Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique

Thèse de doctorat
par

Magali Bodart

UCL
Université
catholique
de Louvain

Faculté des Sciences Appliquées
Unité d'Architecture

Avril 2002

Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique

Thèse de doctorat soumise en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences Appliquées
par

Magali Bodart

UCL
Université
catholique
de Louvain

Membres du Jury
Prof. J.F. Thimus, Président, UCL
Prof. A. De Herde, Promoteur, UCL
Dr. J. B. Gay, EPFL
Prof M. Hutchins, Oxford Brookes University
Dr. J. Lecompte, St-Gobain Glass
Dr. P. Wouters, UCL

Faculté des Sciences Appliquées
Unité d'Architecture

Avril 2002

Remerciements

De nombreuses personnes m'ont apporté leur soutien et leur appui tout au long de ce travail de thèse. Je tiens à les remercier pour leur confiance et pour leur aide.

J'aimerais exprimer tout particulièrement ma gratitude à mon promoteur, le Professeur André De Herde, pour la confiance qu'il m'a accordée dès mon arrivée dans l'équipe « Architecture et Climat », pour le dévouement dont il a fait preuve en m'offrant la possibilité de mener à bien ce travail de recherche et pour ses encouragements constants tout au long de celui-ci. J'ai également beaucoup apprécié la possibilité qu'il m'a donnée de participer à des congrès et des réunions internationaux. Ceux-ci ont été riches en rencontres avec des experts mondialement réputés et m'ont permis de visiter des laboratoires ainsi que des bibliothèques de renommée mondiale.

Je remercie également Monsieur J.P. Beaufays, directeur du département « recherche et développement » de la firme St-Gobain Glass d'avoir accepté de collaborer avec moi dans le cadre de cette thèse de doctorat.
Les nombreux échanges avec Messieurs N. Vanandruel, Y. Lehman, de ce département, ainsi que Messieurs J. Lecompte et C. Boitte, du département de marketing de chez St-Gobain Glass, m'ont permis de progresser aussi bien au niveau technique et scientifique concernant les vitrages qu'au niveau des aspects plus pratiques de la mise en œuvre de ceux-ci ainsi qu'au niveau de l'évaluation de la demande des principaux acteurs du domaine.

J'aimerais témoigner ma gratitude à M. Jean-Bernard Gay (Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO), EPFL, Suisse) et M. Peter Wouters (Centre Scientifique et Technique de la Construction), d'avoir accepté de faire partie de mon comité d'encadrement. A ceux-ci s'ajoutent M. Jan Lecompte (St-Gobain Glass) et le Professeur M. G. Hutchins (Oxford Brookes University), qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps afin de lire et d'évaluer ce travail de doctorat et qui m'ont fait l'honneur de se déplacer afin de composer le jury de mon travail de doctorat. Merci également à M. Jean-François Thimus de présider ce jury.

Je remercie également mes collègues de l'équipe « Architecture et Climat » pour leur aide tout au long de ce travail. Je pense plus particulièrement à Mme Elisabeth Gratia, pour sa disponibilité et le partage de sa grande expérience. Les nombreux échanges que nous avons eus ont été très instructifs et fructueux et j'espère pouvoir encore collaborer avec elle durant de nombreuses années. Merci également à M. José Flémal, pour son travail d'illustration toujours inégalable, à Mme Marie-Hélène Dehut pour sa présence et son aide quotidienne, ainsi qu'à M. Michel Saelen, pour son soutien au niveau informatique.

C'est la Région Wallonne, et plus particulièrement la Direction Générale des Technologies de la Recherche et de l'Energie (DGTRE), qui m'a permis de mener à bien ce travail de doctorat, au travers des financements qu'elle nous a apportés dans le cadre des contrats First et DPOV. Je remercie M. Villers, directeur de cette division, pour la confiance qu'il nous a accordée et renouvelée dans le cadre de ces deux contrats.

Enfin, je remercie de tout cœur mon mari Pierre, pour les encouragements constants qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail et pour la correction et la relecture attentive de ce rapport.

A mes fils, Cédric et Florian, petits soleils de ma vie

Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique.

CHAPITRE 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE 7

1. Introduction 8

2. Objectifs du travail 8

3. Méthodologie 9
3.1 Présentation de la méthodologie poursuivie 9
3.2 Originalité de la démarche adoptée au cours de ce travail de doctorat 10
3.3 Organisation de ce rapport de thèse 11

4. Historique 11
4.1 Les vitrages 11
4.2 Les immeubles de bureaux 13
4.3 Consommations électriques dans les immeubles du tertiaire en région de Bruxelles-Capitale 14

5. Références 16

CHAPITRE 2. HYPOTHÈSES DE CALCUL 17

1. Etudes préliminaires 19
1.1 Introduction 19
1.2 Evolution des températures dans un modèle adiabatique 19
1.3 Comparaison modèle adiabatique - modèle multizonal au niveau des consommations 21
1.4 Etudes thermique paramétriques préliminaires (ensemble 1) 22
1.5 Choix du vitrage de référence 27

2. Géométrie du modèle 2 30
2.1 Le local de bureau 30
2.2 Le bâtiment 31
2.3 Les orientations 31

3. Configuration des façades 32

4. Photométrie des parois intérieures 37

5. Caractérisation physique des vitrages 38
5.1 Le rayonnement électromagnétique 38
5.2 Les mécanismes de transfert de chaleur 39
5.3 Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage 40
5.4 Les facteurs optiques d'un vitrage 41
5.5 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie 41
5.6 Vitrages à haute efficacité énergétique 45
5.7 Modélisation des vitrages dans les programmes de simulation 51

6. Modélisation des vitrages 52
6.1 Vitrages choisis 52
6.2 Traitement des vitrages dans TRNSYS 54

7. Protections solaires 55

8. Le climat **56**

9. Façade, Construction et isolation **57**
9.1 Mur de type "léger" 57
9.2 Mur de type "lourd" 57

10. Inertie interne **58**
10.1 Inertie interne faible et peu accessible 58
10.2 Grande inertie interne accessible 59

11. Les systèmes de chauffage, refroidissement et ventilation **61**
11.1 Système de chauffage et de refroidissement – pas de ventilation nocturne 61
11.2 Système de chauffage. Pas de refroidissement ni de ventilation nocturne 61
11.3 Système de chauffage. Pas de refroidissement mais une ventilation nocturne 62

12. Les gains internes **65**
12.1 Métabolisme 65
12.2 Eclairage 65
12.3 Appareils de bureau 65
12.4 Gains internes dans les couloirs et les autres zones de circulation 66
12.5 Gains internes dans les autres étages 66

13. Le système d'éclairage artificiel **67**
13.1 Efficacité lumineuse des lampes 67
13.2 Valeur d'éclairement de consigne 67
13.3 Position du capteur d'éclairement 67
13.4 Calcul d'éclairement (éclairage artificiel) 67

14. Références **68**

CHAPITRE 3. LA LUMIÈRE **69**

1. Le confort visuel **70**
1.1 L'éclairement 70
1.2 La luminance 73
1.3 Uniformité de la luminance et de l'éclairement autour de la tâche 74
1.4 Uniformité de la luminance et de l'éclairement dans toute la pièce 75
1.5 L'éblouissement 75
1.6 Le clignotement des lampes (flickering) 77
1.7 Distribution spectrale de la lumière 78
1.8 Combinaison indice de rendu des couleurs, température de couleur et niveau d'éclairement 81
1.9 Présence d'éclairage naturel 82
1.10 Type de système d'éclairage 83
1.11 Les systèmes de gestion de la lumière 83
1.12 Conclusion 84

2. Economies d'énergie réalisables par l'utilisation de l'éclairage naturel **86**
2.1 Les stratégies d'éclairage 86
2.2 Les dispositifs de gestions de l'éclairage 87
2.3 Le choix d'un système de gestion de l'éclairage 90
2.4 Impact du dimming en fonction de l'éclairage naturel 92
2.5 Résultats des simulations d'éclairage 94
2.6 Part de la consommation d'éclairage artificiel sur la consommation totale du bâtiment 97
2.7 Influence de la clarté des parois sur la consommation globale 99
2.8 Influence de la présence du système de gestion de l'éclairage sur la consommation globale 101
2.9 Conclusion 101

3. Références **103**

CHAPITRE 4. LES ASPECTS THERMIQUES 107

1. Le confort thermique 108
1.1 Le métabolisme 108
1.2 L'habillement 108
1.3 La température du corps 109
1.4 La température ambiante 109
1.5 La température des parois 109
1.6 L'humidité relative 109
1.7 La vitesse de l'air 109
1.8 Le confort thermique 109
1.9 Conclusion 111

2. Choix des vitrages 112
2.1 Etude générale 112
2.2 Etude configuration par configuration 115
2.3 Etude des écarts entre les différents vitrages 119
2.4 Conclusion 120

