TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 ANATOMIE ET MODE DE TRANSFERT THERMIQUE DANS UNE FENÊTRE 4
1.1 Composition d'une fenêtre.....4
1.2 Les modes de transfert de chaleur dans une fenêtre 5
1.3 Rayonnement solaire.....6
1.4 Propriétés optiques du verre.....8
1.4.1 L'absorptivité (α) 8
1.4.2 La réflectivité (ρ) 9
1.4.3 La transmissivité (τ) 9
1.4.4 L'émissivité (ε) 9
1.5 Coefficient de déperdition thermique d'une fenêtre 10
1.6 Coefficient d'apport par rayonnement solaire (SHGC) 11
1.7 Les aspects techniques des fenêtres commercialisées 12

CHAPITRE 2 FENÊTRES DYNAMIQUES 13
2.1 Les types de fenêtres dynamiques.....13
2.1.1 Les fenêtres dynamiques non électriques 13
2.1.2 Les fenêtres dynamiques électriques 14
2.2 Fenêtres électrochromiques 15
2.2.1 Fonctionnement des fenêtres électrochromiques 16
2.2.2 Avantages et inconvénients des fenêtres électrochromiques 17

CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE 18
3.1 Fenêtres électrochromiques 18
3.2 Norme canadienne du rendement énergétique des fenêtres 21
3.3 Logiciels pour le calcul des performances énergétiques.....23

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....25
4.1 Progiciels *Window* et *Therm* 25
4.1.1 Progiciel *Window* 25
4.1.2 Progiciel Therm: 26
4.1.3 Géométrie dans *Therm* 27
4.2 Modèles de fenêtre étudiées.....28
4.3 Conditions aux frontières.....30
4.4 Étapes de calculs 32
4.4.1 Fichier météorologique 32
4.4.2 Critères du choix des jours étudiés 32
4.4.3 Calcul du rayonnement solaire incident..... 33
4.4.4 Irradiation..... 33

4.4.5 Coefficient de convection extérieur 34
4.4.6 Conditions frontières intérieures 35
4.4.7 Utilisations des résultats dans Window et Therm 35
4.4.8 Calcul du bilan énergétique 36

CHAPITRE 5 RÉSULTATS NUMÉRIQUES 39
5.1 Coefficient de déperdition thermique 39
5.2 Coefficients de gains solaires 42
5.3 Bilan énergétique : résultats horaires 43
5.4 Gains solaires : comparaison des trois approches 49
5.4.1 Première approche 49
5.4.2 Deuxième approche 51
5.4.3 Troisième approche 53
5.4.4 Résumé des trois approches 54
5.5 Bilan énergétique des fenêtres DW et EW 55

CONCLUSION 58

RECOMMANDATIONS 60

ANNEXE I EXEMPLE DES DONNÉES DU FICHIER MÉTÉROLOGIQUE POUR LE PREMIER JANVIER 61

ANNEXE II CHOIX DES JOURS DE CALCUL 63

ANNEXE III EXEMPLE DE RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE KLUCHER POUR LE 26 JANVIER, DIRECTION SUD 65

ANNEXE IV DÉTAIL DES ÉTAPES DE MODÉLISATION 66

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 68

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 4.1 Conditions frontières du côté intérieur de la fenêtre.....35

Tableau 5.1 Apport de chaleur par rayonnement en été – première approche 50

Tableau 5.2 Apport de chaleur par rayonnement en hiver – première approche.....50

Tableau 5.3 Apport de chaleur par rayonnement en été – deuxième approche.....52

Tableau 5.4 Apport de chaleur par rayonnement en hiver – deuxième approche 52

Tableau 5.5 Apport de chaleur par rayonnement en été – troisième approche.....53

Tableau 5.6 Apport de chaleur par rayonnement en hiver – troisième approche 53

Tableau 5.7 Apport de chaleur par rayonnement sur une journée – comparaison entre les trois approches.....54

Tableau 5.8 Bilan énergétique en été - moyenne journalière en Wh/m^2 55

Tableau 5.9 Bilan énergétique en hiver - moyenne journalière en Wh/m^2.....57

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Présentation schématique d'une fenêtre. 5

Figure 1.2 Modes de transfert thermique dans une unité scellée. 6

Figure 1.3 Composition du rayonnement solaire. 7

Figure 1.4 Schéma illustrant le cadre, la bordure et le centre du vitrage. 11

Figure 2.1 Fenêtre électrochromique à l'état clair. 15

Figure 2.2 Fenêtre électrochromique colorée.....16

Figure 4.1 Les différentes composantes de la fenêtre dans *Therm.* 27

Figure 4.2 Fenêtre à double vitrage standard (DW) et fenêtre électrochromique (EW).28

Figure 4.3 Dimensions des fenêtres. 29

Figure 4.4 Coefficient de transmissivité en fonction de la longueur d'onde. 30

Figure 4.5 Les conditions aux frontières. 31

Figure 4.6 Représentation schématique des différentes contributions de l'irradiation incidente totale sur une fenêtre. 34

Figure 4.7 Résumé des étapes de modélisation. 36

Figure 5.1 Coefficients U_f, U_{eg} et U_{cg} des fenêtres DW et EW (conditions hivernales).40

Figure 5.2 Coefficients U_f, U_{eg} et U_{cg} des fenêtres DW et EW (conditions estivales).40

Figure 5.3 Variation du coefficient $SHGC_w$ en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement.....43

Figure 5.4 Variation horaire de la température extérieure le 10 juillet et le 26 janvier.44

Figure 5.5 Variation horaire de l'irradiation directe et diffuse le 10 juillet et le 26 janvier. 45

Figure 5.6 Variation horaire du coefficient U_w le 10 juillet – orientation est. 46

Figure 5.7 Variation horaire du coefficient U_w le 26 janvier - orientation est. 46

Figure 5.8 Gains solaires horaire le 10 juillet – orientation est.....48

Figure 5.9 Gains solaires horaire le 26 janvier – orientation est. 48

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

DW Fenêtre de référence

EW Fenêtre électrochromique

UV Ultraviolet

IR Infrarouge

Low-ε Revêtement à faible émissivité

RE Rendement énergétique

RES Rendement énergétique spécifique

PDLC Cristaux liquides dispersés

SPD Dispositif suspendu de particules

DPS Système dispersé de particules

NFRC *National Fenestration Rating Council*

CSA Association canadienne de normalisation

LBNL *Lawrence Berkeley National Laboratory*

ISO Organisation internationale de normalisation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Surface, m^2
E	Émissivité effective (W/m^2)
h	Coefficient de convection, $W/(m^2 \cdot {}^oC)$
h_0	Coefficient de convection de la surface extérieure, $W/(m^2 \cdot {}^oC)$
h_i	Coefficient de convection de la surface intérieure, $W/(m^2 \cdot {}^oC)$
h_g	Coefficient de convection et de rayonnement à l'intérieur des deux vitrages, $W/(m^2 \cdot {}^oC)$
I	Irradiation, W/m^2
Q	Gains (ou pertes) de chaleur à travers la fenêtre, Wh/m^2
SHGC	Coefficient d'apport par rayonnement solaire
t	Temps, h
T	Température, ^oC
$\bar{T}_{ext}$	Température extérieure moyenne, ^oC
U	Coefficient de transmission de chaleur, $W/(m^2 \cdot {}^oC)$
V	Vitesse du vent, m/s
I_h	Rayonnement solaire horizontal global, W/m^2
$I_{h,b}$	Rayonnement direct normal, W/m^2
$I_{h,d}$	Rayonnement solaire horizontal diffus global, W/m^2
I_T	Rayonnement solaire pour une surface inclinée, W/m^2
R	Résistance thermique, $^oC/W$

Lettres grecques :

α	Absorbtivité
ε	Émissivité
ρ	Réflectivité
τ	Transmissivité
λ	Longueur d'onde, m
θ	Angle d'incidence
θ_z	Angle de zénith

Rapport-Gratuit.com

β angle d'inclinaison de la surface

Indices :

c Circumsolaire

d Diffus

f Cadre

g Sol

s Solaire

t Total (conduction et rayonnement)

w Fenêtre

ext Extérieur

int Intérieur

eg Bordure du vitrage

cg Centre du vitrage

ray Rayonnement

eff Effectif

conv convection

Nombres adimensionnels :

R_b facteur géométrique

INTRODUCTION

Généralités

Les fenêtres font références aux ouvertures dans l'enveloppe des bâtiments, elles permettent aux habitants de voir à l'extérieur et d'avoir un éclairage naturel confortable pendant la journée grâce aux rayons solaires. Certaines fenêtres permettent également de ventiler le bâtiment. Ces fonctions ont incité les architectes, lors de la construction ou la rénovation des bâtiments, à prévoir des fenêtres plus grandes, esthétiques, durables, faciles à mettre en place, et surtout moins chères. Cependant, une fenêtre doit répondre à ces fonctions tout en respectant certains critères de performance énergétique qui ne pénalisent pas la consommation d'énergie du bâtiment. En effet, malgré des progrès significatifs au niveau de leur conception, les fenêtres sont encore responsables d'une portion significative des coûts de chauffage et de climatisation des bâtiments. Selon le département américain de l'énergie, ces coûts excèdent 25 milliards de dollars par année (Lee et al., 2004). Au Canada, les coûts énergétiques associés aux fenêtres sont de plusieurs milliards de dollars par année.

Parmi les fonctions que les fenêtres doivent satisfaire, on cite :

- l'isolation acoustique;
- l'isolation thermique;
- la transmission du rayonnement dans le domaine visible : ce facteur est très important pour le confort des occupants et permet ainsi de diminuer l'utilisation de l'éclairage artificiel;
- le contrôle de la ventilation naturelle, qui peut varier selon la fonction de chaque pièce (cuisine, salon, etc.);
- la durabilité et la résistance aux variations climatiques et aux intempéries extérieures (vent, pluie, glace, etc.);
- la résistance à la condensation.

Aujourd'hui, les fenêtres sont encore considérées comme étant le maillon faible de l'enveloppe des bâtiments. La résistance thermique d'une fenêtre est d'environ 10 fois inférieure à celle des murs et on estime que ces dernières sont responsables de 20 à 25 % des

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

pertes thermiques d'une résidence pendant la saison hivernale. En été, la transmission du rayonnement solaire à travers les fenêtres peut représenter jusqu'à 30 % de la charge de climatisation. Cet impact sur la charge et la consommation énergétique se manifeste à travers les mécanismes de base suivants: le transfert de la chaleur par conduction et convection, l'infiltration et l'exfiltration d'air, ainsi que les gains solaires.

Le développement, relativement récent, de vitrage sélectif et de procédés chromogènes a attiré la curiosité de plusieurs chercheurs comme moyen de contrôle actif de l'intensité du rayonnement solaire pénétrant dans un bâtiment. Ces nouvelles technologies forment la base d'une nouvelle génération de fenêtre appelée fenêtres dynamiques « *Dynamics Windows* » dans lesquelles les gains solaires peuvent être contrôlés en fonction de la saison et des besoins particuliers des occupants. En particulier, les fenêtres dotées d'un vitrage électrochromique permettent la modulation des propriétés optiques entre un état qui maximise la transmissivité du verre (état clair) et un état dans lequel le rayonnement est en grande partie absorbé par le vitrage (état coloré).

Objectifs du mémoire

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer numériquement le bilan énergétique d'une fenêtre dotée d'un vitrage électrochromique en fonction des conditions météorologiques pour la ville de Montréal. Le bilan énergétique par conduction, convection et rayonnement de la fenêtre électrochromique est comparé au bilan établi sur une fenêtre dotée d'un double vitrage standard appelée « fenêtre de référence ».

De façon plus spécifique, il s'agit de comparer les performances énergétiques des deux types de fenêtres :

a) sur une base horaire, en fonction des conditions météorologiques extérieures de la ville de Montréal.
b) pour quatre orientations de fenêtre, soit les orientations est, sud, nord et ouest.
c) pour trois approches distinctes de calcul du rayonnement incident sur la fenêtre.

Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré comme suit : le chapitre 1 présente l'anatomie d'une fenêtre typique ainsi qu'une description des principales composantes. Ensuite, on présente les différents modes de transfert de chaleur dans une fenêtre ainsi que les différents types de fenêtres à vitrage sélectif. La norme canadienne sur le rendement énergétique des fenêtres résidentielles CSA A440.2 (CSA, 2007) y sera également présentée.

Le chapitre 2 présente un survol des différents types de fenêtres dynamiques ainsi que leurs caractéristiques et leurs modes de fonctionnement. Les contributions scientifiques les plus importantes en relation avec le présent projet sont présentées au chapitre 3.

Le chapitre 4 présente la méthodologie numérique utilisée pour l'évaluation des taux de transfert de chaleur dans chaque composante des fenêtres à l'étude. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation sommaire de la méthode de Klucher qui est nécessaire au calcul du rayonnement incident et à la présentation des équations de base pour le calcul du bilan énergétique.

La présentation des résultats numériques fera l'objet du chapitre 5. Dans un premier temps, on procédera à une comparaison du bilan énergétique horaire de la fenêtre électrochromique (état clair et état coloré) à celui obtenu pour la fenêtre de référence. Dans un second temps, les bilans énergétiques pour les quatre points cardinaux seront comparés et discutés. Finalement, les apports de chaleur attribuables au rayonnement solaire seront déterminés et comparés selon trois approches distinctes.

Le mémoire se conclue par une récapitulation des principaux résultats de ce travail. Quelques suggestions de travaux futurs seront également proposées.

CHAPITRE 1

ANATOMIE ET MODE DE TRANSFERT THERMIQUE DANS UNE FENÊTRE

1.1 Composition d'une fenêtre

Les fenêtres sont insérées habituellement dans l'enveloppe des bâtiments. Elles comprennent un cadre constitué d'une partie fixe (dormant), et une partie mobile (ouvrant), ainsi qu'une unité scellée. L'unité scellée est la partie transparente d'une fenêtre qui laisse passer le rayonnement solaire à l'intérieur des bâtiments. La figure 1-1 illustre les parties fixe et mobile du cadre d'une fenêtre typique. Ce cadre est composé de plusieurs cavités. Ces cavités permettent de réduire la quantité de matériaux nécessaire et augmente la résistance thermique de l'ensemble. L'étanchéité entre l'ouvrant et le dormant est assurée par un joint d'étanchéité qui a pour fonction principale de limiter les infiltrations d'air et d'assurer une protection contre l'eau et la neige.

L'unité scellée est simplement formée de deux plaques de verre séparées par un intercalaire qui permet de maintenir une distance constante entre les plaques. Les intercalaires sont faits généralement d'aluminium ou de mousse rigide à faible conductivité thermique. Les intercalaires intègrent un dessicant qui permet d'absorber la vapeur d'eau contenue dans la cavité formée par l'unité scellée. La cavité entre les plaques est normalement remplie d'air. Cependant, on retrouve des fenêtres remplies d'argon, de krypton ou de dioxyde de carbone. Ces gaz « spéciaux » ont une conductivité thermique légèrement plus faible que celle de l'air.

Le cadre et le châssis constituent en général le tiers de la surface totale des fenêtres, d'où la nécessité d'utiliser un matériau résistant et idéalement isolant pour permettre un entretien facile, prolonger la durée de vie et minimiser les déperditions de chaleur.

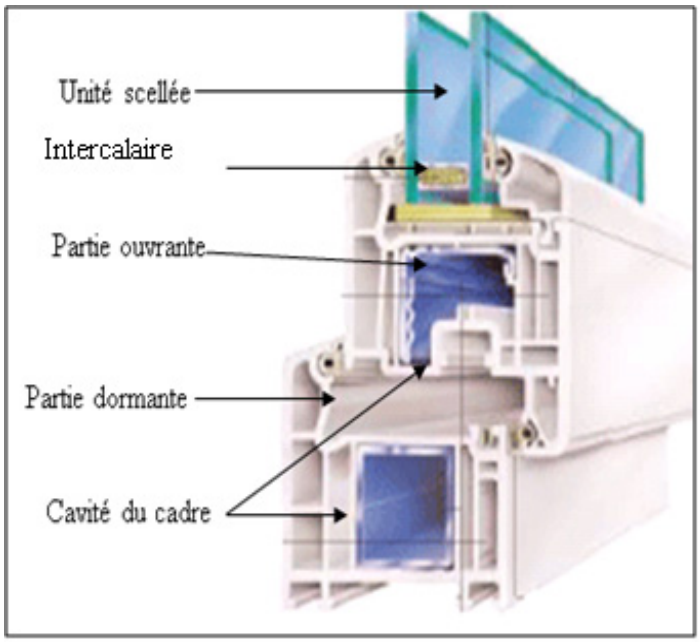


Figure 1.1 Présentation schématique d'une fenêtre.
Tirée de living-fenetres

1.2 Les modes de transfert de chaleur dans une fenêtre

Dans une fenêtre, les trois modes de transfert thermique sont présents. La conduction se trouve dans les parties solides de la fenêtre et elle se qualifie comme étant le mode principal de transfert thermique au niveau du cadre. Le deuxième mode de transfert thermique est la convection. C'est un phénomène d'échange de chaleur sous l'effet du mouvement d'un fluide. Ce mouvement peut être forcé ou naturel (sous l'effet de la variation de la masse volumique avec la température). Sur la surface d'une fenêtre située du côté intérieur, la convection s'effectue généralement en régime naturel contrairement au régime de convection forcé qui est généralement dominant du côté extérieur.

Le gaz présent dans l'unité scellée est soumis à une différence de température. Si la différence de température entre les plaques de verre dépasse un certain seuil, ce gaz se met en mouvement naturellement (poussée d'Archimède) créant ainsi une boucle de convection qui

augmente le transfert de chaleur entre les surfaces du vitrage diminuant par conséquent, la résistance thermique de l'unité scellée et de la fenêtre dans son ensemble.

Le dernier mode de transfert de chaleur, mais non le moindre est le rayonnement. Le transfert de chaleur par rayonnement désigne le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. En fait, le rayonnement est le mode de transfert de chaleur le plus important dans une fenêtre. Dans une fenêtre typique, près des deux tiers du transfert de chaleur total s'effectue par rayonnement.
La figure 1.2 illustre schématiquement les trois modes de transfert se produisant dans une fenêtre.

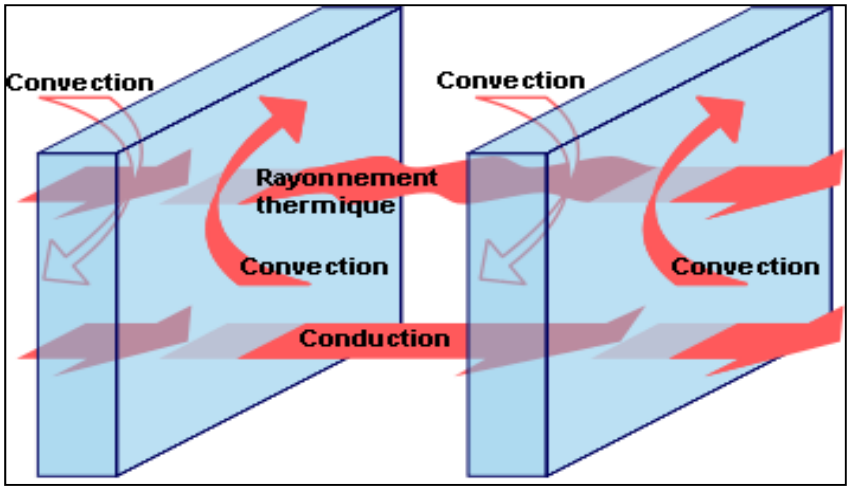


Figure 1.2 Modes de transfert thermique dans une unité scellée.
Tirée de Energie

1.3 Rayonnement solaire

Une connaissance des différents modes de transfert thermique dans une fenêtre est primordiale afin d'estimer ses performances énergétiques. Étant donné l'importance du rayonnement solaire, il est nécessaire de fournir certains détails supplémentaires sur ce mode de transfert de chaleur. Le rayonnement solaire peut modifier considérablement les taux et même la direction du transfert de chaleur dans une fenêtre.

