une journée à partir de l'équation (2.9).

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.8)$$

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.9)$$

Pour trouver l'angle solaire de l'Azimut  $\gamma_s$ , il faut utiliser l'équation (2.10)

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (2.10)$$

## 2.6.2 Énergie solaire disponible

Il existe deux types d'énergies disponibles dans le ciel, l'irradiation directe et l'irradiation diffuse. La première se ramène au faisceau de rayonnement direct du soleil tandis que la deuxième tient compte de quatre autres composantes : l'énergie contenue dans le ciel, la circumsolar, la réflexion au sol ainsi que l'énergie à l'horizon. La Figure 2.12 montre ces composantes (Thevenard et Haddad, 2006). Noter que la composante issue de l'horizon est montrée à la Figure 1.2 .

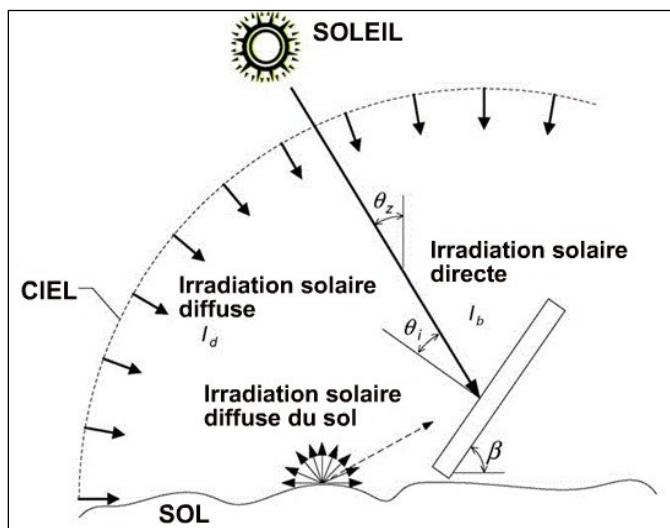


Figure 2.12 Composante de l'irradiation solaire : directe et diffuse  
(ciel, contour solaire, réflexion au sol)  
Adaptée de Thevenard et Haddad (2006)

## 2.6.3 Irradiation directe

L'irradiation solaire directe est simple à modéliser. Il suffit de valider si le point à l'étude voit ou non le soleil directement à l'aide des informations géométriques de la section 2.6. De plus, il faut rajouter une deuxième composante qui tient compte de l'éclat du soleil selon l'équation (2.11).

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.11)$$

où :

$R_b$  : éclat solaire

L'irradiation se calcule donc par un point en  $\text{W/m}^2$  de surface à l'aide de l'équation (2.12).

$$I_{tb} = I_b R_b \cdot \text{visibilité} \quad (2.12)$$

où :

$I_b$  : l'irradiation directe ( $\text{kWh}$ ) à l'aide de fichier météo

visibilité : correspond à 0 ou 1, dépendant si le point voit directement le soleil ou non

#### 2.6.4 Irradiation diffuse

Dans ce travail, le deuxième modèle (Perez et al., 1987) est utilisé. Le modèle de Perez est un modèle de ciel anisotrope (l'énergie n'est pas distribuée de façon uniforme dans le ciel). L'équation (2.13) montre comment est calculé le total de l'énergie diffuse selon ces trois paramètres, le ciel, le circumsolar et l'horizon.

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad (2.13)$$

Dans le cas présent, la composante de l'horizon ne sera pas utilisée puisque dans un contexte urbain il est rare d'avoir une vue parfaite sur l'horizon. L'équation devient donc la (2.14).

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} \right] \quad (2.14)$$

où :

$F_1$  : coefficient d'éclat du ciel

$I_d$  : Irradiation diffuse à l'aide de fichier météo ( $\text{kWh}$ )

Autres composantes : dépendent de la visibilité, donc des angles géométriques

Les équations (2.15) (2.16) montrent comment obtenir les paramètres  $a$  et  $b$ .

$$a = \max(0, \cos \theta) \quad (2.15)$$

$$b = \max(\cos 85, \cos \theta_z) \quad (2.16)$$

Pour ce qui est du paramètre  $\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)$ , le facteur de vue du ciel (*SkyView Factor*), il est défini par la portion visible du ciel à un point étudié.

Le concept d'un ciel anisotrope repose majoritairement sur les conditions climatiques qui ne sont pas réparties uniformément dans le ciel. C'est pourquoi Perez et son équipe se sont interrogés sur le problème. Ils ont donc trouvé que la luminosité par rapport à une surface au sol varie sur toute la surface du ciel. C'est par des facteurs de luminosité au Tableau 2.3, calculés statistiquement par Perez (1987), qu'il est possible d'établir la relation anisotrope. C'est à l'aide de ces facteurs qu'il est possible de calculer le coefficient d'éclat  $F_I$  selon l'équation (2.17) utilisée dans l'équation (2.14).

$$F_I = \max\left[0, \left(f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{13}\right)\right] \quad (2.17)$$

où :

$\Delta$  : paramètre d'éclat donné par l'équation (2.18)

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad (2.18)$$

où :

$m$  : masse de l'air donné par l'équation (2.19)

$I_{on}$  : irradiation extraterrestre donnée par l'équation (2.20)

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.19)$$

$$I_{on} = 1367 \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.20)$$

Tableau 2.3 Coefficients de luminosité du modèle de ciel de Perez

Valeur de $\varepsilon$	$f11$	$f12$	$f13$	$f21$	$f22$	$f23$
1,000-1,065	-0,018	0,705	-0,071	0,058	0,102	-0,026
1,065-1,230	0,191	0,645	-0,171	0,012	0,009	-0,027
1,230-1,500	0,440	0,378	-0,256	0,087	-0,104	-0,25
1,500-1,950	0,756	-0,121	-0,346	0,179	-0,321	-0,008
1,950-2,800	0,996	-0,645	-0,405	0,260	-0,590	-0,017
2,800-4,500	1,098	-1,290	-0,393	0,269	-0,832	0,075
4,500-6,200	0,973	-1,135	-0,378	0,124	-0,258	0,149
$\geq 6,200$	0,689	-0,412	0,273	0,199	-1,675	0,237

L'équation (2.21) montre comment obtenir le coefficient de clarté  $\varepsilon$  sur une base horaire.

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_b}{I_d} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z''}{1 + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z''} \quad (2.21)$$

## 2.6.5 Application du trajet solaire et du modèle de Perez sur un quartier

Les principes de trajet solaire et de calcul d'irradiation solaire sont utilisés sur un quartier. Dans ce travail, les fenêtres sont à l'étude dans le but de quantifier les apports solaires passifs sur un groupe de bâtiments. Chaque fenêtre d'un quartier est évaluée point par point. Par mesure de simplification, le centre de la fenêtre est le point d'évaluation. Les calculs sont effectués sur une base horaire. La position du soleil est calculée par rapport à la fenêtre à l'étude toutes les heures, ce qui permet d'obtenir une évaluation horaire de l'énergie irradiée sur le vitrage. La représentation graphique des modèles urbains sont construits à l'aide du programme dans *matlab version: 7.13 R2011b*. Le logiciel fait une sommation sur toutes les fenêtres chaque heure comme le montre l'équation (2.22).

$$\sum_{z=1}^{x=z} \sum_0^{8760} I_b + I_{d,T} \quad (2.22)$$

où :

$x$  : fenêtre à l'étude

$z$  : nombre de fenêtres total à l'étude

$I_b$  : irradiation directe ( $\text{W/m}^2$ )

$I_{d,T}$  : irradiation diffuse (ciel et circumsolaire) ( $\text{W/m}^2$ )

### 2.6.6 Application du facteur de vue du ciel (*Sky View Factor*) et de la visibilité

Pour le modèle urbain, certaines corrections doivent être apportées par rapport à l'équation suggérée par Duffie et Beckman (2006). En effet, les équations utilisées ont été développées pour des calculs de panneaux solaires en milieu non urbain. Il n'y a donc aucun obstacle pour obstruer le passage du soleil. Pour cette raison, il est nécessaire d'intégrer à ces équations les principes de visibilité du soleil pour l'irradiation directe et l'irradiation diffuse causée par le circumsolaire. De plus, pour l'irradiation diffuse du ciel, il faut appliquer le facteur de vue du ciel, (*Sky View Factor* ou SVF). L'équation (2.14) devient donc l'équation (2.23) :

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - F_1) \cdot SVF + \left( F_1 \frac{a}{b} \right) \cdot \text{visibilité} \right] \quad (2.23)$$

Le concept du SVF est important pour la partie de l'irradiation solaire diffuse provenant du ciel. La Figure 2.13 expose la problématique du SVF. Chen et Ng (2011) rappellent dans leurs travaux la définition du SVF. Dans le cas présent, le point  $P_o$  constituerait le centre d'une fenêtre dans le milieu urbain et  $P_i$  un bâtiment devant cette fenêtre (Figure 2.13). Sur cette Figure 2.13 la structure  $P_i$  empêche de voir une portion du ciel. Il n'est donc pas possible de recevoir toute l'irradiation diffuse du ciel. Le SVF n'a pas d'unité et il s'agit d'un rapport entre 0 et 1. Dans ce travail le calcul du SVF a été effectué à l'aide du logiciel Heliodon2.

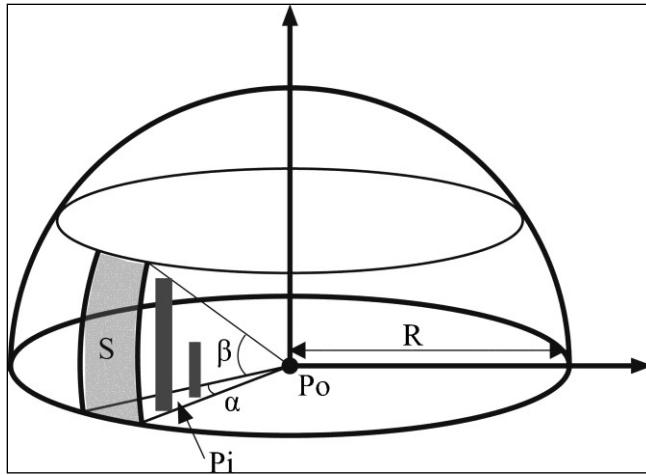


Figure 2.13 Explication du SVF factor  
Tirée de Chen et Ng (2011)

L'élément visibilité est pour sa part important pour le rayonnement direct, mais également l'irradiation solaire diffuse qui comprend le contour de soleil. Pour la visibilité, il s'agit de déterminer si chaque fenêtre voit ou pas le soleil à toute heure de l'année. Une matrice de visibilité est alors créée en effectuant le trajet solaire en milieu urbain.

Dans le modèle de Perez, le contour solaire est simplifié par un point. Il est donc important d'intégrer le principe de visibilité pour le contour solaire.

#### 2.6.7 Limitation de la méthode du calcul de l'irradiation solaire

La méthode utilisée ne tient pas compte de la réflexion solaire émise par l'environnement, seulement l'énergie provenant du soleil direct et diffus tenu en compte. Le logiciel Heliodon2 étant programmé à part entière, il n'est pas envisageable dans le cadre du présent travail de recherche d'effectuer un calcul complet des éléments de réflexion solaire, c'est-à-dire de prendre en compte la radiosité. Cependant, cette simplification permet de créer facilement n'importe quel type de géométrie et de positionner les éléments à étudier n'importe où dans le quartier.

L'effet d'ombrage que peut occasionner les arbres a été négligé, il est logique de négliger cet effet puisque l'ensemble des simulations est effectué en période hivernale, saison où il n'y a plus de feuillage dans les arbres

L'irradiation solaire est calculée en un seul point situé au centre des fenêtres. Il est estimé que l'irradiation reçue à ce point est identique sur l'ensemble de la fenêtre, ce qui constitue certainement une approximation acceptable dans le contexte du milieu urbain. De plus, la composante de l'énergie solaire diffuse de l'horizon n'est pas prise en compte. Cela apparaît comme raisonnable puisqu'il est rare en milieu urbain d'avoir une vue directe sur l'horizon.

Des fichiers météo téléchargés sur le site internet de l'agence américaine de l'énergie (US Department of Energy, 2011) sont utilisés pour obtenir les données horaires moyennes de l'irradiation solaire directe et diffuse pour les cinq villes à l'étude. Ces fichiers sont standardisés selon la WMO (*World Meteorological Organization*). Selon les fichiers disponibles, voici ceux qui sont utilisés. Pour San Francisco le fichier TMY3 (*Typical Meterological year*) est utilisé; il contient une base de données de 1991 à 2005. Pour Montréal le fichier WYEC2 (*Weather Year for Energy Calculations 2*) qui est utilisé, sa base de données est de 1953-1995. Pour Bordeaux, Lyon et Stockholm le fichier IWEC (*International Weather for Energy Calculations*) ayant une base de données horaire de 18 ans qui est utilisé. L'irradiation solaire est calculée toutes les heures, et ce, pour toute la période de chauffe de chacune des villes.

## 2.7 Besoins énergétiques en chauffage

La méthode de l'*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) a été utilisée pour calculer les besoins énergétiques des deux blocs à l'étude du quartier.

La méthode de calcul des besoins énergétiques de l'ASHRAE Chapitre 17 édition 2009 pour les bâtiments résidentiels constitue un moyen d'estimation pour donner un ordre de grandeur

des besoins énergétique en chauffage. Cette méthode est une simplification de la méthode résidentielle selon un bilan thermique détaillé (*Residential Heat Balance* ou RHB) et repose sur des facteurs de charge (*Residential Factor Load* ou RFL). Les degrés-jours de chauffage ainsi que les coefficients de transfert thermique des matériaux sont utilisés pour obtenir un bilan annuel. Le Chapitre 14 de l'ASHRAE (2009) fournit les degrés-jours de chauffage requis pour une température d'équilibre située 18,3°C (65°F) pour toutes les villes à l'étude. L'équation (2.24) montre le lien entre les degrés-jours et les coefficients thermiques du bâtiment pour obtenir les besoins.

$$B_{chauffage} = (K_{tot} \cdot DJ) - I_{sol} \quad (2.24)$$

où :

$B_{chauffage}$  : besoins en chauffage du bâtiment (kWh)

$K_{tot}$  : somme des déperditions de tous les éléments du bâtiment

$DJ$  : degrés-jours

$I_{sol}$  : irradiation solaire (kWh)

Les déperditions sont données par les équations suivantes :

$$K_{tot} = DP_{mur} + DP_{toit} + DP_{fenêtres} + DP_{sol} + DP_{infiltration} \quad (2.25)$$

$$DP_{mur} = U_{mur} \cdot A_{mur} \quad (2.26)$$

$$DP_{toit} = U_{toit} \cdot A_{toit} \quad (2.27)$$

$$DP_{fenêtres} = U_{fenêtres} \cdot A_{fenêtres} \quad (2.28)$$

$$DP_{infiltration} = C_s \dot{V} \quad (2.29)$$

$$DP_{infiltration} = 1,2 \dot{V}$$

où :

$U$  : transmission thermique du matériel à l'étude (W/m<sup>2</sup>)

$A$  : surface du matériel étudié (m<sup>2</sup>)

$C_s$  : facteur de chaleur sensible de l'air

$V$  : débit d'air d'infiltration (L/s)

$\Delta T$  : donné par l'équation (2.30)

$$\dot{V} = \frac{A_{CH} \cdot V}{3600} \quad (2.30)$$

où :

$A_{CH}$  : changement d'air du bâtiment (ratio/heures)

$V$  : volume du bâtiment ( $\text{m}^3$ )

Dans le cas de cette étude, il est difficile d'évaluer le changement d'air requis pour un bloc complet d'anciens bâtiments. L'ASHRAE (2009) propose dans ce cas une équation simplifiée (2.31) pour trouver le débit d'infiltration.

$$\dot{V} = A_L \cdot IDF \quad (2.31)$$

où :

$A_L$  : aire effective d'infiltration du bâtiment (surface extérieure du bâtiment exposé à l'air ajusté par un facteur)

$IDF$  : facteur de force d'infiltration sous condition hivernale

Ce facteur  $IDF$  est donné par le Tableau 5 du Chapitre 17 de l'ASHRAE et tient compte de la température de conception de chauffage ainsi que de la hauteur du bâtiment. Ainsi, plus le bâtiment est élevé et plus l'écart entre la température intérieure et extérieure est grand, plus le facteur  $IDF$  sera important. Chaque bloc de bâtiment est analysé en fonction de sa hauteur et de la variation de l'écart de température. Les journées plus froides ont une plus grande force d'infiltration que les journées les plus chaudes. La température intérieure des habitations est fixée à  $20^\circ\text{C}$  et ne varie pas. L'écart entre la température extérieure et la température intérieure doit être calculé de manière horaire pour les cinq villes à l'aide d'un fichier météo, puisqu'il n'est pas donné par les degrés-jours.

L'aire effective d'infiltration  $A_L$  est ajustée par le type de construction. Ainsi, l'équation (2.32) montre un facteur qui augmente l'aire d'infiltration si le bâtiment n'est pas efficace contre l'infiltration ou la diminue si le bâtiment est performant.

$$A_L = A_{es} A_{ul} \quad (2.32)$$

où :

$A_{es}$  : surface totale exposée à l'air extérieur ( $\text{m}^2$ )

$A_{ul}$  : facteur dépendant de la qualité de construction des bâtiments (allant de 10,4 pour les maisons datant du début 1900 sans modification et à 0,7 pour les nouvelles maisons performantes) ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )

Il faut noter que les ponts thermiques sont compris dans les coefficients  $U_{mur}$  et  $U_{toit}$ .

Les degrés-jours sont donnés par l'équation (2.33) :

$$DJ = (T_{equi} - T_{ext}) \cdot N \quad (2.33)$$

où :

$T_{equi}$  : température d'équilibre

$N$  : nombre d'heures dans l'année où la température extérieure est plus petite que la température d'équilibre

Dans le cas du présent modèle, la température d'équilibre  $T_{equi}$  sera considérée comme équivalente à 18,3°C comme l'AHSRAE (2009) le spécifie. La température d'équilibre correspond à la température extérieure maximum avant que des besoins en chauffage soient requis. Lorsque la température extérieure étudiée est en dessous de la température d'équilibre, cela signifie que les apports internes ne sont plus suffisants pour combler les pertes thermiques au travers du bâtiment. L'équation (2.34) à (2.36) suivante explique le concept d'équilibre :

$$Q_{gains} = Q_{pertes} \quad (2.34)$$

$$Q_{gains} = U_{bat}A(T_{int} - T_{équi}) \quad (2.35)$$

$$T_{équi} = T_{bat}A - \frac{Q_{gains \, internes}}{U_{bat}A} \quad (2.36)$$

où :

$Q_{gain}$  : apports internes (kWh)

$Q_{gain}$  : pertes thermique au travers le bâtiment (kWh)

$T_{int}$  : température à l'intérieur du bâtiment (°C)

### 2.7.1 Exclusions de la méthode de la demande énergétique en chauffage

La mitoyenneté entre les bâtiments n'est pas prise en compte dans la méthode suggérée par l'ASHRAE (2009) puisqu'elle s'applique surtout à la modélisation énergétique d'une maison unifamiliale. Une prise en compte de la mitoyenneté s'avèreraient trop complexe pour les résultats souhaités visant à trouver un ordre de grandeur du poids du chauffage solaire passif dans un quartier existant.

Par ailleurs, les concepts d'inertie des bâtiments sont également laissés de côté afin de simplifier les calculs. Le principe de la température d'équilibre du bâtiment est une simplification de l'inertie des bâtiments, mais permet tout de même d'obtenir des résultats conséquents.

Le comportement des habitants n'est pas pris en compte dans ce présent travail de recherche. Il serait trop complexe de quantifier cet élément, un nombre imposant d'hypothèses devant être posé pour chacun des ménages vivant sur les deux rues à l'étude (horaires de travail, vacances, heures d'utilisation de l'éclairage artificielle, chauffage en continu ou non, etc.). La température intérieure est fixée à 20°C selon les recommandations de l'ASHRAE (2009) pour la période hivernale.



## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS

#### 3.1 Chronologie des simulations

Les simulations sont effectuées en plusieurs volets afin de déterminer l'irradiation solaire émise sur la fenestration des bâtiments. Chacun des quartiers créés est étudié selon plusieurs orientations différentes. Ainsi, le quartier est orienté franc sud au début de la séquence de simulation pour ensuite subir une rotation de 180° afin de déterminer l'orientation la plus avantageuse au niveau de l'irradiation solaire pour la fenestration pendant une période de chauffe. Les rotations sont effectuées selon un pas angulaire de 10° antihoraire, tel qu'illustré à la Figure 3.1. Voici l'ordre des simulations réalisées :

1. scénario original;
2. scénario par densification uniforme (étalement) par ajout d'un étage sur le quartier original;
3. scénario par densification par ajout de tours dans le quartier original, volume équivalent au scénario numéro 2;
4. scénario original avec géométrie simplifiée par des prismes;
5. scénario par densification uniforme avec géométrie simplifiée par des prismes;
6. scénario par densification par ajout de deux étages sur le quartier original;
7. scénario par densification par ajout de trois étages sur le quartier original.

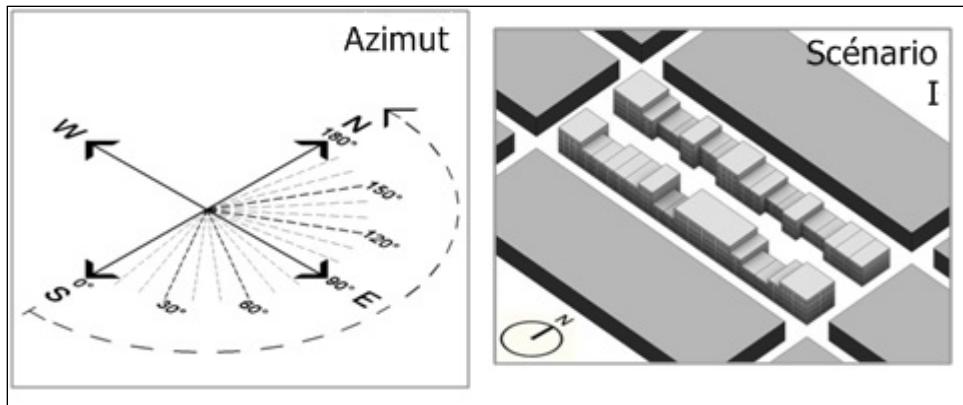


Figure 3.1 Sens des rotations du quartier à l'étude

### 3.2 Paramètres des simulations et précisions des simplifications

Des versions simplifiées des quartiers originaux et d'étalement ont été créées dans le but de valider si le comportement au niveau de l'énergie solaire disponible demeurait semblable malgré une simplification. La simplification consiste à la création de deux prismes rectangulaires qui se rapprochent du même volume que les blocs originaux en gardant la même superficie de fenestration. Le bloc #1 correspond à celui au sud au départ de la simulation et qui se retrouvera du côté nord à la fin de la simulation.

Les simulations réalisées ont été effectuées pendant la période de chauffe des villes, selon les données Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Périodes de chauffe respectives des cinq villes à l'étude

Villes	Période de chauffe	
	Début	Fin
<b>San Francisco</b>	1 <sup>er</sup> octobre	30 avril
<b>Montréal</b>	15 octobre	15 mai
<b>Bordeaux</b>	15 octobre	15 mai
<b>Lyon</b>	15 octobre	15 mai
<b>Stockholm</b>	1 <sup>er</sup> octobre	31 mai

De plus pour des fins de compréhension et de simplification des simulations des fenêtres de 1  $m^2$  sont utilisées pour l'ensemble des simulations sauf à la section 3.6. Les premiers résultats sont calculés en fonction de l'irradiation solaire pour montrer l'impact de la géométrie et de la densification sur le bilan total de l'irradiation solaire. À la section 3.5 les résultats sont décomposés en fonction de la surface vitrée, résultat en kWh d'irradiation solaire par mètres carrés de fenêtres.

### **3.3 Irradiation totale, comparaison entre les modèles et simplification**

Cette section présente les résultats de l'irradiation solaire totale sur les quartiers original, par densification uniforme et par de densification pas ajout de tours. La section 3.3 comprend un analyse où les trois modèles sont comparés un à l'autre. (Original, densification uniforme et ajout de tours. De plus la section 3.3 analyse la simplification des quartiers original et densifié uniformément.