3. Influence de divers paramètres sur les consommations 122
3.1 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de chauffage 122
3.2 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de refroidissement 122
3.3 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation totale d'énergie primaire 123
3.4 Influence des gains internes sur les consommations de chauffage et de refroidissement 124
3.5 Influence des stratégies de refroidissement sur les consommations 126
3.6 Influence de l'inertie thermique sur la consommation totale d'énergie 129
3.7 Influence de l'inertie thermique sur la consommation de chauffage 131
3.8 Influence de l'inertie thermique sur la consommation de froid 131
3.9 Influence de l'inertie thermique sur le nombre d'heures de surchauffe 131
3.10 Influence du type de vitrage sur les consommations d'humidification et de déshumidification 133
3.11 Conclusion 136

4. Références 138

CHAPITRE 5. CRITÈRES DE CHOIX DU VITRAGE 139

1. Importance de l'intégration des aspects d'éclairage 140
1.1 Introduction 140
1.2 Résultats des simulations 140

2. Influence des valeurs de rendement des systèmes 142

3. Importance du choix des facteurs de conversion en énergie primaire 143

4. Critères économiques 145
4.1 Coût des consommations 145
4.2 Temps de retour de l'investissement 145

5. Critères environnementaux 147
5.1 Introduction 147
5.2 Etablissement des écobilans et calcul de l'énergie grise contenue dans les vitrages 147
5.3 Conclusions 149

CHAPITRE 6. PRISE EN COMPTE DES PROTECTIONS SOLAIRES 151

1. Introduction : la problématique des protections solaires 152
1.1 Propriétés physiques des systèmes d'ombrages 152
1.2 Influence des protections solaires sur les consommations d'énergie et sur l'éclairage naturel disponible dans un bâtiment 153
1.3 Méthodes de calcul permettant d'évaluer les performances des bâtiments équipés de protections solaires ou de vitrages de contrôle solaire 154

2. Prise en compte des protections solaires dans les programmes de simulation 155
2.1 Prise en compte des protections solaires dans SUPERLINK 155
2.2 Prise en compte des protections solaires dans TRNSYS 155
2.3 Combinaison des deux programmes 155

3. Paramètres influençant la rentabilité d'un système d'ombrage 156

4. Objectifs des travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat 158

5. Modes d'influence des différents paramètres en cas de chauffage et de refroidissement (stratégie 1) 159
5.1 Choix du vitrage 159
5.2 Choix de la protection solaire 159
5.3 Influence de la température de gestion d'une protection solaire extérieure ou intérieure sur les consommations. 159
5.4 Evolution du nombre d'heures de surchauffe en présence d'un protection solaire extérieure ou intérieure 166
5.5 Influence de la valeur du rayonnement solaire minimal de consigne sur les consommations 166

6. Conclusion 170

7. Références 171

CHAPITRE 7. PRÉSENTATION DE L'OUTIL 173

1. Caractéristiques de l'outil 174
1.1 Exigence auxquelles l'outil doit répondre 174
1.2 Particularités de notre outil 174

2. Présentation des fenêtres 175
2.1 Ecran d'accueil 175
2.2 Ecran des données 175
2.3 Ecran des résultats 177
2.4 Caractéristiques des vitrages 179
2.5 Calcul des coûts 181

3. Utilisation de l'outil 183

4. Références 184

CONCLUSION GENERALE 185

CHAPITRE 1. Introduction générale

Après une introduction générale du contexte dans lequel ce travail de doctorat a été réalisé, le premier chapitre présente au lecteur les objectifs de cette thèse, ainsi que la méthodologie développée afin d'atteindre ces objectifs. Le chapitre 1 met ensuite l'accent sur les aspects d'originalité de cette thèse par rapport à ce qui a déjà été réalisé jusqu'à présent dans le même domaine.
Nous terminons ensuite ce chapitre en proposant au lecteur un bref historique de l'évolution des vitrages et des immeubles de bureaux.

1. Introduction **8**

2. Objectif du travail **8**

3. Méthodologie **9**
3.1 Présentation de la méthodologie poursuivie 9
3.2 Originalité de la démarche adoptée au cours de ce travail de doctorat 10

4. Historique **11**
4.1 Les vitrages 11
4.2 Les immeubles de bureaux 13
4.3 Consommations électriques dans les immeubles du tertiaire en région de Bruxelles-Capitale 14

5. Références **16**

1. Introduction

La diminution des réserves de combustible fossile ainsi que les dommages irréversibles causés par la combustion de ceux-ci est un des plus grands problèmes planétaires actuels. L'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère est à la base d'un échauffement global de la planète qui a déjà commencé à causer des préjudices irrévocables sur notre environnement.
La meilleure manière de réduire l'impact des nuisances environnementales dues à la combustion des énergies fossiles est de limiter celle-ci en diminuant au maximum nos consommations d'énergie.
De nombreuses études portant sur les réductions de consommation d'énergie dans les bâtiments ont déjà été entamées depuis plusieurs années.
Actuellement, les chercheurs sont en mesure de citer les principaux paramètres influençant la consommation d'énergie d'un bâtiment. Ils peuvent donc donner des pistes quant à l'amélioration de ces bâtiments. Cependant lorsqu'ils essaient de combiner plusieurs domaines et que ces domaines interagissent entre eux, comme c'est le cas de la thermique et de l'éclairage naturel, la conséquence de la variation d'un paramètre dans un domaine sur le comportement du bâtiment dans l'autre domaine peut s'avérer complexe.
Le choix du vitrage étant une question qui nous semblait essentielle lors de la conception d'un immeuble de bureau, il nous paraissait très intéressant de l'analyser en détail.
Nous avons choisi de combiner les aspects d'éclairage et de thermique car il paraît évident que le choix d'un vitrage devra se faire en tenant compte des deux aspects. Ce qui est nettement moins connu est la manière dont ces deux aspects interagissent. Quand on aborde la quantification de ces variations, on remarque alors de grandes variations dans les chiffres cités par les différents auteurs ayant abordé ce sujet.

Ces dernières années, les progrès impressionnants réalisés dans le domaine de l'électronique ouvrent une nouvelle perspective d'économie d'énergie dans le domaine de l'éclairage, tout particulièrement pour les immeubles de bureaux. Bien que la consommation d'éclairage artificiel puisse atteindre 20 à 60 % de la consommation électrique totale d'un bâtiment [Kni 1999], certains pourraient avancer le fait que le coût de l'éclairage artificiel reste marginal par rapport au salaire des employés de bureau. Cependant, on peut facilement calculer qu'à l'échelle d'un pays, ces diminutions de consommation peuvent être très importantes [Rut 1991] et participer de manière non négligeable à la réduction de la production de CO_2.
De nombreux auteurs s'accordent à dire que la prise en compte de l'éclairage naturel, tout en permettant une diminution des consommations d'éclairage artificiel, induit une diminution des gains internes d'éclairage et donc une diminution des charges de refroidissement. Cependant la consommation de chauffage en hiver augmente et l'admission de trop d'éclairage naturel induit des gains solaires qui peuvent augmenter les charges de refroidissement associées à la fenêtre. Il existe un bilan énergétique optimum de refroidissement, chauffage et éclairage qui ne peut être atteint que par une approche intégrée de l'éclairage naturel et des aspects thermiques.

2. Objectifs du travail

Le premier objectif de cette thèse était de comprendre les mécanismes liant les aspects d'éclairage et de thermique afin de choisir le vitrage optimum selon la situation rencontrée, dans un immeuble de bureau, en Belgique. Notre idée était donc d'entreprendre une large série de simulations thermiques et d'éclairage afin d'étudier précisément l'influence d'un grand nombre de paramètres sur les performances de différents types de vitrages. A partir des résultats de ces simulations, nous comptions tirer des conclusions permettant, à l'avenir, de choisir les vitrages des immeubles de bureaux en Belgique en fonction de critères de consommation d'énergie et de confort.
Pour clôturer notre étude scientifique précise, il nous semblait très important de transposer nos résultats de manière à les rendre accessibles aux acteurs principaux du choix du vitrage: les architectes et les bureaux d'étude. C'est pourquoi l'idée d'un outil informatique est apparue tout naturellement. En effet, celui-ci a l'avantage de permettre la variation de certains paramètres, par exemple les paramètres évoluant au cours du temps, comme le coût des énergies. Il permet également d'éviter la généralisation trop rapide qui serait nécessairement réalisée si on devait synthétiser les résultats des études de simulation sous forme de conseils ou simplement sous forme "papier".

Le but ultime de ce travail de doctorat était donc de concevoir un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, en vue de garantir le **confort thermique** d'hiver, le confort thermique d'été et le **confort visuel**, pour les **immeubles de bureaux**. L'outil devait également tenir compte des **aspects économiques** (d'une part les coûts d'investissement et d'autre part les coûts énergétiques) ainsi que des **aspects d'environnement**.

Se présentant sous forme informatique, il devait être **convivial**, rapide et **facile à utiliser**.
En effet, ces trois caractéristiques devraient donner à l'architecte l'envie d'utiliser l'outil. Par la suite, cet outil devrait jouer un rôle didactique : en effet, si les calculs sont rapides et que l'utilisateur peut facilement comparer plusieurs cas, il va peu à peu assimiler l'importance des paramètres pris en compte dans l'outil et améliorer sa propre connaissance quand au choix du vitrage.