Le rayonnement solaire est émis par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. L'ensemble des ondes électromagnétiques forme le spectre solaire qui est la seule énergie externe pour l'atmosphère. À l'atmosphère terrestre, nous parviennent essentiellement :

- les rayons X et gamma, de longueur d'onde très courte, extrêmement dangereux qui sont heureusement, arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère ;
- les ultraviolets (UV), de longueur d'onde comprise entre 200 nm à 400 nm. Les UV peuvent provoquer des dommages aux cellules de la peau humaine;
- la lumière visible, de longueur d'onde comprise entre 400 à 800 nm, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs en stimulant le nerf optique de l'humain;
- les infrarouges (IR), de longueur d'ondes comprise entre 800 à 1400 nm. Les IR sont en grande partie responsables du changement de température de la matière solide qu'ils rencontrent;
- les ondes radio et cosmique qui ont de très longue longueur d'onde et dont l'intensité est très faible à la surface de terre.

L'intensité du rayonnement solaire qui arrive à la surface terrestre dépend, entre autres, de la clarté de l'atmosphère, de la longueur du trajet parcouru et de l'angle suivant lequel le rayonnement solaire frappe la surface. Par temps clair, l'intensité maximale de rayonnement solaire qu'une surface horizontale peut recevoir se produit au midi solaire vrai.

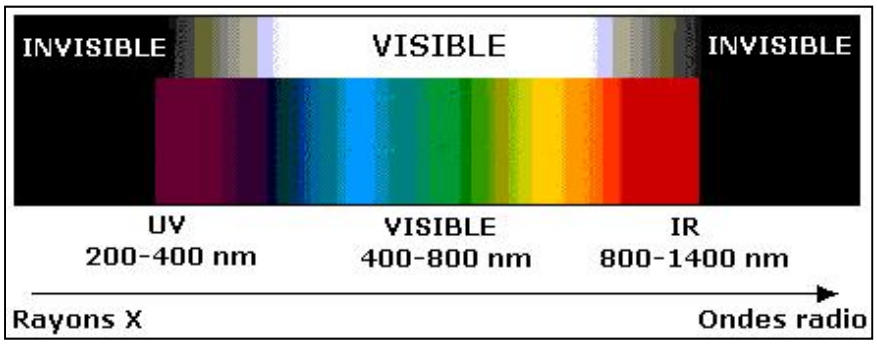


Figure 1.3 Composition du rayonnement solaire.
Tirée de Solaires

Le rayonnement solaire interagit avec l'atmosphère. Par conséquent, le rayonnement total incident sur une surface peut-être :

- **Direct** : comme son nom l'indique, c'est le rayonnement qui provient directement du disque solaire sans interaction avec l'atmosphère.
- **Circumsolaire** : il s'agit du rayonnement qui provient du voisinage immédiat autour du soleil.
- **Diffus :** rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère terrestre dont le parcours n'est pas direct. Le rayonnement diffus semble provenir d'aucune direction particulière. A ce rayonnement diffus provenant de l'atmosphère, il faut ajouter le rayonnement réfléchi par les surfaces environnantes et le sol.

Peu importe que le rayonnement incident soit direct, diffus ou provenant d'une réflexion sur une surface environnante, ce dernier sera réfléchi ou absorbé par le vitrage, ou transmis à l'intérieur du bâtiment. Mentionnons que le vitrage clair ordinaire transmet une grande partie du rayonnement visible à l'intérieur du bâtiment (environ 85%).

1.4 Propriétés optiques du verre

1.4.1 L'absorptivité (α)

L'absorptivité (ou coefficient d'absorption) représente la fraction du rayonnement incident qui est absorbée par le verre. Ce rayonnement absorbé se transforme en chaleur en augmentant ainsi la température du verre.

En pratique, le coefficient d'absorption dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident, et de l'angle d'incidence de ce rayonnement par rapport à la surface vitrée. Certaines unités scellées sont constituées de vitrage sur lequel on a appliqué une couche ayant une absorptivité élevée dans le domaine infrarouge. Ces unités sont habituellement utilisées dans les climats chauds.

1.4.2 La réflectivité (ρ)

C'est le rapport entre l'intensité du rayonnement réfléchi et du rayonnement incident. La réflectivité (ou coefficient de réflexion) dépend du type de verre, de l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à la normale au vitrage et de la longueur d'onde. Quelque soit le type de verre, plus l'angle d'incidence est grand, plus l'intensité du rayonnement réfléchi est importante. Le coefficient de réflexion peut être augmenté en appliquant une couche métallique réfléchissante.

1.4.3 La transmissivité (τ)

La transmissivité représente la fraction du rayonnement incident qui traverse directement un milieu sans interagir avec ce dernier. La transmissivité d'un vitrage varie selon la longueur d'onde du rayonnement incident. Un verre qui transmet les rayons visibles permet d'avoir un éclairage naturel, et un apport de chaleur.

La loi de conservation de l'énergie impose que les coefficients de transmissivité, d'absorptivité et de réflectivité obéissent à la relation suivante :

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \tag{1.1}$$

1.4.4 L'émissivité (ε)

L'émissivité est le rapport entre le rayonnement émis par une surface et le rayonnement émis par un corps noir à la même température. Le coefficient d'émissivité varie en fonction de la longueur d'onde, de la température et du fini de surface.

Rapport-Gratuit.com

1.5 Coefficient de déperdition thermique d'une fenêtre

Le coefficient de déperdition thermique d'une fenêtre (U_w) est exprimé en (W/(m^2•°C)) et représente la capacité d'une fenêtre à transmettre la chaleur sous une différence de température donnée. Le coefficient U_w est l'inverse de la résistance thermique (R). Dans une fenêtre, les coefficients U_w et les valeurs R sont déterminés par des essais physiques, ou par la simulation informatique, à l'aide de logiciels spécialisés.

Il est d'usage de séparer une fenêtre en trois régions bien distinctes. Une première région associée au cadre où le transfert de chaleur se fait principalement par conduction. Une deuxième région appelée « centre du vitrage » où le transfert thermique est essentiellement unidimensionnel et une troisième région appelée « bordure du vitrage » qui est délimitée par le cadre et la périphérie de l'unité scellée. Contrairement au centre du vitrage, le transfert de chaleur dans le cadre et en bordure du vitrage est bidimensionnel.

Le coefficient global U_w d'une fenêtre peut être déterminé à l'aide des coefficients de déperditions thermiques calculés pour le centre (U_{cg}), la bordure du vitrage (U_{eg}), et le cadre (U_f), au moyen de l'expression suivante :

$$U_w = \frac{U_{cg} A_{cg} + U_{eg} A_{eg} + U_f A_f}{(A_{cg} + A_{eg} + A_f)} \tag{1.2}$$

Dans cette équation, chaque coefficient de déperdition thermique a été pondéré selon la surface (A) occupée par chaque région.

Tel qu'illustré sur la Figure 1.4, la bordure du vitrage est la périphérie de l'unité scellée sur une distance de 63 mm calculée à partir de la ligne de jonction entre le cadre et le vitrage.

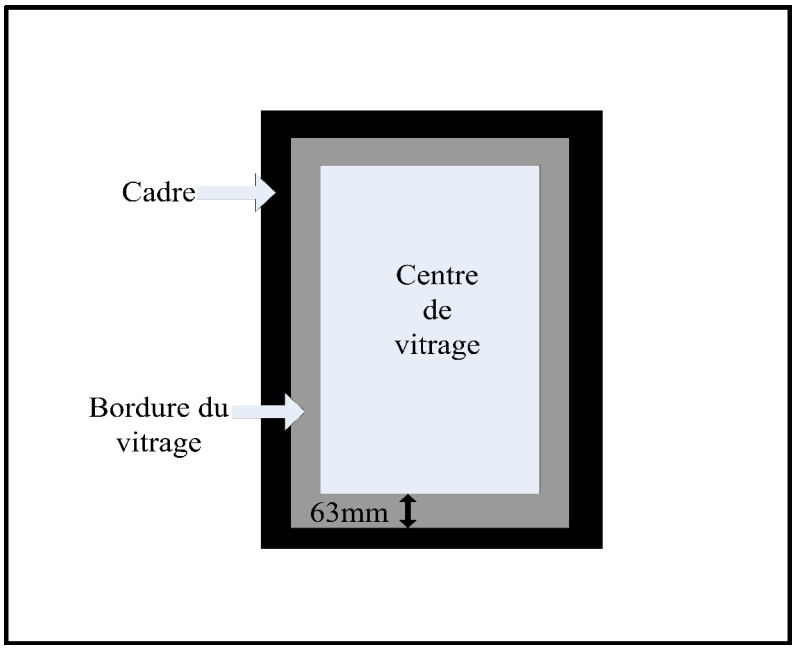


Figure 1.4 Schéma illustrant le cadre, la bordure et le centre du vitrage.

1.6 Coefficient d'apport par rayonnement solaire (SHGC)

Le coefficient d'apport par rayonnement solaire (SHGC) est défini comme étant la fraction du rayonnement solaire incident sur la surface extérieure d'une fenêtre qui est transmise vers l'intérieur du bâtiment. Le SHGC tient compte également de la fraction du rayonnement absorbée par la fenêtre et qui est ultimement transmise vers l'intérieur par conduction, par convection ou par réémission de rayonnement dans le domaine infrarouge. Ce coefficient s'exprime en fraction décimale et sa valeur est comprise entre 0 et 1 (complètement opaque à complètement transparent). Le SHGC permet l'évaluation des gains solaires à travers une fenêtre.

Le SHGC varie en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement incident et en fonction des conditions environnementales (température intérieure et extérieure, vitesse du vent, etc.). En pratique, le coefficient d'apport par rayonnement solaire prend des valeurs de l'ordre de 0,20 pour une fenêtre dotée de verre réfléchissant (valeur maximale) et s'établit à environ

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

0,87 pour une fenêtre à simple vitrage clair. Le SHGC atteint une valeur maximale lorsque le rayonnement frappe directement la fenêtre.

1.7 Les aspects techniques des fenêtres commercialisées

Au cours des dernières décennies, plusieurs développements ont permis d'accroître de façon substantielle la résistance thermique des fenêtres. On retrouve des produits spécialement conçus pour des climats froids (résistance thermique élevée) et chaud (coefficient SHGC faible). Mentionnons, entre autres, l'utilisation de gaz de remplissage pour diminuer le transfert thermique par conduction et par convection dans la cavité des unités scellées. Ces gaz tels que l'argon ou le krypton, ont une conductivité thermique inférieure à celle de l'air.

Commercialisés au début des années 80, les revêtements à faible émissivité (Low-ε) : permettent d'augmenter significativement la résistance thermique d'une fenêtre. Ces revêtements sont habituellement constitués de couches métalliques minces qui s'appliquent sur le vitrage afin de réduire le transfert thermique par rayonnement dans l'unité scellée.

La majorité des fenêtres actuellement disponibles sur le marché possèdent un intercalaire creux en aluminium. Ce matériau est léger, résistant et facile à mettre en forme. Cependant, l'aluminium est un excellent conducteur thermique, ce qui comme conséquence d'augmenter le transfert de chaleur dans la région associée à la bordure du vitrage. Pour pallier cette lacune, certains manufacturiers offrent des fenêtres à intercalaire « isolé » constitué généralement de mousse incompressible ou de plastique. Ces intercalaires permettent une réduction du coefficient U_{eg} de l'ordre de 5 à 10%.

Présentement, des produits tels que les fenêtres sous vide et les fenêtres aérogels commencent à faire leur apparition dans les expositions commerciales. Cependant, le coût de ces fenêtres à grande résistance thermique demeure très élevé et leur utilisation à grande échelle n'est pas prévue à court ni à moyen terme. Par contre, d'autres produits tels que les fenêtres dynamiques ont atteint un certain niveau de maturité.

CHAPITRE 2

FENÊTRES DYNAMIQUES

2.1 Les types de fenêtres dynamiques

L'enveloppe des bâtiments est soumise à des sollicitations thermiques qui varient considérablement au cours d'une année. Une fenêtre qui offre de bonnes performances énergétiques en saison estivale peut être beaucoup moins avantageuse en saison hivernale. Pour répondre de façon optimale aux diverses sollicitations thermiques auxquelles les fenêtres sont soumises, une nouvelle génération de fenêtre appelée « fenêtres dynamiques » (*Dynamics Windows*) a fait récemment son apparition sur le marché. Ces fenêtres permettent aux occupants d'exercer un certain contrôle sur les gains solaires d'une fenêtre en modifiant, au besoin, la réflectivité et l'absorptivité du vitrage

Plusieurs types de fenêtres dynamiques utilisent des particules emprisonnées entre deux couches de verre. Ces particules changent d'orientation afin de modifier leur état initial. Cela permet de contrôler la lumière ou la chaleur transmise à l'intérieur du local. Le changement des propriétés de ces particules se fait à travers des réactions chimiques déclenchées sous l'effet d'un champ électrique ou de la présence de lumière.

2.1.1 Les fenêtres dynamiques non électriques

Il s'agit d'une fenêtre dont l'une des plaques de verre de l'unité scellée a la propriété de changer d'état en fonction des conditions environnementales extérieures. On distingue :

- les fenêtres photochromiques dont la transmissivité change en fonction de l'intensité de la lumière;
- les fenêtres thermochromiques dont le changement d'état dépend de la température extérieure.

Les états de ces deux types de fenêtres s'ajustent automatiquement sans aucun contrôle de l'occupant.

2.1.2 Les fenêtres dynamiques électriques

Cette catégorie comprend toute fenêtre dotée de vitrage qui a la propriété de changer d'état optique en fonction des conditions environnementales extérieures, mais qui nécessite l'application d'une différence de potentiel. On distingue :

- **Les fenêtres à cristaux liquides dispersés par phase (PDLC)**

Les PDLC se composent généralement de deux couches, suivies d'un film de cristaux liquides. Ce dernier est entouré par deux couches d'enduit conducteur électrique. Sous une différence de potentiel électrique, les cristaux s'alignent en parallèle pour permettre à la lumière du soleil de passer à travers la fenêtre. Par contre, les cristaux se placent aléatoirement sans tension électrique pour bloquer partiellement la lumière du soleil. Par contre, ce type de fenêtres n'est pas très utilisé, vu que même en mode « hors tension », une portion significative du rayonnement visible et infrarouge peut pénétrer dans le bâtiment. La modulation entre les états « sous tension » et « hors tension » est relativement limitée. De plus, cette technologie exige l'application d'une différence de potentiel permanente et constante pour que la fenêtre reste transparente.

- **Fenêtres à dispositif suspendu de particules (SPD)**

Les SPD se composent de deux couches de verre, suivies de deux couches d'enduit de conducteur électrique, entourant des particules suspendus de taille microscopiques. Sous tension électrique, les particules s'alignent pour permettre à la lumière du soleil de traverser la fenêtre. Par contre, les particules sont placées aléatoirement sans tension, ce qui bloque la lumière du soleil. Le niveau de la coloration peut être commandé par l'utilisateur en changeant la tension. Comme pour les fenêtres PDLC, les fenêtres à dispositif suspendu de particules exigent une tension permanente pour rester en état clair.

- **Fenêtres électrochromiques**

Les fenêtres électrochromiques ont la capacité de basculer entre un état clair et coloré. Ce type de fenêtre fera l'objet de la section qui suit.

2.2 Fenêtres électrochromiques (EW)

Tous les matériaux dont les propriétés optiques varient lorsqu'ils sont soumis à un stimulant (température, courant électrique, etc.) sont appelés chromiques. Ce phénomène de changement des propriétés visuelles est appelé électrochromisme. Le contrôle du vitrage électrochromique peut être manuel ou à l'aide des capteurs qui réagissent à l'intensité lumineuse, aux apports solaires, et à la température extérieure ou intérieure.

En saison hivernale, une fenêtre électrochromique doit normalement rester à l'état clair pour permettre au rayonnement solaire de passer à travers le verre et ainsi maximiser les gains de chaleur solaire. Cet apport solaire permettra de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage, ainsi que les besoins en éclairage à cause de la quantité de lumière naturelle qui traverse la fenêtre.

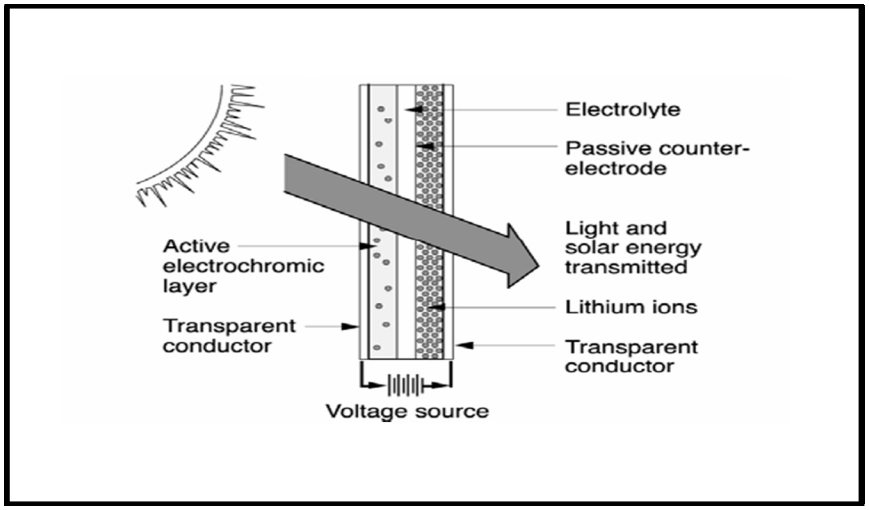


Figure 2.1 Fenêtre électrochromique à l'état clair.
Tirée de Mills (1996)

Pendant la saison d'été, la fenêtre électrochromique est généralement maintenue à l'état coloré. Ce changement se fait grâce à une réaction chimique induite par une tension électrique. L'état coloré permet de réduire considérablement la transmission du rayonnement infrarouge et, par conséquent, les gains de chaleur à travers la fenêtre. Cependant, le changement d'état de clair

à coloré s'accompagne également d'une diminution de la transmissivité dans le domaine visible.

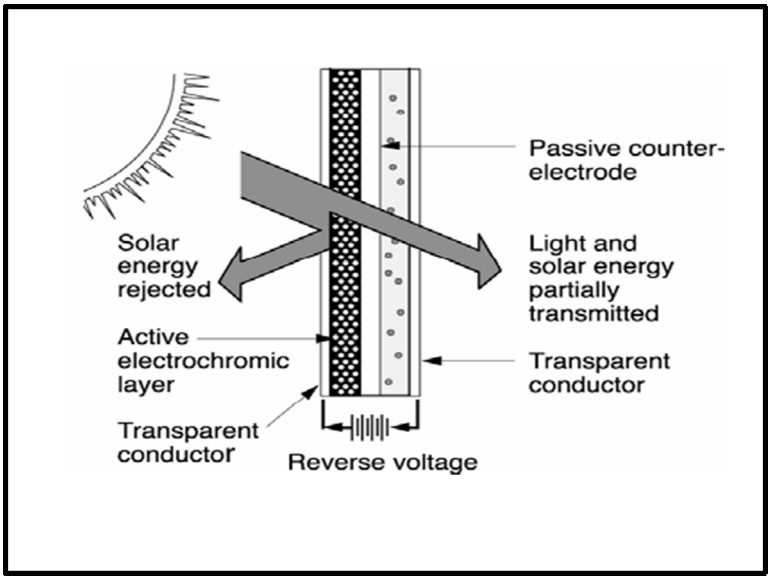


Figure 2.2 Fenêtre électrochromique colorée.
Tirée de Mills (1996)

2.2.1 Fonctionnement des fenêtres électrochromiques

Les systèmes électrochromiques se composent généralement de deux plaques de verre revêtues d'un dépôt électroconducteur servant d'électrode et séparées par au moins une couche de matériau électrochromique et une couche d'électrolyte. Lorsqu'une tension est appliquée entre les conducteurs transparents, un champ électrique s'établit et des ions se déplacent uniformément en entrant et sortant du film électrochromique. En fonction de l'oxyde électrochromique utilisé, l'injection d'électrons peut augmenter ou diminuer la transparence. L'oxyde de tungstène (WO_x) peut être transformé de manière réversible d'un état transparent vers un état bleu foncé de faible transparence. Pour ce matériau, le changement d'état peut être décrit par la réaction chimique suivante :

$$\begin{array}{ccc} WO_3 + xLi^+ & \Leftrightarrow & Li_x\,WO_3 \\ \text{Clair} & \Leftrightarrow & \text{Coloré} \end{array} \qquad (2.1)$$

Comme le conducteur ionique a une conductivité électronique négligeable, le dispositif présente une mémoire de circuit ouvert, de sorte que les propriétés optiques restent stables pendant environ 24 heures après avoir coupé la tension. À température ambiante, les systèmes électrochromiques peuvent changer d'état en quelques minutes. Cependant, lorsqu'ils sont soumis à des températures très basses, le changement d'état peut prendre plus d'une heure.