#### **3.3.1 Irradiation totale sur le quartier original (scénario 1)**

Le quartier original contient 712 fenêtres au total, chacune d'entre elles présentant une surface de 1  $m^2$  aux fins des simulations. La Figure 3.2 illustre l'irradiation totale reçue sur les surfaces vitrées pour le quartier dans les cinq villes à l'étude en fonction de l'orientation et pendant la période de chauffage respective de chaque ville. La Figure 3.3 illustre la différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale reçue par rapport à l'orientation initiale. Ces figures illustrent, selon la typologie du quartier, l'orientation pour maximiser l'irradiation solaire totale reçue sur le quartier.

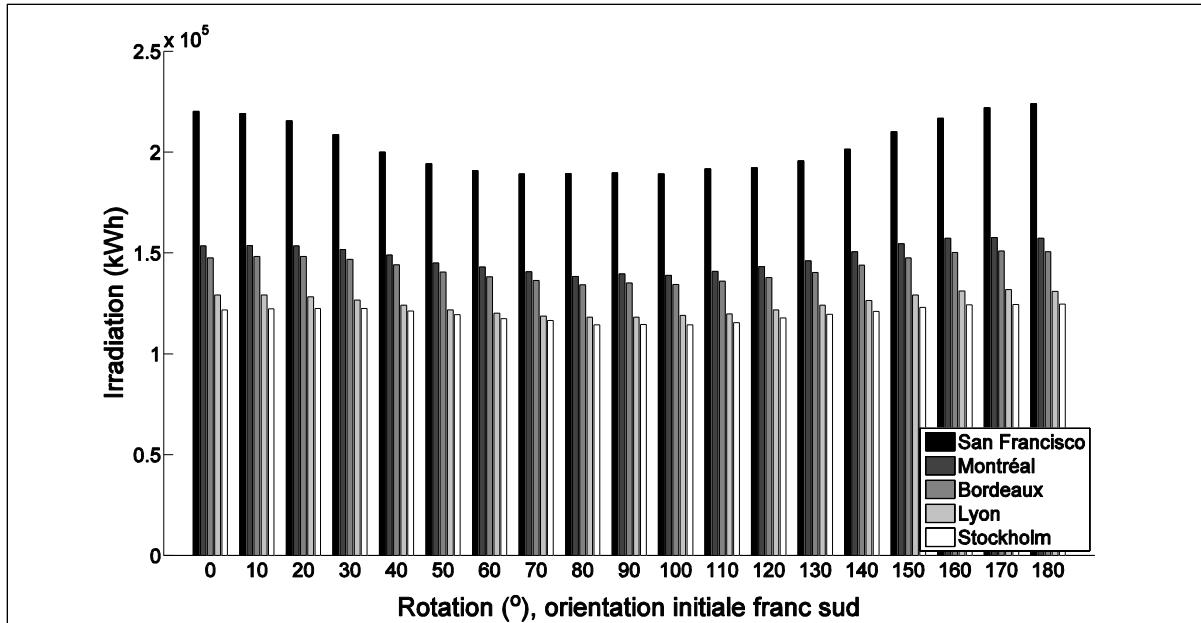


Figure 3.2 Irradiation totale sur les surfaces vitrées du quartier original pour des fenêtres de 1 m<sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

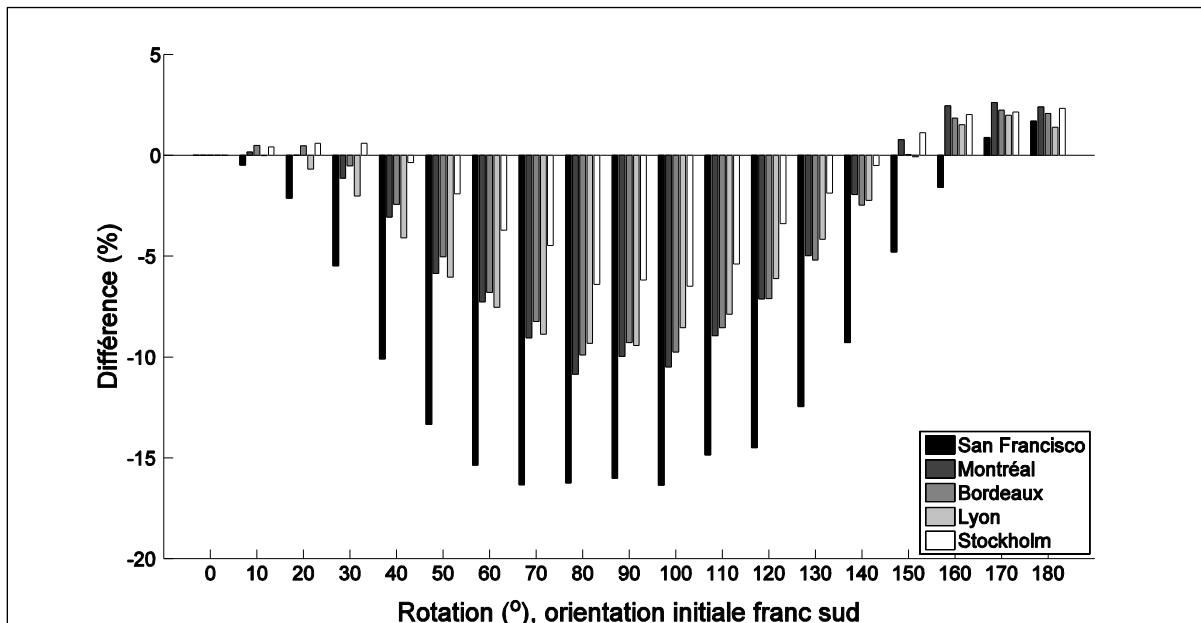


Figure 3.3 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario original, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

La Figure 3.2 montre que la ville de San Francisco qui, de par sa basse latitude, est celle qui présente le plus de rayonnement (liée à la durée d'ensoleillement) peu importe son orientation. À l'inverse, la ville de Stockholm est celle avec le moins de rayonnement à cause de sa latitude élevée qui offre une durée d'ensoleillement restreinte en hiver. En analysant les trois villes situées à la même latitude (Montréal, Bordeaux et Lyon), des résultats différents sont notés malgré le même trajet solaire. C'est la ville de Montréal qui présente le plus d'ensoleillement en hiver entre Bordeaux et Lyon. Ceci est expliqué par le climat montréalais qui est plus dégagé en hiver que celui des deux villes françaises. Pour l'ensemble des villes, la Figure 3.2 montre une diminution du rayonnement solaire au voisinage de  $90^\circ$  (entre  $80^\circ$  et  $100^\circ$ ) de rotation.

La Figure 3.3 illustre, quant à elle, les effets en pourcentage de la rotation du quartier par rapport à l'orientation initiale, elle est utile pour montrer la meilleure orientation qui, pour les cinq villes, se retrouve entre  $170^\circ$  et  $180^\circ$ . En théorie l'orientation optimale serait franc sud pour maximiser le gain solaire et le temps d'ensoleillement. Cependant à cause de la géométrie du quartier le phénomène est différent puisque les formes des bâtiments créent plus d'ombrage par effet de masque pour un angle donné. Cette figure montre également qu'une orientation à  $90^\circ$  conduit à une diminution du potentiel solaire de plus de 15 % dans le cas de la ville de San Francisco. Ceci peut être lié aux caractéristiques du trajet solaire à San Francisco. Le soleil étant bas le matin, le temps d'ensoleillement disponible pour l'ensemble de la fenestration Est est court. Le même effet ce produit du côté Ouest au coucher du soleil. Ainsi lorsque le potentiel solaire soleil est le plus élevé à midi, alors que le plus grande nombre de fenêtres disponibles sont orientées est-ouest pour l'ensoleillement, une la baisse considérable du potentiel solaire à  $90^\circ$  pour la ville de San Francisco est notée. Pour les trois villes situées à la même latitude, le potentiel diminue d'environ 10 % à  $90^\circ$ , le comportement du rayonnement suivant le même type de tendance étant donné le trajet solaire semblable. C'est la ville de Stockholm qui subit la perte la moins élevée soit environ 5 %. Le trajet solaire peu élevé (plus la latitude est élevée, moins le soleil monte haut dans le ciel) lié avec un faible rayonnement solaire explique la faible variation observée.

### 3.3.2 Irradiation totale sur quartier original densifié par étalement (scénario 3)

Le quartier d'étalement contient 934 fenêtres (surface unitaire de 1 m<sup>2</sup> aux fins de simulations) et consiste à l'ajout d'un étage supplémentaire sur le quartier original ainsi qu'au contexte du quartier qui crée des masques sur les deux blocs à l'étude. La Figure 3.4 montre l'énergie reçue sur l'ensemble des surfaces vitrées du quartier tandis que la Figure 3.5 présente la différence (en pourcentage) du potentiel solaire par rapport à l'orientation initiale du quartier.

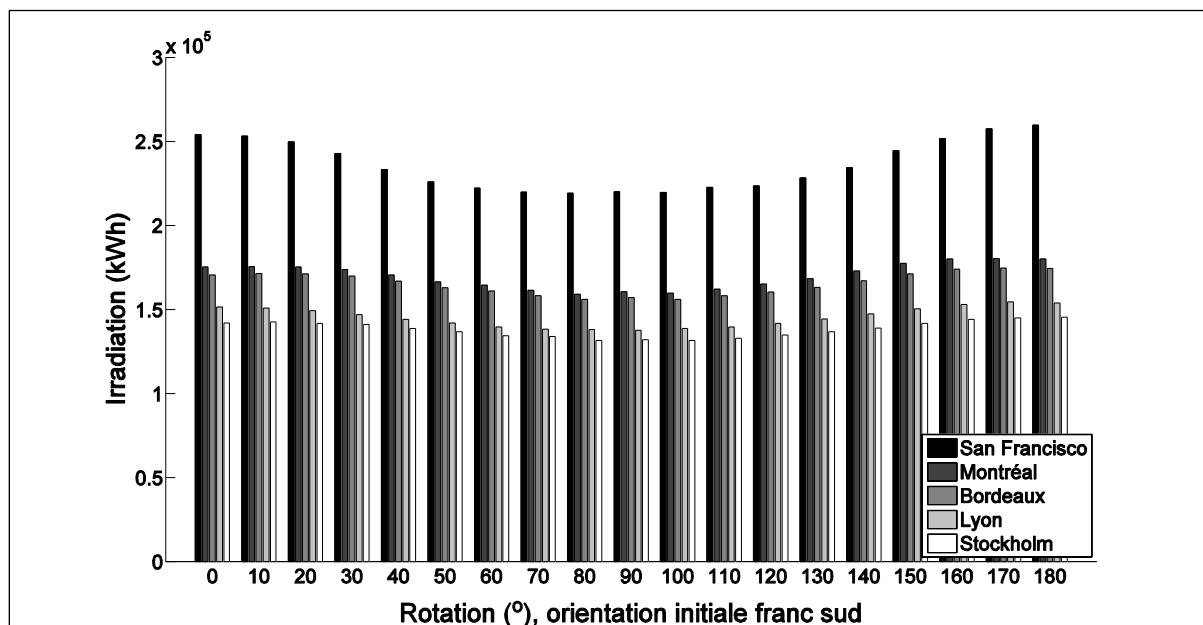


Figure 3.4 Irradiation totale sur la surface vitrée du quartier d'étalement, un étage supplémentaire, pour des fenêtres de 1 m<sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

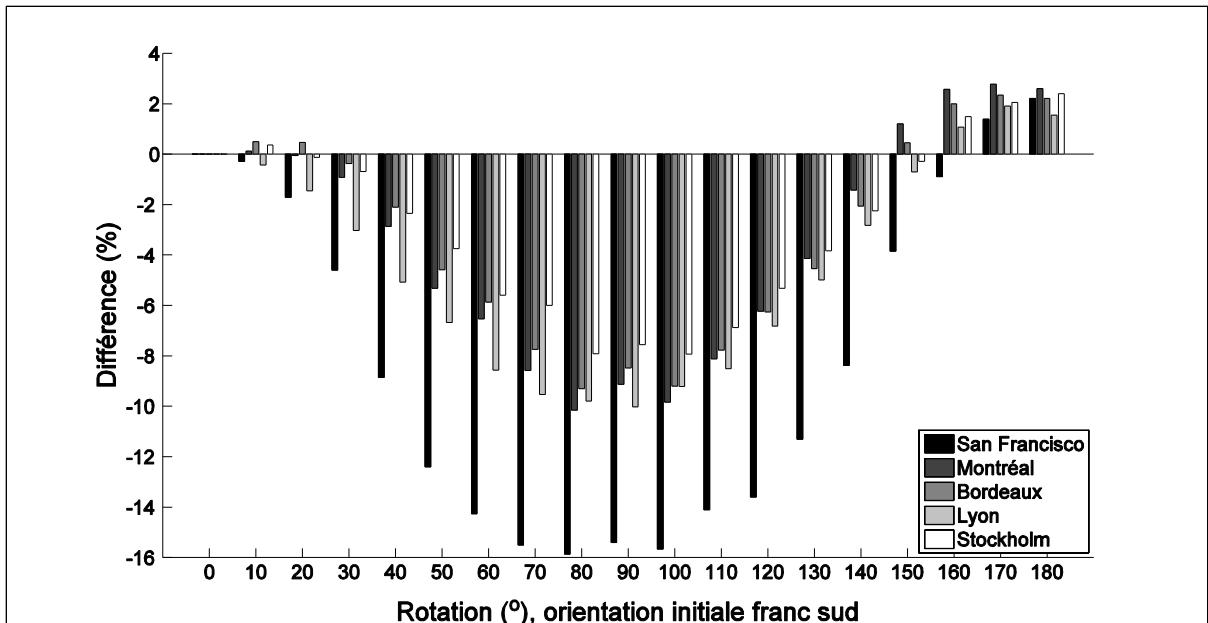


Figure 3.5 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario d'étalement, un étage supplémentaire, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

La Figure 3.4 montre la même tendance qu'à la Figure 3.2. La ville de San Francisco est toujours celle qui reçoit le plus d'énergie solaire sur les fenêtres et Stockholm est la ville la moins productive. En raison des 222 fenêtres supplémentaires, il est normal que les valeurs d'irradiation solaire soient plus élevées qu'au scénario original.

La Figure 3.5 montre l'orientation optimale du quartier. Cette illustration montre que pour la majorité des villes, l'orientation optimale se situe entre 170 et 180°. Lorsqu'un étage supplémentaire est ajouté, le quartier situé à San Francisco est celui qui varie le plus au niveau de la différence en pourcentage. Selon son orientation, le quartier peut perdre près de 16 % de son potentiel ou gagner un peu plus de 2 %. À l'inverse c'est à Stockholm qu'il y a le moins de variations, le potentiel passant d'une perte maximum d'environ 8 % jusqu'à un gain d'un peu plus de 2 %. À 180°, pour l'ensemble des villes il y a un gain d'environ 2 % par rapport à l'orientation initiale.

### 3.3.3 Irradiation totale sur le quartier original densifié par ajout de tours (scénario 3)

Le scénario avec l'ajout de tours contient 970 fenêtres à l'étude, soit une valeur assez comparable à la densification par étalement (934 fenêtres). Le contexte de densification est différent du scénario par étalement, mais reste avec un nombre semblable de fenêtres malgré l'ajout de tours de 10 à 15 étages dans les édifices à l'étude et dans le contexte urbain. La Figure 3.6 montre l'irradiation reçue sur l'ensemble des surfaces vitrées du quartier (chaque fenêtre présente 1 m<sup>2</sup> de surface) pendant la période de chauffe de chacune des villes à l'étude.

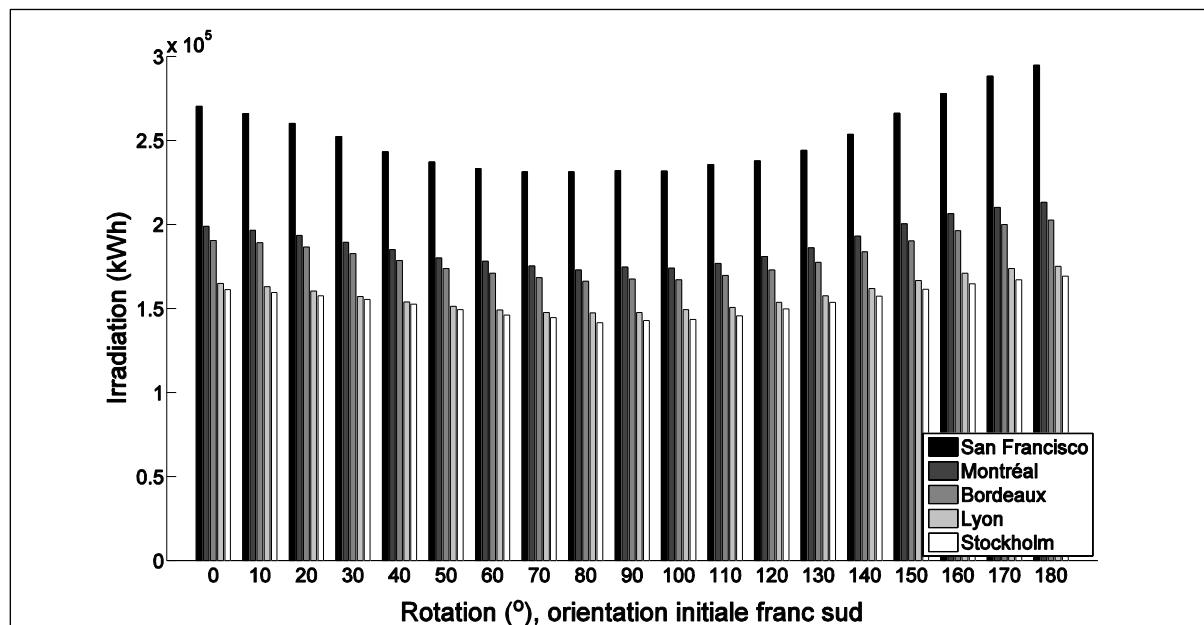


Figure 3.6 Irradiation totale sur la surface vitrée du quartier densifié par ajout de tours pour des fenêtres de 1 m<sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

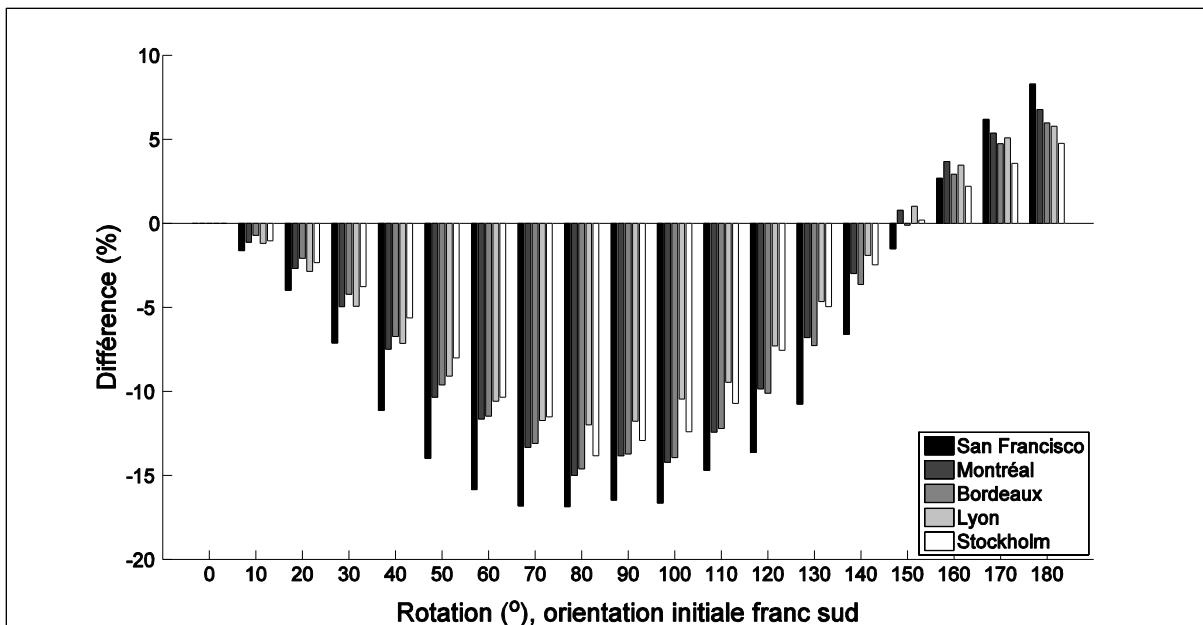


Figure 3.7 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario des tours, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

La Figure 3.6 montre que la ville de San Francisco est celle qui reçoit le plus d'énergie, peu importe son orientation. La ville de San Francisco est suivie de Montréal et Bordeaux, puis de Lyon et Stockholm. En valeur absolue, en raison des 258 fenêtres supplémentaires, il est à nouveau normal que les valeurs d'irradiation solaire soient plus élevées qu'au scénario original.

L'impact de l'ajout des tours est bien saisi en examinant la Figure 3.7. En effet, que toutes les villes présentent un meilleur potentiel solaire si le quartier est pivoté de  $180^\circ$  par rapport au positionnement initial. Cette différence se traduit par un gain se situant entre 8 % et un peu moins de 5 %. L'ordre du gain pour chaque ville suit la même tendance que la grandeur du rayonnement solaire propre à chaque ville, San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. La Figure 3.7 montre aussi que, contrairement aux Figure 3.5 Figure 3.3, la ville de Stockholm est plus désavantagée par une mauvaise rotation que la ville de Lyon. Ceci est explicable par le trajet solaire bas de la ville de Stockholm et la présence de deux tours qui viennent créer des masques importants sur les bâtiments à l'étude lorsque le soleil est plein sud.

### 3.3.4 Analyse des scénarios original, densifié par étalement et par ajout de tours

Les figures 3.3, 3.5 et 3.7, illustrent qu'il existe une orientation pour chaque scénario qui sera plus propice pour optimiser l'irradiation solaire sur les surfaces vitrées à cause de la typologie du quartier. Dans les trois cas étudiés (original, étalement et tours), il vaut mieux tourner le quartier entre  $170^\circ$  et  $180^\circ$  pour augmenter les gains solaires. Pour le quartier original et d'étalement, le tout est explicable par le volume et la hauteur d'un des blocs qui est plus élevé que son bloc opposé (voir les dimensions des blocs Tableau 3.2 et Tableau 3.3). Le bloc de bâtiment qui est situé le plus au sud au début des simulations présente un plus gros volume et une plus grande hauteur. Ainsi, de cette façon, il crée davantage d'ombrage sur son bloc opposé. En le tournant de l'autre côté, il crée moins d'ombre et offre un rendement plus performant pour le quartier. De plus, la distance entre les deux blocs, qui peut être évaluée comme étant la cour, est plus grande que la largeur des rues. Ceci explique aussi l'augmentation de l'irradiation solaire si le quartier est tourné au complet. Le contexte urbain utilisé comme masque aura alors beaucoup moins d'effet sur le bloc le plus volumineux.

Pour le quartier original, l'orientation à  $180^\circ$  dégré permet d'augmenter les gains totaux en irradiation de 1,3 à 2,5% selon la ville à l'étude. Pour le quartier densifié par étalement, les gains à  $180^\circ$  sont de 1,5 à 2,6%. En examinant les figures 3.3 et 3.5 il est aussi possible de trouver les orientations les moins performantes des quartiers original et d'étalement. Puisque les quartiers débutent leurs simulations franc sud, il est à prévoir qu'il y aura une diminution de l'irradiation totale effective lorsque le quartier sera à  $90^\circ$ , car la majorité des surfaces vitrées tombera dans l'axe est-ouest. Au lieu d'avoir un ensoleillement qui durera toute la journée, les fenêtres auront soit un ensoleillement direct seulement le matin ou en fin d'après-midi. À  $90^\circ$  pour le quartier d'étalement, observe des diminutions respectives de 9, 8, 7 et 10 % sont observées pour les villes de Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm respectivement. Pour la ville de San Francisco, la diminution s'établit à près de 16 %. Ceci peut être explicable par l'importance de la puissance de l'irradiation solaire à l'heure du midi pour une ville à plus basse latitude comme San Francisco. Le quartier original à  $90^\circ$  subit des

pertes d'irradiation solaire de 9 % pour les villes de Montréal, Bordeaux et Lyon, de 6 % pour Stockholm et de 16 % pour la ville de Stockholm.