L'outil permet à l'utilisateur, d'après ses contraintes architecturales, de s'identifier à un module de référence. Il lui fournit le ou les meilleurs vitrages utilisables dans son cas, selon ses priorités dans les domaines de performance envisagés.

3. Méthodologie

3.1 Présentation de la méthodologie poursuivie

La mise au point de l'outil est basée sur de nombreuses études paramétriques préliminaires réalisées au moyen d'un logiciel de calcul thermique dynamique validé et performant : le programme MBDS. Dans la suite de ce rapport, nous appellerons ce groupe de simulations préliminaires « ensemble 1 ». Ces simulations ont été réalisées sur un premier modèle d'immeuble de bureau (modèle 1). L'analyse des résultats fournis par cet ensemble 1 de simulations nous a permis d'évaluer les paramètres importants à prendre en compte dans la suite de notre étude ainsi que leur domaine de variation. Elle nous a également permis d'affiner le modèle du bâtiment, afin de nous approcher d'un immeuble de bureaux type correspondant le mieux possible aux bâtiments de bureaux construits actuellement en Belgique (modèle 2).
Une autre justification de l'évolution du modèle 1 vers le modèle 2 est la volonté de dissocier au mieux les locaux d'orientations différentes et de différencier par la suite le choix du vitrage en fonction de l'orientation du local considéré.
Cet ensemble 1 de simulations nous a donc permis :

- de mettre au point un modèle de bâtiment définitif (modèle 2)
- de déterminer quelles étaient les simulations nécessaires afin d'évaluer les consommations d'énergie pour la majorité des immeubles de bureaux neufs en Belgique et pour différents vitrages.

Dans un deuxième temps, notre but a été d'estimer les consommations de chauffage, refroidissement (si applicable), humidification, déshumidification (si applicable) et éclairage artificiel pour tous les cas choisis.
Cette évaluation a demandé plusieurs milliers de simulations (ensemble 2), totalisant ainsi plusieurs mois de calcul.

Les calculs d'éclairage ont été réalisés au moyen du logiciel SUPERLINK, dont nous parlerons au cours du chapitre 3. Les calculs de thermique ont été réalisés au moyen du logiciel TRNSYS que nous aborderons également au chapitre 3.
Il est important de noter que ces deux types de simulations sont intimement liés et que les calculs de thermique n'auraient pas pu être réalisés si les calculs d'éclairage n'avaient pas été exécutés auparavant.

L'estimation des consommations d'énergie se fait principalement dans un but de comparaison des diverses solutions les unes avec les autres. Il serait dangereux d'extraire les valeurs nettes des consommations des résultats de l'outil et de les appliquer à un cas réel, de manière quantitative. En effet, les résultats sont liés au type de local (local entouré d'autres locaux) et à toutes les hypothèses décrites dans le chapitre 2. Lors de l'analyse des résultats de simulations, il faut toujours garder en tête le fait que l'intérêt de ces valeurs se situe

principalement en terme de comparaison des valeurs entre-elles plutôt qu'en terme de quantitatif.

Une fois le second ensemble de simulations terminé, nous avons regroupé ses résultats dans une base de données. Cette base de données est accessible à travers l'outil informatique. Son traitement par l'outil permet à l'utilisateur d'évaluer l'impact du choix d'un vitrage dans son cas particulier (géométrie du local et de l'ouverture, photométrie des parois, position de l'ouverture, etc).

Il faut donc bien être conscient du fait que les calculs qui sont réalisés par l'outil informatique sont des calculs très simples et rapides permettant de comparer, à partir des résultats de milliers de simulations, les coûts énergétiques ou économiques de certains choix posés par l'architecte ou le concepteur du bâtiment.

Ce mode de travail a été choisi en réponse au critère de demande impérative de vitesse de calcul défini dans les objectifs. Il n'était également pas envisageable de faire utiliser des logiciels de calcul dynamique par l'utilisateur de l'outil.
En effet, ces logiciels sont fort élaborés et exigent une expertise pour leur emploi. De plus, l'introduction des données dans ces logiciels est longue et fastidieuse. Enfin, le temps nécessaire tout autant pour les calculs d'éclairage que pour les calculs de thermique est important.

Pour ce travail, nous n'avons envisagé que les immeubles de bureau, pour lesquels le problème du choix du vitrage semble le plus crucial. Cependant, la méthodologie développée pour ce type de bâtiment peut, sans trop de difficultés, être étendue à d'autres types de bâtiment.
Nous nous sommes également limités au climat belge, en sachant que la méthodologie peut également être étendue à d'autres climats.

3.2 Originalité de la démarche adoptée au cours de ce travail de doctorat

L'originalité de notre démarche se situe au niveau de l'analyse multicritère établie. En effet, cette analyse nous a permis de mettre en évidence les paramètres intervenant dans le choix du vitrage. Ces paramètres n'étaient auparavant pas connus. Certains de ces paramètres ont dus être fixés, de par l'incertitude quant à leur valeur et une demande de très grande expertise nécessaire afin de les évaluer (par exemple, pour le coefficient d'infiltration). Ils ont été fixés en fonction de résultats de mesures qui avaient permis de déterminer les valeurs couramment rencontrées dans les immeubles de bureaux en Belgique.
Pour les autres paramètres intervenant dans le choix du vitrage, nous avons pu déterminer leur intervalle de variation dans les immeubles de bureaux en Belgique et proposer ainsi à l'utilisateur plusieurs valeurs qui lui permettent de s'approcher au maximum du cas précis qu'il décide de tester.

Même si le couplage entre les aspects thermiques et visuels nous semble, ainsi qu'à de nombreux auteurs, très important, voire indispensable à réaliser lors du choix du vitrage, nous ne rencontrons pas encore beaucoup d'articles décrivant de tels travaux. Les principales raisons de cette lacune sont, à notre avis les suivantes :

- Premièrement, il est certainement plus difficile de prédire des consommations d'éclairage artificiel que des consommations relatives aux aspects thermiques, en raison de la grande incertitude quand au type de ciel rencontré au cours de l'année. En effet, le type de ciel intervient directement dans la quantité de lumière naturelle disponible et il n'existe pas, comme pour le fichier météo utilisé pour les calculs de thermique, de fichier type reprenant les données d'éclairage naturel. Les programmes de calcul de consommation d'éclairage artificiel en complément à l'éclairage naturel disponible n'ont été développés qu'au cours de ces dernières années et présentent encore certaines lacunes. De plus, la validation de ce genre de programme n'est pas terminée et l'incertitude quant aux résultats donnés par ces programmes reste encore importante.
- Deuxièmement, les domaines de l'éclairage naturel et de la thermique sont deux domaines parallèles nécessitant tout les deux une certaine expérience. L'établissement de la liaison entre ces deux domaines demande donc une expertise en thermique et en éclairage

naturel et plus précisément dans la modélisation de ces aspects. Il est rare de rencontrer des chercheurs travaillant en parallèle sur ces deux domaines et aptes à réaliser le lien existant à ce niveau.

L'originalité de cette thèse résulte également de l'analyse économique du choix d'un vitrage. Elle se situe à deux niveaux :

- Premièrement, l'outil donne à son utilisateur la possibilité de comparer les différents vitrages en terme de rentabilité ou de temps de retour, à partir de leur coût d'achat et du coût des consommations d'énergie qu'ils induisent au cours de leur vie dans le bâtiment. Il montre qu'un vitrage plus performant au niveau énergétique, qui requiert en général un processus de fabrication plus élaboré et est donc en général plus onéreux, peut être rapidement rentabilisé par rapport à un vitrage moins performant et moins onéreux, si on tient compte des différences des coûts de consommation d'énergie.

- Deuxièmement, le fait de travailler à partir d'un outil informatique permet de tenir compte de l'évolution des coûts des différentes énergies et de l'évolution du prix des vitrages. En effet, ces coûts d'achat peuvent varier au cours du temps mais aussi en fonction du type de montage du vitrage ou de l'ampleur du chantier considéré (par exemple, un vitrage boulonné, c'est-à-dire monté sans châssis, est beaucoup plus onéreux que le même vitrage monté sur châssis).

Un dernier point original de ce travail est la prise en compte des données environnementales lors du choix du vitrage. En effet, nous sommes intimement convaincus qu'actuellement, il n'est plus envisageable de parler du choix d'un ensemble de matériaux, comme un vitrage, sans envisager l'analyse des aspects de production de polluants liés à la fabrication et à la mise en œuvre de ces matériaux (écobilan) ainsi que de la consommation d'énergie nécessaire pour fabriquer ces matériaux et les acheminer jusqu'au chantier (énergie grise).
Au cours de cette thèse, nous avons tenté de réaliser ces évaluations et même s'il reste une incertitude quant aux données sur lesquelles se basent nos calculs, nous avons quand même pu établir certaines conclusions quant à l'analyse environnementale du choix d'un vitrage (voir chapitre 5).