2.2.2 Avantages et inconvénients des fenêtres électrochromiques

De part leurs propriétés, les fenêtres électrochromiques permettent une réduction significative de la charge de climatisation des bâtiments. Par conséquent, des économies d'énergie substantielles sont prévues. De plus, cette technologie offre l'entière liberté aux occupants de modifier au besoin l'état du vitrage ce qui peut dans certains cas, éliminer la nécessité d'installer des stores ou des rideaux. Finalement, les fenêtres électrochromiques nécessitent l'application d'une différence de potentiel uniquement pour passer d'un état à l'autre, aucune consommation d'électricité n'est nécessaire pour maintenir le verre électrochromique à l'état clair ou coloré.

Parmi les facteurs qui freinent l'utilisation de cette technologie, mentionnons le coût qui demeure très élevé. Ceux-ci s'établissent environ à 900$ par mètre carré de fenêtre. De plus, la durée de vie du matériel électrochromique est limitée entre 10 et 15 ans. Finalement, les avantages associés à l'utilisation de ce type de fenêtre en été sont en partie annulés par leurs inconvénients en période hivernale. Ce point sera analysé en détail au chapitre 5 de ce mémoire.

CHAPITRE 3

REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature présentée dans ce chapitre est un survol des travaux jugés pertinents pour cette étude. Dans un premier temps, les principaux travaux sur les fenêtres électrochromiques seront abordés. Par la suite, une section est consacrée à la norme canadienne du rendement énergétique des fenêtres. Le chapitre se terminera par quelques études en relation avec les progiciels *Window* et *Therm*. Le lecteur intéressé par les études « classiques » sur les fenêtres et leur performance énergétique est invité à consulter la thèse de Hallé (2001).

3.1 Fenêtres électrochromiques

Bien que le phénomène électrochromique fût découvert au début des années 70, ce n'est que vingt ans plus tard qu'apparaissent les premières études mettant l'emphase sur l'utilisation des matériaux électrochromiques pour les systèmes de fenêtres. À titre d'exemple, mentionnons les travaux de Lampert (1998) ainsi que Truong et Mehra (November 1984). Ces travaux présentent les développements technologiques nécessaires pour l'utilisation à grande échelle des fenêtres électrochromiques. On y mentionne notamment l'importance d'augmenter la durée de vie des matériaux chromogènes et de diminuer le temps de transition entre les états clair et coloré particulièrement à basse température.

Mathew et al. (1997) mentionnent que la durée de vie d'une fenêtre électrochromique dépend de sa capacité à résister aux rayons ultraviolets, aux températures extrêmes et à l'humidité. Cette durée de vie devra être de l'ordre de 20 à 40 ans pour une utilisation dans les bâtiments commerciaux et d'au moins 15 ans dans le secteur résidentiel.

Au milieu des années 90, le département américain de l'énergie (DOE) a inauguré un programme appelé « *Electrochromics Initiative* » qui avait comme objectif d'établir une formule de partage des coûts entre le DOE et l'industrie privée, pour le développement et la commercialisation de prototypes de fenêtres électrochromiques. Ce programme de partenariat

a permis à plusieurs entreprises comme par exemple *Sage Electrochromics Inc.* de développer des fenêtres aux propriétés optiques variables dont les performances énergétiques sont nettement supérieures aux fenêtres à double vitrage standard.

Warner et al. (1992) ont étudié cinq prototypes de fenêtres représentant une gamme d'options de contrôle, pour évaluer le potentiel d'économie d'énergie des fenêtres électrochromiques par rapport aux fenêtres aux propriétés solaires statiques. Selon cette étude, les fenêtres électrochromiques peuvent fournir des réductions significatives de la demande de climatisation et d'éclairage artificiel par rapport aux autres fenêtres. La stratégie de contrôle permettant le changement entre les états clair et coloré est basée sur l'intensité de la lumière incidente sur la fenêtre. Cette stratégie permet de réduire considérablement la charge de refroidissant et la demande d'éclairage.

Pour des conditions estivales dans la ville de Reno (Nevada), Klems (2001) a fait des mesures sur un puits de lumière (*skylight)* composé de verre électrochromique, dans le but de déterminer ses performances thermiques. Klems a mis en évidence qu'à l'état coloré, le SHGC était réduit de façon significative, mais qu'une partie de l'énergie absorbée se transmet malgré tout à l'intérieur du bâtiment. Par contre, d'autres mesures effectuées sur un certain type d'électrochromique doté d'un enduit intégral à faible émissivité montrent une diminution significative de la portion absorbée de l'énergie.

Les premières études à grande échelle sur les fenêtres électrochromiques ont été réalisées dans les laboratoires *LBNL* par Lee et DiBartolomeo (2002). L'étude avait pour objet d'illustrer l'effet de l'utilisation de ce type de fenêtres sur le confort des occupants et la consommation d'énergie. Dans cette étude, des fenêtres électrochromiques orientées sud-est ont été testées dans un secteur commercial d'Oakland (Californie) en saison hivernale. Les résultats ont montré que les gains énergétiques étaient moins élevés que prévus. Ceci peut-être en partie dû aux systèmes de contrôle permettant la commutation de coloration.

Lee et al. (2002) ont procédé à d'autres études dans un bâtiment du gouvernement américain situé dans la ville d'Oakland. Plusieurs stratégies de contrôle entre les états clair et coloré ont été testées. Les stratégies les plus intéressantes sont :

Rapport-Gratuit.com

- une stratégie « manuelle » dans laquelle c'est l'occupant qui change l'état de la fenêtre électrochromique selon son niveau de confort thermique et visuel;
- une stratégie automatisée basée sur l'intensité de la lumière du jour et la demande en climatisation.

Les résultats finaux démontrent que la commande de la coloration contribue de manière significative à baisser la demande d'énergie pour la climatisation du bâtiment (40 à 50%).

Toujours aux laboratoires LBNL, Clear (2006) a réalisé un banc d'essai des fenêtres électrochromiques montées directement en direction sud. Ce banc d'essai se compose de trois salles A, B, et C. La salle A possède une fenêtre à double vitrage standard. Les salles B et C sont dotées de fenêtres électrochromiques avec une transmittance variant entre 5 % et 60 %. Les résultats du banc d'essai montrent qu'on peut développer un système électrochromique de fenêtres qui permet d'économiser de l'énergie tout en maintenant le confort visuel.

Une autre étude expérimentale menée dans un bâtiment commercial a été conduite par Lee et al (2006) sur une durée de 20 mois. L'étude avait pour objectif de quantifier l'économie d'énergie due à l'utilisation des fenêtres électrochromiques en utilisant diverses stratégies de contrôle couplées à l'utilisation d'un écran vénitien pour le contrôle des gains solaires.

Ces études ont été entreprises pour acquérir une expérience réelle avec les façades électrochromiques, évaluer les réactions des occupants face à cette technologie, et surveiller les diverses variables environnementales (qualité de l'air intérieur, température, luminosité). Bien que ces études ont surtout été menées en Californie, elles confirment les gains énergétiques dûs à l'utilisation des fenêtres électrochromique. Cependant, d'autres données seront nécessaires pour confirmer les avantages pendant une année complète et pour d'autres climats.

En collaboration avec le département de l'énergie américain, McGrail (2005) a fait une recherche sur les bénéfices des fenêtres électrochromiques. Les résultats publiés dans l'article prouvent que l'utilisation de ce type de fenêtre réduit la consommation d'énergie associée à

la climatisation (49 %), et la demande des systèmes CVCA (16%), ainsi qu'une réduction significative pour la demande d'éclairage.

Assimakopoulou (2004) dans le cadre de sa thèse doctorale, a utilisé la logique floue pour la commande des fenêtres électrochromiques. Les résultats obtenus montrent l'intérêt d'utilisation de ce type de fenêtres dans les bâtiments. Récemment, Piccolo, Pennisi et Simone (2009) ont publié une étude expérimentale sur l'utilisation des fenêtres électrochromiques pour le contrôle de l'éclairage naturel dans les bâtiments. Des mesures effectuées en fonction des conditions météorologiques, de l'orientation et des quelques stratégies de contrôle ont montré la très grande polyvalence des vitrages électrochromiques pour le contrôle du confort visuel. Les études actuelles sur la technologie électrochromique mettent l'emphase sur les volets énergie et éclairage. Une exception est l'étude de Syrrakou et al. (2005) dans laquelle on propose une méthodologie d'analyse selon une perspective plus globale qui inclut des indicateurs tels que le cycle de vie, le coût d'achat et l'énergie requise pour la fabrication de ces produits. Cependant, l'article met l'emphase sur la technique d'analyse et la fenêtre électrochromique étudiée n'est comparée à aucune autre fenêtre.

3.2 Norme canadienne du rendement énergétique des fenêtres

Après la crise du pétrole au début des années 70, les manufacturiers ont mis sur le marché une multitude de fenêtres aux caractéristiques variées. À titre d'exemple, mentionnons les films à faible émissivité, les gaz de remplissage inertes, les fenêtres à bord « chaud » et plus récemment les « super » fenêtres qui offrent une résistance thermique 5 fois supérieure aux fenêtres à double vitrage. Cependant, la résistance thermique ne peut, à elle seule, rendre compte des performances énergétiques d'une fenêtre. En effet, l'infiltration/exfiltration d'air à travers le cadre et l'apport du rayonnement solaire ont un impact important sur le bilan énergétique d'une fenêtre. En pratique, il n'est pas facile pour le consommateur de déterminer quel produit offre les meilleures performances énergétiques.

Pour contrer ce problème, le Canada a développé une norme de rendement énergétique pour les fenêtres résidentielles (CSA A440.2). En établissant une base de comparaison équitable

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

pour les différents produits disponibles, le rendement énergétique permet au consommateur de déterminer la fenêtre qui offre les meilleures performances au point de vue énergétique.

La norme CSA A440.2 (2007) s'applique à la détermination des valeurs de rendement énergétique de divers types de systèmes de fenestration, y compris les fenêtres fixes, les fenêtres ouvrantes et les portes coulissantes en verre. Elle énonce des coefficients de rendement énergétique applicables à tous les bâtiments résidentiels. La procédure de calcul de la norme canadienne combine les pertes de chaleur par conduction, les pertes par infiltration et les gains solaires en une seule valeur appelée rendement énergétique (*RE*).

$$RE = \frac{[gains\ solaires] - [pertes\ par\ conduction] - [pertes\ par\ infiltration]}{1\,W/m^2} + 40 \qquad \textbf{(3.1)}$$

Le *RE* d'une fenêtre est sans dimension et donne une indication des pertes (ou des gains) moyennes de chaleur durant une saison de chauffage. Plus le *RE* est élevé, plus la fenêtre est efficace du point de vue énergétique. Le facteur 40, a été ajouté pour rendre le *RE* positif. Le code canadien de l'énergie pour les habitations résidentielles (CNRC, 1997) prescrit une valeur minimum du *RE* des fenêtres pour chaque région du Canada. Mentionnons que le rendement énergétique tel que défini plus haut n'est valable que durant la saison de chauffage. Il est possible de définir un *RE* pour la période de climatisation, mais puisque le climat canadien est dominé par le chauffage, il n'existe aucune norme à ce sujet.

Le système actuellement en place a fait ses preuves et est effectivement très utile pour comparer les performances de différents produits en période hivernale. Cependant, dans le cas des fenêtres électrochromiques, il est difficile d'attribuer une valeur de *RE* puisque le coefficient de gains solaires sera fortement influencé par l'état dans lequel se trouve la fenêtre (clair ou coloré). De plus, le couplage entre les différents modes de transfert de chaleur fait en sorte que le coefficient de déperdition thermique sera également affecté par le changement d'état. Finalement, la stratégie de contrôle entre les états clair et coloré de la fenêtre aura un impact déterminant sur les économies potentielles d'énergie. Par conséquent, on ne peut attribuer à une fenêtre dynamique une valeur de *RE* unique. Aux États-Unis, le NFRC propose un système d'étiquetage des fenêtres dynamiques où l'on indique simplement

le coefficient U_w et les coefficients SHGC pour les états clair et coloré. Ce système permet d'informer le consommateur sur la plage de variation de la fenêtre dynamique, mais ne donne aucune information sur les économies mensuelles ou annuelles associées à ce type de fenêtre.

3.3 Logiciels pour le calcul des performances énergétiques

Historiquement, les performances énergétiques des fenêtres ne pouvaient être déterminées qu'en effectuant des mesures expérimentales sur des prototypes de fenêtres installées dans une chambre climatique. Cette façon de faire exigeait beaucoup de temps et des ressources financières importantes. De plus, certains bancs d'essai mal équipés couplés à des erreurs de mesures faisaient en sorte que la précision de certains résultats était remise en question par les bureaux d'architectes et les firmes de génie conseil.

Au début des années 80, le NFRC a introduit deux progiciels (*Window* et *Therm*) de simulation numérique du transfert de chaleur spécialement adaptés pour les fenêtres. Bien que la version initiale (1.0) de *Window* et *Therm* était limitée en fonctionnalités, ils se sont considérablement améliorés depuis tant au niveau de la fiabilité que de la convivialité. Suite à de nombreuses études de validation au laboratoire LBNL, les prédictions numériques de *Window* 5.0 et *Therm* 2.0 donnent des résultats présentant un écart maximum de 10% par rapport aux résultats expérimentaux. Cependant, pour des cas particuliers tels les murs rideaux et les puits de lumière, les écarts peuvent être plus importants. Il y a une quinzaine d'années, les États-Unis ont recommandé l'utilisation d'outils de modélisation pour la certification des fenêtres et depuis ce temps plus de 60 000 produits ont été certifiés. Les algorithmes de calculs utilisés par *Window* et *Therm* sont conformes à la norme ISO 15099.

Mentionnons finalement que le Canada a également développé un programme de certification des fenêtres basé sur les progiciels *Vision* et *Frame* développés par *Enermodal Engineering* avec le support de l'*Advanced Glazing Laboratory* de l'Université de Waterloo. Les algorithmes de calcul de *Vision* et *Frame* sont très similaires à *Window* et *Therm*. Il est possible qu'on assiste d'ici quelques années à une fusion de ces progiciels de façon à obtenir un code unique de certification des fenêtres pour toute l'Amérique du Nord. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de *Window* et *Therm* a été motivé par le fait qu'ils ont l'avantage

d'être couplées à la librairie *Optics* (V.17). *Optics* est une base de données contenant les propriétés spectrales de 1800 vitrages disponibles sur le marché qui inclut, entre autres, des vitrages électrochromiques.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

Les performances énergétiques d'une fenêtre dépendent de sa résistance thermique et de sa capacité à transmettre et à absorber le rayonnement thermique incident. En pratique, la modélisation du transfert thermique dans une fenêtre doit tenir compte de la transmission de la chaleur par conduction, par convection et par rayonnement.

Ce chapitre présente les outils numériques permettant d'atteindre cet objectif. Les modèles de fenêtres étudiées, et les conditions aux frontières imposées sur ces dernières sont également présentés. Finalement, ce chapitre présente le modèle de rayonnement de Klucher et les relations mathématiques permettant d'évaluer le bilan énergétique horaire sur les modèles de fenêtre étudiés.

4.1 Progiciels *Window* et *Therm*

Dans le cadre de cette étude, les modélisations du transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement dans les fenêtres étudiées ont été réalisées à l'aide des progiciels *Therm* et *Window* (Mitchell et al., 2008) développés par le LBNL aux États-Unis. Ces progiciels ont servi à la modélisation des performances thermiques des fenêtres. Cependant, ils peuvent être utilisés pour la modélisation du transfert de chaleur dans d'autres composantes du bâtiment (murs, portes, toits, etc.). Une présentation détaillée de ces modèles dépasse le cadre de ce mémoire. Dans cette section, seules les relations de base permettant de déterminer les coefficients U_w et $SHGC_w$ seront présentées.

4.1.1 Progiciel *Window*

Le progiciel *Window* permet le calcul du transfert de chaleur au centre du vitrage. Tel que mentionné à la section 1.5, le transfert thermique dans cette région est quasi-unidimensionnel. Par conséquent, le coefficient de déperdition thermique U_{cg} est donné par :

$$U_{cg}^{-1} = \frac{1}{h_{int+r}} + \frac{2l_g}{k_g} + \frac{l}{k_{eff}} + \frac{1}{h_{ext+r}} \tag{4.1}$$

La conductivité thermique effective (k_{eff}) tient compte de la convection et de la radiation entre les surfaces de verre situées dans la cavité.

Les gains de chaleur solaire dépendent principalement des coefficients de transmissivité (τ), réflectivité (ρ) et d'absorptivité (α) du verre. Sur une plaque de verre, le coefficient de réflectivité n'est pas nécessairement le même sur les deux surfaces. De plus, les coefficients τ, α et ρ varient en fonction de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Window adopte une approche « multi-bandes » dans laquelle le spectre solaire est divisé en segments ou en bandes. Dans chaque segment, les propriétés du vitrage sont supposées constantes. Plus le nombre de bandes est élevé, plus la méthode sera en mesure de considérer les variations spectrales des coefficients nécessaires au calcul des gains solaires. Cependant, le temps de calcul sera également plus important.

Les résultats de *Window* sont exportés dans le progiciel *Therm,* pour construire le seuil, le montant, et la traverse haute. Ces parties sont ensuite, combinées avec le vitrage pour construire un système complet de fenestration.

4.1.2 Progiciel Therm:

Le progiciel *Therm* permet le calcul du transfert thermique en bordure du vitrage et dans le cadre. Dans ces régions, le transfert de chaleur est bidimensionnel. En considérant un régime permanent, la loi de conservation d'énergie permettant l'évaluation du champ de température dans un milieu solide s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{q''}{k} \tag{4.2}$$

Cette équation est résolue numériquement dans *Therm* par la méthode des éléments finis. *Therm* inclut un générateur automatique de mailles en plus d'un estimateur d'erreurs. Les résultats peuvent être visualisés à même le logiciel soit sous forme d'isothermes ou de vecteurs de flux de chaleur. Lorsque le champ de température dans le cadre est déterminé, le taux de transfert thermique du cadre en appliquant un bilan d'énergie sur la surface du cadre située du coté intérieur.

$$\vec{q}'' = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\vec{j}\right) \tag{4.3}$$

Le coefficient de déperdition thermique dans le cadre est :

$$U_f = \frac{q_f / \Delta T}{l_f} \tag{4.4}$$

4.1.3 Géométrie dans *Therm*

Dans *Therm*, la géométrie d'une fenêtre se compose de trois parties : le seuil situé dans la partie inférieure, la traverse haute (partie supérieure du cadre) et le montant (partie latérale). La Figure 4.1 illustre ces différentes parties.