Tableau 3.2 Dimensions des blocs du modèle original et la simplification des blocs en respectant le volume et la fenestration du modèle original

<b>Bloc sud original</b>			<b>Bloc sud simplifié</b>			
Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Différence de volume (%)
12 à 15	7,5 à 13,5	21 965	14,3	11,3	21 967	0,01
<b>Bloc nord original</b>			<b>Bloc nord simplifié</b>			
12 à 15	7,5 à 13,5	19 603	14,1	10,3	19 605	0,01

Tableau 3.3 Dimensions des blocs du modèle d'étalement et la simplification des blocs en respectant le volume et la fenestration du modèle d'étalement

<b>Bloc sud original densifié</b>			<b>Bloc sud pondéré</b>			
Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Différence de volume (%)
12 à 15	10,5 à 16,5	27 689	14,4	14,3	27 779	0,3
<b>Bloc nord original densifié</b>			<b>Bloc nord pondéré</b>			
12 à 15	10,5 à 16,5	25191	14,1	13,3	25 317	0,5

Il est possible d'évaluer le même genre de données en examinant le quartier densifié par l'ajout de tours à la Figure 3.7. Le quartier densifié pour les cinq villes obtient un meilleur bilan s'il est pivoté de 180°. Ce résultat s'explique par la présence de la tour située dans le bloc qui est le plus au sud au départ. En effet, en la déplaçant de l'autre côté, elle crée automatiquement moins d'ombrage sur le bloc opposé. Des gains respectifs d'environ 8, 7, 6, 6 et 5 % sont observables à une rotation de 180° pour les villes de San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. À 90°, l'effet contraire est constaté : la surface vitrée est alors

réduite et les tours créent davantage d'ombrage sur les blocs à l'étude. Il y a donc une diminution de 12 à 17 % par rapport à l'orientation d'origine pour les cinq villes.

### 3.3.5 Comparaison de l'irradiation selon les modèles

Des scénarios de densification ont été créés dans le but de simuler l'impact de l'ajout de surface habitable dans un quartier existant. Deux approches sont étudiées, la densification en ajoutant un étage supplémentaire sur tout le contexte original et l'autre en ajoutant des tours au contexte original. L'ajout d'étages augmentera la surface vitrée des quartiers et le gain solaire possible au travers celle-ci.

Globalement, l'ajout d'un étage supplémentaire fait augmenter les gains solaires pour la ville de Montréal par exemple, de 5 à 17 % dépendant l'orientation par rapport au quartier original. La Figure 3.8 montre les variations pour les cinq villes à l'étude pendant la période de chauffe. Lorsque l'orientation optimale pour l'irradiation solaire est considérée à 180°, dans ce cas que les gains les plus productifs viennent des deux villes les moins performantes, Lyon et Stockholm, soit environ 17 %. Ceci peut être explicable en partie par le degré de latitude élevé de la ville de Stockholm qui avantage des bâtiments en hauteur ayant peu de masques devant eux en hiver pour capter plus de soleil étant donné le trajet solaire bas. L'analyse au niveau des rotations 70 à 120°, met en lumière que la ville de San Francisco est peu avantagee par l'ajout d'un étage. Le contexte urbain qui a augmenté d'un étage couvre donc de façon considérable le quartier et n'aide pas à obtenir un bilan global positif.

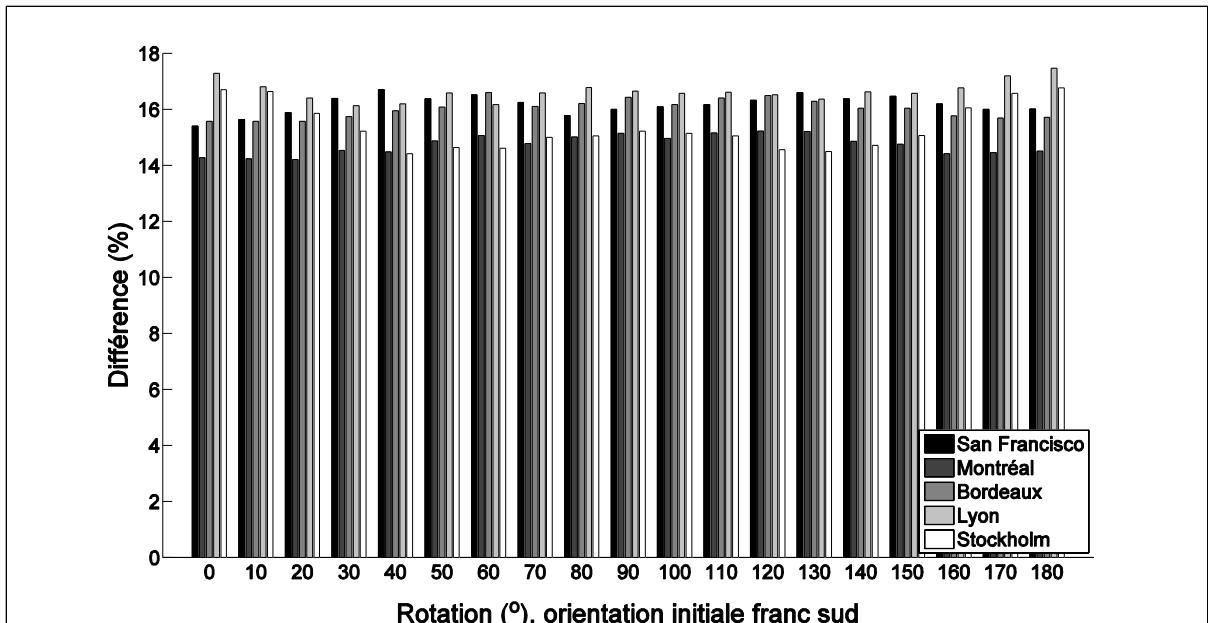


Figure 3.8 Pourcentage de l'irradiation solaire totale du quartier d'étalement, un étage supplémentaire, en comparaison au quartier original, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

L'effet d'ajouter des tours au quartier original apporte aussi des gains au niveau du bilan énergétique solaire des deux blocs de bâtiments à l'étude. Le nombre de fenêtres à l'étude passe de 712 à 970 avec l'ajout des bâtiments en hauteur. La Figure 3.9 montre les différences en pourcentage du gain de l'ajout des tours par rapport au quartier original selon l'orientation pendant la période de chauffe des cinq villes à l'étude. Comme pour le scénario d'étalement par un étage, la ville de Stockholm est la plus avantageée par la densification par des tours. Le trajet solaire bas en hiver d'une ville à haute latitude comme Stockholm favorise des bâtiments en hauteur pour maximiser l'irradiation solaire. À 180°, la ville de Stockholm obtient un gain de 38 % en irradiation solaire par rapport au scénario original. C'est aussi à cette orientation que le gain est maximisé pour les villes de San Francisco (33 %), Montréal (38 %), Bordeaux (36 %) et Lyon (35 %).

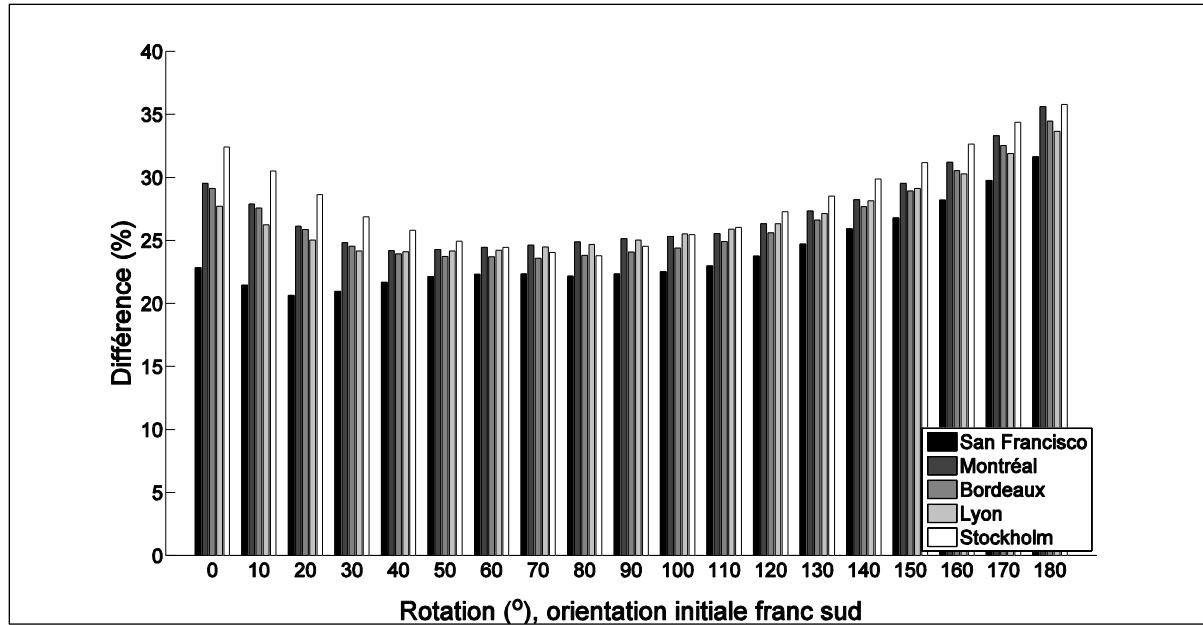


Figure 3.9 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale du quartier des tours en comparaison au quartier original, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

La Figure 3.10 montre, quant à elle, la différence d'irradiation en pourcentage entre le scénario des tours et celui de l'étalement. Globalement, il est plus avantageux d'utiliser le scénario des tours dans la plupart des cas si seulement le bilan énergétique du solaire passif est utilisé comme critère. Le fait qu'il y ait un peu plus de fenêtres aide évidemment au bilan, mais le but ici était de visualiser l'impact de la typologie d'un quartier.

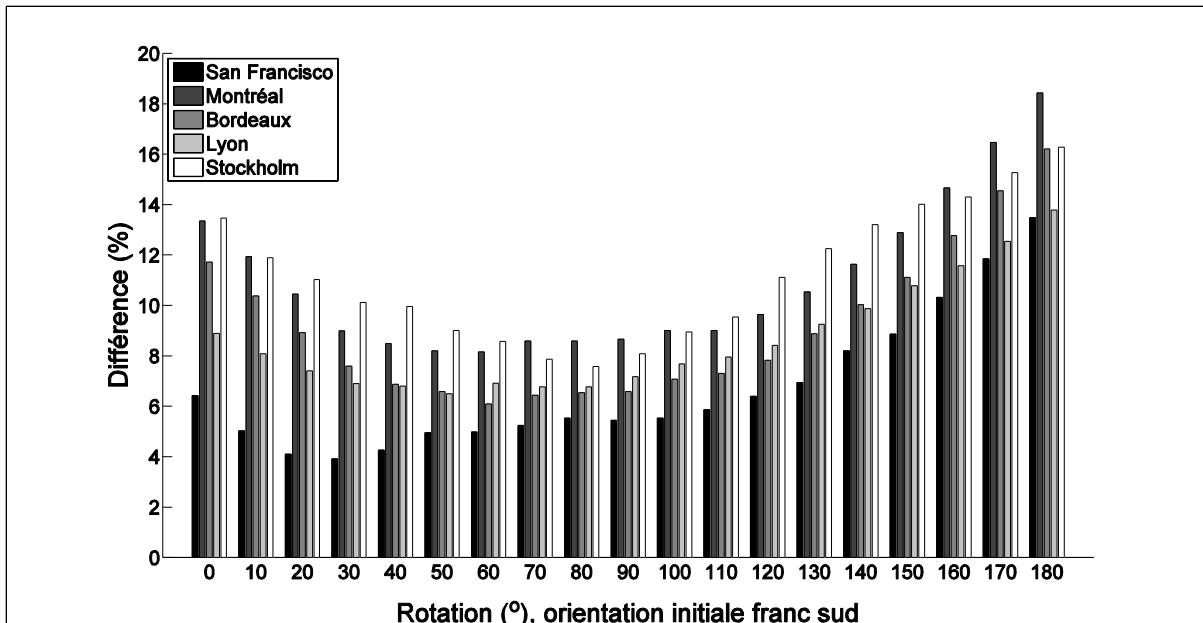


Figure 3.10 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale du quartier des tours en comparaison au quartier densifié par étalement, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

### 3.3.6 Irradiation des blocs simplifiés et niveau de détails des modèles

Une simplification du quartier original a été créée afin de valider que la réduction du niveau de détail puisse donner une bonne idée de grandeur du rayonnement sur le quartier. La réduction du niveau de détail permet de faire des simulations plus rapides. La simplification du quartier original est faite de deux prismes rectangulaires présentant de la fenestration sur toutes les façades pour un total de 720 fenêtres à comparer aux 712 fenêtres du premier modèle. Les dimensions des blocs sont déterminées dans le but de garder le même ordre de grandeur que le scénario original. Ainsi, le bloc le plus au sud au départ possède un volume plus élevé que le bloc au nord grâce à une hauteur et largeur légèrement plus élevée. Le même travail est effectué pour le quartier d'étalement. Le Tableau 3.2 et le Tableau 3.3 présentent les caractéristiques géométriques pour comparer le modèle simplifié au modèle original et d'étalement.

Les Figures 3.11 et Figure 3.12 montrent le rayonnement solaire total reçu pour les deux quartiers simplifiés.

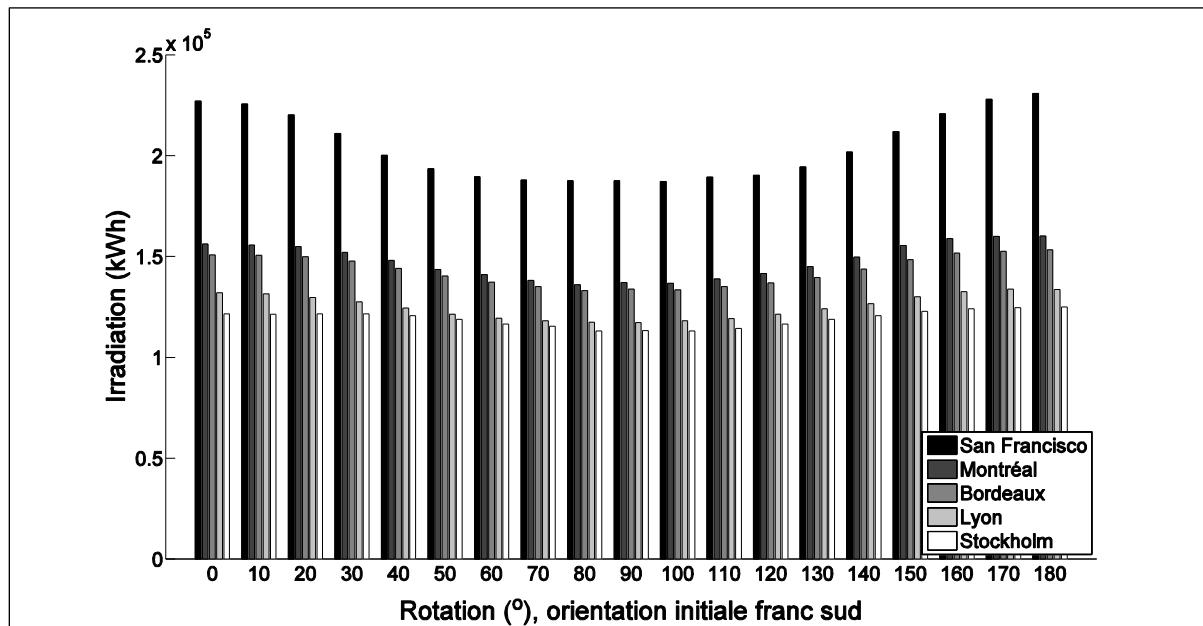


Figure 3.11 Irradiation totale sur les surfaces vitrées du quartier formé de deux prismes simplifiés par rapport au quartier original pour des fenêtres de  $1 \text{ m}^2$  par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

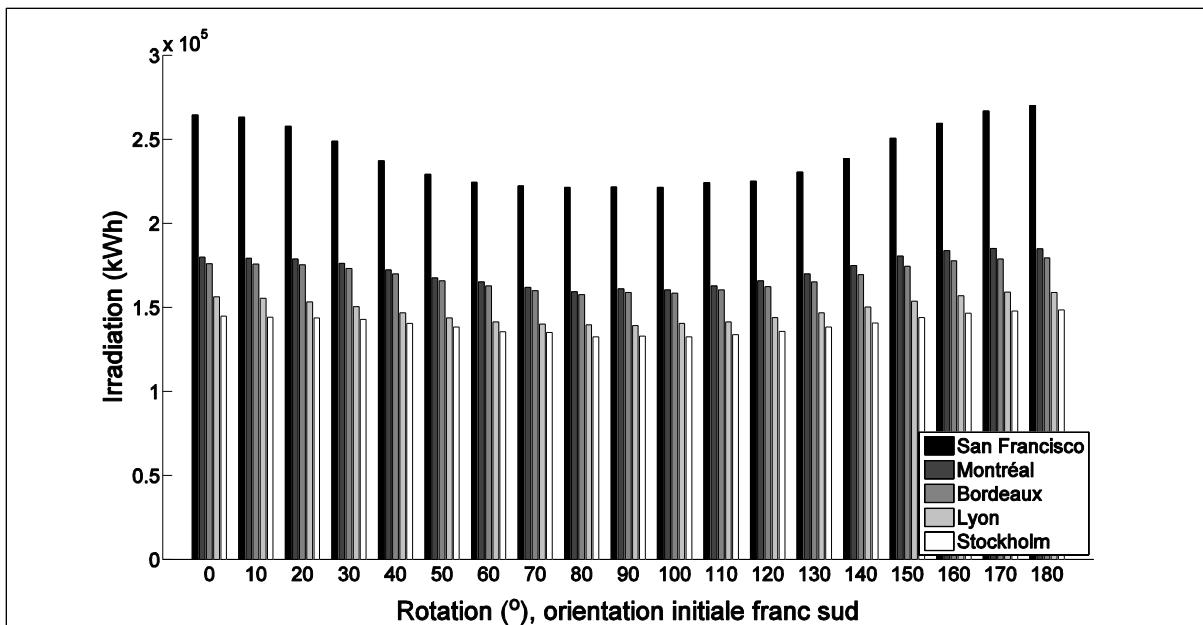


Figure 3.12 Irradiation totale sur les surfaces vitrées du quartier formé de deux prismes simplifiés par rapport au quartier densifié par étalement pour des fenêtres de 1 m<sup>2</sup> par rapport son orientation, selon la ville à l'étude et leur période de chauffe respective

L'examen des Figure 3.11 et Figure 3.12 met en évidence les relations souhaitées. L'ordre de grandeur est conservé selon l'orientation à comparer au quartier de référence (original et étalement, Figure 3.2 et Figure 3.4), la ville de San Francisco étant la plus productive et Stockholm la moins productive. L'irradiation est un peu plus élevée à la rotation de 180° qu'à la position initiale pour l'ensemble des villes. Les Figure 3.13 et Figure 3.14 montrent la différence d'énergie solaire totale reçue entre les scénarios d'origines et la géométrie simplifiée.

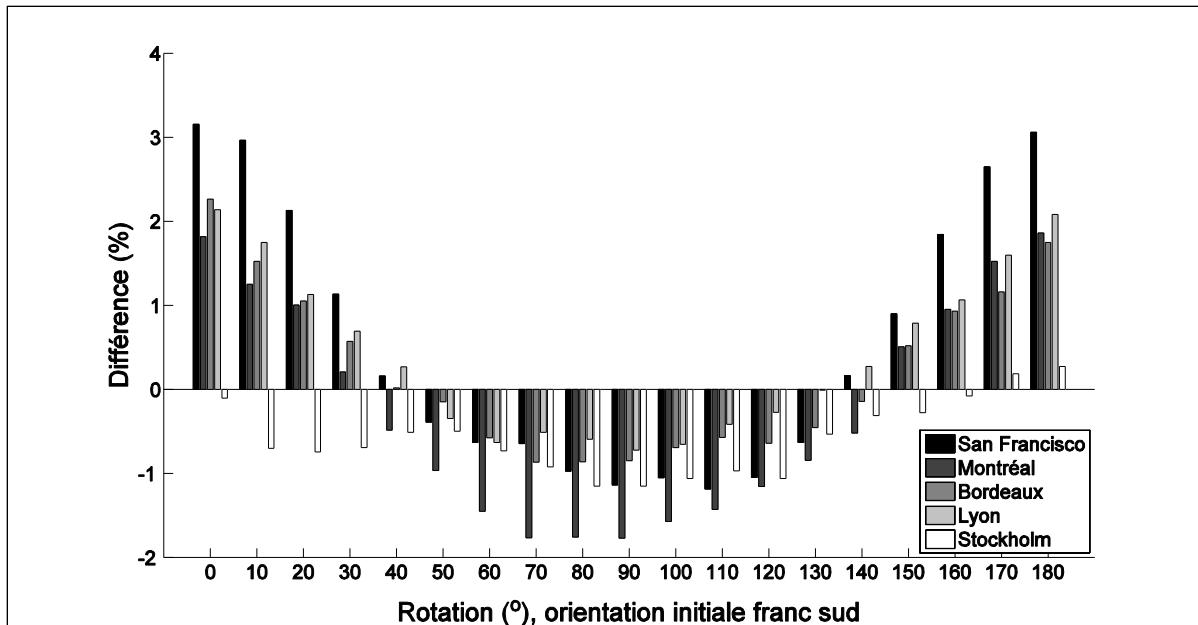


Figure 3.13 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire entre les blocs simplifiés et le quartier original, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

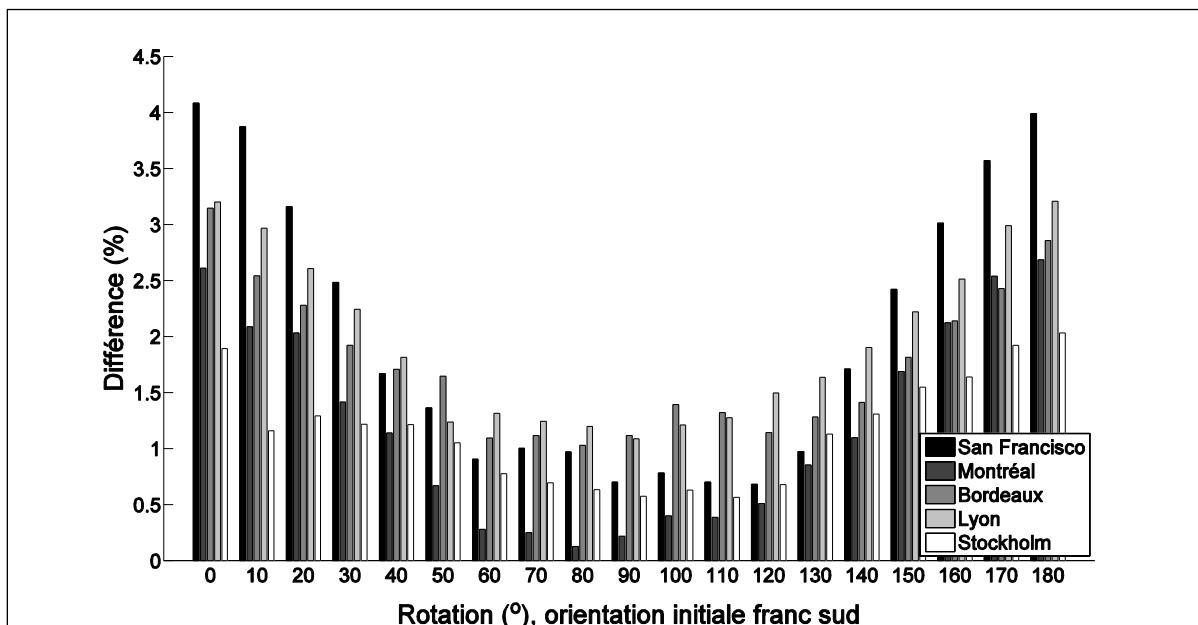


Figure 3.14 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale entre les blocs simplifiés (densifiés par étalement) et le quartier densifié par étalement, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

La Figure 3.13 illustre des différences positives et négatives pour la comparaison avec le quartier original. Le modèle simplifié sous-évalue l'énergie solaire à partir de la rotation de 50° à la rotation de 130° pour l'ensemble des cinq villes à l'étude. Il faut noter que pour l'ensemble des positions, la ville de Stockholm est toujours sous-évaluée. La hauteur moyenne constante des bâtiments constante dans le modèle simplifié combiné avec le trajet solaire bas de Stockholm peut expliquer le phénomène. Le scénario original de par sa hauteur qui varie d'un bâtiment à l'autre obtient d'avantage d'irradiation solaire si la hauteur des bâtiments est basse. Il faut noter que la différence est faible et varie seulement entre -2 % et à peine 3 %. Pour Figure 3.14, le même genre d'observation peut être effectué. Toutefois, il n'y a jamais de sous-évaluation. Les différences sont en dessous de 5 % également. Les différences observées entre les Figure 3.13 et Figure 3.14 peuvent être expliquées par la hauteur choisie pour les blocs simplifiés. Le bloc sud simplifié a une hauteur fixe à 11,3 mètres, cette dimension peut créer de légères sous-évaluations proches des rotations de 90° à cause de son influence sur le rayonnement solaire disponible à cause de l'ombrage.