3.3 Organisation de ce rapport de thèse

Pour terminer cette introduction générale, nous présentons un bref historique de l'évolution des vitrages ainsi que des immeubles de bureaux en Belgique.
Nous proposons ensuite au lecteur, dans le chapitre 2, une présentation des simulations préliminaires (ensemble 1) ainsi qu'une description des hypothèses de calcul adoptées pour la réalisation du second ensemble de simulations.
Le chapitre 3 définit le confort visuel et décrit en détail les résultats des simulations d'éclairage.
De la même manière, au chapitre 4, nous abordons les aspects thermiques en proposant une définition du confort thermique ainsi qu'une analyse précise des résultats de l'ensemble 2 de simulations. Cette analyse nous donne des pistes quant au choix du vitrage et nous montre comment certains paramètres influencent les différentes consommations d'énergie.
Le chapitre 5 aborde les critères de choix des vitrages et précise comment un changement de critère peut influencer ce choix.
Le chapitre 6, quant à lui, aborde les aspects des protections solaires et montre que leur choix, ainsi que celui de leur système de gestion, est très complexe et qu'il existe dans la pratique actuelle des lacunes à ce niveau.
Le dernier chapitre présente, au travers de copies d'écran commentées, l'outil qui a été conçu dans le cadre de cette thèse.
Enfin, la conclusion générale résume les principales conclusions des différents chapitres et décrit comment cette thèse pourrait être et sera étendue et complétée dans les années à venir.

4. Historique

4.1 Les vitrages

Avant d'entrer dans le vif du sujet et de présenter en détail les vitrages actuels, il nous semblait intéressant d'étudier l'historique des fenêtres et de montrer le chemin parcouru depuis

l'apparition des premiers vitrages jusqu'à la large gamme de vitrages très performants proposés actuellement par les industriels.

Au départ, les fenêtres étaient un signe de luxe [Car 1996]. Les maisons primitives étaient souvent construites sans fenêtres. La porte était bien entendu un élément essentiel permettant aux personnes d'entrer et de sortir de la maison mais les fenêtres restaient au départ un raffinement, un agrément, qui permettaient de rendre un endroit plus agréable à vivre. C'est en tant que telles que les fenêtres ont été continuellement développées au cours des âges.

Les trous qui permettaient l'évacuation de la fumée peuvent être considérés comme les toutes premières formes de fenêtres. Ils permirent à la fumée provenant à la fois de la cuisine et des feux utilisés pour se chauffer de s'échapper, améliorant ainsi grandement la qualité de l'air intérieur. Un effet non voulu dû à la présence de ces trous fut l'apport d'éclairage naturel qui réduisit ainsi l'aspect général très sombre de l'intérieur. Ces trous eurent cependant comme conséquence d'importantes pertes de chaleur de l'habitation par évacuation de l'air chaud.

C'est pourquoi la première amélioration de cette ouverture fut de l'équiper d'un volet. Ce volet permit alors l'ouverture ou la fermeture de l'ouverture, régissant ainsi les mouvements d'air mais aussi la pénétration de lumière, le passage des insectes ou de poussière ou encore la protection aux intempéries.

L'addition d'un élément translucide, tel que le papier huilé ou la peau d'un animal, encadré dans le trou de la fenêtre offrit ensuite de nouvelles possibilités de contrôle. Le volet lui-même pouvait être fait de matériau translucide, créant ainsi une fenêtre ouvrante.

Apparition du verre

Ce n'est qu'avec l'apparition du vitrage transparent, à l'époque Romaine, que la fenêtre put simultanément laisser pénétrer l'éclairage naturel et permettre un contrôle des mouvements d'air ainsi qu'une vue vers l'extérieur.

La plus grande pièce de vitrage trouvée chez les Romains faisait 0.9 x 1.2 m. Ce vitrage était installé dans les bains publics de Pompéi. Au cours du Moyen-Age, Venise fut établie comme le premier centre de fabrication de verre, que ce soit pour les articles en verre ou pour le simple vitrage. Les petits panneaux de verre plat étaient produits de la manière suivante [CSTC 1999] : premièrement, les artisans soufflaient un cylindre de verre. Celui-ci, appelé manchon, était ensuite coupé à ses deux extrémités et fendu à chaud en longueur Il suffisait alors de l'ouvrir et de le dérouler alors qu'il était encore chaud, de manière à l'étaler en verre plat. Ce procédé présentait les inconvénients d'une faible productivité et de grandeurs de vitrages limitées à un mètre. Les petites surfaces de verre étaient donc assemblées en une grande fenêtre à panneaux de verre multiples.

Développement du verre plat

Sous Louis XIV (1638-1715), Colbert encouragea la fabrication de la glace en France afin de limiter le monopole de Murano. La manufacture Royale des Glaces fut ainsi créée. La technique des manchons fut petit à petit remplacée par celle du coulage qui consistait à verser le verre en fusion sur une table en métal bordée de réglettes qui fixaient la dimension et l'épaisseur du produit. A l'état semi-visqueux, le verre était laminé par un rouleau de cuivre, puis placé dans un four de refroidissement, où il restait plusieurs jours. Cette technique permis de produire un verre de belle qualité et des panneaux de plus grande taille. Le technique du manchon fut définitivement abandonnée vers 1763. La technique du coulage permit la fabrication de miroirs de grande qualité (galerie des glaces du château de Versailles) et, à la fin du 19^{ième} siècle, on put obtenir des verres de trois mètres de hauteur. L'utilisation du verre pris alors son plein essor, que ce soit pour la construction de miroirs ou de grandes fenêtres.
Les verres tant soufflés que coulés, devaient être doucis et polis. Le doucissage visait à rendre les faces du verre planes et parallèles. Quant au polissage, il visait à rendre au verre la transparence et la brillance qu'il avait perdues lors du doucissage. Ces opérations étaient longues : il fallait un mois pour venir à bout du doucissage et 12 jours pour le polissage d'un verre de deux mètres.

Au 18ième siècle, de nombreuses fabriques de verre virent le jour en Allemagne, en Angleterre et en Espagne.
Jusqu'à la fin du 19ième siècle, la fabrication du verre resta dans son principe, ce qu'elle était aux origines (coulage et soufflage).

Développements modernes

Au début du 20ième siècle, l'industrie verrière prit un essor important en Belgique, ce qui l'amena à employer plus de 20000 personnes et à exporter plus de 90% de sa production. Toutefois, cette industrie était toujours peu mécanisée.

Entre 1920 et 1930, les techniques de fabrication du verre se modernisèrent grâce aux procédures d'étirage mécanique. Le travail à froid (douci et poli) s'améliora également et demanda moins de temps.

En 1959, la technique du float fut mise au point en Angleterre par Pilkington. Elle fut exploitée en Belgique dès le début des années 1960.
Ce processus de fabrication [StR 1996], qui est réalisé en continu, consiste à la mise en fusion d'un mélange composé des matières premières suivantes : silice, chaux, magnésie, soude et additifs, dans un four montant jusqu'à une température d'environ 1600°C. Quand il sort du four, le verre en fusion, qui atteint alors une température de 1000°C, se déverse sur un bain d'étain en fusion. Par différence de densité, le verre flotte sur l'étain, ce qui lui assure une parfaite planéité et un poli de surface. Le verre, entré à 1000°C, sort du flottage à 600°C. Les épaisseurs réalisables vont de 1,7 à 19 mm. Le verre est ensuite refroidi progressivement de 600°C à 50 °C, de manière à supprimer les contraintes internes qui rendraient la découpe impossible. Aussitôt refroidi, le ruban de verre est contrôlé et coupé d'équerre. Finalement, il passe dans une laveuse puis sous un rouleau imprégné d'une solution adéquate qui le protège contre le vieillissement.
Cette technique produit des surfaces de verre extrêmement plates, d'épaisseur uniforme et ne présentant quasiment pas de distorsion visuelle. La planéité et le parallélisme des faces du verre rendent alors inutiles les opérations de doucissage et de polissage nécessaires dans tous les procédés anciens. Actuellement, la quasi totalité du verre plat est fabriquée par ce procédé.

Les vitrages modernes

L'apparition de cette technique marqua un tournant important dans l'évolution du verre réalisée ces dernières années. En effet, l'application de couches minces sur les vitrages qui sont communément utilisées actuellement nécessite absolument une telle qualité de surface du verre.
Le changement le plus important dans la production des fenêtres entre 1965 et 1980 fut le développement de vitrages isolants ou doubles vitrages (deux panneaux de verre scellés ensemble, séparés par un espace rempli d'air).
Vers la fin des années 1970, en réponse aux deux crises d'énergie ayant touché cette décennie, des triples vitrages furent développés. Ils sont actuellement peu à peu abandonnés en raison de nouveautés techniques qui permettent d'atteindre des caractéristiques d'isolation thermiques équivalentes au moyen de doubles vitrages.
Actuellement, il existe une très large gamme de double vitrages couvrant un très vaste domaine de paramètres tout aussi bien physiques qu'esthétiques. Ce sont quelques uns de ces types de vitrages que nous avons choisi de prendre en compte dans notre outil. Ces vitrages, ainsi que leurs paramètres physiques, sont décrits précisément au chapitre 2 (Hypothèses de calcul).