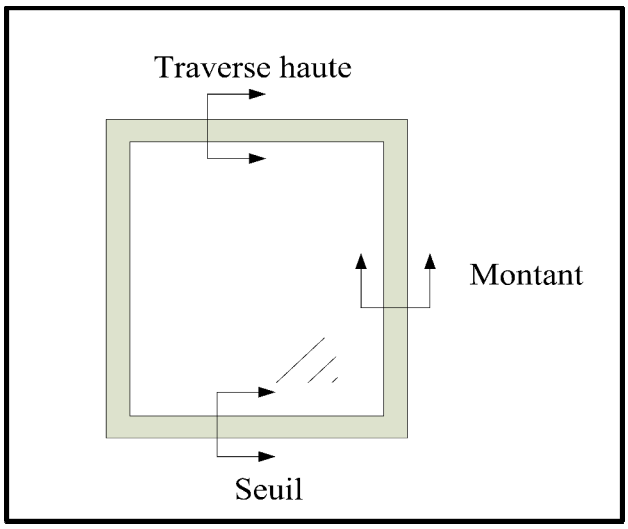


Figure 4.1 Les différentes composantes de la fenêtre dans *Therm*.

Chaque partie est dessinée dans un fichier séparé et sera simulée dans le progiciel *Therm*, ce qui permet d'avoir U_{eg} et U_f.

4.2 Modèles de fenêtres étudiées

La Figure 4.2 présente les deux types de fenêtres étudiées. La première fenêtre (DW) est constituée d'un double vitrage scellé rempli d'un mélange d'argon (95%) et d'air (5%). Les plaques de verre de l'unité scellée ont une épaisseur de 3 mm. Le vitrage situé du côté intérieur est doté d'un film à faible émissivité (ε=0,04). La cadre en bois a une épaisseur de 89 mm et une hauteur de 57 mm pour une surface totale (A_f) de 0,29 m^2. Les dimensions de la fenêtre sont de 1,20 m de largeur par 1,50 m de hauteur (voir Figure 4.3).

La deuxième fenêtre (fenêtre EW) est en tout point identique à la fenêtre DW exception faite du vitrage situé du côté extérieur qui est remplacé par un vitrage électrochromique d'une épaisseur de 4 mm.

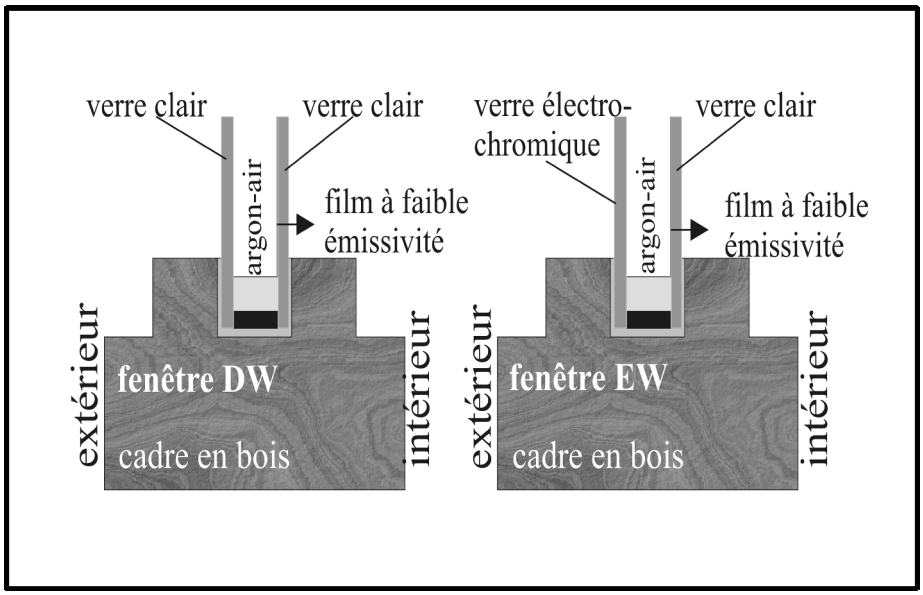


Figure 4.2 Fenêtre à double vitrage standard (DW) et fenêtre électrochromique (EW).

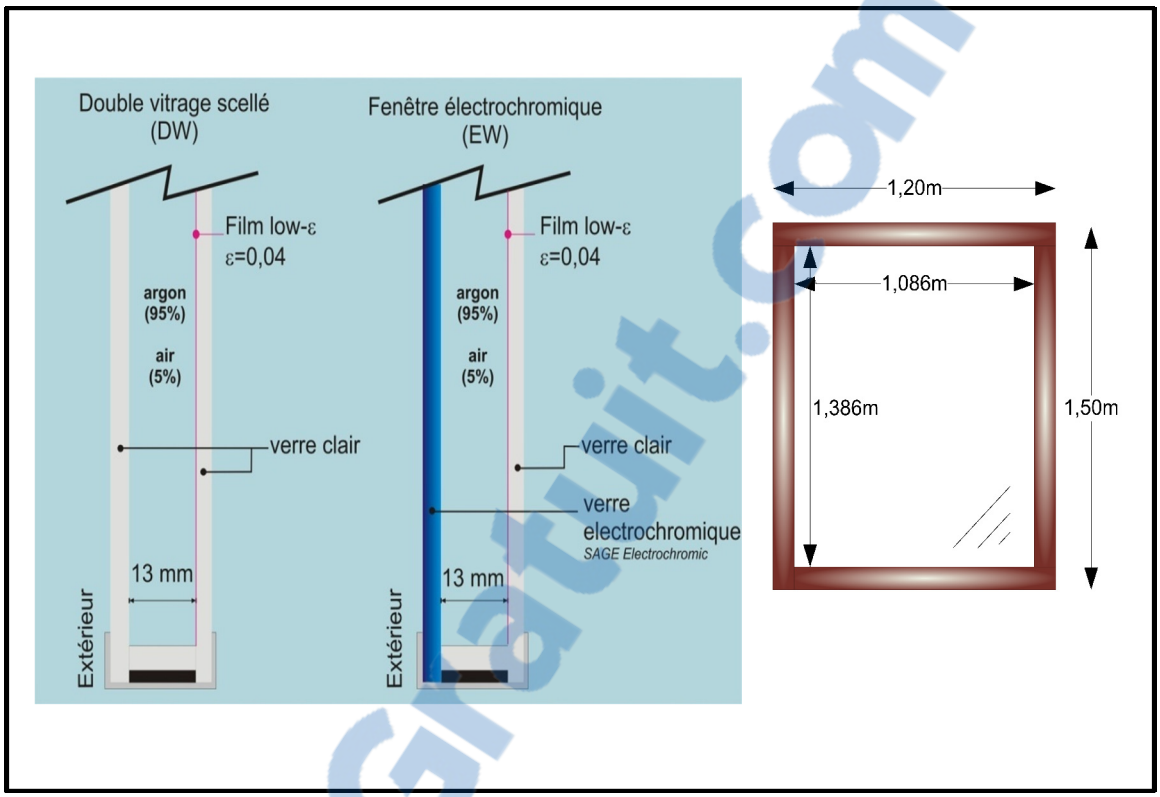


Figure 4.3 Dimensions des fenêtres.

Les propriétés optiques spectrales des vitrages étudiés sont tirées de la base de données IGDB v.16.2 (*International Glazing Database*) (Versluis et al., 2003). La Figure 4.4 présente la variation du coefficient de transmissivité, des vitrages clair et électrochromique, en fonction de la longueur d'onde pour une incidence normale du rayonnement.

Rapport-Gratuit.com

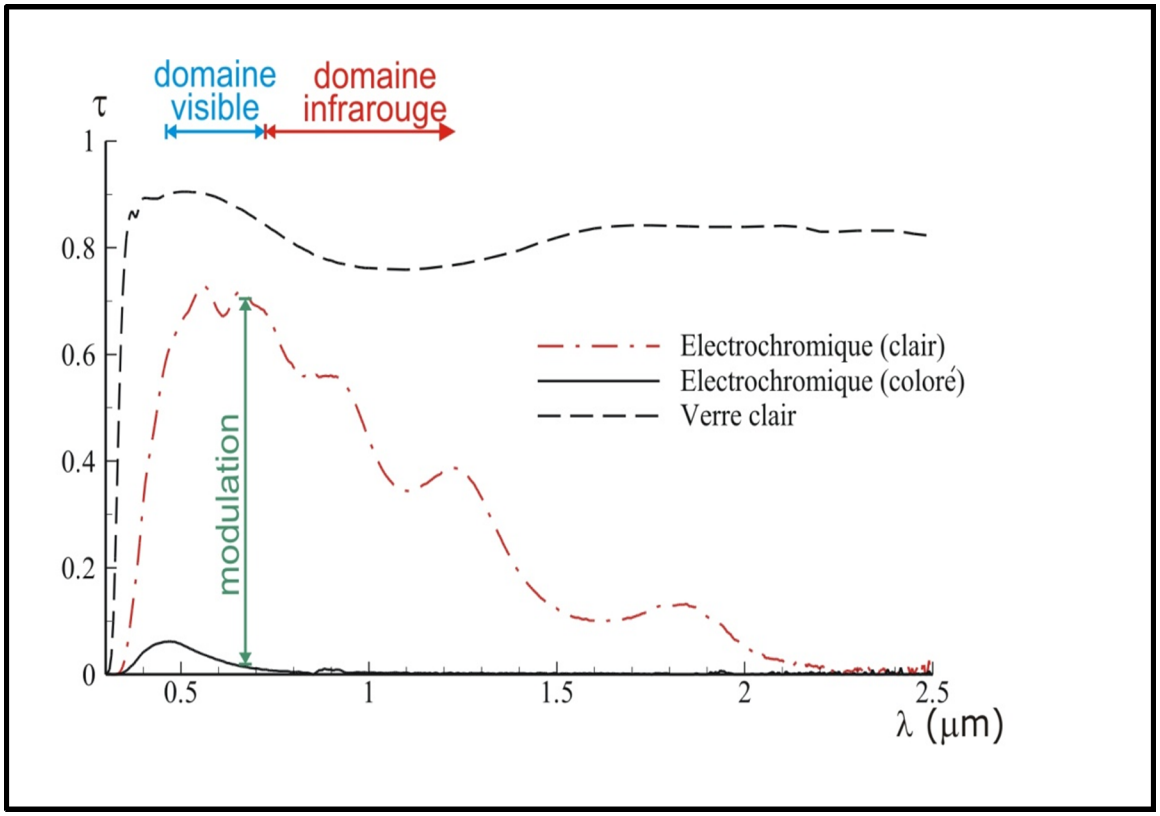


Figure 4.4 Coefficient de transmissivité en fonction de la longueur d'onde.

4.3 Conditions aux frontières

Après que la géométrie soit dessinée, le programme localise automatiquement tous les segments externes de frontière et l'utilisateur doit définir les conditions frontières qui s'appliquent à chaque segment. Les choix des conditions frontières incluent la convection, le flux thermique constant, la température constante et l'intensité du rayonnement.

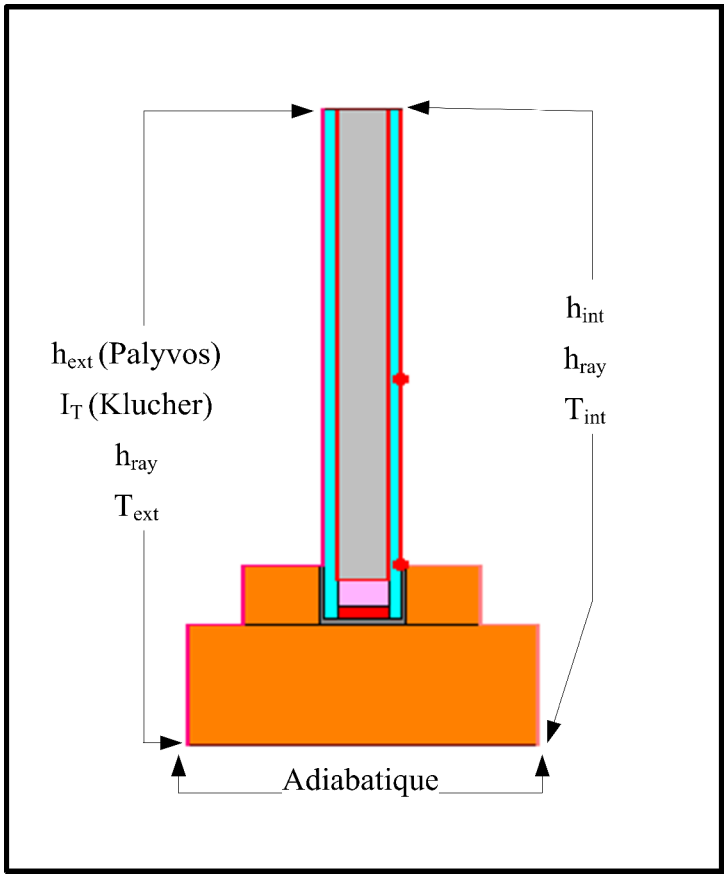


Figure 4.5 Conditions aux frontières.

La Figure 4.5 montre un exemple des conditions aux frontières appliquées à la géométrie étudiée. On impose une condition adiabatique pour les deux surfaces horizontales au haut et au bas de la fenêtre. La surface inférieure repose sur la structure du bâtiment. Pour les surfaces intérieures et extérieures, différentes conditions sont appliquées par le biais d'un coefficient de convection et une intensité de rayonnement incident. Précisons que la surface extérieure de la fenêtre est exposée à des conditions frontières calculées à partir d'un fichier météorologique.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.4 Étapes de calculs

4.4.1 Fichier météorologique

Les coefficients U_w et $SHGC_w$, pour chaque type de fenêtres, sont évalués sur une base horaire en fonction des conditions extérieures. Ces conditions proviennent d'un fichier météorologique pour la ville de Montréal au Canada. Ce fichier contient les valeurs horaires pour une année typique de plusieurs paramètres tels que : la température extérieure, la vitesse et la direction du vent, l'irradiation directe, diffuse et globale sur une surface horizontale (voir annexe I).

4.4.2 Critères du choix des jours étudiés

Le fichier météorologique contient les valeurs nécessaires aux calculs thermiques sur toute une année. Par contre, le nombre d'étapes nécessaires pour modéliser les différentes parties d'une fenêtre est très élevé. Effectuer des calculs horaires sur une année complète exigerait un temps considérable. Par conséquent, seulement quelques jours en période hivernale et estivale ont été choisis.

Puisque les valeurs moyennes de température, de rayonnement solaire, de vitesse et direction du vent changent continuellement, il n'est pas évident de faire un choix de jour représentatif des conditions auxquelles une fenêtre peut-être soumise lors de la saison de chauffage et de climatisation. Dans le cadre de ce travail, le choix des jours est basé sur l'intensité du rayonnement incident sur la fenêtre pendant une journée. Ainsi, trois jours ont été choisis en janvier et trois autres jours en juillet. En déterminant la valeur du rayonnement moyen journalier pour le mois de janvier, le premier jour choisi se situe près de la moyenne journalière d'ensoleillement du mois. Les 2e et 3e jours se situent, respectivement à un écart-type sous et au-dessus de la valeur moyenne mensuelle du rayonnement. Le choix des trois jours pour le mois de juillet a été fait de la même façon (voir annexe II).

4.4.3 Calcul du rayonnement solaire incident

Les données de rayonnement dans le fichier météorologique contiennent le rayonnement direct et le rayonnement diffus mesurés sur une surface horizontale. Pour déterminer les performances énergétiques d'une fenêtre installée verticalement, il est nécessaire de convertir ces données en rayonnement direct, isotopique diffus et circumsolaire diffus équivalent. De plus, une portion attribuable au rayonnement réfléchi par le sol doit être considérée. Il existe plusieurs modèles permet de tenir compte de ces contributions sur une surface inclinée. Loutzenhiser et al. (2007)comparent sept modèles de complexité variable. Dans le cadre de ce mémoire, le modèle de Klucher (Loutzenhiser et al., 2007) a été choisi puisqu'il est relativement simple à implanter et les résultats donnés par ce modèle se comparent à ceux obtenus par les modèles plus complexes tels que, par exemple, celui de Perez et al. (1990).

L'albédo du sol a une influence sur l'intensité du rayonnement incident I_g sur la fenêtre. Cette valeur a été fixée à 0,26 pour les simulations en période estivale (gazon vert) et à 0,4 en période hivernale (sol couvert de neige en milieu urbain) selon Thevenard et Haddad (2006). Les résultats obtenus permettent de créer les conditions aux frontières sur une base horaire pour les progiciels *Therm* et *Window*. Un exemple de ces résultats fait l'objet de l'annexe III.

4.4.4 Irradiation

La Figure 4.6 présente schématiquement l'irradiation incidente totale sur la surface extérieure d'une fenêtre. Cette irradiation totale provient de la contribution du rayonnement direct, isotopique diffus, circumsolaire diffus et une portion attribuable au rayonnement solaire réfléchi par le sol.

Le rayonnement solaire direct (I_s) atteint la surface extérieure de la fenêtre à un angle θ_s. Cet angle est en fonction de la position géographique, l'orientation de la fenêtre et de l'heure du jour. En première approximation, on peut supposer que le rayonnement circumsolaire diffus (I_c) atteint la fenêtre au même angle d'incidence que I_s soit θ_s.

La distribution angulaire du rayonnement isotropique diffus incident sur une fenêtre est généralement inconnue. Cependant, il est possible d'attribuer un angle d'incidence effectif à cette composante de l'irradiation totale en effectuant une intégration du rayonnement transmis sur tous les angles d'incidence possibles. Par conséquent, I_d peut être considérée comme une irradiation incidente sur la fenêtre à un angle d'incidence unique θ_d. De même, I_g atteint la fenêtre à un angle d'incidence équivalent à θ_g. Pour une fenêtre installée verticalement, cette intégration conduit à $\theta_d \cong \theta_g \cong 60^o$(Duffie et Beckman, 2006).

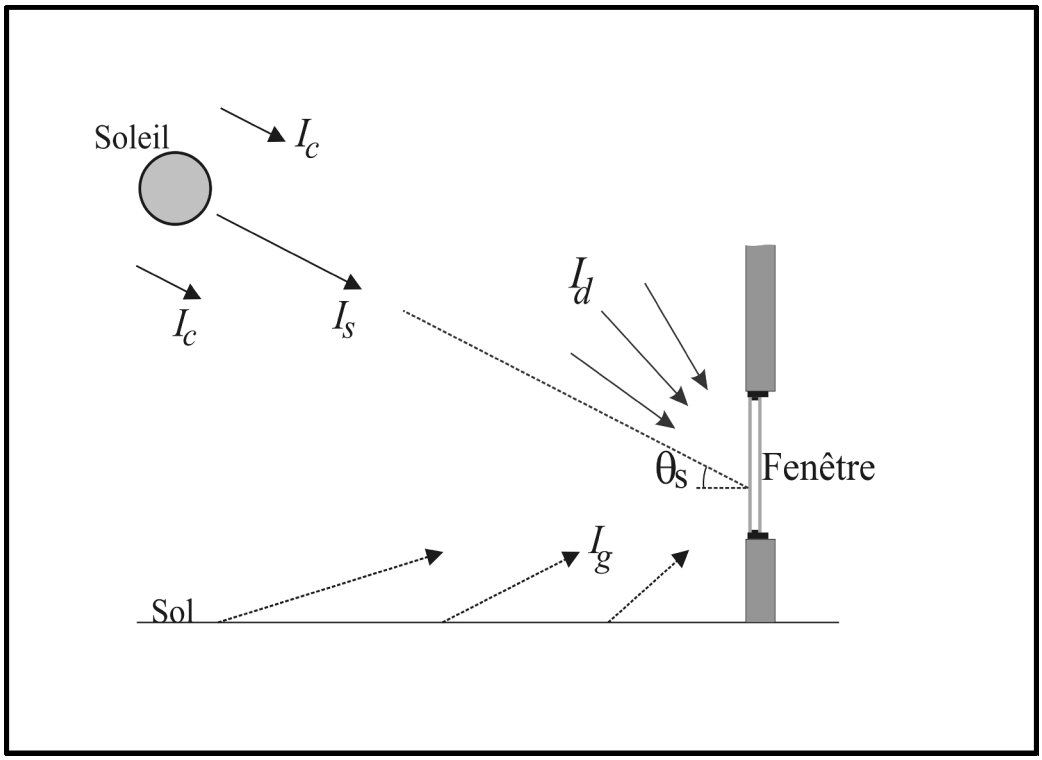


Figure 4.6 Représentation schématique des différentes contributions de l'irradiation incidente totale sur une fenêtre.