### **3.4      Effet d'ajout d'étages sur le quartier densifié par étalement et analyse du premier étage (rez-de-chaussée)**

La section suivante aborde l'étude de l'irradiation solaire reçue sur la façade sud du bloc situé au sud (position initiale) afin de valider les effets sur le gisement solaire de la rotation d'un quartier et de la densification du quartier. La densification du quartier original est poussée à un autre niveau, ainsi trois étages sur le quartier original sont ajoutés afin de simuler de plus en plus d'ombrage sur l'étage situé au rez-de-chaussée. À noter que le contexte suit la densification et sa hauteur augmente à chaque fois que des étages sont ajoutés.

#### **3.4.1    Irradiation pour ajout de deux et trois étages supplémentaires sur le quartier original et vérification de l'orientation optimale**

Deux étages sont ajoutés sur le scénario d'étalement dans le but d'évaluer l'accroissement de l'irradiation solaire disponible. L'ajout d'étages supplémentaires a un effet direct sur

l'accroissement de l'irradiation solaire global. La Figure 3.15 montre l'irradiation solaire totale pour l'ajout d'un étage sur le quartier d'étalement, la tendance d'irradiation solaire selon l'orientation du quartier des cinq villes est sensiblement la même que pour le quartier d'étalement présenter à la Figure 3.4. En augmentant la densité du quartier à nouveau, une orientation optimale est notée pour maximiser l'énergie solaire. En effet une rotation de 180° permet des gains d'environ 3 % pour les villes de San Francisco, Montréal, Bordeaux et Stockholm et de moins de 2 % pour la ville de Lyon. Ces valeurs sont semblables à celles notées pour le quartier original densifié par ajout d'un étage (Figure 3.3 et Figure 3.5) où des gains de 2 à 4 % pour chacune des villes à une rotation de 180° sont notés.

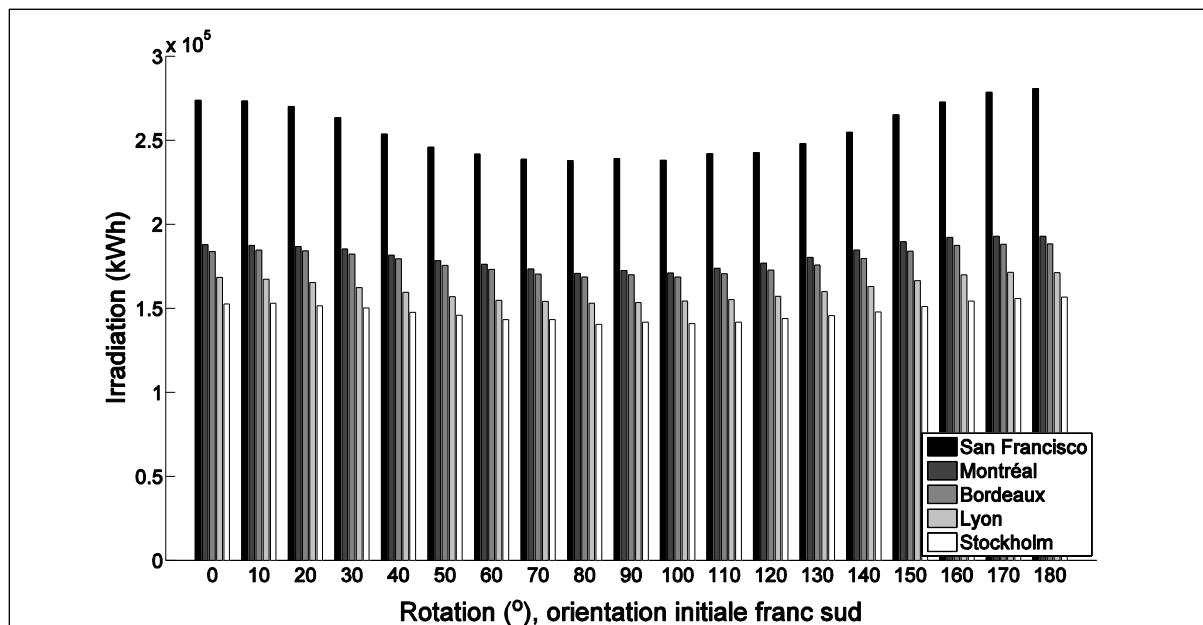


Figure 3.15 Irradiation solaire totale pour des fenêtres de 1 m<sup>2</sup> sur le quartier densifié par ajout de deux étages supplémentaires, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

La Figure 3.15 montre également que la tendance d'irradiation solaire selon l'orientation du quartier des cinq villes est sensiblement la même que pour le quartier densifié par étalement (Figure 3.4). La somme du rayonnement solaire est plus élevée et le classement des villes est conservé.

La Figure 3.16 montre la différence en pourcentage de l'irradiation solaire reçue par rapport à l'orientation initiale. En augmentant la densité du quartier, une orientation optimale est à nouveau notée pour maximiser l'énergie solaire. En effet une rotation de 180° permet des gains d'environ 3 % pour les villes de San Francisco, Montréal, Bordeaux et Stockholm et de moins de 2 % pour la ville de Lyon. Ces valeurs sont semblables à ceux notés pour le quartier original et d'étalement (Figure 3.3 et Figure 3.5) où des gains de 2 à 4 % se retrouvaient pour chacune des villes à une rotation de 180°. La ville de San Francisco est toujours celle qui subit le plus de conséquences liées à une mauvaise orientation.

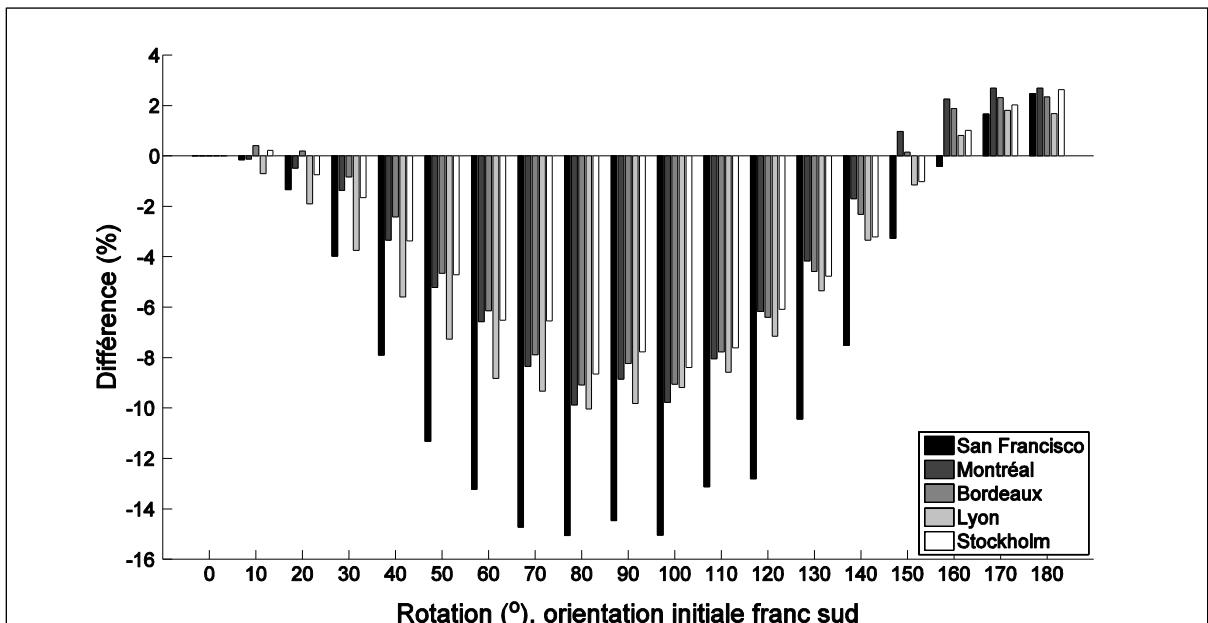


Figure 3.16 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire totale par rapport à l'orientation initiale pour le scénario d'ajout de deux étages supplémentaires, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

L'ajoute un autre étage supplémentaire sur le quartier fait encore augmenter la surface vitrée et donc les gains en énergie solaire passive. La Figure 3.17 montre la tendance obtenue pour le quartier original densifié de deux étages supplémentaires. La Figure 3.18 montre la différence de l'irradiation solaire totale reçue par rapport à la position initiale.

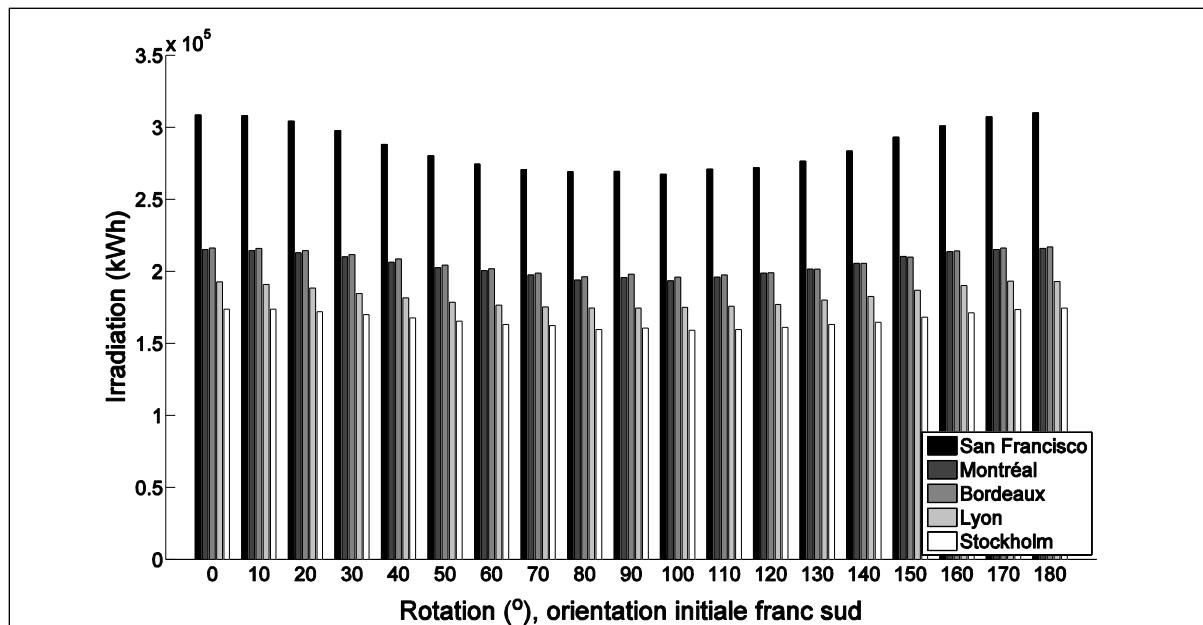


Figure 3.17 Irradiation solaire totale pour des fenêtres de 1 m<sup>2</sup> sur le quartier densifié par ajout de trois étages supplémentaires, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

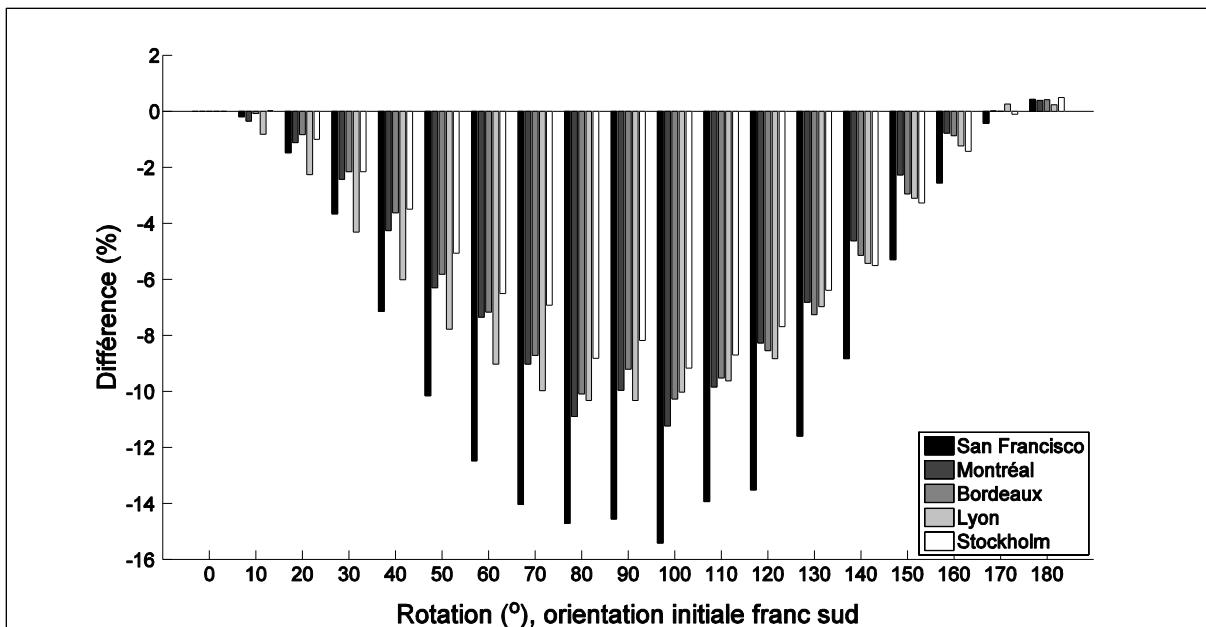


Figure 3.18 Différence en pourcentage de l'irradiation solaire par rapport à l'orientation initiale pour le scénario d'ajout de trois étages supplémentaires, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

Toutefois, au niveau de l'orientation optimale, la Figure 3.18 illustre que les gains sont négligeables lorsqu'une rotation complète du quartier est effectuée à comparer aux autres scénarios. La hauteur du quartier qui augmente fait en sorte que ce sont les fenêtres du haut des bâtiments qui captent la majorité de l'énergie solaire. Les fenêtres du bas sont donc moins sollicitées et présentent moins d'impact sur le bilan global de l'orientation. La typologie des bâtiments influence alors moins les résultats.

### 3.4.2 Comportement du premier étage (rez-de-chaussée)

L'ajout d'étages supplémentaires se traduit par des gains au niveau de l'irradiation solaire global reçue pour l'ensemble des quartiers créés dans les cinq villes à l'étude. La densification d'un quartier en ajoutant des étages augmente la surface vitrée disponible au solaire passif. Toutefois, l'augmentation de la hauteur des bâtiments et du contexte a un impact au niveau du premier étage (rez-de-chaussée) qui subira davantage d'ombrage. Une analyse des 51 fenêtres du premier étage du bloc sud au départ de la simulation est faite pour

comprendre ce qui se produit au premier étage. Le côté sud seulement est utilisé et non l'ensemble des fenêtres au premier étage afin de bien montrer le phénomène qui se produit, soit la baisse de potentiel solaire. La simulation de l'ensemble des fenêtres au premier des deux blocs montre une symétrie dans les résultats lorsque des rotations de 180° sont effectuées. La Figure 3.19, Figure 3.20 et Figure 3.21 montrent les effets de l'ajout d'un étage selon l'orientation pour le premier étage de la façade sud du bloc #1 (bloc au sud au départ). Le but de montrer ces trois figures (Figure 3.19, la Figure 3.20 et la Figure 3.21) de façon consécutive est de mettre l'emphase sur le fait que l'énergie totale disponible pour le premier étage diminue à chaque fois qu'un étage est ajouté. Le scénario original reçoit donc davantage d'énergie au premier étage que celui découlant de l'ajout de deux étages, malgré une irradiation solaire totale reçue moindre.

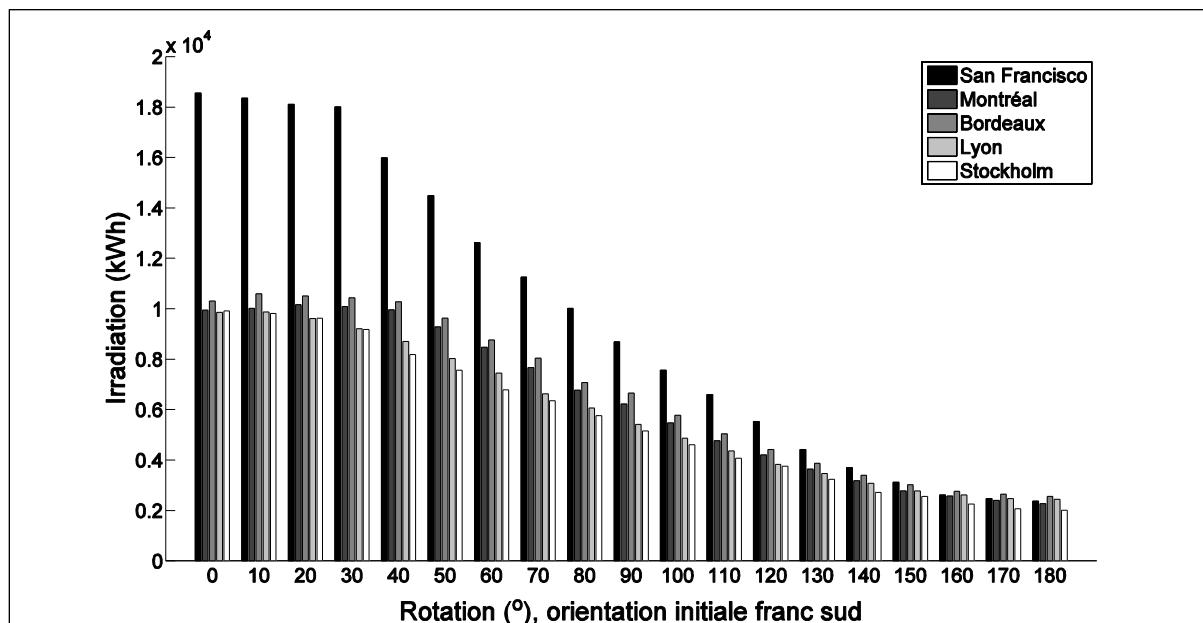


Figure 3.19 Irradiation solaire sur le premier étage (rez-de-chaussée) du bloc situé au sud sur la façade sud du scénario original, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

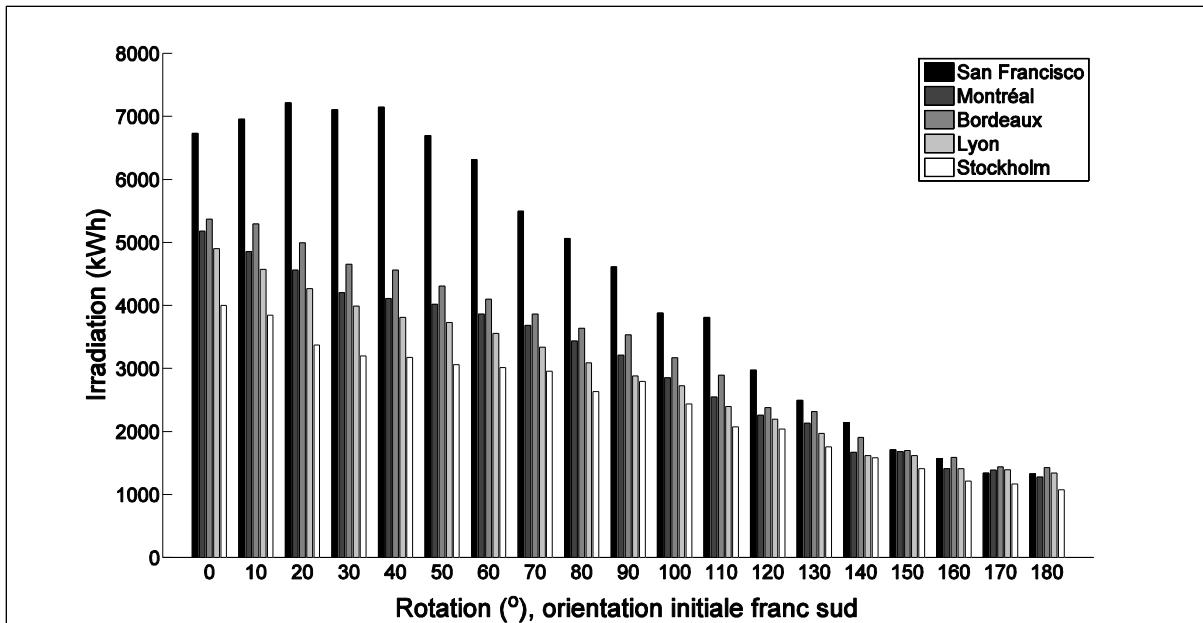


Figure 3.20 Irradiation solaire sur le premier étage (rez-de-chaussée) du bloc situé au sud sur la façade sud du scénario deux étages ajoutés, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

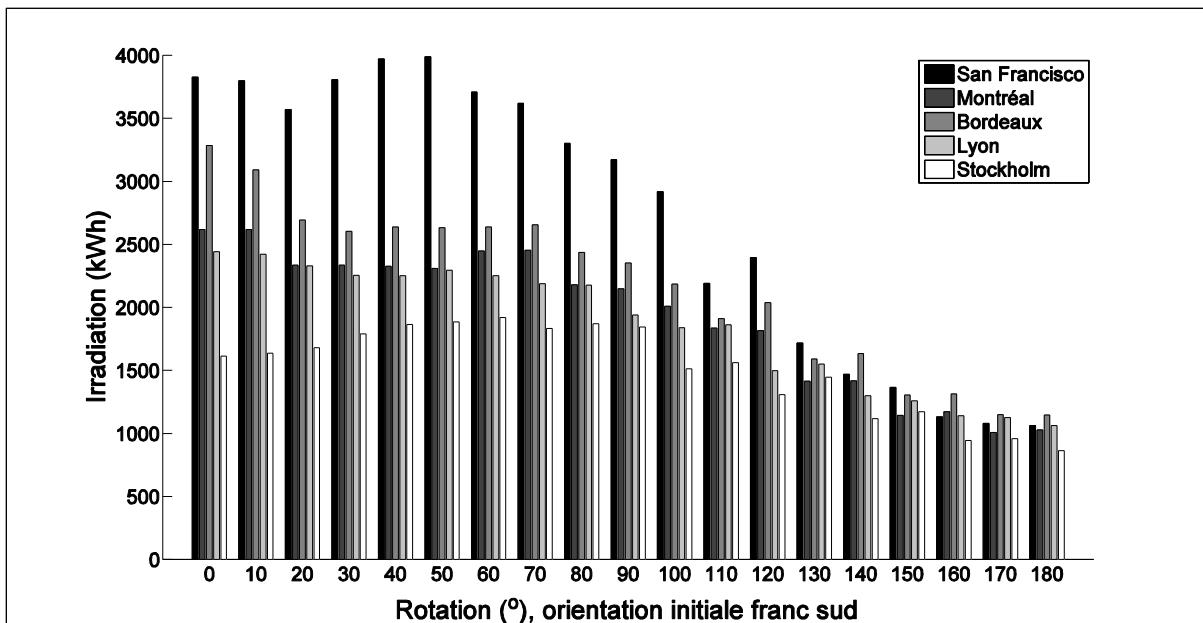


Figure 3.21 Irradiation solaire sur le premier étage (rez-de-chaussée) du bloc situé au sud sur la façade sud du scénario de trois étages ajoutés, selon les villes à l'étude et leur période de chauffe respective

Les Figures 3.19, 3.20 et 3.21 illustrent que l'énergie totale disponible pour le premier étage diminue au fur et à mesure qu'un étage est ajouté. Le scénario original reçoit donc d'avantage d'énergie au premier étage que celui de l'ajout de deux étages malgré une plus petite irradiation solaire totale. Les Figure 3.19, la Figure 3.20 et la Figure 3.21 montrent qu'à la rotation de  $180^\circ$ , le potentiel solaire devient presque le même pour les cinq villes, car la façade sud est rendue au nord et qu'il n'y a presque plus d'irradiation directe. Les données viennent en majorité de l'irradiation diffuse qui est liée avec la géométrie. La Figure 3.21 pour l'ajout de trois étages montre une tendance moins stable au niveau des courbes qui sont plus difficiles à prédire que pour l'ajout de deux étages et le scénario original. Il est possible que certaines rotations permettent au soleil de rentrer au travers les ouvertures faites par les rues, ce qui fait en sorte que le rayonnement solaire est plus élevé à une rotation de  $50^\circ$  pour la ville de San Francisco qu'à la position initiale par exemple.