4.2 Les immeubles de bureaux

L'outil développé dans le cadre de cette thèse de doctorat se rapporte uniquement aux immeubles de bureau. En effet, il nous semble que c'est ce type de bâtiment qui se trouve confronté avec la plus large gamme de vitrages possible et que c'est lors de la conception d'un immeuble de bureaux que l'architecte se trouve confronté au plus grand nombre de paramètres et de critères. Cependant, la méthodologie développée lors de l'élaboration de cet outil pourrait facilement être adaptée à d'autres types de bâtiments.

Il est intéressant de résumer rapidement l'évolution des immeubles de bureaux, depuis leur apparition jusqu'à maintenant, afin de mettre en évidence les problèmes actuels qui leurs sont propres.

Au XIX^{ième} siècle, la construction des premiers immeubles de bureaux, qui est souvent d'initiative publique, est fréquemment liée aux grands événements de l'époque. Citons par exemple le Ministère des chemins de fer à Bruxelles (1892) ou le Ministère des Pensions (des Anciens combattants de la guerre de Sécession) à Washington (1885) [Fon 1999].
A cette époque, les immeubles de bureaux devaient être ventilés naturellement et devaient pouvoir profiter au maximum de l'éclairage naturel [Ren 1998]. Ils devaient donc présenter un plan peu profond favorisant la pénétration de lumière naturelle ainsi que les possibilités de ventilation naturelle transversale. L'apparition de l'éclairage électrique et, plus tard, de la ventilation mécanique et du conditionnement d'air, libérèrent les concepteurs d'immeubles de bureaux de ces contraintes.
Aux alentours des années 1960, les concepteurs tirèrent l'avantage du conditionnement d'air pour concevoir des bâtiments larges, souvent vitrés de bas en haut. Les occupants des bâtiments présentant peu de masse thermique et de grandes superficies vitrées orientées au sud-ouest ainsi qu'un système de refroidissement d'air peu efficace subirent de la surchauffe pendant la saison chaude. Les bâtiments conditionnés étant pratiquement toujours entièrement scellés, leurs occupants perdirent le contrôle de leur environnement (possibilité d'ouvrir les fenêtres). Ceux qui furent placés loin des fenêtres perdirent l'avantage de la vue vers le monde extérieur.
Dans les années 1970 et 1980, les progrès réalisés en terme d'équipement informatique et de bureautique augmentèrent les charges internes dans la plupart des bâtiments. Cette augmentation fut combinée avec l'augmentation des charges internes provenant de l'utilisation de l'éclairage artificiel rendu nécessaire de par l'augmentation de profondeur des bureaux. Ce surplus de charges internes, ainsi que l'utilisation de plus en plus étendue de faux plafonds, amplifièrent les risques de surchauffe.
Les consommations de refroidissement augmentèrent donc parallèlement avec la hausse des charges internes. Entre-temps, l'utilisation d'une meilleure isolation réduisit les consommations de chauffage, mettant en évidence l'importance de la consommation d'éclairage des immeubles de bureaux profonds. Actuellement, les immeubles de bureaux conditionnés présentant des locaux de grande profondeur consomment typiquement deux fois plus d'énergie primaire que les immeubles équivalents ventilés et éclairés naturellement [EEO 1991].
Au cours des années 1980, les occupants commencèrent à exprimer leur malaise par rapport aux immeubles profonds, scellés, permettant peu de vue vers l'extérieur. Il faut noter également que ce type de bâtiment fut souvent associé au "sick building syndrome". Actuellement, les occupants demandent un plus grand contrôle de leur environnement de travail personnel et les managers sont conscients du fait qu'il existe un lien étroit entre les conditions de travail et la productivité.

Depuis les années 1990, les inquiétudes par rapport aux changements climatiques et à l'appauvrissement des réserves énergétiques de la planète ont conduit à une résurgence de l'intérêt pour les bâtiments ventilés naturellement.
De plus, les concepteurs portent plus d'attention à la conception des fenêtres ainsi qu'au type de vitrage. En effet, la fenêtre a un impact de plus en plus important sur la ventilation, l'éclairage et les économies d'énergie. A ces fonctions, il est intéressant de noter l'impact de l'acoustique qui peut également jouer un grand rôle sur le bien-être des occupants.

4.3 Consommations électriques dans les immeubles du tertiaire en région de Bruxelles-Capitale

Le bilan énergétique de la région Bruxelles-Capitale de 1995, établi par l'Institut Wallon en Juin 1996 nous donne des informations relatives aux consommations électriques des immeubles de bureaux situés en Région de Bruxelles Capitale.
Tout d'abord, remarquons que les valeurs citées se rapportent à des immeubles de bureaux ne se chauffant pas à l'électricité.
Selon l'Observatoire des bureaux de la Région de Bruxelles-Capitale, le parc des immeubles de bureaux de la Région s'élevait au 1er janvier 1995 à 8,3 millions de mètres carrés (pour 6,8 millions de m^2 fin 1990). Cette superficie ne concerne que les immeubles conçus pour un

usage administratif et ne tient pas compte des surfaces de bureaux localisées dans des maisons de maître ou des appartements, pas plus que les bureaux annexes à des entreprises industrielles ou semi industrielles, ni les bureaux attachés à des services publics (écoles, hôpitaux, bibliothèque, …)
Ces bureaux sont principalement concentrés dans cinq "quartiers administratifs" à savoir le Pentagone (28%), le Quartier Léopold (18%), le Rond-Point Schuman (8%), le Quartier Nord (7%) et le quartier Louise (6%). A eux seuls, ils totalisaient 66 % du parc recensé au 1er janvier 1995 par l'Observatoire.
Si nous établissons le graphique de comparaison des consommations spécifiques d'électricité pour les différents acteurs du secteur tertiaire, en Région de Bruxelles-Capitale, nous obtenons la Figure 1.1.
Cette figure nous montre un nette différence de consommation électrique entre les bureaux privés (banques, assurances et services aux entreprises) et les bureaux publics (administrations publiques et internationales). Elle montre aussi que dans les bureaux publics, la consommation électrique diminue lorsque la superficie augmente, contrairement à ce que l'on peut observer dans les bureaux privés.

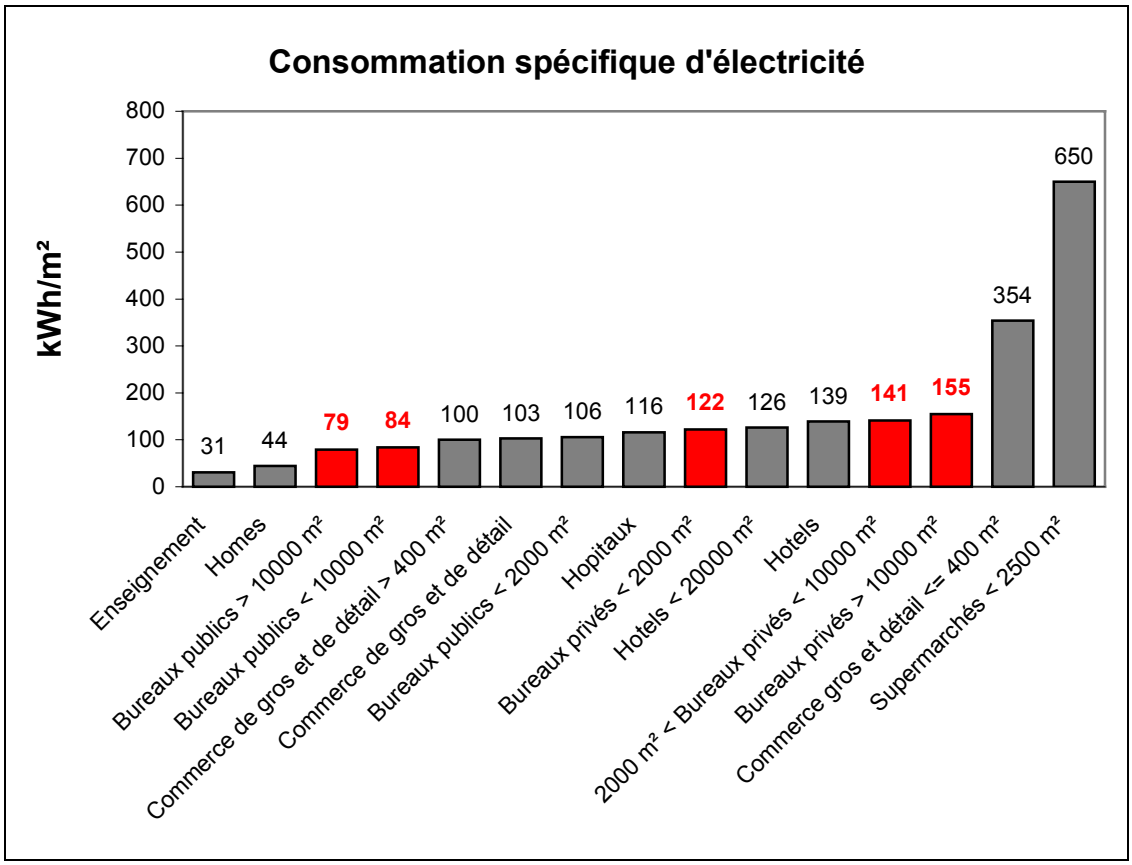


Figure 1.1 : Consommations électriques dans le tertiaire en région de Bruxelles-Capitale

5. Références

[Car 1996] Carmody J.; Selkowitz S. et Heschong L., "Residential windows: a guide to new technologies and energy performance." W.W. Norton. New York, 1996.