4.4.5 Coefficient de convection extérieur

Comme hypothèse, la température radiante moyenne du côté extérieur de la fenêtre $\overline{T}_{ray,ext}$, est supposée identique à T_{ext}. Par contre, le coefficient de convection sur la surface extérieure est

fortement influencé par la vitesse et la direction du vent. Ce coefficient est évalué sur une base horaire par les corrélations de Palyvos (2008).

$$h_{ext} = \begin{cases} 7{,}4 + 4 \times |V| & (face\ au\ vent) \\ 4{,}2 + 3{,}5 \times |V| & (ombre\ du\ vent) \end{cases} \tag{4.5}$$

4.4.6 Conditions frontières intérieures

Le coefficient de convection sur la surface intérieure d'une fenêtre varie en fonction de la hauteur. Il est plus élevé au niveau de la traverse supérieure qu'au niveau du dormant. De plus, la présence de rideaux ou de store peut affecter l'écoulement d'air à proximité d'une fenêtre et par conséquent affecter le coefficient h_{int}. Bien qu'il soit possible d'évaluer la variation du coefficient *h* en fonction de la hauteur, *Window* ne permet pas l'imposition d'un coefficient variable. Par conséquent, le coefficient h_{int} a été fixé à 8 W/m^{2o}C ce qui est conforme aux recommandations de la norme CSA A440. Le Tableau **4.1** présente les conditions frontières du côté intérieur de la fenêtre pour les simulations effectuées en période hivernale et estivale.

Tableau 4.1 Conditions frontières du côté intérieur de la fenêtre

	T_{int} (^{o}C)	**$\overline{T}_{ray,int}$ (^{o}C)**	**h_{int} (W/m^{2o}C)**	**E**
Hiver	20	20	8,0	1,0
Été	24	24	8,0	1,0

4.4.7 Utilisations des résultats dans Window et Therm

Les données du fichier météorologique pour Montréal, couplées à l'utilisation des méthodes de Klucher et Palyvos, donnent les conditions frontières horaires nécessaires pour établir le bilan énergétique sur les modèles de fenêtres étudiées. Ces données sont utilisées par *Window* pour évaluer U_{cg}, le progiciel *Therm* évalue par la suite les coefficients U_f, et U_{eg}

pour le montant, le seuil et la traverse supérieure. Finalement, les résultats sont ensuite exportés vers *Window* pour une analyse de la fenêtre complète (U_w). Les étapes décrites précédemment doivent être répétées pour chaque heure, chaque orientation et type de fenêtres. La Figure 4.7 montre les étapes de modélisation dans les progiciels *Therm* et *Window*.

Plus de détails sur les étapes de modélisation sont donnés à l'annexe IV.

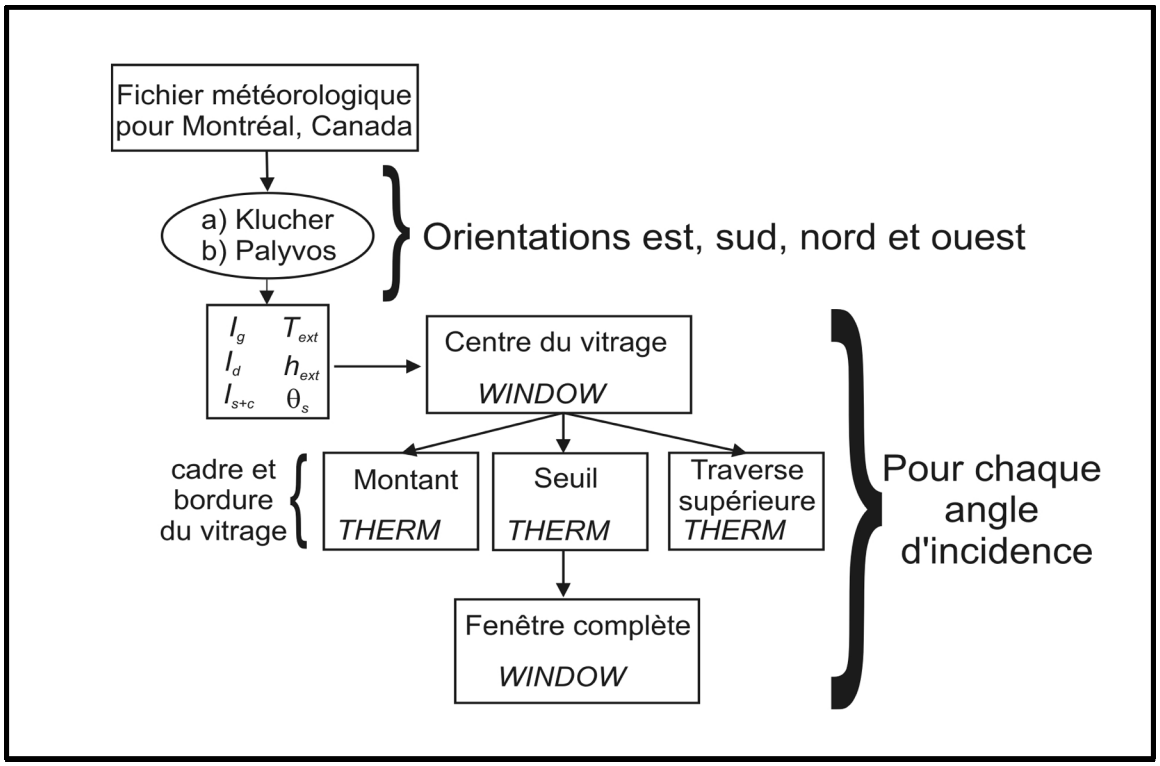


Figure 4.7 Résumé des étapes de modélisation.

4.4.8 Calcul du bilan énergétique

La version actuelle (v. 6.2) du progiciel *Window* ne permet pas de considérer plusieurs sources d'irradiation associées à des angles d'incidence différents. Par conséquent, la portion du rayonnement direct et circumsolaire diffus doit faire l'objet d'un calcul indépendant des rayonnements diffus I_g et I_d. Généralement, la portion diffuse du rayonnement ne représente qu'une fraction du rayonnement total. Ce constat, nous incite à croire que les contributions I_g et I_d sont négligeables sur le bilan énergétique d'une fenêtre. Cependant, on observe fréquemment des situations où une fenêtre est exposée uniquement au rayonnement diffus.

De façon à déterminer l'influence de rayonnement diffus sur le bilan énergétique des fenêtres étudiées, trois approches sont comparées pour estimer les apports de chaleur par rayonnement.

- **La première approche** consiste à considérer de façon indépendante le rayonnement incident sur la fenêtre à un angle $\theta_{s,i}$ (direct et circumsolaire) du rayonnement diffus provenant du sol et du ciel à un angle effectif de 60° pour une fenêtre installée verticalement. Selon cette approche, la contribution du rayonnement solaire Q_s^1 au bilan énergétique de la fenêtre est :

$$Q_s^1 = \sum \left[\left(SHGC_{w,i}(\theta_{s,i})(I_{s,i} + I_{c,i}) + SHGC_{w,i}(60^o)(I_{g,i} + I_{d,i}) \right) \Delta t \right] \tag{4.6}$$

- **La deuxième approche** est basée sur l'hypothèse que tout le rayonnement incident atteint la fenêtre à un angle $\theta_{s,i}$.

$$Q_s^2 = \sum \left[\left(SHGC_{w,i}(\theta_{s,i})(I_{s,i} + I_{c,i} + I_{g,i} + I_{d,i}) \right) \Delta t \right] \tag{4.7}$$

- **La troisième approche** suppose que la contribution du rayonnement diffus est négligeable dans le bilan énergétique des apports de chaleur par rayonnement.

$$Q_s^3 = \sum \left[\left(SHGC_{w,i}(\theta_{s,i})(I_{s,i} + I_{c,i}) \right) \Delta t \right] \tag{4.8}$$

En négligeant l'infiltration/exfiltration d'air à travers la fenêtre, le bilan énergétique est donné par la relation suivante :

$$Q_{w,t} = Q_s^X + \sum \left[\left(U_w [T_{ext} - T_{\text{int}}] \right) \Delta t \right] \tag{4.9}$$

Dans la relation précédente Δt représente le pas de temps (1 heure) et $Q_{w,t}$ est le gain (ou la perte) de chaleur à travers la fenêtre en Wh/m^2. La variable X peut prendre les valeurs 1, 2 et

3 selon l'approche utilisée pour le calcul des gains solaires (équations 4.6 à 4.8). Le bilan énergétique sur la saison de chauffage (climatisation) peut-être obtenu en effectuant cette sommation pour chaque heure de la période de chauffage (climatisation).

CHAPITRE 5

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

Ce chapitre présente les résultats numériques des performances énergétiques des fenêtres étudiées. Dans un premier temps, les coefficients de déperditions thermiques des fenêtres DW (double vitrage) et EW (électrochromique) sont comparés pour des conditions estivales et hivernales en l'absence de rayonnement solaire. Ensuite, les variations horaires des coefficients U_w et $SHGC_w$ sont présentées pour deux journées « typiques » tirées du fichier météorologique. Puisque les différences principales entre les fenêtres se situent au niveau des propriétés optiques, la seconde partie de ce chapitre est consacrée à la comparaison des gains solaires à travers les modèles de fenêtres. Tel que présenté au chapitre 4, trois approches distinctes de calcul des gains solaires sont comparées. Le chapitre se termine par une comparaison des performances énergétiques journalière calculées à partir des résultats de simulations effectuées sur 72 heures en été et 72 heures en hiver.

5.1 Coefficient de déperdition thermique

Avant de présenter l'influence du rayonnement sur les performances énergétiques des fenêtres, cette section compare les déperditions (ou les gains) de chaleur en l'absence de rayonnement solaire. La figure 5-1 présente les coefficients U_{cg}, U_{eg} et U_f des fenêtres DW et EW soumises à des conditions hivernales extraites du fichier météorologique utilisé pour cette étude. La figure 5-2 présente les mêmes coefficients obtenus pour les modèles de fenêtres soumises à des conditions estivales. Dans les deux cas, les simulations ont été effectuées pour une seule condition horaire en l'absence de rayonnement solaire. Mentionnons que dans ces conditions, il n'y a pas lieu de faire la différence entre les états clair et coloré de la fenêtre électrochromique.

Rapport-Gratuit.com

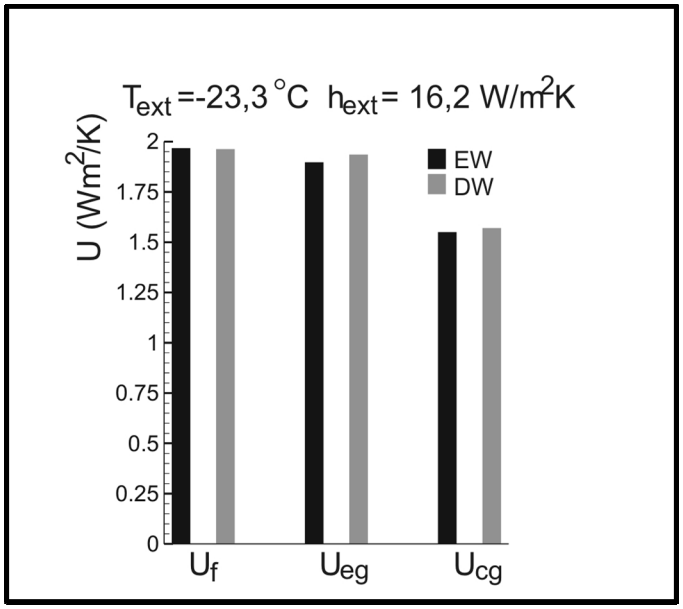


Figure 5.1 Coefficients U_f, U_{eg} et U_{cg} des fenêtres DW et EW (Conditions hivernales).

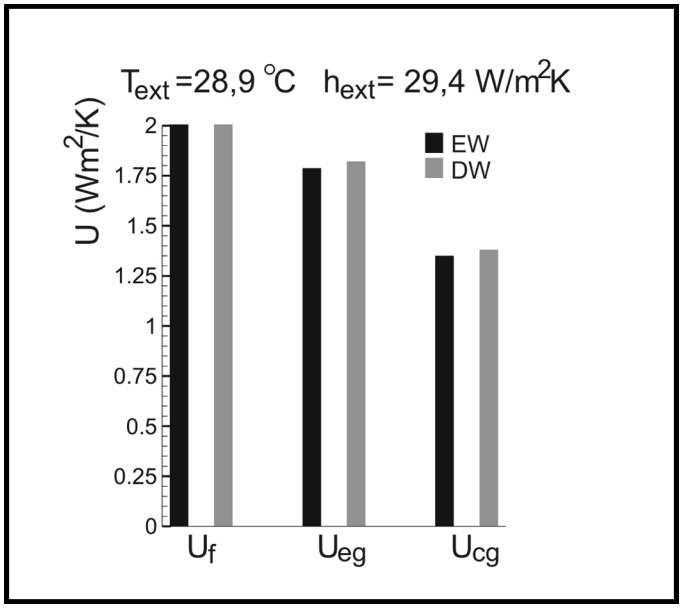


Figure 5.2 Coefficients U_f, U_{eg} et U_{cg} des fenêtres DW et EW (Conditions estivales).

Tel que mentionné à la section 4.2, les modèles de fenêtres DW et EW sont très similaires. Dans les deux cas, les dimensions et la composition du cadre sont identiques. Le gaz de remplissage dans l'unité scellée est également de même nature pour les deux fenêtres. De

plus, chaque fenêtre est dotée d'un intercalaire en aluminium avec bris thermique et du même film à faible émissivité. La seule différence entre les fenêtres se situe au niveau du vitrage situé du côté extérieur. Pour la fenêtre EW, le vitrage clair d'une épaisseur de 3 mm et d'une conductivité thermique (k) de 1,0 W/mK est remplacé par un vitrage électrochromique d'une épaisseur de 4 mm et k= 0,95 W/mK.

En l'absence de rayonnement solaire, les coefficients de déperdition thermique dans le cadre, en bordure et au centre du vitrage devraient être similaires, peu importe le modèle de fenêtre. On constate effectivement aux figures 5-1 et 5-2 que les coefficients U des deux types de fenêtres sont presque identiques. Les écarts entre les coefficients de déperdition thermiques dans le cadre (U_f) des fenêtres DW et EW sont inférieurs à 0,2 % quelques soient les conditions environnementales. Les écarts entre les fenêtres sont légèrement plus importants pour les coefficients U_{eg} et U_{cg} mais demeurent inférieurs à 1,8 %. Ces différences étant attribuables à l'épaisseur et la conductivité thermique du vitrage électrochromique.

La comparaison des coefficients U entre les conditions hivernales et estivales montre quelques différences notables. Mentionnons que ces conditions horaires ont été prises « au hasard », le seul critère dans le choix étant l'absence de rayonnement solaire (direct ou diffus). Les coefficients U_f des fenêtres DW et EW obtenus pour la condition horaire hivernale sont légèrement inférieurs à ceux obtenus l'été. Cette différence s'explique par la variation de la vitesse et direction du vent qui font en sorte que le coefficient de convection du côté extérieur s'établit à 16,2 W/m^{2}K l'hiver et à 29,4 W/m^{2}K l'été. Par contre, on observe une augmentation du coefficient U_{cg} de l'ordre de 12 % entre les conditions horaires hivernales et estivales. Pour ces conditions horaires spécifiques, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est de 43,3 ^{o}C en hiver contre seulement 4,9 ^{o}C en été. Par conséquent, la boucle de convection entre les deux vitrages est nettement plus importante en hiver alors qu'en été, le nombre de Nusselt dans la cavité est approximativement égal à l'unité et le transfert de chaleur dans le centre du vitrage se fait principalement par conduction.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

5.2 Coefficients de gains solaires

La contribution du rayonnement sur le bilan énergétique d'une fenêtre peut-être quantifiée à l'aide du coefficient d'apport par rayonnement solaire ($SHGC_w$), défini comme étant la fraction (N_i) du rayonnement solaire incident qui est transmis dans le bâtiment incluant la fraction du rayonnement absorbée par la fenêtre et réémis vers l'intérieur soit par conduction, convection ou rayonnement. Pour une fenêtre donnée, le coefficient $SHGC_w$ dépend de l'angle d'incidence du rayonnement sur la fenêtre et des conditions environnementales qui prévalent du côté intérieur et extérieur.

Le coefficient *SHGC* associé au vitrage est obtenu en effectuant une moyenne pondérée des gains solaires en bordure et au centre du vitrage pour des longueurs d'onde typiquement comprises entre 0,2 µm et 2,5 µm. Le coefficient global d'apport par rayonnement solaire de la fenêtre ($SHGC_w$) est déterminé par la moyenne pondérée des coefficients dans le cadre et dans la partie transparente (bordure et centre du vitrage).

La figure 5-3 présente la variation du coefficient $SHGC_w$ en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement incident (θ). Un angle θ de 0° correspond à une incidence de rayonnement parallèle au vecteur normal par rapport à la surface du vitrage. Pour les fenêtres DW et EW à l'état clair, on remarque que les coefficients $SHGC_w$ sont relativement constants pour des angles d'incidence inférieurs à 50°. Au delà de 50°, on observe une diminution rapide du coefficient de gains solaires en fonction de θ. Pour des angles d'incidence supérieurs à 50°, une portion significative du rayonnement est réfléchie par le vitrage situé du côté extérieur. On constate que même à l'état clair, la transmission des gains solaires de la fenêtre EW est inférieure à celle de la fenêtre à double vitrage clair. Cette différence s'explique par le fait que le coefficient de transmissivité du verre électrochromique à l'état clair est plus faible que celui du verre clair standard. Par conséquent, une portion plus importante du rayonnement est soit absorbée, soit réfléchie par le verre électrochromique. La transmissivité du verre électrochromique à l'état coloré étant très faible, on remarque que dans cet état, le coefficient $SHGC_w$ est faible et se situe approximativement à 0,1 sur l'intervalle [0°-80°].

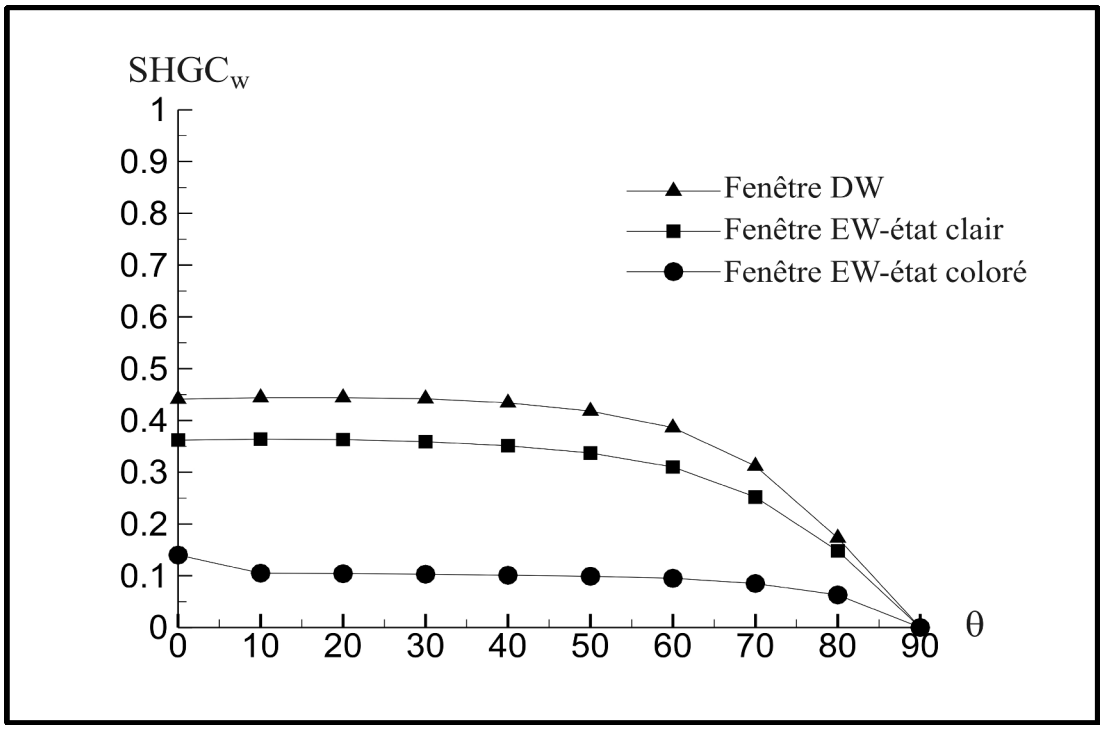


Figure 5.3 Variation du coefficient $SHGC_w$ en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement.