Pour mieux comprendre l'influence de l'ajout des étages, l'analyse est développée pour une seule ville. La ville de Bordeaux est sélectionnée comme exemple. La Figure 3.22 montre l'effet de l'ajout d'étage supplémentaire sur le quartier existant sur le premier étage.

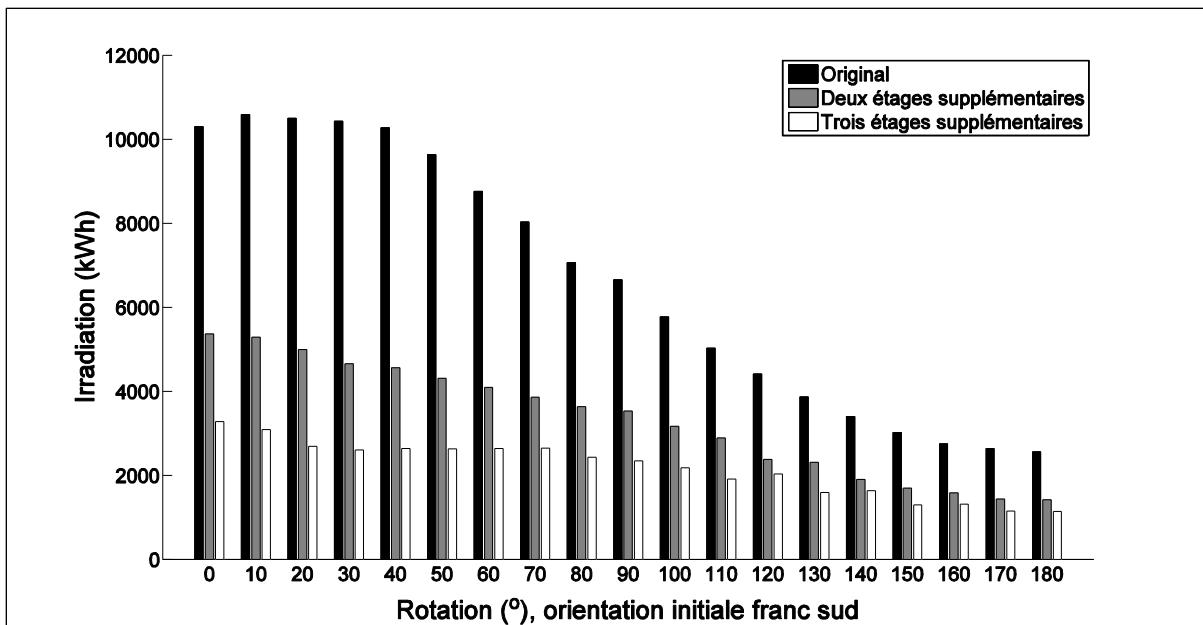


Figure 3.22 Irradiation solaire au premier étage du bloc situé au sud sur la façade sud, selon les scénarios original, deux et trois étages supplémentaires pour la ville de Bordeaux selon son orientation

La densification a un impact défavorable au niveau du premier étage. À 180 degrés de rotation pour la ville de Bordeaux, les surfaces vitrées du premier étage du quartier original reçoivent une irradiation solaire totale de 2 560 kWh. Si trois étages sont ajoutés au contexte, cette valeur diminue à 1 150 kWh, soit 45 % de l'irradiation initiale du premier étage du quartier original. Pour cette orientation, la densification représente une réduction de près de 55 % de l'irradiation solaire initialement disponible du premier étage du quartier original. De plus, l'ordre de grandeur pour le quartier original à l'orientation initiale est significatif à comparer à une rotation de 180 degrés, c'est-à-dire plus de 10 000 kWh initialement comparés à 2 560 kWh.

La diminution de l'énergie disponible est attribuable à la hauteur des bâtiments qui augmente et qui conduit à une réduction de l'irradiation directe sur les fenêtres ainsi que l'irradiation diffuse. Du côté de l'irradiation solaire, la visibilité directe du soleil diminue puisque le contexte des bâtiments voile la vision directe avec le soleil. La Figure 3.23 montre les relations entre l'irradiation solaire reçue sur la surface vitrée et les heures de visibilité du

rayonnement directe au premier étage de la façade sud. Les 51 fenêtres du premier étage qui sont orientées franc sud au départ perdent de l'accès au rayonnement direct lors de chacune des rotations conduisant ainsi à une baisse de l'énergie solaire disponible.

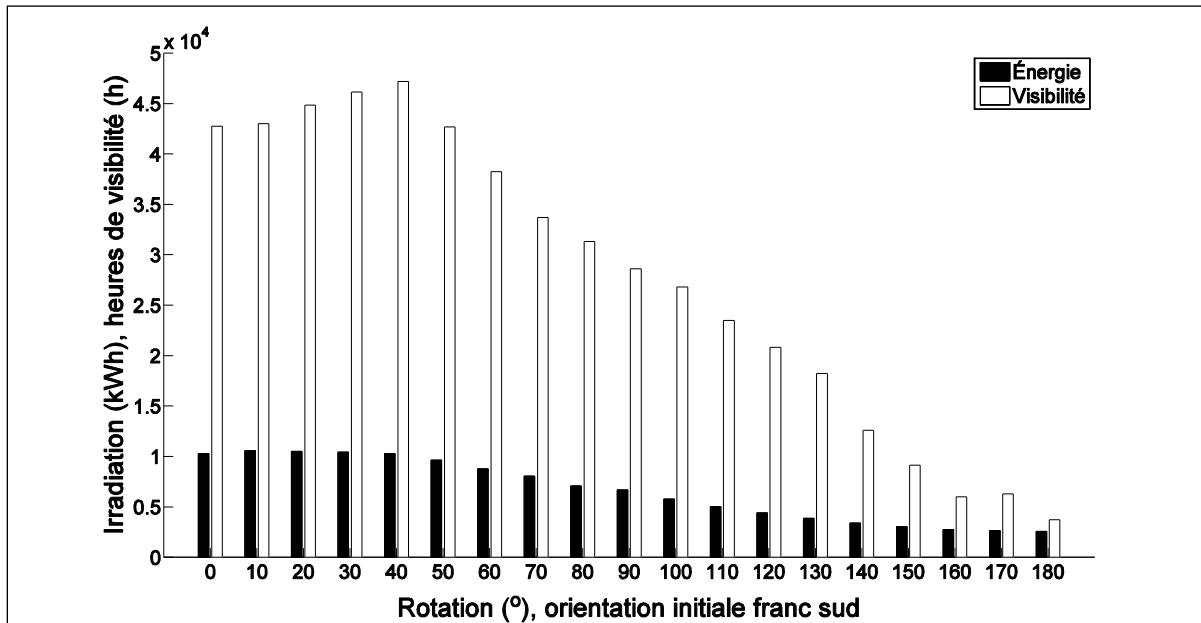


Figure 3.23 Heures de visibilité comparées à l'irradiation solaire sur des fenêtres de  $1 \text{ m}^2$  au premier étage du bloc situé sud de la façade sud sur le scénario original pour la ville de Bordeaux pendant la période de chauffe

Du côté de l'analyse de l'énergie solaire diffuse, il faut évaluer la typologie du quartier, car c'est elle qui a le plus d'influence sur l'énergie solaire disponible. C'est le facteur de vue de ciel (FVC) qui donne la meilleure information sur le sujet en raison de son lien avec l'énergie solaire diffuse. L'augmentation de la densité par des étages supplémentaires a un effet sur les FVC du ciel de chacune des fenêtres. Le Tableau 3.4 présente la moyenne des FVC pour chacun des scénarios au niveau du premier étage.

Tableau 3.4 FVC moyen des 51 fenêtres de la façade sud du premier étage du bloc sud selon la géométrie du quartier à l'étude

Scénario	FVC moyen des 51 fenêtres du premier étage bloc sud (%)	Différence par rapport scénario original (%)
Original	22,3	-
2 étages supplémentaires	12,3	-45,0
3 étages supplémentaires	9,75	-56,3

En densifiant le quartier original, les valeurs moyennes des FVC évoluent de 22,3 à 12,3 % lorsque deux étages supplémentaires sont ajoutés au contexte et de 22,3 à 9,75 % lorsque trois étages supplémentaires sont ajoutés. Par rapport au scénario original, ce sont des diminutions respectives de 45 et 56 % de la valeur moyenne des FVC du premier étage du bloc sud. Ces valeurs sont les mêmes pour toutes les villes et influencent les résultats de l'irradiation diffuse. Lorsque la fenestration du premier étage se retrouve orientée vers le nord, l'ajout d'étages vient directement influencer l'accès à l'irradiation solaire diffuse.

### 3.5 Irradiation solaire par critère de performance, par $\text{m}^2$ de surface vitrée

Les résultats présentés au début de la section (3.3.1 à 3.3.3) montrent que la valeur totale de l'irradiation solaire passive sur chacun des quartiers à l'étude augmente en fonction du nombre de fenêtres ajouté. Certains planificateurs urbains pourraient utiliser ce paramètre dans le but de trouver la forme du quartier qui leur offrira le meilleur apport solaire au total pour l'ensemble de la population. Dans le contexte de cette recherche, la densification d'un quartier est représentée par l'ajout d'étages ou de tours qui amènent une augmentation de la surface vitrée. Plus la surface vitrée augmente, plus cela favorise une irradiation solaire totale passive élevée en fonction de la bonne orientation. Toutefois, les résultats montrent que l'augmentation des étages a un effet sur la population d'un quartier en particulier pour ceux qui se trouvent aux étages les plus bas. Les résidents qui vivent au premier étage selon une orientation nord peuvent voir leur gisement solaire diminuer de plus de la moitié si le nombre d'étages augmente dans leur contexte. De cette façon, la densification ne peut être le seul

facteur à considérer l'accès solaire aux résidents d'un quartier est à optimiser, un bilan positif se faisant au détriment de certains résidents.

Une classification des scénarios peut se faire en ramenant les résultats totaux par rapport aux surfaces vitrées en mètres carrés. Les résultats sont ainsi ramenés en kWh/m<sup>2</sup> ce qui permet l'étude d'un autre paramètre de performance. La ville de San Francisco peut être utilisée pour illustrer les résultats sous ce nouvel angle. La Figure 3.24 montre ainsi les résultats pour les différents scénarios à l'étude pour la ville de San Francisco en fonction du critère d'irradiation solaire en kWh/m<sup>2</sup>.

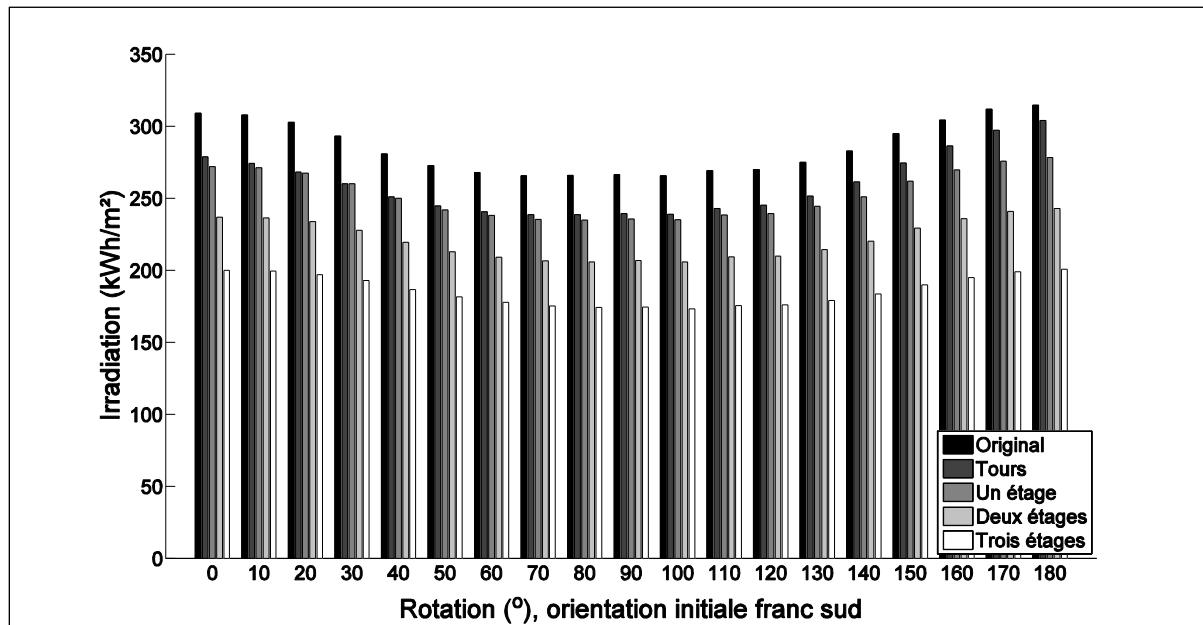


Figure 3.24 Irradiation solaire en kWh/m<sup>2</sup> de la surface vitrée pour la ville de San Francisco selon son orientation pour les scénarios original, ajout de tours, ajout d'un, deux et trois étages supplémentaires, pendant la période de chauffe

En utilisant ce critère d'évaluation, c'est le quartier original qui est le plus performant et ce peu importe l'orientation du quartier. En prenant l'orientation initiale, une irradiation de 309 kWh/m<sup>2</sup> est obtenue pour le scénario original et cette valeur diminue jusqu'à 237 kWh/m<sup>2</sup> pour le scénario avec trois étages additionnels, cas le moins performant selon le critère d'irradiation solaire par unité de surface vitrée.

À titre comparatif la ville de San Francisco est évaluée en fonction des résultats totaux, c'est-à-dire en considérant l'ensemble des fenêtres de chacun des quartiers afin de déterminer l'irradiation solaire totale. La somme de l'irradiation solaire fenêtre par fenêtre est effectuée (dimension des fenêtres de  $1 \text{ m}^2$ ), ce qui est illustré à la Figure 3.25.

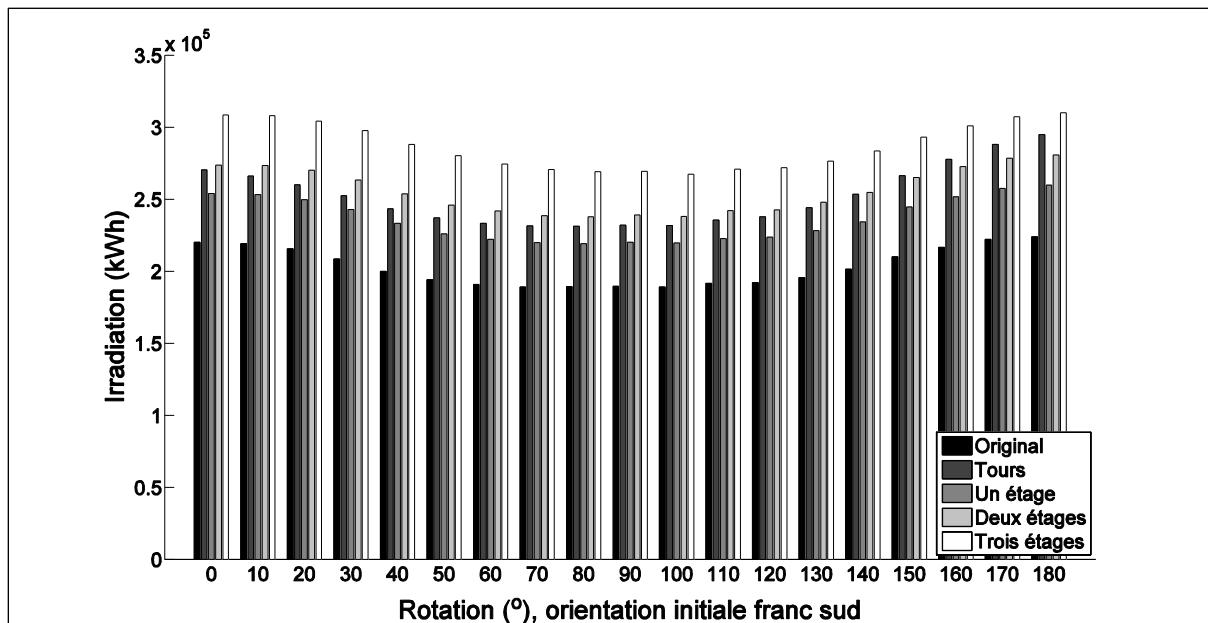


Figure 3.25 Irradiation solaire totale reçue en kWh pour l'ensemble de la surface vitrée pour la ville de San Francisco selon son orientation pour les scénarios original, ajout de tours, ajout d'un, deux et trois étages supplémentaires, pendant la période de chauffe

En effectuant l'analyse pour la ville de San Francisco en fonction des résultats totaux, des résultats différents que pour le critère d'irradiation solaire par unité de surface sont obtenues. Contrairement au critère par mètre carré, le scénario le plus performant au niveau global est celui de l'ajout de trois étages et non le scénario original grâce à une irradiation totale d'environ 309 000 kWh à l'orientation initiale. La même tendance est observée pour les quatre autres villes de Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. Le Tableau 3.5 présente un sommaire des résultats.

Tableau 3.5 Résumé des résultats pour la ville de San Francisco pendant la période de chauffe selon son orientation initiale en fonction de l'irradiation solaire totale et l'irradiation par unité de surface vitrée

Rang	Irradiation solaire totale			Irradiation solaire par unité de surface		
	Scénario	Résultats		Scénario	Résultat	
		(kWh)	(%)		(kWh/m <sup>2</sup> )	(%)
1	<b>3 étages supplémentaires</b>	309 000	---	<b>Original</b>	309	---
2	2 étages supplémentaires	274 000	-11	Tours	279	-9,7
3	Tours	270 000	-13	1 étage supplémentaire	272	-12
4	1 étage supplémentaire	254 000	-18	2 étages supplémentaires	237	-23
5	Original	220 000	-29	3 étages supplémentaires	200	-35

Le Tableau 3.5 montre le pourcentage de diminution du potentiel pour chaque scénario en fonction du scénario de départ. Du côté de l'irradiation solaire totale le fait d'enlever des étages fait diminuer le potentiel de 11 à 29 % à cause du nombre de fenêtres qui diminue. Du côté de l'irradiation par unité de surface l'ordre de diminution est différent, le potentiel le plus élevé étant celui du quartier original alors que la densification des quartiers fait diminuer le gisement de -9,7% à -35%. Ceci s'explique par l'ajout d'étage(s) qui crée(nt) d'avantage d'ombrage, mais aussi par le nombre de fenêtres qui augmente la surface vitrée.

### 3.6 Demande énergétique en besoin de chauffage pour les scénarios et comparaison avec l'irradiation solaire comme chauffage passif

La sous-section suivante présente les résultats des demandes énergétiques en chauffage des bâtiments selon les scénarios étudiés en comparaison avec l'irradiation solaire reçue sur les surfaces vitrées. Pour les prochaines sections, il faut noter que des fenêtres ayant une dimension de 1,3 m par 1,5 m sont utilisées, ce choix étant fait dans le but de mieux refléter le réalisme dans les simulations. À la section 3.3 à 3.5 des fenêtres de 1 mètre carré avaient été sélectionnées dans le but de simplifier et comprendre l'impact des formes et du trajet solaire sur les apports solaire disponibles. Pour une simulation au niveau des besoins en chauffage il est plus réaliste d'utiliser des fenêtres rectangulaires que des fenêtres ayant la forme d'un carré parfait (fenêtre de 1m<sup>2</sup>). L'ajout de surface vitrée supplémentaire fera aussi

augmenter les apports solaires disponibles (fenêtre de 1,3 m par 1,5 m). Les scénarios pour des bâtiments construits dans les années 1960 et aujourd’hui (2000 et +) sont traités en premier pour visualiser la réalité des constructions existantes. Par la suite, à la section 3.6.3, des scénarios sont faits pour traiter des bâtiments du futur qui auront de meilleures performances énergétiques grâce à l’amélioration de la technologie.

### 3.6.1 Paramètres et dimensions pour la demande énergétique

La demande énergétique en chauffage est évaluée pour quatre scénarios : le scénario original, l’ajout d’un, deux et trois étages supplémentaires. Le scénario des tours n’est pas évalué dans ce contexte puisqu’il faut considérer des systèmes de ventilation qui demande plus de précision. Les degrés-jours fournis par l’ASHRAE (2007) sont utilisés dans le contexte. Les déperditions thermiques des bâtiments sont fonction des matériaux utilisés pour la construction, de la surface et du volume des unités d’habitation ainsi que de la force du climat. Le Tableau 3.6 présente les dimensions utilisées pour le calcul de la demande énergétique.

Tableau 3.6 Dimensions des paramètres formant les différents quartiers qui influencent la demande énergétique en chauffage

Scénario	Surface des murs ( $m^2$ )	Surface vitrés ( $m^2$ )	Surface habitable ( $m^2$ )	Surface toiture ( $m^2$ )	Périmètre au sol (m)
Original	8 598	712	11 820	3 771	642
Ajout d’un étage	9 998	934	15 590	3 771	642
Ajout deux étages	11 398	1 156	19 362	3 771	642
Ajout trois étages	12 482	1 554	21 133	3 771	642

Le Tableau 3.7 présente les propriétés thermiques des matériaux utilisés pour chacune des villes. Des scénarios sont élaborés pour les anciens bâtiments, construits dans les années

1950-1960, pour les bâtiments d'aujourd'hui et pour des scénarios du futur, soit des bâtiments à faible consommation énergétique.

Tableau 3.7 Propriétés thermiques des matériaux de construction pour les cinq villes à l'étude selon l'année de construction des bâtiments

Composantes	Villes				
	San Francisco	Montréal	Bordeaux	Lyon	Stockholm
<b>Anciens bâtiments 1950-1960</b>					
Murs	0,56	0,56	2,50	2,50	0,91
Fenêtres	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Toit	0,34	0,29	0,30	0,30	0,29
Fondations	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Infiltration ( $A_{ul}$ )	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
<b>Bâtiments d'aujourd'hui (2000)</b>					
Murs	0,43	0,23	0,4	0,4	0,3
Fenêtres	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Toit	0,28	0,14	0,3	0,3	0,14
Fondations	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Infiltration ( $A_{ul}$ )	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Mur, fenêtres et toit en $W/(m^2 \cdot K)$ ; fondation en $W/K$ ; indice d'infiltration en $cm^2/m^2$ .					

À noter que pour les fenêtres, la même propriété thermique a été utilisée pour les anciens bâtiments (1950-1960) faute d'informations dans la littérature. Un vitrage double peu performant a ainsi été utilisé. En tenant compte de ces données, il est possible d'estimer la demande énergétique en utilisant les degrés-jours de chauffage pour chacune des villes (Tableau 3.8). La demande énergétique en chauffage calculée est présentée au Tableau 3.9 pour les anciens bâtiments ainsi que pour les bâtiments construits aux normes d'aujourd'hui.