[CSTC 1999] Centre Scientifique et Technique de la Construction, "Le verre et les produits verriers – les fonctions des vitrages", Note d'information technique 214, Décembre 1999.

[EEO 1991] Energy Efficiency Office, "Energy efficiency in offices", EEO Energy Consumption Guide 19, 1991.

[Fon 1999] Fondation pour l'Architecture, Agenda-catalogue publié à l'occasion de l'exposition "Le siècle des bureaux", Bruxelles, Décembre 1999.

[IW 1996] Institut Wallon asbl, "Bilan énergétique de la Région de Bruxelles-Capitale 1995", Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Juin 1996.

[Kni 1999] Knight I.P., ”Measured energy savings due to photocell control of individual luminaires", *Lighting Research and Technology*, p.19-22, 1999.

[Ren 1998] Rennie D. et Parand F., "Environmental design guide for naturally ventilated and daylit offices", Building Research Establishment, CRC Ltd, London, 1998.

[Rut 1991] Rutten A. J. F., ”Daylight-controlled artificial lighting : a potential energy saver; right interior light by sky luminance tracking", *Proceedings of Right Light 1 (1991, Stockholm, S)*, p.47-56, 1991.

[StR 1996] St-Roch, Manuel de formation du personnel, version 1/96.

CHAPITRE 2. Hypothèses de calcul

Nous commençons ce chapitre en présentant les études préliminaires qui ont été réalisées afin de modéliser le bâtiment et de déterminer les paramètres à faire varier lors de nos simulations.
Nous exposons ensuite en détail le modèle adopté; sa géométrie, la configuration des façades testées ainsi que la photométrie des parois intérieures.
Après une description théorique du transfert de chaleur et de lumière au travers des vitrages, nous présentons les vitrages que nous avons choisis d'étudier ainsi que la manière de modéliser ces vitrages dans les programmes de simulation.
Le lecteur trouvera également dans le chapitre 2 la description précise des parois des deux types de bâtiments (avec peu ou beaucoup d'inertie) et les stratégies de chauffage, refroidissement et ventilation appliquées lors de nos calculs.
Pour terminer, le lecteur trouvera une description précise des valeurs des différents gains internes utilisés lors des simulations ainsi que du système d'éclairage artificiel.

1. Etudes préliminaires 19
1.1 Introduction 19
1.2 Evolution des températures dans un modèle adiabatique 19
1.3 Comparaison modèle adiabatique - modèle multizonal au niveau des consommations 21
1.4 Etudes thermique paramétriques préliminaires (ensemble 1) 22
1.5 Choix du vitrage de référence 27

2. Géométrie du modèle 2 30
2.1 Le local de bureau 30
2.2 Le bâtiment 31
2.3 Les orientations 31

3. Configuration des façades 32

4. Photométrie des parois intérieures 37

5. Caractérisation physique des vitrages 38
5.1 Le rayonnement électromagnétique 38
5.2 Les mécanismes de transfert de chaleur 39
5.3 Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage 40
5.4 Les facteurs optiques d'un vitrage 41
5.5 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie 41
5.6 Vitrages à haute efficacité énergétique 45
5.7 Modélisation des vitrages dans les programmes de simulation 51

6. Modélisation des vitrages 52
6.1 Vitrages choisis 52
6.2 Traitement des vitrages dans TRNSYS 54

7. Protections solaires 55

8. Le climat 56

9. Façade, Construction et isolation 57
9.1 Mur de type "léger" 57
9.2 Mur de type "lourd" 57

10. Inertie interne 58
10.1 Inertie interne faible et peu accessible 58
10.2 Grande inertie interne accessible 59

11. Les systèmes de chauffage, refroidissement et ventilation 61
11.1 Système de chauffage et de refroidissement – pas de ventilation nocturne 61
11.2 Système de chauffage. Pas de refroidissement ni de ventilation nocturne 61
11.3 Système de chauffage. Pas de refroidissement mais une ventilation nocturne 62

12. Les gains internes 65
12.1 Métabolisme 65
12.2 Eclairage 65
12.3 Appareils de bureau 65
12.4 Gains internes dans les couloirs et les autres zones de circulation 66
12.5 Gains internes dans les autres étages 66

13. Le système d'éclairage artificiel 67
13.1 Efficacité lumineuse des lampes 67
13.2 Valeur d'éclairement de consigne 67
13.3 Position du capteur d'éclairement 67
13.4 Calcul d'éclairement (éclairage artificiel) 67

14. Références 68

1. Etudes préliminaires

1.1 Introduction

Comme nous l'avons déjà expliqué dans le premier chapitre, les simulations qui nous ont fourni les résultats intégrés dans l'outil (ensemble 2) ont été précédées de simulations préliminaires (ensemble 1) qui nous ont permis de faire évoluer notre modèle de bâtiment du modèle 1 vers le modèle 2 et de déterminer les paramètres à faire varier lors du second ensemble de simulations. Dans ce point 1 (Etudes préliminaires), nous présentons quelques unes de ces études et montrons comment elles ont influencées soit l'évolution géométrique du modèle (point 1.2, point 1.3 et point 1.5), soit le choix des paramètres (point 1.4).
Les hypothèses choisies pour réaliser ces simulations ne sont donc ni identiques entre-elles ni identiques à celles adoptées lors de la réalisation du second ensemble de simulations, puisqu'elles ont évolué au cours de ce travail préliminaire. Nous nous efforçons, pour les points 1.2 à 1.5, de décrire les principales hypothèses relatives à chacun de ces calculs et insistons plus fortement sur les aspects les plus importants par rapport aux points traités.

1.2 Evolution des températures dans un modèle adiabatique

Lors de l'établissement du premier modèle de simulation, nous avions envisagé modéliser le local de bureau en considérant que ses parois étaient adiabatiques et donc en négligeant les échanges de chaleurs avec les locaux voisins. Cette idée était basée sur le fait que tous les locaux doivent répondre aux mêmes critères de confort thermique et donc que les températures atteintes dans ces locaux étaient à peu près identiques. Nous pensions donc que l'on pouvait négliger les échanges de chaleur entre locaux. Des travaux réalisés par E. Gratia, lors de la conception du programme OPTI [GRA 1998], nous montrent que cette hypothèse n'est pas applicable. Décrivons ces travaux.

Objectifs de l'étude

L'objectif de l'étude à laquelle nous faisons référence était de calculer l'évolution de la température dans les bureaux d'orientation Sud, Est et Ouest, au printemps, en été et en automne en fonction de divers paramètres tels que la surface de plancher, la surface du vitrage et de son facteur solaire, des gains internes et l'inertie du local.

Hypothèses de calcul

Le local modélisé était le suivant :

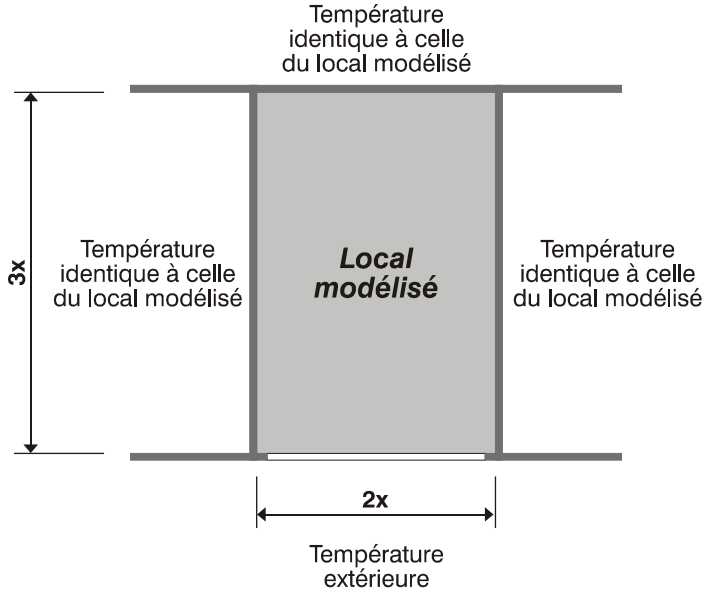


Figure 2.1 : Modélisation d'un local adiabatique

Les calculs ont été réalisés en considérant que les pièces voisines au bureau choisi avaient, à tout moment, la même température que celui-ci. Ceci permettait, contrairement au cas où on

aurait considéré les parois comme adiabatiques, de tenir compte de l'inertie des murs intérieurs. (On tient en fait compte de la moitié de celle-ci.)