5.3 Bilan énergétique : résultats horaires

L'enveloppe des bâtiments est soumise à des sollicitations thermiques qui changent continuellement selon les conditions météorologiques. En particulier, le transfert de chaleur dans une fenêtre sera affecté par la température extérieure, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et l'orientation de la fenêtre. Les gains solaires dépendent, entre autres, de la position du soleil par rapport à la fenêtre et de la couverture nuageuse. Puisque les gains solaires incluent la portion du rayonnement absorbée par la fenêtre qui est ensuite transmise vers l'intérieur, ces derniers seront aussi affectés par les changements de température, de vitesse et d'orientation du vent.

La figure 5.4 présente la variation horaire de la température extérieure pour une journée d'été et d'hiver. Ces valeurs mesurées le 10 juillet et le 26 janvier, proviennent d'un fichier d'une année météorologique « typique » pour la ville de Montréal.

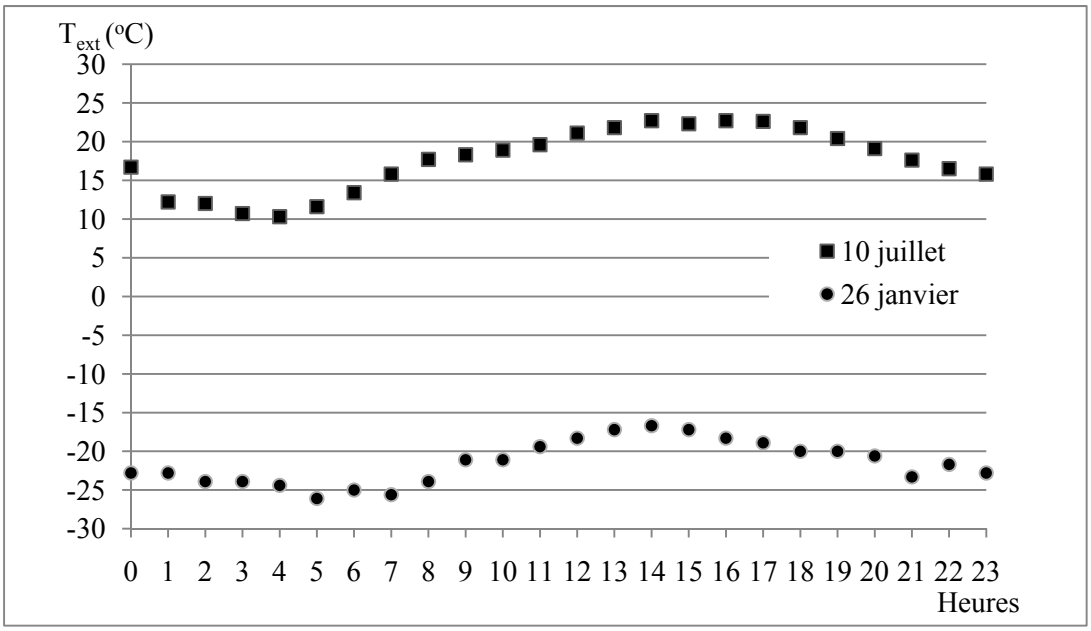


Figure 5.4 Variation horaire de la température extérieure le 10 juillet et le 26 janvier.

La figure 5-5 présente les variations horaires de l'irradiation sur une surface horizontale pour le 10 juillet et 26 janvier. Ces valeurs tirées du fichier météorologique incluent le rayonnement solaire direct et circumsolaire (I_s et I_c) ainsi que le rayonnement diffus du ciel (I_d) et du sol (I_g). Précisions que la portion du rayonnement diffus provenant du sol est nulle (I_g=0) pour une surface horizontale. On observe sur la figure 5-5 que le 10 juillet correspond à une journée nuageuse où l'intensité du rayonnement diffus est supérieure à l'intensité du rayonnement direct. En hiver (le 26 janvier), le rayonnement direct (I_s, I_c) atteint 500 W/m^2 à midi et le rayonnement diffus n'excède pas 210 W/m^2 et s'établit en moyenne à 110 W/m^2 entre 7:00 et 16:00.

Ces données horaires valables sur une surface horizontale, ont été converties à l'aide du modèle de Klucher en intensité de rayonnement I_s, I_c, I_d et I_g sur une surface verticale orientée selon les quatre points cardinaux (nord, est, sud et ouest).

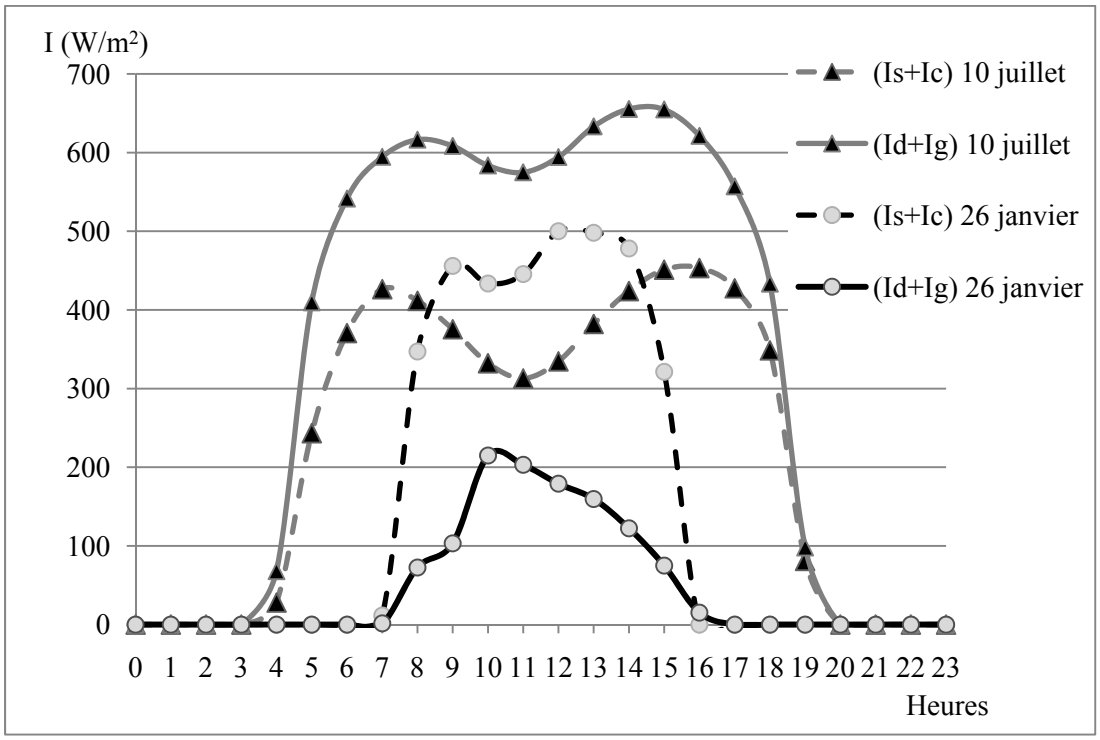


Figure 5.5 Variation horaire de l'irradiation directe et diffuse le 10 juillet et le 26 janvier.

Les variations horaires du coefficient U_w des fenêtres DW et EW à l'état coloré sont présentées à la figure 5-6 pour les conditions estivales et à la figure 5-7 pour les conditions hivernales. Dans les deux cas, les résultats sont présentés pour des fenêtres orientées à l'est. On remarque que les coefficients U_w sont très similaires pour les deux fenêtres et que les coefficients de déperditions thermiques sont peu affectés par les variations de vitesse et de direction du vent. Pour les conditions hivernales, ceci peut s'expliquer en partie par le fait que la vitesse du vent est plus faible à -25 ^oC que celle à -16 ^oC. Ainsi, l'augmentation du nombre de Nusselt dans la cavité est en partie compensée par la diminution du coefficient de convection du côté extérieur de la fenêtre.

Pour la fenêtre électrochromique à l'état coloré, le rayonnement solaire peut avoir un impact sur l'intensité de la boucle de convection dans l'unité scellée. En effet, une partie du rayonnement est absorbée par le vitrage électrochromique ce qui est susceptible de changer le nombre de Nusselt dans la cavité. Cependant, l'intensité de la boucle de convection dans l'unité scellée est généralement faible pour une fenêtre soumise à des conditions estivales.

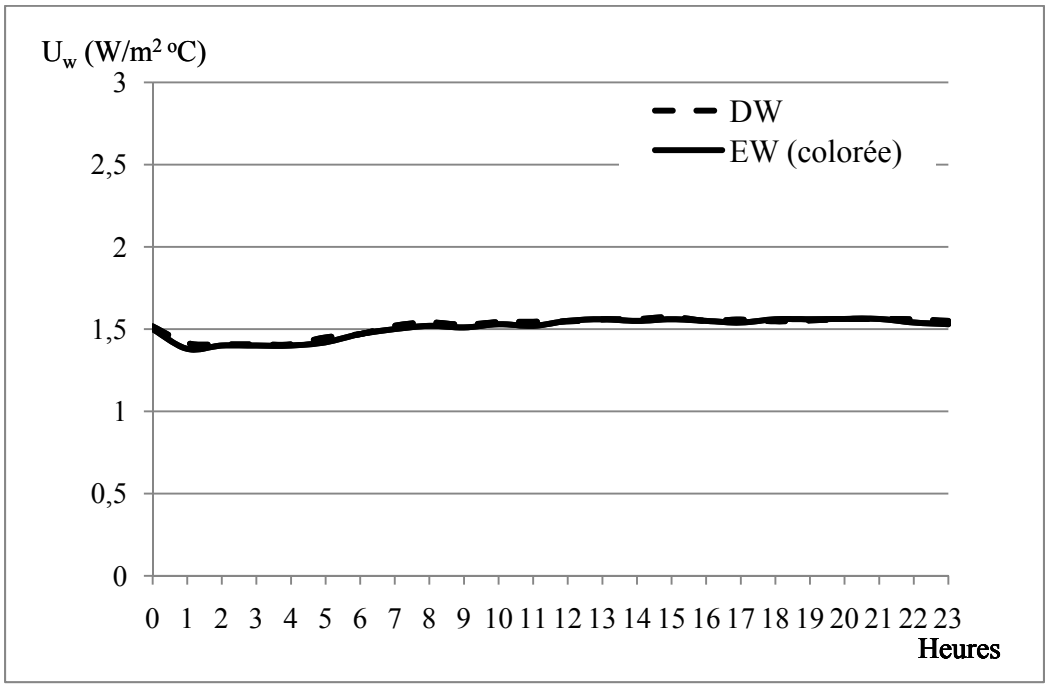


Figure 5.6 Variation horaire du coefficient U_w le 10 juillet – orientation est.

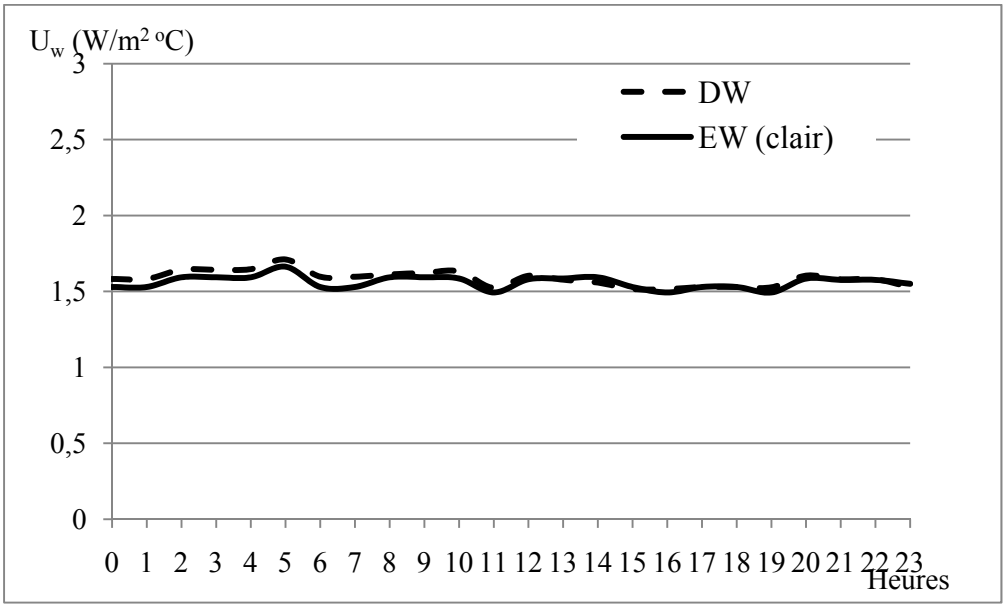


Figure 5.7 Variation horaire du coefficient U_w le 26 janvier - orientation est.

Tel que mentionné au chapitre 4, l'irradiation totale incidente sur une fenêtre origine de plusieurs directions. L'angle d'incidence du rayonnement solaire direct et circumsolaire est

directement relié à l'orientation de la fenêtre, la latitude, le jour considéré et l'heure solaire. Par contre, on ne peut attribuer une direction unique au rayonnement isotropique diffus et au rayonnement réfléchi par le sol. Les distributions angulaires de ces deux contributions au rayonnement total incident sont généralement inconnues. Cependant, il est possible d'attribuer un angle d'incidence effectif en effectuant une intégration du rayonnement I_g et I_d (Figure 4-6) sur tous les angles d'incidence possibles. Pour une fenêtre installée verticalement, cette intégration conduit à $\theta_d \cong \theta_g \cong 60^o$.

Les figures 5-8 et 5-9 présentent la variation des gains solaires à travers les modèles de fenêtre orientées à l'est pour le 10 juillet et 26 janvier, respectivement. Ces gains solaires ont été déterminés pour chaque heure, par la relation suivante :

$$Q^1_{s,i} = \left(SHGC_{w,i}\left(\theta_{s,i}\right)\left(I_{s,i} + I_{c,i}\right) + SHGC_{w,i}\left(60^o\right)\left(I_{g,i} + I_{d,i}\right)\right) \tag{5.1}$$

On remarque sur la figure 5-8 que les gains solaires à travers la fenêtre électrochromique à l'état coloré sont approximativement 4 fois plus faibles que pour la fenêtre DW. Pour les deux fenêtres, les gains solaires sont plus importants le matin. Lors d'une journée ensoleillée et pour une orientation est, l'intensité du rayonnement direct est importante le matin et devient nulle à midi. On observe effectivement sur la figure 5-8, une chute des gains solaires à midi. Par contre, les fenêtres sont toujours soumises à un rayonnement diffus provenant du ciel (I_s) et du sol (I_g). Ce rayonnement diffus est important entre 13h et 17h (figure 5-5) et la totalité des gains solaires en après-midi est causée par l'irradiation diffuse. Les gains solaires deviennent nuls au coucher du soleil soit vers 20h.

En hiver, pour la journée du 26 janvier, les gains solaires des fenêtres DW et électrochromique (état clair) se concentrent entre 7:30 et midi. En après-midi, les fenêtres sont exposées uniquement au rayonnement diffus et compte-tenu des variations horaires du rayonnement pour cette journée particulière, les gains solaires sont inférieurs à 50 W/m^2 pour les deux fenêtres. Du point de vue de la consommation d'énergie, l'utilisation d'une fenêtre EW a un effet négatif en réduisant l'apport de chaleur dans un bâtiment d'environ 15%.

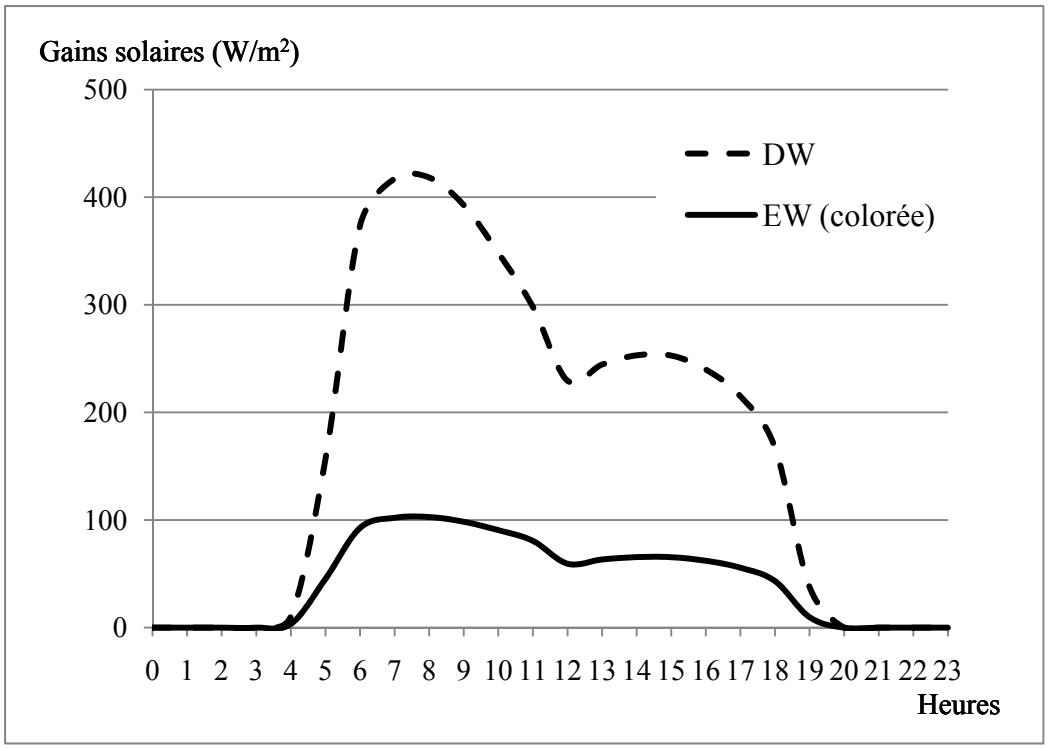


Figure 5.8 Gains solaires horaire le 10 juillet – orientation est.

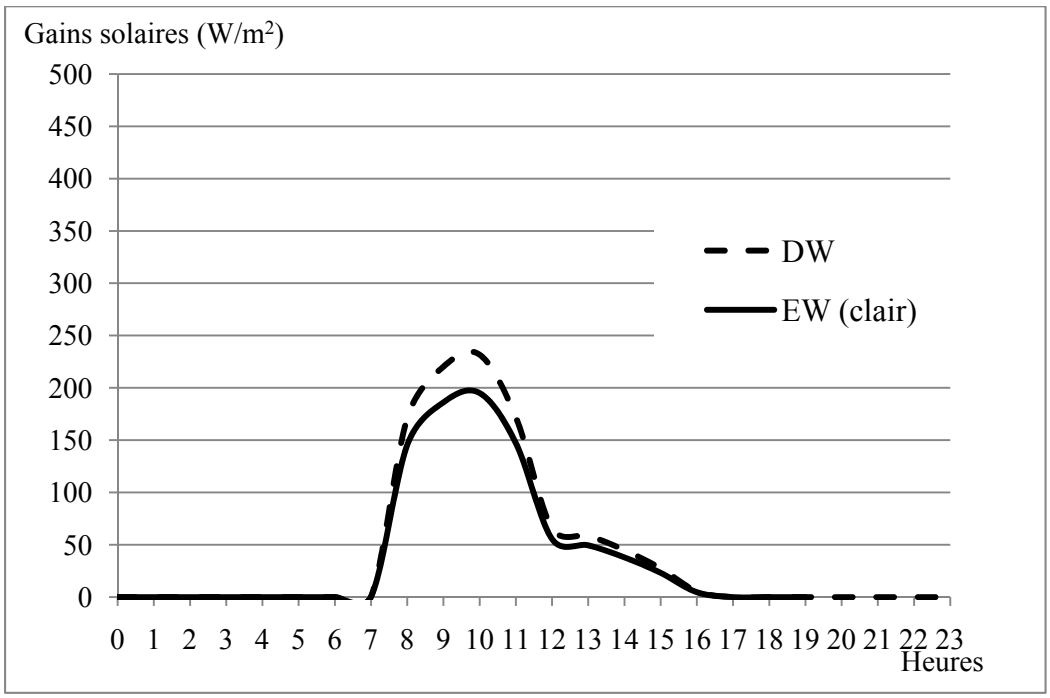


Figure 5.9 Gains solaires horaire le 26 janvier – orientation est.