Tableau 3.8 Degrés-heures de chauffe pour chacune des villes à l'étude à 18,3°C selon les données de l'ASHRAE (2007)

Villes	Degrés-heures de chauffe à 18,3°C
San Francisco	1 504
Montréal	4 428
Bordeaux	2 008
Lyon	2 389
Stockholm	4 286

Tableau 3.9 Présentation de la demande énergétique nécessaire pour les besoins de chauffage pour les cinq villes à l'étude pour le scénario original pour les anciens bâtiments (1950-1960) et ceux d'aujourd'hui (2000 et +), *résultat en kWh*

Composantes	Villes				
	San Francisco	Montréal	Bordeaux	Lyon	Stockholm
Anciens bâtiments (1950-1960)					
Murs	282 422	511 687	1 035 887	1 232 437	495 278
Fenêtres	124 892	367 701	166 744	198 383	355 909
Toit	46 280	116 218	454 330	540 535	112 491
Fondations	27 113	79 825	36 199	43 067	77 265
Infiltration	117 708	490 188	161 900	205 935	464 630
Total	616 846	1 619 881	1 879 667	2 249 633	1 558 096
Bâtiments d'aujourd'hui (2000 et +)					
Murs	133 452	210 157	165 741	197 190	159 196
Fenêtres	87 425	257 391	116 721	138 868	185 073
Toit	40 835	56 105	54 520	64 864	50 427
Fondations	19 698	57 993	26 298	31 288	56 133
Infiltration	14 714	61 273	20 238	25 742	58 079
Total	308 143	678 308	399 566	477 045	543 162

La Figure 3.26 montre la demande énergétique annuelle en chauffage pour l'ensemble des deux blocs à l'étude, selon leur année de construction et les codes de construction locaux ainsi que pour chacune des villes.

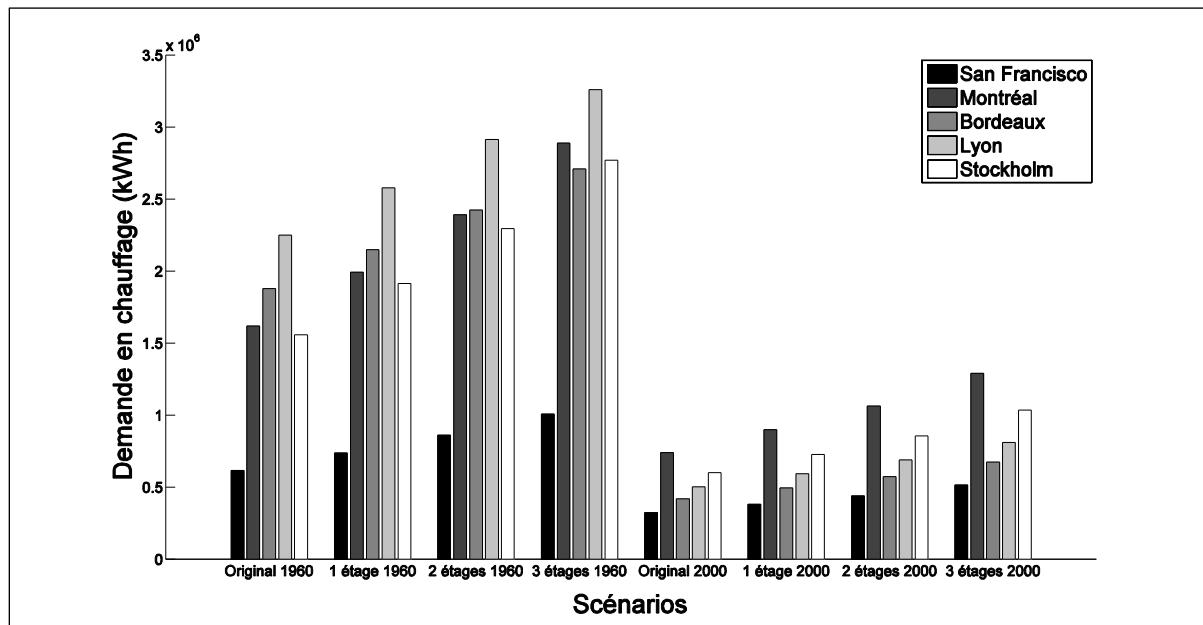


Figure 3.26 Demande énergétique annuelle en chauffage pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon l'année de construction des bâtiments et les codes de construction locaux de l'époque (1960 et 2000)

La Figure 3.26 montre la vulnérabilité des bâtiments construits dans les années 1960 à Bordeaux et Lyon qui n'ont pas subi de rénovation dans le but d'améliorer leur rendement énergétique. Dans presque tous les scénarios pour les années 1960 (original, un et deux étages supplémentaires) les deux blocs à l'étude ont besoin d'avantage d'énergie pour le chauffage que les mêmes blocs construits à Montréal avec les standards locaux de l'époque, et ce, malgré un climat plus doux que Montréal. Ceci peut être en partie expliqué par la rigueur de climat montréalais qui a incité les résidents à isoler leur toiture et leur mur. Pour le scénario de trois étages supplémentaires, les blocs à la ville de Montréal nécessiteront plus d'énergie que les blocs à Bordeaux. Ceci est explicable par l'infiltration qui augmente en fonction de la hauteur des bâtiments et qui est fonction de la température extérieure; c'est le phénomène d'effet de cheminée. Plus il y aura une différence de température entre l'intérieur

et l'extérieur du bâtiment, plus l'infiltration sera importante si elle n'est pas contrôlée et plus il faudra chauffer cet air frais. Dans le présent cas, l'absence de système sophistiqué de ventilation pour limiter l'infiltration a été supposée pour ainsi faciliter les simulations. Pour visualiser ce phénomène (voir la Figure 3.28 plus loin), celle-ci montre l'énergie nécessaire en chauffage au niveau de l'infiltration seulement pour les bâtiments des années 1960 (bâtiment peu étanche à l'air).

La Figure 3.26 montre également l'amélioration de la technologie au niveau de la construction des bâtiments permettant de limiter de façon considérable les pertes thermiques. Toutes les demandes en chauffage ont diminué pour chacune des villes, dans la plupart des cas selon une différence de plus de 50 % de la valeur des années 1960. Les standards locaux de construction montrent les efforts importants au niveau de la consommation énergétique en Europe particulièrement. La France et la Suède doivent respecter des codes de construction sévères de nos jours, ce qui exige des éléments de performances thermiques minimum élevés, contrairement au Canada où les codes de construction en matière d'efficacité énergétique sont encore peu restrictifs. La norme Novoclimat régie par le gouvernement du Québec qui est utilisée comme référence dans ce travail (pour les bâtiments des années 2000) est respectée sur une base volontaire par les constructeurs. Ceci explique la différence en consommation énergétique entre Stockholm et Montréal qui présentent sensiblement le même climat.

Pour mieux visualiser les résultats, la Figure 3.27 présente les résultats de la consommation énergétique nécessaire pour le chauffage divisé par la surface totale habitable de chacun des scénarios. La consommation par unité de surface est souvent utilisée pour donner un ordre de grandeur de la performance des habitations.

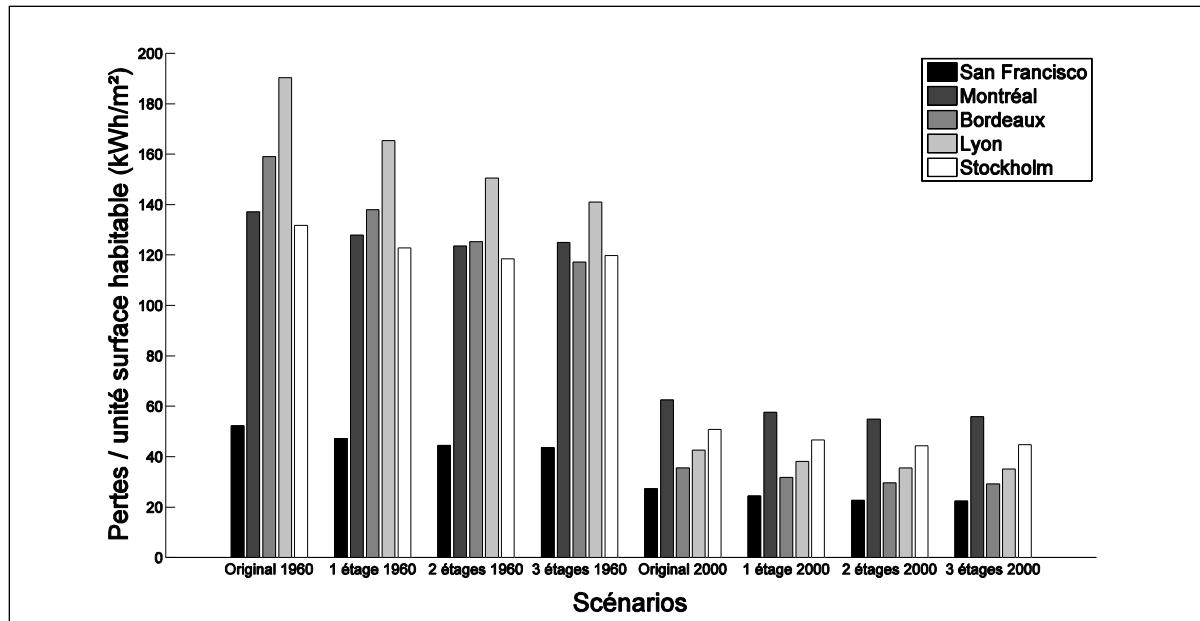


Figure 3.27 Demande énergétique annuelle en chauffage par surface habitable pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon l'année de construction des bâtiments et les codes de construction locaux de l'époque (1960 et 2000)

La densification des quartiers crée davantage de surface habitable ce qui explique la diminution de la consommation énergétique par unité de surface habitable à chacun des scénarios. En d'autres mots, l'accroissement de la surface augmente plus rapidement que la demande en chauffage. Il est important de noter ici que la mitoyenneté des bâtiments n'est pas prise en compte, mais qu'elle a sans doute un impact sur la consommation. La Figure 3.27 met en évidence la performance énergétique médiocre des bâtiments français dans les années 1960, avec par exemple une demande de 190 kWh/m<sup>2</sup> pour les blocs situés dans la ville de Lyon. De plus, cette valeur ne tient compte que du chauffage des bâtiments, de l'utilisation des électroménagers, de l'éclairage et d'autres appareils qui feront augmenter le bilan. La Figure 3.28 montre comment la relation de l'infiltration est reliée avec la température extérieure. En effet, les villes de Montréal et Stockholm, qui présentent les climats les plus froids, montrent les plus fortes déperditions par infiltration.

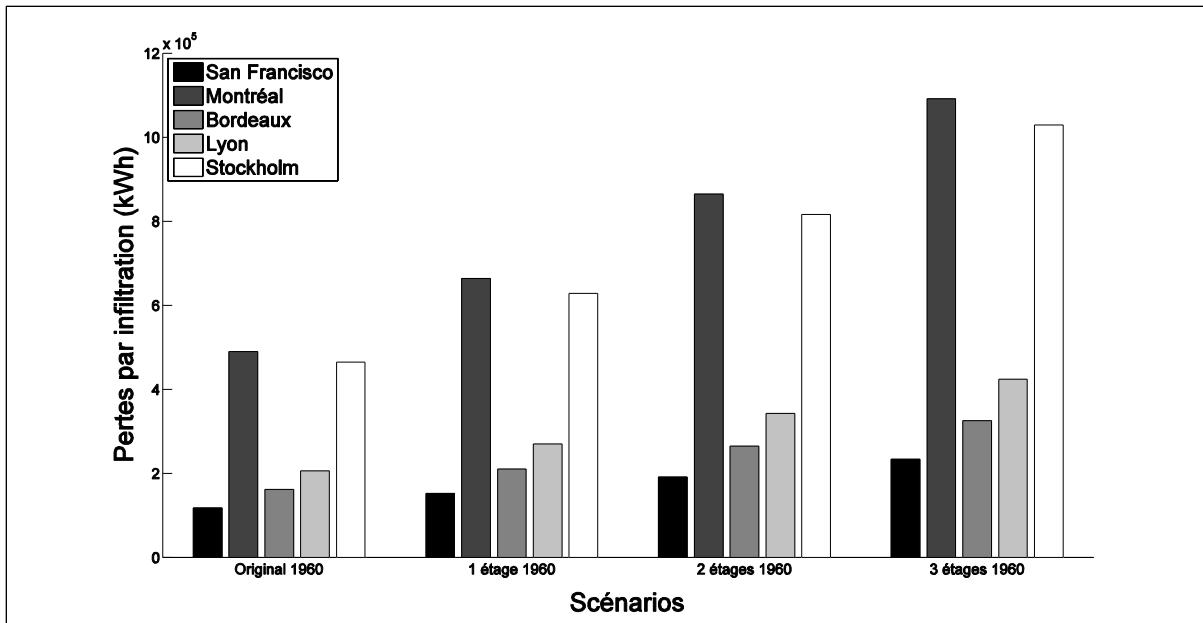


Figure 3.28 Demande énergétique pour combler les pertes d'énergie par infiltration pour les villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon les bâtiments des années 1960 et les codes de construction locaux de l'époque

### 3.6.2 Énergie solaire passive et demande énergétique

À tout moment de l'année, l'énergie émise par le soleil permet de réduire la demande énergétique. C'est ce qui est étudié dans le présent travail afin de quantifier les effets du solaire passif pour deux blocs de bâtiments situés dans un quartier urbain. Premièrement, lorsque le rayonnement solaire direct et diffus atteint la surface d'une fenêtre, une portion de l'énergie pénètre à l'intérieur du bâtiment et le reste est réfléchi au contexte environnemental. Il existe donc plusieurs modèles de fenêtres qui présentent des propriétés différentes quant à la portion d'énergie solaire que la fenêtre permettra de récupérer. Aux États-Unis, ce facteur est appelé le *Solar Heat Gain Ratio (SHGR)*, le facteur de gain solaire (FDGS). Il est fréquemment utilisé par les fabricants de fenêtres. Il ne faut pas le confondre avec les facteurs d'émissivité qui sont quant à eux utilisés pour démontrer comment limiter les pertes au travers la fenêtre qui se traduit par le phénomène de radiation. Plus le FDGS sera élevé, plus l'énergie solaire pourra passer au travers les vitrages. Le Tableau 3.10 présente les FDGS utilisés dans le présent travail.

Tableau 3.10 Facteur de gain solaire des vitrages utilisé en fonction des époques de construction pour l'ensemble des villes à l'étude (données tirées de l'ASHRAE, 2010)

Époque de construction des deux blocs	FDGS
1960 : <i>vitrage double première génération</i>	0,41
2000 : <i>vitrage double à faible émissivité</i>	0,70
Futur (2025 et +) : <i>fenêtres intelligentes</i>	0,80

Le vitrage double a été utilisé dans le cas des années 1960 et 2000 malgré le fait de l'arrivée de vitrage triple à faible émissivité qui permet moins de gains solaires à cause de l'ajout de couches de verre. Le vitrage simple clair des années 1960, qui permet des gains solaires élevés ( $FDGS > 0,80$ ), a été négligé en raison de ses piètres performances isolantes. De plus, il faut tenir compte de la surface des fenêtres tant pour les pertes thermiques que pour les gains solaires. Tel qu'énuméré précédemment, pour la section suivante 3.6.2, toutes les fenêtres présentent des dimensions de 1,5 mètre de hauteur par 1,3 mètre de largeur. Pour les résultats suivants, l'orientation à  $180^\circ$  par rapport à l'orientation initiale a été choisie afin de maximiser l'irradiation solaire sur les deux blocs à l'étude comme au début de la section *Résultats*.

La Figure 3.29 montre les résultats comparatifs entre l'énergie demandée en chauffage et les gains solaires pour la ville de Montréal selon une orientation de  $180^\circ$  par rapport à l'axe initial. En analysant la Figure 3.29, il est vite établi que les gains solaires pour des bâtiments construits dans les années 1960 à Montréal n'ont pas d'impact important pour palier à la demande en chauffage. Toutefois, le solaire passif devient plus avantageux pour les bâtiments récents où le rayonnement solaire peut avoir un impact réel sur la consommation du bâtiment. Pour mieux comprendre, il faut analyser la différence entre la demande énergétique et les gains solaires passifs. Plus la différence entre les deux sera faible, plus un groupe de bâtiments sera performant vis-à-vis le gain dû au rayonnement solaire et, conséquemment, sur sa demande énergétique.

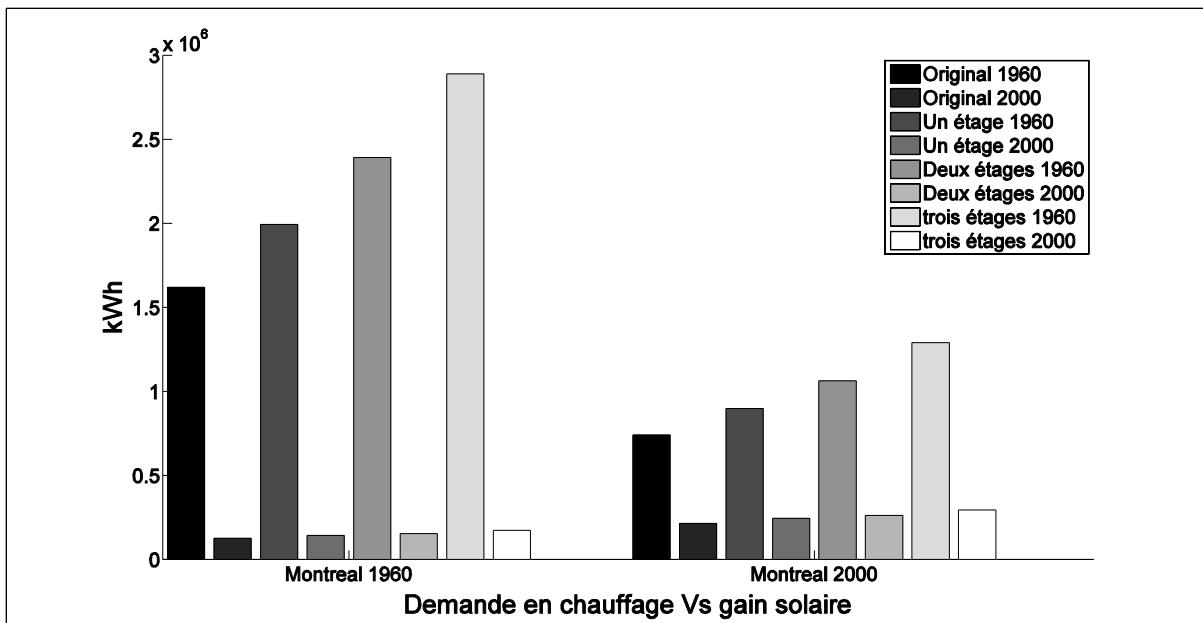


Figure 3.29 Énergie nécessaire pour le chauffage (à gauche) en comparaison avec les gains solaires passifs effectifs (à droite) pour la ville de Montréal en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon les bâtiments des années 1960 et 2000, selon une orientation de 180° par rapport à la position initiale

La Figure 3.30 présente quant à elle le rapport entre le rayonnement solaire passif et les besoins en chauffage pour les cinq villes à l'étude et pour les scénario original à trois étages supplémentaires.

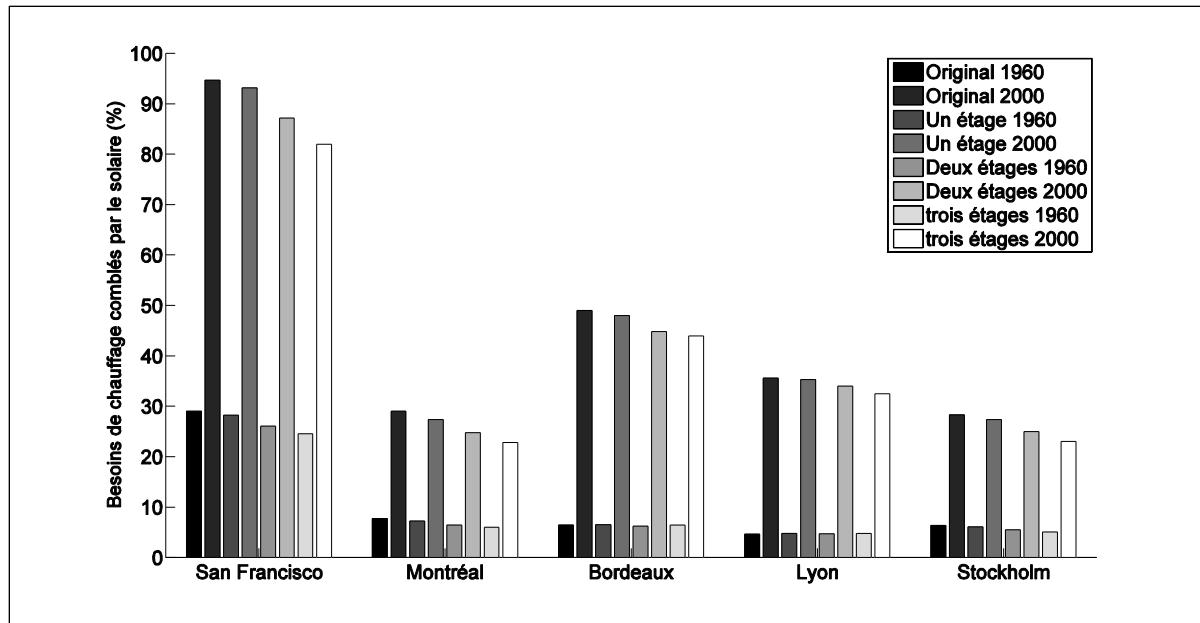


Figure 3.30 Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffe pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires selon l'année de construction des bâtiments et les codes de construction locaux de l'époque, selon une orientation de 180° par rapport à la position initiale

La Figure 3.30 montre que les bâtiments construits dans les années 1960 présentaient trop de pertes thermiques pour que l'énergie solaire puisse avoir un impact sur la facture de chauffage, mis à part la ville de San Francisco qui est avantageé par son climat doux. Ceci est attribuable aux technologies et techniques d'isolation qui étaient moins performantes qu'aujourd'hui. L'augmentation du coût des ressources énergétiques aux cours des années a conduit à différentes innovations technologiques, à un accès plus aisément à ces technologies et, conséquemment à une isolation plus performante des bâtiments d'aujourd'hui. Pour les bâtiments récents de la ville de San Francisco le rayonnement solaire comble presque la totalité des besoins en chauffage : 94 % des besoins pourraient théoriquement être assuré par l'irradiation solaire pour le scénario original. Suivant un autre raisonnement, le tout se traduit par une faible différence entre la demande énergétique en chauffage et ces gains solaires, soit environ moins de 6 % pour le scénario original. Dans ce cas, il est possible d'assumer que les gains solaires peuvent combler presque la totalité de la demande en chauffage. Pour les villes de Montréal et de Stockholm, le solaire passif présente tout de même un poids qui se reflète

sur la facture de chauffage pour les bâtiments construits selon les standards d'aujourd'hui. Ainsi, pour le scénario original, le rapport entre les gains solaire et les pertes est de près de 29 % pour Montréal et Stockholm. Pour les deux villes françaises, l'impact est majeur, le rapport variant de 49 à 33% selon la ville et le scénario considéré.

Il est également intéressant de valider les résultats selon l'orientation initiale qui était moins avantageuse pour le solaire passif. La validation est réalisée seulement avec les bâtiments récents (2000), puisqu'il a été démontré que l'apport solaire a peu d'influence sur la consommation énergétique en chauffage pour les bâtiments des années 1960. La Figure 3.31 montre les résultats obtenus pour ces simulations.