Les journées simulées étaient :

Printemps : du 22/2 au 3/3
Eté : du 31/5 au 9/6
Automne : du 9/9 au 18/9

Voici quelques valeurs de résultats obtenus dans le cas de la mise en œuvre d'une ventilation hygiénique (30 m^3 par personne et par heure), lorsque aucun système de refroidissement n'est employé.

Résultats

Les températures représentées graphiquement ci-dessous sont les températures obtenues le dernier jour de la période considérée. Les températures intérieures sont à lire sur l'échelle de gauche. La température extérieure est à lire sur l'échelle de droite. Nous analysons uniquement les orientations Sud et Ouest, qui sont les plus critiques en terme de surchauffe.

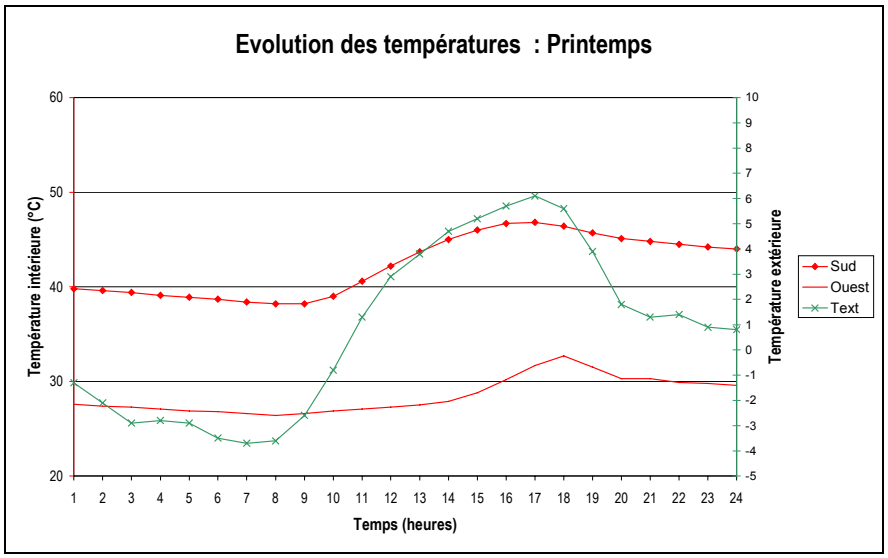


Figure 2.2: Evolution des températures intérieures et extérieures au printemps

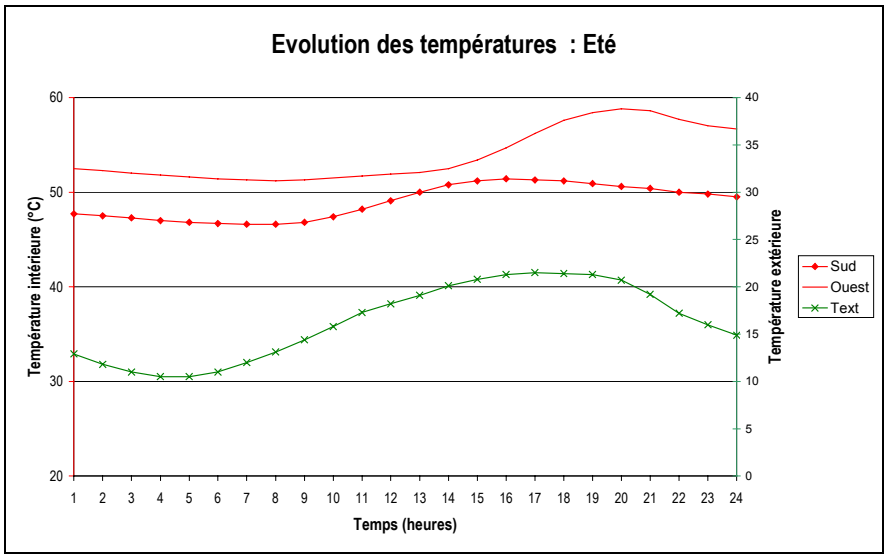


Figure 2.3: Evolution des températures intérieures et extérieures en été

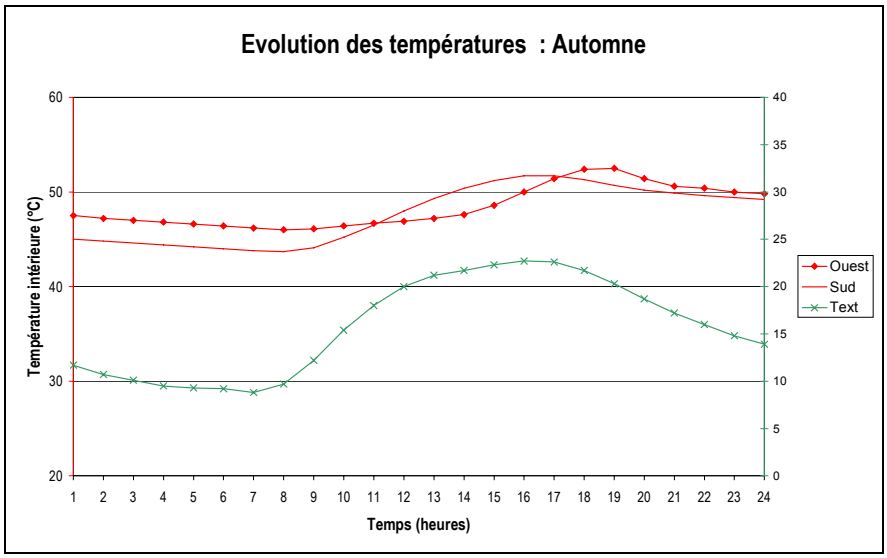


Figure 2.4: Evolution des températures intérieures et extérieures en automne

Nous remarquons que les températures obtenues dans la pièce sont très élevées et certainement surévaluées, puisqu'elles dépassent toujours 48°C en été et environ 45°C en automne. Il semble donc que l'hypothèse considérant que les bureaux voisins au bureau choisi évoluaient de la même manière que celui-ci n'est pas réaliste, du moins lorsqu'on étudie les surchauffes, c'est à dire lorsqu'on se trouve en dehors de la zone de confort. Dans ce cas, il existe des échanges de chaleur non négligeables entre locaux de différentes orientations ou de différentes géométries (par exemple, un local de coin présente une surface déperditive plus importante qu'un local situé au centre d'un bâtiment).

1.3 Comparaison modèle adiabatique - modèle multizonal au niveau des consommations

Nous avons vu au point 1.2 que lorsque le bâtiment n'est pas équipé d'un système de conditionnement d'air, c'est-à-dire, lorsque les conditions de confort d'été ne sont pas toujours atteintes, nous ne pouvons pas négliger les échanges de chaleur entre locaux voisins.

Montrons maintenant que lorsque l'on considère que les conditions de confort d'été sont toujours satisfaites (bâtiment équipé d'un système de conditionnement d'air), et qu'on limite l'augmentation des températures dans tout le bâtiment, on ne peut pas non plus faire la simplification du local adiabatique sans perdre de grande précision dans les résultats des calculs.

Etudions les consommations de chauffage et de refroidissement pour un même local, modélisé de deux manières différentes.
Prenons par exemple le local n°1, orienté au sud. La configuration de la façade est c1 et ce local profite de gains internes faibles. La combinaison des coefficients de réflexion des parois est p1 (la description précise de ces hypothèses est réalisée aux points 2, 3 et 4).

Si nous modélisons un bâtiment de bureaux dans son entièreté et que nous étudions un local particulier contenu dans cet immeuble, nous obtenons une consommation annuelle de chauffage de 47,3 kWh/m^2. Par contre, si nous simplifions le modèle de simulation et ne considérons que le local, modélisé de manière adiabatique, nous obtenons la valeur de 39.5 kWh/m^2. De même, pour les consommations de refroidissement, nous obtenons des valeurs de 15.06 kWh/m^2 dans le premier cas et 20.34 kWh/m^2 dans le second cas.
Lorsqu'on prend un modèle adiabatique, on a donc tendance à sous estimer la consommation de chauffage de 16.5 % et surestimer la consommation de refroidissement de 35.1 %.
Cela montre que, pour un local sud, on néglige une partie des déperditions calorifiques lorsqu'on ne tient pas compte des échanges de chaleur entre locaux voisins.

Nous voyons donc que, même lorsque le confort est atteint (car les systèmes de chauffage et de refroidissement sont conçus pour répondre à des températures de consignes fixées), le modèle du local adiabatique n'est pas fiable.
Cette observation, combinée aux constatations que nous avons faites au point 1.2, nous montre qu'il est indispensable de modéliser un immeuble de bureaux dans sa globalité en utilisant un modèle multizonal.

1.4 Etudes thermique paramétriques préliminaires (ensemble 1)

Introduction

Comme nous l'avons déjà dit au point 1.1, les hypothèses de calcul choisies pour les études paramétriques préliminaires ne sont pas les mêmes que celles que nous avons fixées pour la réalisation du second ensemble de simulations. Nous allons donc aborder ce point 1.4 en décrivant les hypothèses de calcul considérées ici. Ensuite nous montrerons ce que ces simulations préliminaires nous ont appris et pourquoi nous devons considérer avec prudence l'analyse des résultats obtenus. Nous décrirons finalement les paramètres que nous avons décidé de faire varier pour la réalisation du second ensemble de simulations ainsi que leur domaine de variation.