Les résultats présentés dans cette section permettent de constater que le coefficient U_w est relativement indépendant des conditions météorologiques extérieures. Cependant, les gains solaires sont fortement influencés par les variations d'irradiation solaire. Par conséquent, il est difficile de porter un jugement sur les performances énergétiques des fenêtres DW et EW à partir d'une seule journée de simulation en hiver et en été.

Pour les modèles de fenêtres étudiées, la modélisation du transfert de chaleur avec les progiciels *Window* et *Therm*, nécessite cinq simulations indépendantes. Une première simulation pour la région correspondant au centre du vitrage (U_{cg} et $SHGC_{cg}$), trois simulations pour le cadre et la bordure du vitrage (partie inférieure, supérieure et latérale) et une simulation globale du transfert de chaleur dans la fenêtre. Effectuer une caractérisation complète des fenêtres sur une base horaire pour une année entière (8760 heures) et pour quatre orientations exigerait un nombre considérable de simulations. Cependant, en sélectionnant judicieusement un nombre de jours limités dans le fichier météorologique pour Montréal, il est possible d'obtenir un bilan énergétique représentatif des performances des fenêtres DW et EW en période hivernale et estivale.

Avant de présenter les résultats des bilans énergétiques sur les fenêtres DW et EW, la section suivante compare trois approches différentes de calcul des gains solaires.

5.4 Gains solaires : comparaison des trois approches

5.4.1 Première approche

Tel que présentée dans la section 4.4.5, la première approche de calcul des gains de chaleur par rayonnement consiste à considérer de façon indépendante le rayonnement direct (I_s) et circumsolaire (I_c) incident sur la fenêtre à un angle $\theta_{s,i}$, des contributions associées au rayonnement diffus provenant du sol (I_g) et le rayonnement diffus du ciel (I_d) à un angle effectif de 60°.

Les tableaux 5-1 et 5-2 comparent les apports de chaleur par rayonnement des fenêtres DW et EW obtenus selon la première approche pour les jours de calcul en hiver (3 jours) et en été

Rapport-Gratuit.com

(3 jours). Les résultats exprimés en Wh/m^2, ont été obtenus en effectuant la moyenne sur 1 jour de la somme des apports de chaleur calculée par la relation 4.6 pour les trois jours de calcul (72 heures). Les simulations ont également été effectuées pour des fenêtres installées selon les orientations sud, est, ouest et nord. L'orientation de la fenêtre a un impact sur la variation horaire du rayonnement direct et sur le coefficient de convection du côté extérieur (direction du vent).

Tableau 5.1 Apport de chaleur par rayonnement en été – première approche

		Q_s^1 (Wh/m^2) moyenne journalière		
		DW	EW-état coloré	EW-état clair
Les directions	Sud	2193,5	577,4	1771,0
	Est	2279,0	579,1	1882,2
	Ouest	2266,1	576,5	1823,2
	Nord	2029,4	539,7	1640,4

Tableau 5.2 Apport de chaleur par rayonnement en hiver – première approche

		Q_s^1 (Wh/m^2) moyenne journalière		
		DW	EW-état coloré	EW-état clair
Les directions	Sud	1100,2	266,9	876,2
	Est	605,0	160,5	500,9
	Ouest	694,9	173,8	542,3
	Nord	558,0	145,0	447,0

D'après ces résultats, on remarque que les apports de chaleur par rayonnement sont plus importants l'été que l'hiver quelque soit l'orientation des fenêtres. Ce résultat était prévisible compte tenu du fait qu'en hiver la durée du jour s'établit en moyenne à 9 heures comparativement à 15 heures en été. En été, l'orientation des fenêtres a une influence

relativement faible sur les apports de chaleur par rayonnement. Les fenêtres orientées au nord ont les gains solaires les plus faibles, mais les écarts sont de 8% à 12% comparativement à l'orientation est. Durant la période estivale, la contribution du rayonnement diffus lors d'une journée entière est généralement importante.

En hiver, l'orientation des fenêtres a un impact plus significatif sur les gains de chaleur par rayonnement. L'orientation nord étant la moins favorable. Quelque soit la fenêtre, l'orientation sud est celle qui maximise les apports de chaleur.

Tel que prévu, la fenêtre EW-état coloré est celle qui permet de minimiser les apports de chaleur par rayonnement en été. En effectuant une moyenne pour les quatre orientations, les apports de chaleur sont de 2172 Wh/m^2 pour la fenêtre DW et 493 Wh/m^2 pour la fenêtre EW-état coloré soit une diminution de 77%. Pour une fenêtre de 4 m^2, ceci se traduit par une économie d'énergie de 6,7 kWh. Cependant, les avantages associés à la fenêtre EW sont en partie « annulés » en période hivernale. En hiver, une fenêtre permettant des apports de chaleur par rayonnement important permettra une réduction de la consommation d'énergie associée au chauffage. Selon les résultats présentés au tableau 5-2, la fenêtre DW est celle qui présente les caractéristiques les plus intéressantes du point de vue énergétique. En effectuant une moyenne pour 1 jour et pour les quatre orientations, les apports de chaleur s'établissent à 740 Wh/m^2 pour la fenêtre DW et à 592 Wh/m^2 pour la fenêtre EW-état clair. Pour une fenêtre de 4 m^2, cette réduction des gains de chaleur de 0,6 kWh devra être assumée par le système de chauffage.

5.4.2 Deuxième approche

Les tableaux 5-3 et 5-4 présentent les résultats de la deuxième approche qui est basée sur l'hypothèse que tout le rayonnement incident atteint la fenêtre à un angle $\theta_{s,i}$ (équation 4.7). Les jours de calcul considérés sont les mêmes que ceux de la section 5.4.1. Les résultats exprimés en Wh/m^2, ont été obtenus en effectuant la moyenne sur 1 jour de la somme des

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

apports de chaleur calculée par la relation 4.7 pour les trois jours de calcul en été et 3 jours en hiver.

Tableau 5.3 Apport de chaleur par rayonnement en été – deuxième approche

		Q_s^2 (Wh/m^2) moyenne journalière		
		DW	EW-état coloré	EW-état clair
Les directions	Sud	1327,9	371,9	920,1
	Est	1419,9	343,5	988,6
	Ouest	1317,6	319,4	945,5
	Nord	678,8	203,4	540,8

On remarque au tableau 5-3, que les gains solaires calculés Q_s^2 avec l'hypothèse que l'irradiation directe et diffuse sont incidents sur les fenêtres au même angle $\theta_{s,i}$ qui fait en sorte que les gains solaires du tableau 5-3 sont inférieurs à ceux du tableau 5-1. Tel que mentionné précédemment, le nombre d'heures auquel une fenêtre est exposée uniquement au rayonnement diffus est relativement élevé en saison estivale. Associer un angle $\theta_{s,i}$ au rayonnement diffus $I_{g,i}$ et $I_{d,i}$ suppose que la fenêtre ne reçoit plus de rayonnement dès que $\theta_{s,i} \geq 90^o$. Selon cette approche, les fenêtres orientées dans la direction est ne présentent aucun gain de chaleur à partir de midi.

Tableau 5.4 Apport de chaleur par rayonnement en hiver – deuxième approche

		Q_s^2 (Wh/m^2) moyenne journalière		
		DW	EW-état coloré	EW-état clair
Les directions	Sud	1151,3	264,1	911,7
	Est	378,2	101,2	317,7
	Ouest	417,0	99,6	282,8
	Nord	192,3	50,2	153,0

5.4.3 Troisième approche

Tel que présenté à la section 4.4.5, la troisième approche de calcul des gains de chaleur par rayonnement néglige les contributions du rayonnement diffus provenant du ciel et du sol (équation 4.8). Les résultats moyennés sur 1 jour à partir de 3 jours de calcul en été et 3 jours en hiver, obtenus par la troisième approche, sont présentés dans les tableaux 5-5 et 5-6.

Tableau 5.5 Apport de chaleur par rayonnement en été – troisième approche

		Q_s^3 (Wh/m^2) moyenne journalière		
		DW	EW-état coloré	EW-état clair
Les directions	Sud	524,2	147,4	430,4
	Est	609,7	146,6	481,6
	Ouest	596,9	144,1	482,6
	Nord	360,2	107,2	299,8

Tableau 5.6 Apport de chaleur par rayonnement en hiver – troisième approche

		Q_s^3 (Wh/m^2) moyenne journalière		
		DW	EW-état coloré	EW-état clair
Les directions	Sud	693,7	161,6	549,8
	Est	206,0	55,2	174,5
	Ouest	301,2	68,5	215,9
	Nord	151,5	39,7	120,6

Selon ces résultats, on constate que le fait de négliger la contribution du rayonnement diffus sous estime de façon considérable les apports de chaleur par rayonnement. Quelle que soit la saison, on remarque que la contribution du rayonnement diffus au bilan énergétique des

apports de chaleur est significative et doit être considérée dans l'évaluation du bilan global de la fenêtre.

5.4.4 Résumé des trois approches

Le tableau 5-7 présente les gains solaires journaliers obtenus en effectuant une moyenne des résultats sur les quatre orientations et pour les trois jours en été et en hiver.

Tableau 5.7 Apport de chaleur par rayonnement sur une journée – comparaison entre les trois approches

	Q_s^1 (Wh/m^2)	Q_s^2 (Wh/m^2)	Q_s^3 (Wh/m^2)
	Été (moyenne journalière et moyenne de 4 orientations)		
DW	2192,0	1186,1	522,8
EW-état clair	1779,2	848,8	423,6
EW-état coloré	568,2	309,6	136,2
	Hiver (moyenne journalière et moyenne de 4 orientations)		
DW	739,5	534,7	338,1
EW-état clair	591,6	416,3	265,2
EW-état coloré	186,6	128,8	81,3

Pour les conditions estivales, on remarque que les apports de chaleur par rayonnement Q_s^1 sont approximativement deux fois plus élevés que Q_s^2. L'écart entre les approches 1 et 2 est également significatif en période hivernale, mais plus faible qu'en été, s'établissant à environ 30%. Ceci s'explique par la durée du jour en hiver qui fait en sorte que le nombre d'heures auxquelles une fenêtre est uniquement exposée au rayonnement diffus est plus faible en hiver qu'en été.

Les apports de chaleur par rayonnement de l'approche 3 sont nettement inférieurs aux prévisions des autres approches. Pour les trois types de fenêtres, les écarts entre Q_s^1et Q_s^3 est de l'ordre de 75% et 55% pour l'été et l'hiver respectivement.

5.5 Bilan énergétique des fenêtres DW et EW

Les tableaux 5-8 et 5-9 présentent les résultats du bilan énergétique global ($Q_{w,t}$) des fenêtres DW et EW pour trois jours d'été et trois jours d'hiver. Le bilan énergétique est établi en sommant les gains solaires à travers la fenêtre et les gains (ou les pertes) de chaleur par conduction et convection. Dans tous les cas, l'infiltration ou exfiltration d'air à travers les fenêtres est négligée. En pratique, ces mouvements d'air à travers une fenêtre sont présents et ils influencent la résistance thermique totale des fenêtres. Cependant, il est très difficile de prédire le débit d'infiltration ou d'exfiltration sur une base horaire.

Le bilan énergétique, évalué pour les quatre orientations de fenêtre (est, nord, sud et ouest), est déterminé selon la relation suivante :

$$\begin{aligned} Q_{w,t} &= \sum\left[\left(SHGC_{w,i}\left(\theta_{s,i}\right)\left(I_{s,i}+I_{c,i}\right)+SHGC_{w,i}\left(60^{o}\right)\left(I_{g,i}+I_{d,i}\right)\right)\Delta t\right] \\ &+\sum\left[\left(U_{w}\left[T_{ext}-T_{\text{int}}\right]\right)\Delta t\right] \end{aligned} \tag{5.2}$$

Dans cette expression, la sommation est effectuée pour chaque condition horaire du fichier météorologique, le pas de temps étant fixé à 1 heure (Δt=1heure).

Tableau 5.8 Bilan énergétique en été - moyenne journalière en Wh/m^2

		DW(Wh/m^2)	EW-état coloré (Wh/m^2)	EW-état clair (Wh/m^2)
Les directions	Sud	2076,1	460,0	1653,6
	Est	2177,2	477,3	1720,5
	Ouest	2161,0	471,4	1715,8
	Nord	1930,6	440,9	1541,5

Le bilan énergétique pour les journées correspondant aux conditions estivales montre le potentiel de réduction des gains de chaleur associé à l'utilisation d'une fenêtre électrochromique. Comparativement à la fenêtre DW, la fenêtre EW en état coloré permet une réduction des gains de chaleur de 1616,1 Wh/m^2, 1699,9 Wh/m^2, 1689,6 Wh/m^2, et 1489,7 Wh/m^2 pour les orientations sud, est, ouest et nord respectivement.

Considérons une fenêtre de 4 m^2 de surface, orientée dans la direction ouest. En posant comme hypothèse que les résultats du tableau 5-8 sont représentatifs du bilan énergétique journalier pour le mois de juillet, une fenêtre EW maintenue à l'état coloré permettra une réduction mensuelle des apports d'énergie de 209 kWh comparativement à une fenêtre DW de même dimension.

En hiver, les fenêtres DW et EW ont un bilan énergétique négatif (perte d'énergie) quelques soient leurs orientations. Les pertes d'énergie moyenne sur une journée de la fenêtre à double vitrage sont moins élevées que celles de la fenêtre électrochromique à l'état clair. L'écart entre les deux fenêtres est plus élevé pour l'orientation sud, $Q_{w,t}(EW - clair) \approx 2 \times Q_{w,t}\,(DW)$, que pour une fenêtre orientée au nord $Q_{w,t}(EW - clair) \approx 1{,}15 \times Q_{w,t}\,(DW)$. Le coefficient de gains solaires étant le paramètre principal qui distingue les fenêtres DW et EW-clair, il est normal que l'écart entre les bilans énergétiques soit plus élevé pour l'orientation qui reçoit le plus de rayonnement.

Considérons une fenêtre de 4 m^2 de surface, orientée dans la direction sud. En posant comme hypothèse que les résultats du tableau 5-9 sont représentatifs du bilan énergétique journalier pour le mois de janvier, une fenêtre EW maintenue à l'état clair va engendrer une augmentation mensuelle de pertes d'énergie de 26,9 kWh comparativement à une fenêtre DW de même dimension.

Tableau 5.9 Bilan énergétique en hiver - moyenne journalière en Wh/m^2

Les directions	DW (Wh/m^2)	EW-état coloré (Wh/m^2)	EW-état clair (Wh/m^2)
Sud	-239,8	-1073,1	-463,8
Est	-733,9	-1184,0	-843,7
Ouest	-652,2	-1173,4	-804,9
Nord	-782,1	-1200,7	-898,7

CONCLUSION

Les fenêtres sont des éléments importants de l'enveloppe des bâtiments. Elles permettent aux occupants de bénéficier d'un éclairage naturel et elles jouent un rôle important dans le confort thermique. Cependant, leurs caractéristiques font en sorte qu'elles sont responsables d'une part importante des coûts de chauffage et de climatisation. Depuis quelques décennies des efforts importants ont été consacrés au développement de fenêtres plus efficace du point de vue énergétique. En particulier, le développement relativement récent de procédés électrochromiques permettant la commercialisation de fenêtres « intelligentes » pour le contrôle actif des gains solaires offre un potentiel intéressant de réduction de la consommation énergétique en période de climatisation.

L'objectif principal de ce mémoire était d'évaluer numériquement le bilan énergétique d'une fenêtre dotée d'un vitrage électrochromique (EW) en fonction des conditions météorologiques pour la ville de Montréal. Bien que les simulations du transfert de chaleur dans les modèles de fenêtre aient été effectuées sur un nombre limité de jours, les résultats des progiciels *Window* et *Therm* ont montré que la fenêtre électrochromique permettait une réduction significative des gains d'énergie en période de climatisation. Pour une fenêtre de 4 m^2 de superficie, ces économies ont été estimées à 209 kWh mensuellement. Cependant, la transmisivité du verre électrochromique à l'état clair étant inférieure à celle du verre utilisé dans les unités scellées standard (fenêtre DW), les performances énergétiques en période hivernale de la fenêtre EW sont moins intéressantes. En effet, pour une fenêtre de 4 m^2 orientée dans la direction sud, la fenêtre EW engendre une augmentation mensuelle des pertes d'énergie de 26,9 kWh.

Les simulations ont montré que les différences entre les fenêtres se situaient principalement au niveau des gains solaires. Pour les fenêtres DW et EW, les coefficients de déperdition thermique sont très similaires et présentent peu de variations sur une base horaire.

L'analyse des données horaires du fichier météorologique pour Montréal indiquait que l'irradiation diffuse représentait une portion significative de l'irradiation totale sur une surface horizontale. Ceci nous a incité à comparer les résultats de la contribution du rayonnement

solaire selon trois approches distinctes de calcul. La comparaison entre ces trois approches montre que quelle que soit la saison, la contribution du rayonnement diffus au bilan énergétique des apports de chaleur sur une fenêtre est significative et devrait être considérée dans l'évaluation du bilan énergétique global de la fenêtre.

Rapport-Gratuit.com

RECOMMANDATIONS

Cette étude à permis de mettre en évidence l'impact de l'utilisation des fenêtres électrochromique pendant la saison estivale et hivernale. Cependant, plusieurs interrogations subsistent et les principales recommandations qu'il est possible d'émettre suite à cette étude sont les suivantes.

- Il est difficile d'extrapoler le bilan énergétique des fenêtres sur une saison à partir de seulement 3 jours de calcul en période hivernale et 3 jours en période estivale. Par conséquent, les calculs horaires devraient être effectués sur un plus grand nombre de jours de façon à avoir une idée plus précise de leurs performances saisonnières.

- Il serait intéressant de vérifier le bilan énergétique d'une fenêtre dans laquelle le verre électrochromique est situé du côté intérieur du bâtiment. Cette conception pourrait réduire de façon significative l'écart entre la fenêtre DW et EW en période hivernale.

- L'impact de la vitesse du vent et de la température extérieure sur les coefficients U_w devrait être analysé plus en détails.

- Analyser les risques de condensation de la fenêtre EW en période hivernale. Bien que le temps de simulation soit plus élevé, *Window* permet l'évaluation des risques de condensation des fenêtres par un calcul plus détaillé du transfert de chaleur en bordure du vitrage.

ANNEXE I

EXEMPLE DES DONNÉES DU FICHIER MÉTÉROLOGIQUE POUR LE PREMIER JANVIER

Lees données météorologiques utilisées dans la présente étude proviennent d'un fichier CWEC (*Canadian Weather File for Energy Calculation*) d'Environnement Canada. Le tableau suivant présente un exemple des informations qu'on y retrouve pour le premier janvier.