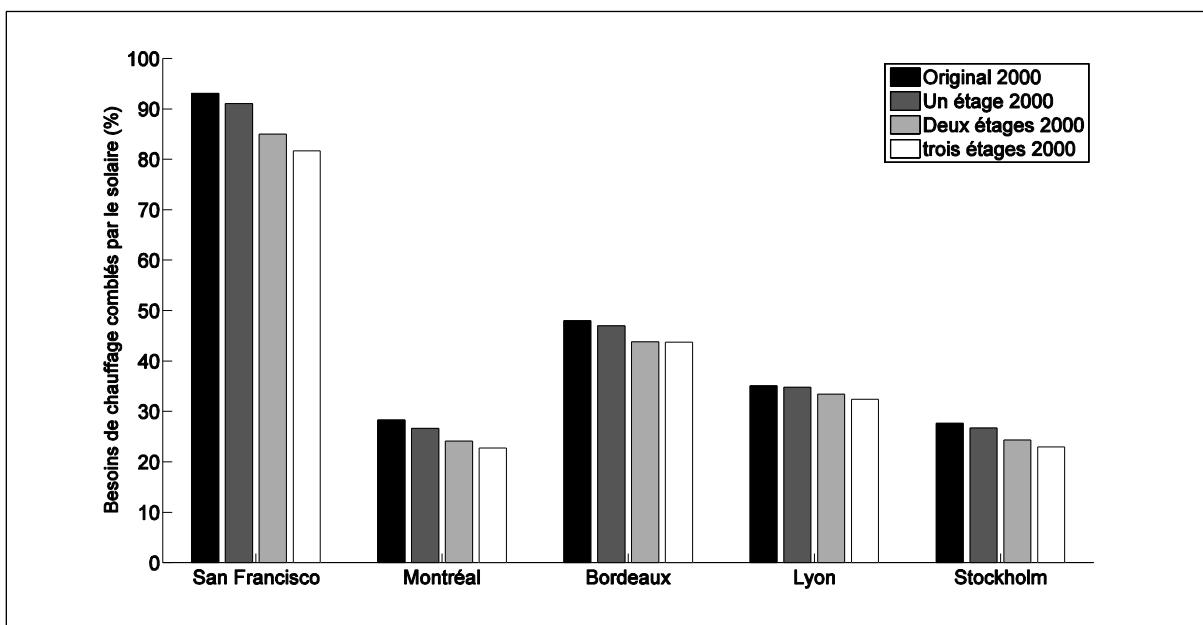


Figure 3.31 Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffe pour les cinq villes à l'étude en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires pour les constructions récentes (2000) selon l'orientation initiale

La Figure 3.31 montre des augmentations de la demande en chauffage pour l'ensemble des villes et des scénarios lors du positionnement des deux blocs à l'étude à leur orientation initiale, orientation qui avait été établie comme la moins performante pour le solaire passif.

Ceci est lié à la diminution du rayonnement solaire relative à l'orientation qui fait alors augmenter la différence entre la demande en chauffage et le solaire passif. Toutefois, il faut noter que les augmentations sont faibles, voir négligeables pour certains cas. Pour la ville de San Francisco, le rapport entre le gain solaire et la demande en chauffage évolue par exemple de 3 % pour le scénario d'ajout de deux étages supplémentaires. Pour les villes de Montréal, de Bordeaux, de Lyon et de Stockholm, les différences sont dans la plupart des cas d'à peine 1 %. Ainsi, même si le rayonnement global est moins performant à l'orientation initiale, la fenestration sud constitue encore un excellent médium pour récupérer l'énergie solaire dans le cas des deux blocs à l'étude, étages ajoutés ou non.

### 3.6.3 Analyse des gains solaires en comparaison avec des blocs ayant des performances élevées au niveau des pertes thermiques, maison solaire passive (scénario du futur)

La présente analyse est réalisée en considérant des bâtiments isolés grâce aux innovations du futur (2025 et +). L'analyse s'inspire des propriétés des bâtiments solaires passifs existant en Suède selon les propriétés thermiques des matériaux du Tableau 3.11 et du Tableau 3.12.

Tableau 3.11 Propriétés thermiques des matériaux de construction pour les cinq villes à l'étude pour les bâtiments du futur (2025 et plus)

Composantes	Villes				
	San Francisco	Montréal	Bordeaux	Lyon	Stockholm
<b>Bâtiments futurs (2025 et plus)</b>					
Murs	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Fenêtres	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Toit	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Fondations	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Infiltration ( $A_{ul}$ )	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Mur, fenêtres et toit en $W/(m^2 \cdot K)$ ; fondation en $W/K$ ; indice d'infiltration en $cm^2/m^2$ .					

Tableau 3.12 Facteur de gain solaire des vitrages (FDGS) utilisé en fonction des bâtiments du futur pour l'ensemble des villes à l'étude (données tirées de l'ASHRAE, 2010)

Époque de construction des deux blocs	FDGS
<i>Vitrage du futur</i>	0,80

Le Tableau 3.13 montre quant à lui les demandes en chauffages pour chacune des villes en fonction des scénarios du futur pour le scénario original.

Tableau 3.13 Présentation de la demande énergétique nécessaire pour les besoins de chauffage pour les cinq villes à l'étude pour le scénario original pour les bâtiments du futur (2000 et +), *résultat en kWh*

Composantes	Villes				
	San Francisco	Montréal	Bordeaux	Lyon	Stockholm
<b>Bâtiments futurs (2025 et plus)</b>					
Murs	33 208	97 769	44 336	52 748	94 633
Fenêtres	43 962	129 431	58 694	69 831	125 280
Toit	12 251	36 068	16 356	19 459	34 911
Fondations	2 989	8 801	3 991	4 748	8 519
Infiltration ( $A_{ul}$ )	14 714	61 273	20 238	25 742	58 079
Total	114 335	354 575	153 243	183 984	341 975

L'analyse est faite pour les villes de Montréal et Stockholm seulement puisque les propriétés thermiques utilisées sont trop isolantes et feraient en sorte que les blocs de bâtiments seraient en gain d'énergie pour les villes de San Francisco, Bordeaux et Lyon. À ce stade, trop d'isolation pour des blocs dans des régions au climat plus clément créerait un effet inverse et donc des problèmes de surchauffe qui augmenteraient la demande en climatisation en période estivale. La Figure 3.32 montre le rapport entre les gains solaires et la demande en chauffage pour les blocs lorsqu'ils sont situés dans les villes de Montréal et Stockholm et construit à l'aide de matériaux qui seront performants dans le futur.

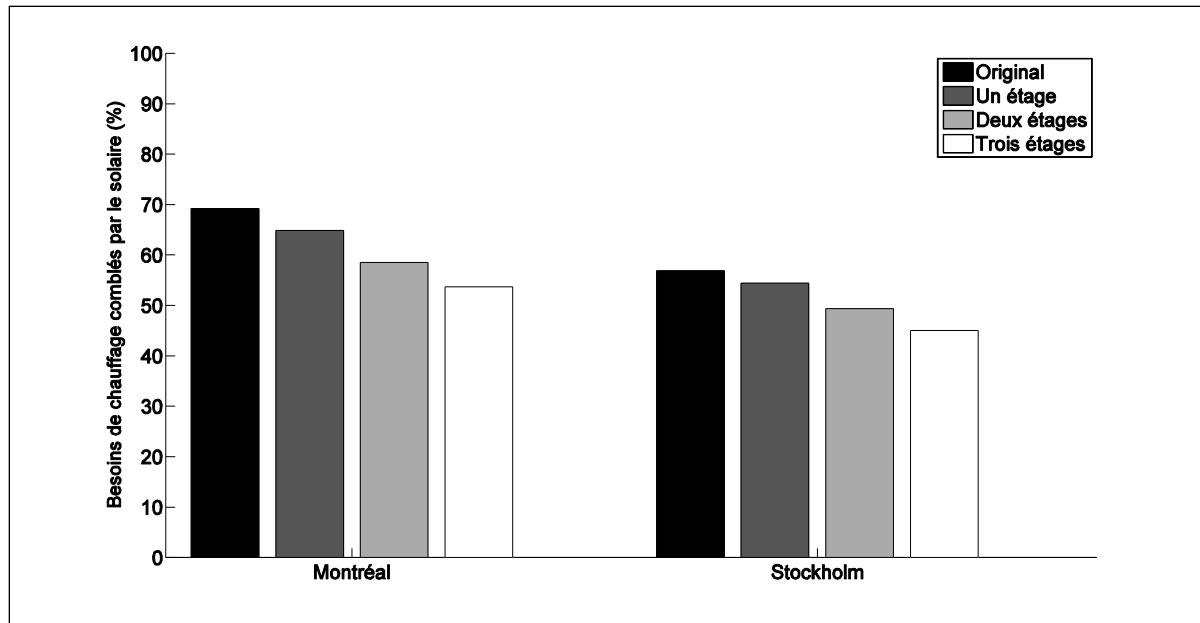


Figure 3.32 Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffage pour les blocs à Montréal et Stockholm en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires pour les constructions du futur (2025 et +) selon l'orientation optimale à 180° par rapport à la position initiale

La Figure 3.32 met ainsi en évidence l'impact de l'énergie solaire passive sur la consommation énergétique en chauffage lorsque la construction des bâtiments est faite avec des matériaux performants. La comparaison des résultats avec la Figure 3.30, montre que le ratio des gains solaires a considérablement augmenté pour tous les scénarios. Les constructions des années 2000 montrent un pourcentage des besoins comblés par le solaire de 30 % alors que, pour des matériaux du futur pour le scénario original à Montréal, le rapport augmente à près de 70 %. Une isolation performante permet donc de réduire de façon considérable la facture énergétique et c'est alors dans ces conditions que le solaire passif devient plus avantageux.

Tout comme à la Figure 3.31, la simulation énergétique pour les constructions du futur est effectuée avec l'orientation non optimale, c'est à dire à l'orientation à 90° par rapport à la position initiale, et ce, afin de valider que l'orientation peut avoir un effet important ou non sur la consommation énergétique du quartier pour des fins de chauffage. (Figure 3.33)

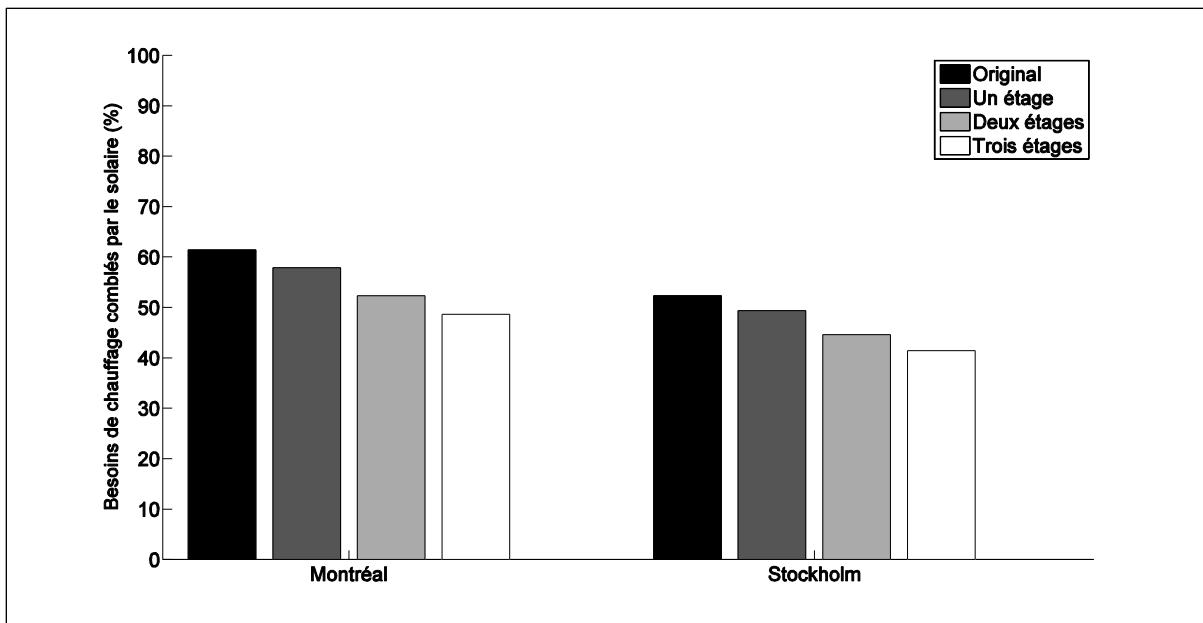


Figure 3.33 Différence entre la demande énergétique en chauffage et les gains solaires passifs pendant la période de chauffe pour les blocs à Montréal et Stockholm en fonction des scénarios original, un, deux et trois étages supplémentaires pour les constructions du futur (2025 et +) selon l'orientation de  $90^\circ$

L'analyse de la Figure 3.33 montre que, comme pour le cas des bâtiments construits dans les années 2000, l'orientation du quartier a peu d'influence sur la demande énergétique en chauffage. La comparaison de la Figure 3.32 et la Figure 3.33, illustre que le rapport passe de 49 à 46 % pour la ville de Stockholm pour le scénario de l'ajout de deux étages sur le contexte existant. Cette variation est quasi négligeable. Ceci peut être explicable par le nombre de fenêtres sur les façades Est et Ouest qui continuent quand même d'optimiser l'irradiation solaire le matin et l'après-midi pour le cas d'une rotation à  $90^\circ$ . Sud qui est le même, peu importe l'orientation du quartier. La Figure 3.2 à la section 3.3.1 montrait que la variation du potentiel solaire total variait de moins de 5 % à  $180^\circ$  et d'environ 15 % à  $90^\circ$ . Cette variation est donc négligeable pour la demande énergétique pour les scénarios des bâtiments du futur lorsqu'ils sont placés dans les villes de Montréal et Stockholm. Par contre la conclusion serait probablement différente si le nombre de fenêtres variait entre la façade nord et sud. Pour le cas de Montréal, les besoins comblés par le solaire sont un peu plus élevés à l'orientation optimale par rapport à l'orientation à  $90^\circ$  pour le scénario original, les

gains solaire font passer les besoins en chauffage de 60 à 69%. Ceci s'explique par la puissance du rayonnement de Montréal qui est plus élevé qu'à Stockholm.

## CHAPITRE 4

### DISCUSSIONS

Le présent chapitre présente la portée des résultats par rapport aux enjeux énergétique à l'échelle urbaine. Il traite aussi des limites et perspectifs se terminant sur des recommandations.

#### 4.1 Portée des résultats

Le présent travail a étudié les effets de l'irradiation solaire dans un canyon urbain. Les résultats portent sur l'irradiation solaire disponible pour l'ensemble d'un groupe de deux blocs de bâtiment dépendamment de leur orientation et de leur contexte géométrique. Les scénarios de densification de la ville ont montré qu'il est possible d'augmenter de façon considérable la quantité totale de gains solaire pour des bâtiments en ajoutant des surfaces vitrées. Les résultats montrent aussi que la densification d'un quartier crée des masques et peu cependant limiter le gisement solaire disponible. En ajoutant trois étages supplémentaires sur le quartier original une baisse considérable de l'irradiation solaire disponible par mètre carré de surface vitrée est notée. Ainsi le quartier original devient le plus avantage par le critère d'évaluation de l'irradiation solaire par mètre carré de surface vitrée. Les scénarios de densification de la ville amène aussi un critère d'évaluation qui devrait être étudié, la disponibilité des gains solaire au niveau du premier étage. La densification fait chuter le potentiel solaire de façon considérable lorsque des étages sont ajoutés au-dessus d'un premier étage. Enfin le travail porte sur la compréhension des gains solaire passifs vis-à-vis la demande en chauffage. Les résultats illustrent que le solaire passif n'est pas viable pour les bâtiments des années 1960 aménagés dans un canyon urbain à cause de leur isolation peu performante. Cependant, la portée de ses simulations montre que les gains solaires deviennent importants pour des villes comme Montréal et Stockholm lorsqu'on étudie des bâtiments construit selon les standards d'aujourd'hui.

## 4.2 Le modèle géométrique

Bien qu'à première vue le modèle utilisé semble complexe, quelques simplifications ont dû être effectuées afin d'être en mesure de modéliser l'énergie solaire qui entrait sur les façades du quartier. Ces simplifications ont ainsi permis de réduire le temps de simulation. À titre de référence, une simulation de 19 rotations nécessitait une durée moyenne de cinq heures par ville. Le modèle a été principalement conçu de surfaces planes et droites. Les fenêtres sont considérées comme étant positionnées directement à la surface des murs extérieurs. Dans la réalité, les fenêtres ne sont jamais directement apposées sur le mur. Le cadrage de la fenêtre fait en sorte que celle-ci est souvent renfoncée et il peut y avoir des éléments au-dessus des fenêtres qui produisent de l'ombre. Sachant que les modèles utilisés dans le cadre de la présente étude sont fonctionnels, il peut être envisageable de complexifier le quartier en ajoutant des éléments géométriques comme la construction des fenêtres par exemple. Le voisinage du canyon urbain à l'étude a aussi été simplifié par des prismes rectangulaires pour accélérer le calcul. La complexification de ce contexte permettrait de se rapprocher de la réalité et de vérifier si l'ajout de formes complexes pourrait avoir un impact sur le gisement solaire disponible.

Tel qu'énoncé, le modèle géométrique utilisé se retrouve à mi-chemin entre la réalité et le modèle élaboré de toute pièce. En travaillant ainsi, un cas test réaliste a pu être créé. Ce cas test a été analysé sous différentes perspectives afin de démontrer son fonctionnement. Il serait par contre possible lors de travaux futurs de modifier la géométrie de ce modèle, soit en ajoutant d'avantage de texture ou bien en changeant le positionnement des fenêtres afin d'obtenir des résultats plus réalistes.

Un autre paramètre vient influencer les résultats, soit la fenestration uniforme sur les murs extérieurs. L'agencement de cette surface vitrée a été établi à 20 % par rapport à la façade tandis que l'espacement entre les fenêtres a été considéré comme constant, tant sur la largeur qu'au niveau des étages. Dans la réalité, l'emplacement des fenêtres varie d'un bâtiment à l'autre. En construisant ainsi le modèle, il serait alors possible de mettre en évidence

différents effets comme, par exemple, l'impact d'une fenestration plus importante sur la façade sud que nord. Par ailleurs, l'orientation des bâtiments peut également avoir un impact différent selon la situation considérée. Dans le cas de bâtiments à basse consommation énergétique, le fait qu'ils soient dans une orientation non optimale pourrait avoir une conséquence importante sur la demande en chauffage de ceux-ci. Il demeure ainsi important de bien analyser le contexte d'application pour que les efforts de modélisation soient investis adéquatement.

### 4.3 Le modèle solaire

Le modèle solaire de Perez (1987) qui a été utilisé permet de quantifier l'énergie solaire directe et diffuse qui est émise sur des surfaces particulières du quartier, soit les fenêtres dans le cas présent. Elles ont été représentées par un seul point et l'hypothèse initiale montre que l'énergie solaire y était uniformément distribuée. Il existe d'autres modèles solaires qui tiennent compte de la luminosité du ciel. Cette luminosité est ainsi calculée grâce à un maillage du ciel. Bien qu'en thermique du bâtiment le modèle de Perez modifié est le plus utilisé, la notion de luminosité devient intéressante d'autres éléments de calcul viennent s'ajouter dans le modèle tel que l'éclairage naturel des bâtiments.

Les éléments de radiosité (réflexion de l'énergie solaire dans le contexte urbain) ont été négligés. Il est difficile d'incorporer cet élément dans l'étude, car il faudrait définir les propriétés de tous les matériaux utilisés dans le quartier : murs en briques, pavage, toiture en bardeaux, végétaux, etc. De nombreuses hypothèses devraient être faites afin de pouvoir modéliser la radiosité. Toutefois, le fait d'avoir créé un cas test n'empêche pas d'ajouter une plateforme d'étude qui pourrait déterminer les effets de la radiosité. Il faudrait alors ajouter des paramètres qui tiennent compte de la réflexion solaire et bien choisir les matériaux de construction des bâtiments et de la rue, en plus de bien définir les coefficients de réflexion solaire de chaque matériau. Cela nécessite un travail de recherche significatif qui dépassait largement le cadre de la présente étude.

#### **4.4 Saison de modélisation et position sur le globe terrestre**

Toutes les simulations ont été effectuées pendant la période de chauffe. Il pourrait être intéressant d'effectuer le même travail pendant la période estivale afin de valider les effets de l'irradiation solaire en été sur le confort des habitants. Le soleil ayant un trajet solaire plus élevé en été mettrait possiblement en évidence la nécessité d'ajouter des éléments comme des brise-soleil au-dessus des fenêtres afin de limiter les besoins en climatisation. Un travail pourrait être fait pour les cinq villes à l'étude afin de bien positionner les brise-soleil, de manière à ce que ceux-ci ne nuisent pas aux gains solaires en hiver alors que le soleil est plus bas dans le ciel. Il serait possible de concevoir ces brise-soleil et de les incorporer à ce présent travail en modifiant le fichier de géométrie.

De plus, avec le modèle existant, il est possible de se déplacer dans n'importe quelle ville du monde, du moment qu'il existe un fichier météo pour modéliser le rayonnement solaire sur le quartier. Ceci laisse à la communauté scientifique un outil qu'elle pourra utiliser pour procéder à d'autres études.

#### **4.5 Modélisation de la demande énergétique pour le chauffage**

La méthode statique a été choisie dans le présent travail afin de donner un ordre de grandeur du poids de l'énergie solaire passive dans un bilan thermique pour le chauffage d'un groupe de bâtiments. Néanmoins, il existe de nombreux outils pour effectuer des simulations dynamique de la demande en chauffage. La combinaison de ces simulations dynamiques avec les résultats de l'irradiation solaire serait intéressante à étudier afin de valider si le poids de l'énergie solaire pouvait varier significativement à comparer à une simulation statique comme celle des degrés-jours utilisés dans le présent travail. La simulation dynamique permettrait de quantifier les phénomènes d'inertie des bâtiments et il serait alors possible de modéliser les effets de la mitoyenneté des bâtiments et des apports internes (éclairages, électroménagers, etc.). L'ajout de ces phénomènes rendrait l'énergie solaire encore plus intéressante puisque ces éléments peuvent abaisser le bilan de l'énergie nécessaire pour le chauffage des habitations. De plus, il serait intéressant d'analyser le comportement des

usagers. Par exemple, une journée type pourrait être simulée et alors réaliser un bilan énergétique. Le solstice d'hiver en décembre constitue un choix logique puisque cette journée représente souvent l'une des journées les plus froides de l'année avec le moins d'heures d'ensoleillement, ce qui en fait une journée critique de l'année. L'étude de cette journée pourrait montrer qu'un groupe de bâtiments bien orientés et construits pourrait nécessiter un besoin en chauffage de nuit équivalent au rayonnement solaire de la journée. Dans ce cas, des stratégies de stockage énergétique pourraient être étudiées.

#### 4.6 Retombés

Grace aux scénarios de densification effectués, le présent travail soulève un élément important de réflexion aux planificateurs urbains. À la lumière des résultats obtenus il est équitable de se poser la question suivante : Est-ce qu'il y a une densité optimale pour une ville? Les résultats illustrent que la densification fait augmenter la quantité des gains en solaire passif disponible. En évaluant ce paramètre il pourrait être intéressant de densifier une ville en hauteur en maximisant le l'ajout surface vitrée sur des étages. Cependant, il a été montré que ce gain apporte aussi un lot de conséquences à évaluer. En effet, selon les résultats, la densification intensive peut faire réduire la quantité des gains solaire reçue au premier étage d'un canyon urbain par un facteur de près de trois. Un élément ressort, densification planifiée devrait viser à réduire les impacts sur la population vivant déjà dans un milieu urbanisé. Dans un même genre d'idée, l'ajout d'une tour d'une vingtaine d'étages ne devrait pas se faire tout prêt d'un parc. Socialement, il n'est pas équitable qu'une ville accepte de construire une tour seulement sur le principe de la densification et en montrant que cette dernière est performante au niveau du solaire passif à cause de la qualité de sa construction et son orientation.

Le travail laisse aussi un outil disponible pour quantifier l'énergie solaire à un endroit précis sur la terre. L'étude s'est effectuée dans les villes de San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm mais pourrait facilement être transporté ailleurs sur la planète. Dans ce travail se sont les fenêtres qui ont été maillé mais à l'aide du programme il aurait été possible

de mailler d'autre élément, par exemple le sol et ainsi faire une étude au niveau de des îlots de chaleurs. Une autre évaluation pourrait porter sur la génération ou l'accumulation d'énergie en milieu urbain à l'aide de panneaux photovoltaïques par exemple.

## CONCLUSION

L'accroissement de la population en milieu urbain dans les décennies années à venir constituera un enjeu majeur pour les décideurs gouvernementaux afin d'en limiter les impacts négatifs, notamment en prônant une saine gestion de la demande énergétique qui mettra en avant des solutions novatrices, au lieu d'utiliser les méthodes actuellement disponibles qui sont moins performantes au niveau environnemental. Un levier disponible consiste à utiliser des énergies renouvelables pour limiter la production de gaz à effet de serre. Les villes consomment près de 60 % de l'énergie dans le monde. L'énergie solaire passive peut jouer un rôle important dans cette proportion si la construction de bâtiments est faite en conséquence et que ces bâtiments sont bien orientés. L'orientation des nouveaux quartiers est donc à considérer à cause de la forme géométrique qui a un impact sur le gisement solaire. Si un quartier basé sur un canyon urbain doit être créé, il faudra prévoir son orientation optimale avec une fenestration en majorité sur les façades sud. La géométrie des bâtiments aura un impact sur l'énergie solaire passive disponible en fonction de l'orientation sélectionnée.