Mois	Jours	Heure	Température sèche	Radiation normale directe	Radiation normale diffuse	Direction du vent	Vitesse du vent	Couverture nuageuse	Visibilité
			Celsius	Wh/m²	Wh/m²	Degré	m/s		km
1	1	1	6,8	0	0	225	7,2	10	16,1
1	1	2	8,3	0	0	248	6,7	10	16,1
1	1	3	9,2	0	0	248	8,1	10	16,1
1	1	4	9,5	0	0	248	7,2	10	16,1
1	1	5	9,3	0	0	270	7,2	10	16,1
1	1	6	9	0	0	292	4,4	10	16,1
1	1	7	7,8	0	0	270	6,4	8	16,1
1	1	8	6,1	0	0	270	8,1	4	48,3
1	1	9	5	357	35	270	5,3	2	48,3
1	1	10	5,6	628	56	270	6,4	2	56,3
1	1	11	6,1	688	72	270	8,9	2	56,3
1	1	12	5,6	714	80	270	10,8	7	56,3
1	1	13	5,6	267	118	270	11,7	7	64,4
1	1	14	5	258	100	270	10,8	7	64,4
1	1	15	4,4	234	63	292	8,1	8	64,4
1	1	16	2,8	115	27	292	9,7	8	64,4
1	1	17	1,7	0	0	315	6,4	8	25
1	1	18	1,1	0	0	315	7,2	4	25
1	1	19	0	0	0	338	4,4	1	25
1	1	20	-1,1	0	0	315	5,3	4	25
1	1	21	-1,7	0	0	292	6,4	6	25
1	1	22	-4,4	0	0	315	7,5	3	25
1	1	23	-6,1	0	0	338	5,8	0	25
1	1	24	-7,2	0	0	338	5	0	25

ANNEXE II

CHOIX DES JOURS DE CALCUL

La version actuelle des progiciels *Window* et *Therm* ne permet pas d'automatiser les calculs en fonction de plusieurs conditions de température et d'irradiation. Chaque simulation exige plusieurs étapes de calcul ce qui rend quasi impossible la caractérisation des performances énergétiques des fenêtres sur une longue période. De façon à réaliser le calcul des performances énergétiques sur un nombre de jours limité (3 jours) mais qui permet d'obtenir des résultats « représentatifs » des performances mensuelles, le choix des jours est basé sur l'intensité moyenne du rayonnement solaire moyen journalier pour le mois considéré.

Les mois de juillet et janvier ont respectivement été choisis pour l'évaluation du bilan énergétique des fenêtres en période estivale et hivernale. À partir du fichier météorologique CWEC, les 31 jours du mois de juillet ont été séparés en 3 groupes. Un premier groupe dans lequel l'irradiation journalière moyenne se situe sous la moyenne du mois. Un deuxième groupe de 10 jours qui se situe près de la moyenne du mois et un dernier groupe sous la moyenne mensuelle du mois de juillet. Un jour de calcul pour le mois de juillet a été choisi dans le groupe 1, le deuxième jour dans le groupe 2 et le troisième jour dans le groupe 3. Les trois jours en période hivernale ont été choisis de la même façon.

Les tableaux suivant présentent le rayonnement et la température moyenne par jour pour les mois de juillet et de janvier. Les jours choisis sont identifiés par les lignes grises dans les tableaux.

	Juillet		
	Jours	Radiation moyenne journalière	Température moyenne journalière
Groupe 1	12	98,83	19,65
	4	139,92	19,52
	30	167,29	20,20
	24	175,88	20,46
	2	230,63	16,14
	13	239,17	22,11
	25	267,17	20,58
	29	286,33	21,26
	21	296,25	24,90
	8	300,17	20,05
Groupe 2	23	313,17	18,71
	17	320,25	23,90
	1	322,00	21,81
	9	336,04	19,00
	11	344,92	20,77
	20	350,50	22,09
	16	350,92	24,12
	5	355,29	21,41
	22	367,38	15,62
	26	373,67	14,09
Groupe 3	14	395,92	20,56
	28	424,13	19,95
	18	439,21	22,84
	27	444,46	17,26
	19	445,13	26,60
	15	458,21	27,27
	31	468,54	20,01
	3	471,50	18,64
	6	491,88	17,36
	7	495,04	19,29
	10	556,50	17,57

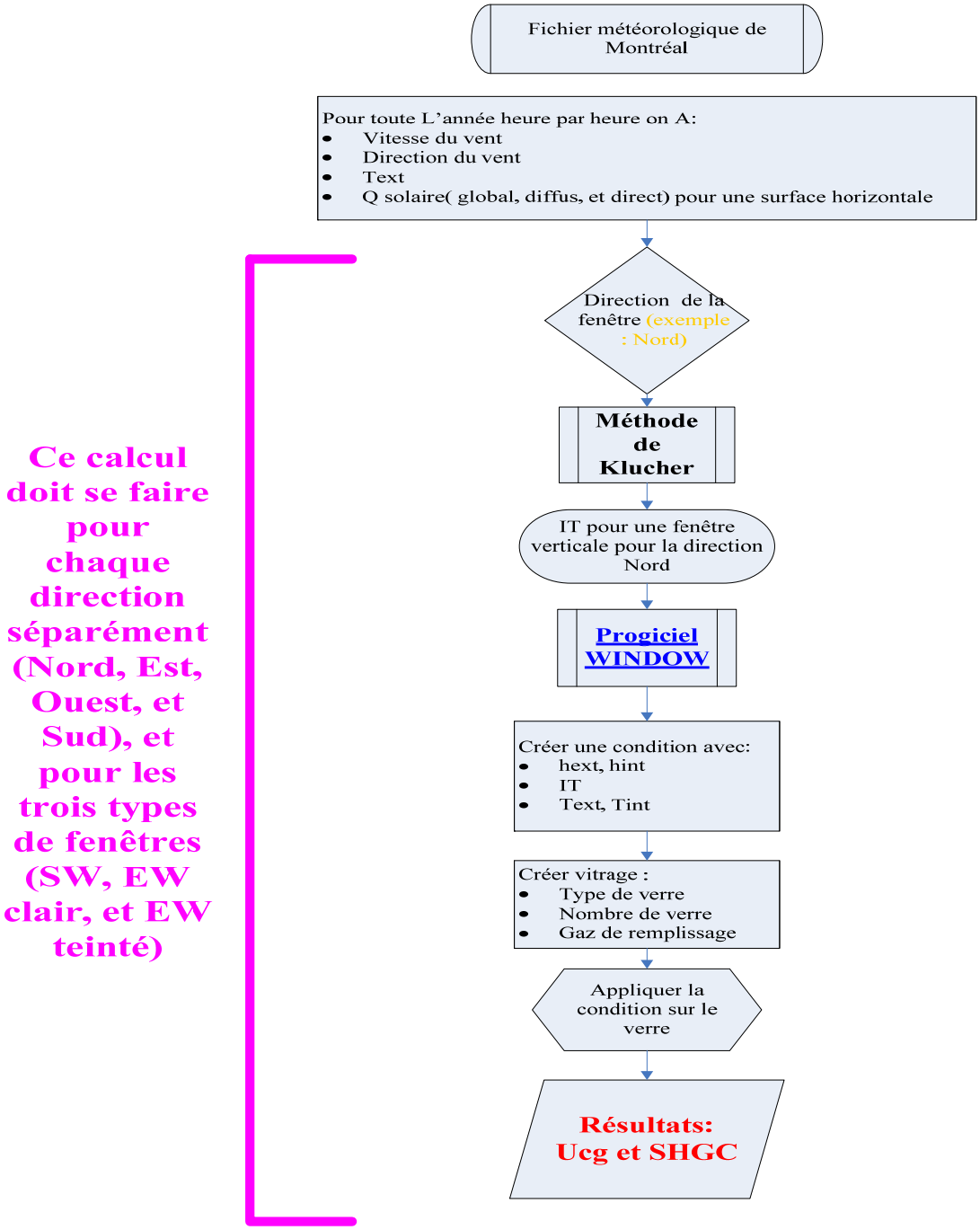
	Janvier		
	Jours	Radiation moyenne journalière	Température moyenne journalière
Groupe 1	26	316,38	-21,46
	25	310,38	-16,88
	15	292,00	-15,87
	9	280,79	-16,31
	12	277,42	-19,62
	14	244,96	-11,33
	27	236,67	-18,34
	21	226,54	-2,04
	4	224,29	-7,08
	28	219,33	-17,33
Groupe 2	29	215,63	-17,63
	1	158,83	3,68
	8	155,42	-15,03
	13	138,67	-16,23
	16	135,92	-15,83
	7	135,46	-10,09
	11	100,75	-12,90
	6	98,04	-6,13
	2	98,00	-7,38
	17	93,13	-7,57
Groupe 3	18	88,46	-5,99
	31	77,17	-10,04
	5	61,33	-3,19
	10	45,50	-8,81
	3	42,21	0,45
	19	37,38	-3,69
	23	35,92	-4,13
	20	30,50	-1,17
	30	29,71	-10,00
	22	28,33	-3,63
	24	24,71	-3,28

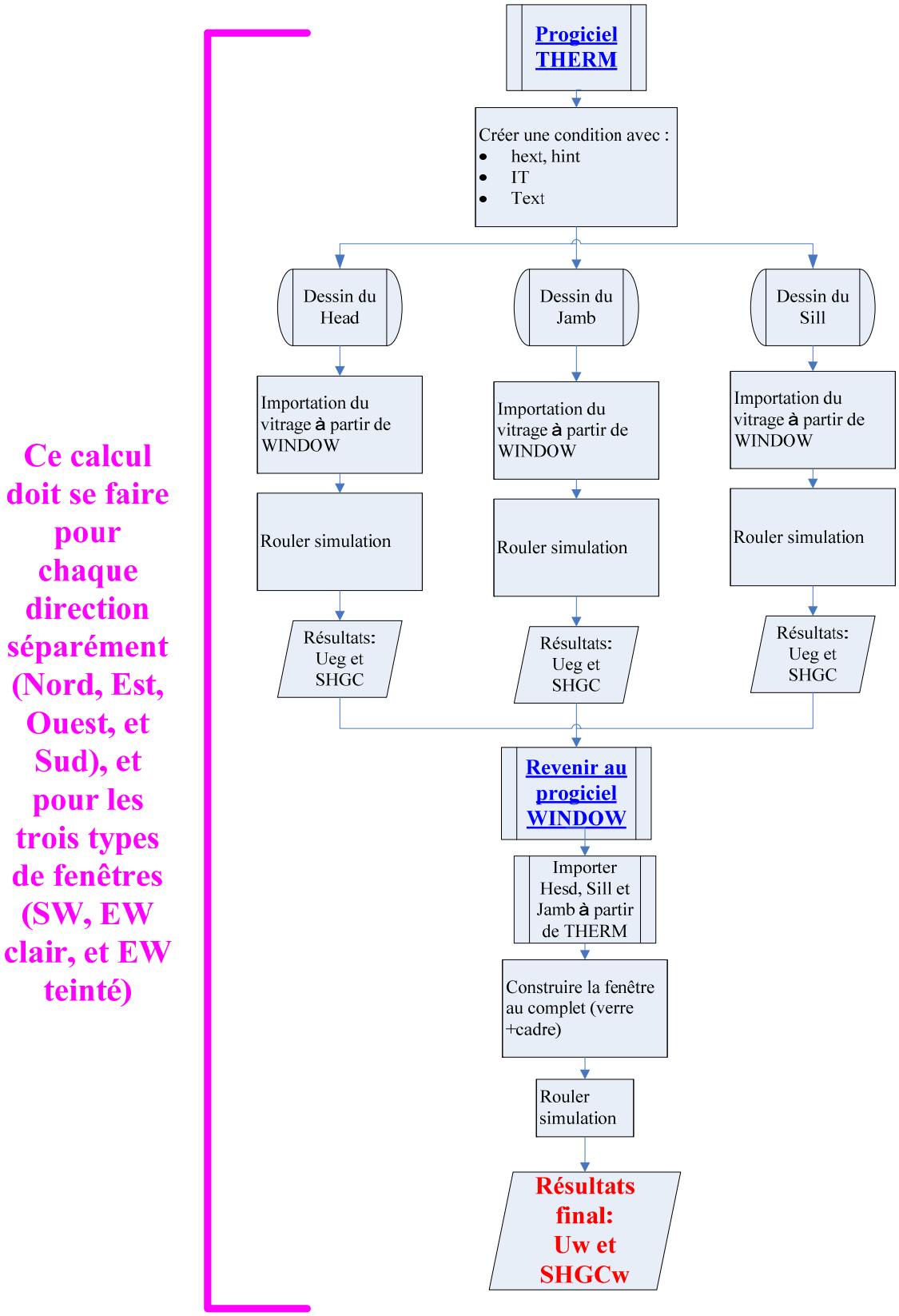
ANNEXE III
EXEMPLE DE RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE KLUCHER POUR LE 26 JANVIER, DIRECTION SUD

heure	$I_{h,b}$	angle atitude α	angle azimuth ψ	Ω	θz	R_b	A=Ih,b* Rb	$I_{h,d}$	B=$I_{h,d}$ * (1+cos β)*1/2	I_h	F'	C=1+F' $\sin^3$(β/3)	sin θz	D=1+F' $\cos^2$θ* $\sin^3$θz	E=I_h*ρ(1 - cosβ)*1/2	IT
1H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
2H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
3H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
4H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
5H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
6H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
7H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
8H30	30	9.14	51.280	54.390	80.860	0.537	16.101	1	0.5	3	0.889	1.314	0.987	1.3	0.825	17.80
9H30	657	16.59	38.860	39.390	73.410	0.528	347.142	44	22	147	0.910	1.322	0.958	1.48	40.425	430.78
10H30	879	22.17	25.000	24.390	67.830	0.519	455.989	41	20.5	290	0.980	1.346	0.926	1.63	79.75	580.99
11H30	847	25.34	9.860	9.400	64.660	0.512	433.609	116	58	433	0.928	1.328	0.904	1.66	119.075	680.96
12H30	872	25.71	-5.890	-5.600	64.290	0.511	445.655	97	48.5	466	0.957	1.338	0.901	1.69	128.15	683.65
13H30	968	23.25	-21.280	-20.600	66.750	0.517	500.014	73	36.5	488	0.978	1.346	0.919	1.65	134.2	715.67
14H30	947	18.25	-35.520	-35.600	71.750	0.526	497.956	69	34.5	438	0.975	1.345	0.950	1.55	120.45	690.47
15H30	894	11.23	-48.310	-50.600	78.770	0.535	478.182	59	29.5	334	0.969	1.343	0.981	1.40	91.85	625.65
16H30	691	2.73	-59.790	-65.590	87.270	0.540	373.128	48	24	178	0.927	1.328	0.999	1.23	48.95	461.40
17H30	246	-6.79	-70.360	-80.590			0	14	7	31	0.796	1.281	0.000	1.0	8.525	17.50
18H30	0	-16.95	-80.540	-95.590			0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
19H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
20H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
21H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0	0	0
22H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0000	0	0
23H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0000	0	0
00H30	0						0	0	0	0	1	1.354		1.0000	0	0

ANNEXE IV

DÉTAIL DES ÉTAPES DE MODÉLISATION




Ce calcul doit se faire pour chaque direction séparément (Nord, Est, Ouest, et Sud), et pour les trois types de fenêtres (SW, EW clair, et EW teinté)
Progiciel THERM
Créer une condition avec :
hext, hint
IT
Text
Dessin du Head
Dessin du Jamb
Dessin du Sill
Importation du vitrage à partir de WINDOW
Importation du vitrage à partir de WINDOW
Importation du vitrage à partir de WINDOW
Rouler simulation
Rouler simulation
Rouler simulation
Résultats: Ueg et SHGC
Résultats: Ueg et SHGC
Résultats: Ueg et SHGC
Revenir au progiciel WINDOW
Importer Hesd, Sill et Jamb à partir de THERM
Construire la fenêtre au complet (verre +cadre)
Rouler simulation
Résultats final: Uw et SHGCw

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Assimakopoulou, Margarita-Niki. 2004. « Développement et évaluation des systèmes et stratégies de contrôle de régulation d'un vitrage électrochromique pour des applications de bâtiment ». These de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de LYON.

Clear, R.D. 2006. « Summary results of visual comfort measurements at the electrochromic windows testbed ». *Lawrence National Laboratory, LBNL-941*.

CSA. 2007. « Rendement énergétique des fenêtres et autres systèmes de fenestration / Guide d'utilisation de la CSA A440.2-04, Évaluation du rendement énergétique des fenêtres et autres systèmes de fenestration ». p. 150.

Duffie, J. A., et W.A. Beckman. 2006. « Solar Engineering of Thermal Processes ». *Wiley*, p. 908.

Hallé, Stéphane. 2001. « Étude numérique et expérimentale du transfert thermique dans une fenêtre ». These de doctorat, École polythecnique.

Klems, J. H. 2001. « Net energy performance measurements on electrochromic skylights ». *Energy and Buildings,* vol. 33, n° 2, p. 93-102.

Lampert, Carl M. 1998. « Smart switchable glazing for solar energy and daylight control ». *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 52, n° 3-4, p. 207-221.

Lee, E. S., et D. L. DiBartolomeo. 2002. « Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings ». *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 71, n° 4, p. 465-491.

Lee, Eleanor S., Dennis L. Dibartolomeo, Joseph H. Klems, Mehry Yazdanian et Stephen E. Selkowitz. 2006. « Monitored energy performance of electrochromic windows controlled for daylight and visual comfort ». In. Vol. 112 PART 2, p. 122-141. Coll. « ASHRAE Transactions ». Quebec City, QC, Canada: Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditoning Eng. Inc.

Lee, ES, SE Selkowitz, MS Levi, SL Blanc, E McConahey, M McClintock, P Hakkarainen, NL Sbar et MP Myser. 2002. « Active load management with advanced window wall systems: Research and industry perspectives ». *ACEEE 2002 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings: Teaming for Efficiency, Pacific Grove, CA (US), 08/18/2002--08/23/2002*.

Loutzenhiser, P. G., H. Manz, C. Felsmann, P. A. Strachan, T. Frank et G. M. Maxwell. 2007. « Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation ». *Solar Energy,* vol. 81, n° 2, p. 254-267.

Mathew, J. G. H., S. P. Sapers, M. J. Cumbo, N. A. O'Brien, R. B. Sargent, V. P. Raksha, R. B. Lahaderne et B. P. Hichwa. 1997. « Large area electrochromics for architectural

applications ». In. Vol. 218, p. 342-6. Coll. « J. Non-Cryst. Solids (Netherlands) ». Netherlands: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00242-1>.

Mills, Evan. 1996. « Windows as Luminaires ». *Lawrence National Laboratory, LBNL-941*, p. 6.

Mitchell, R., C. Kohler, J. H. Klems, M. Rubin, D.K. Arasteh, C. Huizenga et D. Curcija. 2008. « Window 6.2/Therm 6.2 - Research Version Manual ». *Lawrence National Laboratory, LBNL-941*, p. 126.

Palyvos, J. A. 2008. « A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling ». *Applied Thermal Engineering,* vol. 28, n° 8-9, p. 801-8.

Piccolo, A., A. Pennisi et F. Simone. 2009. « Daylighting performance of an electrochromic window in a small scale test-cell ». *Solar Energy,* vol. 83, n° 6, p. 832-44.

Syrrakou, E., S. Papaefthimiou, N. Skarpentzos et P. Yianoulis. 2005. « Electrochromic windows: physical characteristics and environmental profile ». *Ionics,* vol. 11, n° 3-4, p. 281-8.

Thevenard, D., et K. Haddad. 2006. « Ground reflectivity in the context of building energy simulation ». *Energy and Buildings,* vol. 38, n° 8, p. 972-80.

Troung, V.V, et M.C Mehra. November 1984. « Electrochromic Materials:A Technical Review ». *National Research Council*.

Versluis, R., R. Powles, M Yazdanian et M. Rubin. 2003. « International Glazing Database: Data Submission Procedure ». In., p. 10. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-49790.

Warner, J.L., M.S. Reilly, S.E. Selkowitz, D.K. Arasteh et G.D. Ander. 1992. *Utility and economic benefits of electrochromic smart windows*. Medium: ED; Size: 24 p. p. </servlets/purl/10102353-QfLW1q/>.

Rapport-Gratuit.com