Le présent travail de recherche visait à quantifier l'apport des gains solaires passifs sur un quartier urbain dense et à valider le poids de ces gains sur la demande en chauffage passif en localisant le quartier dans différents climats (villes) et sous différentes technologies de construction.

Pour réaliser cette étude d'impact des formes sur le potentiel solaire d'un canyon urbain, un relevé des quartiers existants de cinq villes (Montréal, Bordeaux, Lyon, Stockholm et San Francisco) a été fait. Trois de ces villes sont situées pratiquement sur la même latitude géographique. À partir de ce relevé, un quartier a été créé comme banc d'essai. Ce quartier, modifiable par l'ajout d'étages ou de tours pour le densifier, a été testé et calibré en réduisant le tout à de simples blocs. Le modèle solaire de Perez (1987) a été utilisé pour quantifier le rayonnement solaire diffus provenant du ciel sur les façades vitrées des bâtiments en liant des données météorologiques associées à chaque ville. Une analyse des besoins énergétiques en

chauffage a été effectuée à l'aide de la méthode suggérée par l'ASHRAE au chapitre 17 de l'édition 2007 fondamental (*Residential heat balance*)

Les simulations réalisées ont montré que deux blocs de bâtiments de deux à quatre étages verront leur potentiel solaire total augmenter entre 3 et 5 % selon leur latitude géographique dans la gamme allant de San Francisco à Stockholm lorsqu'une rotation de 180 degrés est effectuée par rapport à l'orientation plein sud. L'ordre de grandeur sur ce potentiel solaire devient un peu plus faible lorsque le quartier est densifié par l'augmentation du nombre d'étages, par exemple par l'ajout de trois étages supplémentaires (total de 5 à 7 étages). En effet, l'orientation du quartier aura un faible impact lorsque celui-ci est pivoté de 180° et ce indépendamment de la latitude étudiée. Une différence moyenne de 0,4 % est notée pour les cinq villes pour le scénario à trois étages supplémentaires. Une orientation à 90° est-ouest est généralement défavorable, car elle ne permet pas de maximiser l'énergie solaire disponible puisque la majorité de la portion vitrée se retrouve sur les façades est et ouest. Pour le scénario de densification par ajout de trois étages supplémentaires, la différence du rayonnement solaire passe de – 15 à – 8 % pour une rotation de 90° par rapport à l'orientation initiale en étudiant la gamme de latitude allant de San Francisco à Stockholm. Pour ce qui est de la densification par des tours pour une rotation de 180 degrés par rapport à l'origine, une augmentation de 8 % à 5 % est notée pour les villes allant de San Francisco à Stockholm à cause de la position favorable des tours.

Le bilan total de l'irradiation solaire a été étudié selon deux approches dans le présent travail. Premièrement, un bilan total a été effectué pour l'ensemble des surfaces vitrées des deux blocs. De cette façon, les résultats ont montré que le quartier qui reçoit la plus grande quantité d'énergie (309 000 kWh) est celui de densification par ajout de trois étages supplémentaires à cause de sa quantité importante de fenêtres. Le moins performant est le quartier original (avant densification) avec 220 000 kWh, soit le scénario comportant le moins de fenêtres et comportant de deux à trois étages. En second lieu, le bilan énergétique solaire a été ramené par la surface des fenêtres disponible. Une inversion des classements a alors été notée. Ainsi, le quartier original s'est avéré le plus performant avec 309 kWh

d'irradiation solaire/m<sup>2</sup> de fenestration en raison de la forme des blocs qui crée moins d'ombrage (masque) que le quartier densifié par trois étages supplémentaires. Ce quartier densifié de trois étages supplémentaires montre quant à lui une irradiation solaire de 200 kWh/m<sup>2</sup> de fenestration, soit une diminution de 33 % par rapport au quartier original. Le quartier des tours quant à lui présente une irradiation totale de 270 000 kWh et lorsque celle-ci est ramenée au rapport de surface vitré la valeur s'établit à 279 kWh/m<sup>2</sup>.

Les résultats ont également montré que l'ajout d'étages peut avoir un impact négatif significatif pour les habitants qui vivent aux premiers étages. Les gens vivant dans ces étages sont ceux qui reçoivent le moins d'énergie de sorte que, en ajoutant des étages de manière consécutive, leur gisement solaire diminue jusqu'à près des deux tiers (65 %) selon l'orientation solaire. Si une rotation de 180 degrés est effectuée par rapport à l'origine, alors le potentiel solaire diminuera de 75 % pour la façade qui se trouvait du côté sud à l'origine. Il est donc primordial de trouver le juste milieu dans le mode de densification en portant une attention particulière sur le gisement solaire des habitants au premier étage.

L'étude a montré que les anciens bâtiments qui sont peu isolés ne constituent pas de bons candidats pour le solaire passif. Cette conclusion prévaut pour toutes les villes à l'étude dans ce travail, à l'exception des blocs de bâtiments localisés à San Francisco qui sont avantagés par le climat doux. La portion solaire pour le chauffage des bâtiments qui datent des années 1960 représente une faible contribution pour les villes de Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. En moyenne, 8 % des besoins en chauffage sont comblés par l'énergie solaire passive. Par contre, les bâtiments construits de nos jours présentent des pertes thermiques beaucoup plus faibles, ce qui fait en sorte que le solaire passif représente un apport significatif pour le chauffage. Il est en effet envisageable que la portion solaire représente 50 à 60 % de la demande en chauffage pour la ville de Bordeaux par exemple. Pour une ville de même latitude que Bordeaux, comme Montréal, le solaire passif peut couvrir jusqu'à 28 % des besoins en chauffages pour un bloc de bâtiments construits selon les normes d'aujourd'hui.

Quant aux bâtiments du futur, les travaux ont montré que ceux-ci seront nettement avantageés en raison de leurs faibles pertes thermiques. Les résultats montrent la possibilité de créer des maisons passives autonomes pour les villes de San Francisco, Bordeaux et Lyon. Il faudra alors simplement considérer les besoins en confort au niveau de la saison estivale pour la climatisation. Pour des villes comme Montréal et Stockholm où le climat hivernal est plus rigoureux, le solaire passif ne pourra combler l'ensemble des besoins en chauffage. Toutefois, l'apport solaire pourrait tout de même combler entre 50 et 70 % de la demande en chauffage, selon l'orientation du canyon urbain (plein sud ou rotation de 90°).

Dans le présent travail, l'irradiation provenant du rayonnement solaire direct et du diffus a été étudiée de façon à quantifier l'énergie passive entrant par la fenestration du canyon urbain. Des éléments restent toutefois encore à étudier. La radiosité du contexte devra en effet être analysée afin de connaître si son impact sur le bilan énergétique du quartier est négligeable ou non. Le rayonnement solaire pendant la saison estivale devrait également être étudié en fonction des besoins de climatisation. De plus, un calcul dynamique de la demande énergétique devrait être associé au modèle afin de comparer les résultats obtenus à l'aide de la méthode calcul statique.

Enfin ce travail laisse à la communauté scientifique une encyclopédie de l'ensoleillement en période hivernal pour les villes de San Francisco, Montréal, Bordeaux, Lyon et Stockholm. La même méthode pourrait être utilisée pour l'évaluation des apports solaire dans d'autre ville dans le monde. De plus le travail porte une réflexion au niveau de la densification d'une ville.

## ANNEXE I

### CODE MATLAB GÉOMÉTRIE

```
% Le calcul est effectué entre les numéros de jour définis par 'DayRange'  
% entre les heures définies par 'HourRange'. Si les heures sont en dehors de  
% la période de jour, la journée est ajustée avec l'heure du lever et du  
% couché de soleil. Le calcul est réalisé avec un pas de temps de  
% 'TimeStep'  
  
% La variable 'PtDensity' caractérise la densité approchée de points dans  
% les deux directions de chaque surface.
```

#### %DONNEES GEOMETRIQUES

```
% Points du contexte urbain
```

```
Pt=[0 0 0 %## Ground level *****BLOCK 2 Sud  
12 0 0  
18 0 0  
24 0 0  
30 0 0 %5  
36 0 0  
43.5 0 0  
51 0 0  
57 0 0  
63 0 0 %--10  
93 0 0  
99 0 0  
106.5 0 0  
114 0 0
```

120 0 0 %15  
135 0 0  
0 15 0 %\*\*\*\*\*BLOCK 2 Nord  
12 15 0  
12 12 0  
18 12 0 %--20  
24 12 0  
24 15 0  
30 15 0  
36 15 0  
43.5 15 0 %25  
51 15 0  
51 12 0  
57 12 0  
63 12 0  
63 15 0 %--30  
93 15 0  
99 15 0  
99 12 0  
106.5 12 0  
114 12 0 %35  
114 15 0  
120 15 0  
135 15 0  
0 30 0 %\*\*\*\*\*BLOCK 1 Sud  
15 30 0 %--40  
21 30 0  
21 33 0  
28.5 33 0  
36 33 0

36 30 0 %45  
43.5 30 0  
43.5 33 0  
49.5 33 0  
55.5 33 0  
55.5 30 0 %--50  
67.5 30 0  
73.5 30 0  
79.5 30 0  
79.5 33 0  
85.5 33 0 %55  
91.5 33 0  
91.5 30 0  
99 30 0  
99 33 0  
106.5 33 0 %--60  
114 33 0  
114 30 0  
120 30 0  
127.5 30 0  
135 30 0 %65  
0 45 0 %\*\*\*\*\*BLOCK 1 Nord  
15 45 0  
21 45 0  
28.5 45 0  
36 45 0 %--70  
43.5 45 0  
49.5 45 0  
55.5 45 0  
67.5 45 0

73.5 45 0 %75  
79.5 45 0  
85.5 45 0  
91.5 45 0  
99 45 0  
106.5 45 0 %--80  
114 45 0  
120 45 0  
127.5 45 0  
135 45 0  
0 0 13.5 % 85 ## Building level \*\*\*\*\*BLOCK 2 Sud  
12 0 13.5  
12 0 10.5  
18 0 10.5  
24 0 10.5  
30 0 10.5 %--90  
36 0 10.5  
43.5 0 10.5  
43.5 0 13.5  
51 0 13.5  
51 0 7.5 %95  
57 0 7.5  
63 0 7.5  
63 0 13.5  
93 0 13.5  
93 0 10.5 %--100  
99 0 10.5  
99 0 7.5  
106.5 0 7.5  
114 0 7.5

114 0 10.5 %105  
120 0 10.5  
120 0 13.5  
135 0 13.5  
0 15 13.5 %\*\*\*\*\*BLOCK 2 Nord  
12 15 13.5 %--110  
12 12 10.5  
18 12 10.5  
24 12 10.5  
24 15 10.5  
30 15 10.5 %115  
36 15 10.5  
43.5 15 10.5  
43.5 15 13.5  
51 15 13.5  
51 12 7.5 %--120  
57 12 7.5  
63 12 7.5  
63 15 13.5  
93 15 13.5  
93 15 10.5 %125  
99 15 10.5  
99 12 7.5  
106.5 12 7.5  
114 12 7.5  
114 15 10.5 %--130  
120 15 10.5  
120 15 13.5  
135 15 13.5  
0 30 13.5 %\*\*\*\*\*BLOCK 1 Sud

15 30 13.5 %135  
15 30 10.5  
21 30 10.5  
21 33 7.5  
28.5 33 7.5  
36 33 7.5 %--140  
36 30 13.5  
43.5 30 13.5  
43.5 33 10.5  
49.5 33 10.5  
55.5 33 10.5 %145  
55.5 30 13.5  
67.5 30 13.5  
67.5 30 10.5  
73.5 30 10.5  
79.5 30 10.5 %--150  
79.5 33 7.5  
85.5 33 7.5  
91.5 33 7.5  
91.5 30 10.5  
99 30 10.5 %155  
99 33 7.5  
106.5 33 7.5  
114 33 7.5  
114 30 10.5  
120 30 10.5 %--160  
127.5 30 10.5  
135 30 10.5  
0 45 13.5 % \*\*\*\*\*BLOCK 1 Nord  
15 45 13.5

15 45 10.5 %165  
21 45 10.5  
21 45 7.5  
28.5 45 7.5  
36 45 7.5  
36 45 13.5 %--170  
43.5 45 13.5  
43.5 45 10.5  
49.5 45 10.5  
55.5 45 10.5  
55.5 45 13.5 %175  
67.5 45 13.5  
67.5 45 10.5  
73.5 45 10.5  
79.5 45 10.5  
79.5 45 7.5 %--180  
85.5 45 7.5  
91.5 45 7.5  
91.5 45 10.5  
99 45 10.5  
99 45 7.5 %185  
106.5 45 7.5  
114 45 7.5  
114 45 10.5  
120 45 10.5  
127.5 45 10.5 %--190  
135 45 10.5  
-12 -57 0 %### Contexte  
147 -57 0  
-147 -12 0

-12 -12 0 %195

0 -12 0

135 -12 0

147 -12 0

282 -12 0

-12 0 0 %--200

147 0 0

-12 45 0

147 45 0

-147 57 0

-12 57 0 %205

0 57 0

135 57 0

147 57 0

282 57 0

-12 102 0 %--210

147 102 0

-12 -57 10.5

147 -57 10.5

-147 -12 10.5

-12 -12 10.5 %215

0 -12 10.5

135 -12 10.5

147 -12 10.5

282 -12 10.5

-12 0 10.5 %--220

147 0 10.5

-12 45 10.5

147 45 10.5

-147 57 10.5

-12 57 10.5 %225  
0 57 10.5  
135 57 10.5  
147 57 10.5  
282 57 10.5  
-12 102 10.5 %--230  
147 102 10.5];

% Connectivité des plans du contexte urbain (avec PtFixe)

Cofac=[1 2 86 85

2 3 88 87  
3 4 89 88  
4 5 90 89  
5 6 91 90 %5  
6 7 92 91  
7 8 94 93  
8 9 96 95  
9 10 97 96  
10 11 99 98 %10  
11 12 101 100  
12 13 103 102  
13 14 104 103  
14 15 106 105  
15 16 108 107%15  
17 18 110 109  
19 20 112 111  
20 21 113 112  
22 23 115 114  
23 24 116 115%20  
24 25 117 116

25 26 119 118  
27 28 121 120  
28 29 122 121  
30 31 124 123%25  
31 32 126 125  
33 34 128 127  
34 35 129 128  
36 37 131 130  
37 38 133 132%30  
1 17 109 85  
16 38 133 108  
39 40 135 134  
40 41 137 136  
42 43 139 138%35  
43 44 140 139  
45 46 142 141  
47 48 144 143  
48 49 145 144  
50 51 147 146%40  
51 52 149 148  
52 53 150 149  
54 55 152 151  
55 56 153 152  
57 58 155 154%45  
59 60 157 156  
60 61 158 157  
62 63 160 159  
63 64 161 160  
64 65 162 161%50  
66 67 164 163

67 68 166 165  
 68 69 168 167  
 69 70 169 168  
 70 71 171 170%55  
 71 72 173 172  
 72 73 174 173  
 73 74 176 175  
 74 75 178 177  
 75 76 179 178%60  
 76 77 181 180  
 77 78 182 181  
 78 79 184 183  
 79 80 186 185  
 80 81 187 186%65  
 81 82 189 188  
 82 83 190 189  
 83 84 191 190  
 39 66 163 134];

Comask=[2 18 110 86

4 22 114 89  
 7 25 118 93  
 8 26 119 94  
 10 30 123 98  
 11 31 124 99  
 12 32 126 101  
 14 36 130 105  
 15 37 132 107  
 40 67 164 135  
 41 68 166 137

45 70 170 141  
46 71 171 142  
50 73 175 146  
51 74 176 147  
53 76 179 150  
57 78 183 154  
58 79 184 155  
62 81 188 159  
192 195 215 212  
193 198 218 213  
194 195 215 214  
196 197 217 216  
198 199 219 218  
200 202 222 220  
201 203 223 221  
204 205 225 224  
206 207 227 226  
208 209 229 228  
205 210 230 225  
208 211 231 228];

Coplot=[85 86 110 109  
87 88 112 111  
88 89 113 112  
89 90 115 114  
90 91 116 115  
91 92 117 116  
93 94 119 118  
95 96 121 120

96 97 122 121  
98 99 124 123  
100 101 126 125  
102 103 128 127  
103 104 129 128  
105 106 131 130  
107 108 133 132  
134 135 164 163  
136 137 166 165  
138 139 168 167  
139 140 169 168  
141 142 171 170  
143 144 173 172  
144 145 174 173  
146 147 176 175  
148 149 178 177  
149 150 179 178  
151 152 181 180  
152 153 182 181  
154 155 184 183  
156 157 186 185  
157 158 187 186  
159 160 189 188  
160 161 190 189  
161 162 191 190  
65 84 191 162];

Comask=[Cofac;Comask];

% Normales des plans du contexte urbain

Normal=[0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0

0 -1 0



```

0 1 0
0 1 0
0 1 0
0 1 0
0 1 0
0 1 0
0 1 0
0 1 0
0 1 0
-1 0 0 ]

```

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Administration, US Energy Information. 2013. « International Energy Outlook 2013 ». Washington: U.S. Energy Information Administration, 300 p.
- Andersson, Brandt, Wayne Place, Ronald Kammerud et M. Peter Scofield. 1985. « The impact of building orientation on residential heating and cooling ». *Energy and Buildings*, vol. 8, n° 3, p. 205-224.
- ASHRAE. 2007. *ANSI/ASHRAE STANDARD 90.2-2007*. Atlanta: ASHRAE, 50 p.
- ASHRAE. 2010. *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 224 p.
- Aste, Niccolò, et Claudio Pero. 2013. « Energy retrofit of commercial buildings: case study and applied methodology ». *Energy Efficiency*, vol. 6, n° 2, p. 407-423.
- Baker, Nick, et Koen Steemers. 1996. « LT Method 3.0 — a strategic energy-design tool for Southern Europe ». *Energy and Buildings*, vol. 23, n° 3, p. 251-256.
- Beckers, Benoit, Luis Merino et Diana Rodriguez. 2012. *Réhabilitation des Etablissements pour Personnes Agées et Facteur 4*. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 74 p.
- Becker, Benoit. 2012. *Solar Energy at Urban Scale*. 1er. London : ISTE Ltd. 363 p.
- Canada, Gouvernement du. 2013. « Lignes directrices pour l'adaptation du Code national de l'énergie pour les bâtiments de 2011 ». <[http://www.codesnationaux.cnrc.gc.ca/fra/cneb/cneb\\_adaptation\\_lignes\\_directrices.html](http://www.codesnationaux.cnrc.gc.ca/fra/cneb/cneb_adaptation_lignes_directrices.html)>. Consulté le 2013-06-27.
- Charlier, Dorothée, et Anna Risch. 2012. « Evaluation of the impact of environmental public policy measures on energy consumption and greenhouse gas emissions in the French residential sector ». *Energy Policy*, vol. 46, n° 0, p. 170-184.
- Chen, Liang, et Edward Ng. 2011. « Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, n° 4, p. 586-594.
- Chidiac, S. E., E. J. C. Catania, E. Morofsky et S. Foo. 2011. « A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings ». *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 2-3, p. 614-620.

- Crawley, Drury B., Jon W. Hand, Michaël Kummert et Brent T. Griffith. 2008. « Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs ». *Building and Environment*, vol. 43, n° 4, p. 661-673.
- Duffie, John A., et William A. Beckman. 2006. *Solar engineering of thermal processes*, 3. New Jersey: John Wiley & Sons inc., 908 p.
- ENERGY-STAR. 2011. *Energy star portfolio manager—methodology for accounting for weather*. Coll. « Supporting Documents ». Arlington USA: energy star, 9 p.
- France, Gouvernement. 2010. « Le plan d'actions Ville durable - Ministère du Développement durable ». <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-plan-d-actions-Ville-durable.html>>. Consulté le 2013-06-28.
- Grimmond, C. S. B., S. K. Potter, H. N. Zutter et C. Souch. 2001. « Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas ». *International Journal of Climatology*, vol. 21, n° 7, p. 903-913.
- Hachem, Caroline, Andreas Athienitis et P. Fazio. 2011. « Investigation of solar potential of housing units in different neighborhood designs ». *Energy and buildings*, vol. 43, n° 9, p. 2262-2273.
- Hoeven, Maria van der. 2012. « Urban energy policy design ». Paris: International Energy Agency, 3 p.
- Hofman, Karen, et Xianguo Li. 2009. « Canada's energy perspectives and policies for sustainable development ». *Applied Energy*, vol. 86, n° 4, p. 407-415.
- Littlefair, Paul. 1998. « Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2, n° 3, p. 303-326.
- Liu, Benjamin Y. H., et Richard C. Jordan. 1960. « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation ». *Solar Energy*, vol. 4, n° 3, p. 1-19.
- Ma, Zhenjun, Paul Cooper, Daniel Daly et Laia Ledo. 2012. « Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art ». *Energy and Buildings*, vol. 55, n° 0, p. 889-902.
- Météo France. 2005. « Fiche méthode Degrés Jours ». Paris: Météo France, 2 p.
- Mohareb, Eugene A., Christopher A. Kennedy, L. D. Danny Harvey et Kim D. Pressnail. 2011. « Decoupling of building energy use and climate ». *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 10, p. 2961-2963.

- Murray, Sean N., Benoit Rocher et D. T. J. O'Sullivan. 2012. « Static Simulation: A sufficient modelling technique for retrofit analysis ». *Energy and Buildings*, vol. 47, n° 0, p. 113-121.
- Oke, T. R. 1982. « The energetic basis of the urban heat island ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, n° 455, p. 1-24.
- Olonoscheck, Mady , Anne Holsten et Jürgen P. Kropp. 2011. « Heating and Cooling energy demand and related emissions of German residential building stock under climate change ». *Energy Policy*, vol. 39, n° 9, p. 4795-4806.
- Perez, Richard, Robert Seals, Pierre Ineichen, Ronald Stewart et David Menicucci. 1987. « A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces ». *Solar Energy*, vol. 39, n° 3, p. 221-231.
- Québec, Gouvernement. 2011a. *Novoclimat - volet logement*. Québec: Agence de l'efficacité énergétique, 14 p.
- Québec, Gouvernement. 2011b. « Réglementation - Efficacité énergétique - Gouvernement du Québec ». < <http://www.efficaciteenergetique.mrnf.gouv.qc.ca/foire-aux-questions/reglementation/> >. Consulté le 2013-06-28.
- Ratti, Carlo, Nick Baker et Koen Steemers. 2005. « Energy consumption and urban texture ». *Energy and Buildings*, vol. 37, n° 7, p. 762-776.
- Sakakibara, Yasushi. 1996. « A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget ». *Atmospheric Environment*, vol. 30, n° 3, p. 487-496.
- Sillion, Francois X, et Claude Puech. 1994. *Radiosity and Global Illumination*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, inc., 251 p.
- Strømann-Andersen, J., et P. A. Sattrup. 2011. « The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains ». *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 8, p. 2011-2020.
- Strzalka, Aneta, Jürgen Bogdahn, Volker Coors et Ursula Eicker. 2011. « 3D City modeling for urban scale heating energy demand forecasting ». *HVAC&R Research*, vol. 17, n° 4, p. 526-539.
- Thevenard, D., et K. Haddad. 2006. « Ground reflectivity in the context of building energy simulation ». *Energy and Buildings*, vol. 38, n° 8, p. 972-980.
- Tronchin, Lamberto, et Kristian Fabbri. 2008. « Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation ». *Energy and Buildings*, vol. 40, n° 7, p. 1176-1187.

- Unger, J. 2004. « Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach ». *Climate Research*, vol. 27, n° 3, p. 253-264.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2012. *World Urbanization Prospects, the 2011 Revision*. New York: United Nations, 2 p.
- US Departement of Energy. 2011. « EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data ». Consulté le 21 mars 2012.
- van Esch, M. M. E., R. H. J. Looman et G. J. de Bruin-Hordijk. 2012. « The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies ». *Energy and Buildings*, vol. 47, n° 0, p. 189-200.
- Watson, I. D., et G. T. Johnson. 1987. « Graphical estimation of sky view-factors in urban environments ». *Journal of Climatology*, vol. 7, n° 2, p. 193-197.