Hypothèses de calcul

Le bâtiment modélisé est un immeuble de bureau de type "allongé", que l'on peut orienter suivant les 4 orientations principales (pour étudier les 4 orientations, il faut donc réaliser les calculs 4 fois).
Le local analysé est un local de bureau de type individuel. Sa surface peut être modifiée mais ses proportions varient toujours selon le rapport 2/3.
Ce local est situé au premier étage du bâtiment, au milieu de l'aile.

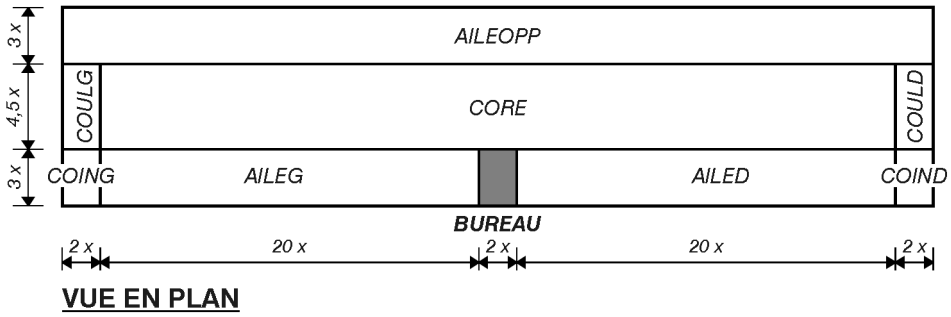


Figure 2.5 : Vue en plan du modèle utilisé pour le set 1 de simulations

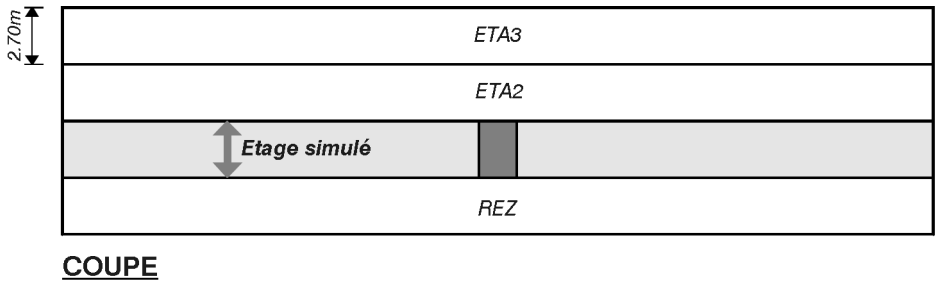


Figure 2.6 : Vue en coupe du modèle utilisé pour le set 1 de simulations

L'immeuble est isolé par 5 cm d'isolation.

Nous analysons plusieurs superficies de fenêtre en considérant que le châssis (en bois, de 5 cm d'épaisseur) occupe 20% de la superficie de celle-ci. Pour les autres locaux, la surface de

la fenêtre reste proportionnelle à la largeur du bureau, dans les mêmes proportions que celles du local type étudié.
Toutes les fenêtres de même orientation que celle du local type sont équipées du même vitrage que celui-ci. Par contre, toutes les autres fenêtres sont équipées d'un vitrage de référence ; un double vitrage ordinaire (k = 2.8 W/m^{2}K, FS = 76% et TI = 81%).

Le taux d'infiltration est de 0,15 Vol/heure.

Selon les nouvelles réglementations, le taux de ventilation est de 2,5 m^3/(hxm^2) pour un bureau individuel ou de 2,9 m^3/(hxm^2) pour un bureau commun.

La température de consigne à respecter dans les bureaux en terme de chauffage est de 20°C entre 7 et 17h et de 15°C en dehors de cette plage horaire.

La température de consigne à respecter dans les bureaux en terme de refroidissement est de 25°C entre 7 et 17h et de 30°C en dehors de cette plage horaire.

Quatre scénarios d'apports internes sont étudiés.

Remarque :
En terme de superficie, il est de pratique courante qu'une personne ait au moins droit à 15 m^2 de surface. Si le local a une superficie de moins de 30 m^2, il n'est donc occupé que par une personne. Si sa superficie est comprise entre 30 et 45 m^2, il est occupé par deux personnes, etc.
Considérons le cas d'un local occupé par deux personnes :

1er cas (Nrgi = 4) : aucun apport interne

2ème cas (Nrgi = 1): apports internes faibles
c'est-à-dire de 8h à 18h
- 2 lampes individuelles de 18 W
- 2 personnes (2 x 81 W par personne)
- éclairage général de 13 W/m²

3ème cas (Nrgi = 2): apports internes moyens
c'est-à-dire de 8h à 18h
- 2 lampes individuelle de 18 W
- 2 personnes (2 x 81 W)
- 2 PC + écran (2 x 160 W)
- éclairage général de 13 W/m²

4ème cas (Nrgi = 3): apports internes élevés
c'est-à-dire de 8h à 18h
- 2 lampes individuelles (2 x 18 W)
- 2 personnes (2 x 81 W)
- 2 PC + écran (2 x 160 W)
- 2 imprimantes (2 x 160 W)
- éclairage général de 13 W/m²

Les vitrages étudiés lors des ensembles de simulations 1 et 2 sont pratiquement identiques et sont décrits en détails au point 6, Modélisation des vitrages.

Ces simulations ont été réalisées au moyen du logiciel MDBS, qui est un logiciel bien validé et utilisé depuis de nombreuses années au sein de la cellule de recherche "Architecture et Climat" de l'UCL.

Paramètres étudiés

Nous étudions l'influence des paramètres suivants :
- épaisseur d'isolant ;
- choix des températures de consigne ;

- pourcentage de surface vitrée par rapport à la surface de la façade ;
- taille du bâtiment ;
- géométrie du local ;
- étanchéité du local ;
- valeur des gains internes.

Ces simulations nous ont permis d'étudier les consommations de chauffage et de refroidissement et plus particulièrement le classement des vitrages en terme de consommation de chauffage additionnée à la consommation de refroidissement.

Analyse des résultats des simulations en terme de somme chauffage + refroidissement

Epaisseur de l'isolant
Le paramètre 'épaisseur d'isolant' ne modifie que très peu le classement des vitrages, surtout dans le domaine compris entre 3 et 7 cm, domaine qui correspond à la majorité des immeubles de bureaux actuellement construits en Belgique.

Choix des températures de consigne
Les variations de plages de températures de consigne n'ont que très peu d'influence sur le classement des vitrages en terme de somme de consommation de chauffage et de refroidissement.

Pourcentage de la surface vitrée
Cette valeur n'a apparemment pas beaucoup d'influence sur le total chauffage + refroidissement.

Taille du local
Les proportions du local restant fixées à 2x/3x, nous faisons varier la surface au sol du local. Cette variation n'a que peu d'influence sur le classement des vitrages.

Géométrie du local
Nous faisons varier le rapport profondeur sur largeur du local et nous remarquons que cette variation influence le classement des vitrages.

Valeur des gains internes
La valeur des gains interne a une influence très marquée sur le classement des vitrages.

Etanchéité du bâtiment
Les variations d'étanchéité induisent des changements assez marqués dans le choix des vitrages.

Validation de l'analyse des résultats en terme de somme chauffage + refroidissement

Diverses raisons nous poussent à reconsidérer les conclusions tirées à partir des simulations paramétriques décrites ci-dessus:

1. Nous n'avons pas, lors de ces études paramétriques, introduit de facteur de rendement des systèmes ni de facteur de transformation de la demande d'énergie en énergie primaire.
   La suite de ce travail de doctorat nous a cependant montré que le choix de ces facteurs peut être essentiel quant au choix du vitrage car la combinaison de ces deux facteurs donne en général un poids plus important aux demandes de chaud qu'aux demandes de froid (voir chapitre 3, point 2.6).
   Il se peut donc que la variation d'un paramètre n'ait pas eu d'effet visible sur la somme de la consommation de chauffage et de refroidissement lors des études paramétriques mais qu'il ait cependant une influence sur cette somme, exprimée en énergie primaire.

2. Nous n'avons pas non plus tenu compte des consommations d'humidification et de déshumidification. Ce travail de doctorat nous a également montré que ces consommations

(et plus particulièrement la consommation d'humidification) peuvent varier en fonction du vitrage (voir chapitre 4, point 3.10) et donc avoir une influence sur le choix de ceux-ci.

Les faits décrits ci-dessus nous poussent donc à reconsidérer les conclusions tirées des études paramétriques détaillées ici.

Repassons donc en revue les paramètres étudiés et justifions notre choix de fixer ou de faire varier ces paramètres.

Epaisseur de l'isolant
Si le paramètre 'épaisseur d'isolant' n'influence que très peu le classement des vitrages en terme de somme des consommations de chauffage et de refroidissement, la pratique nous montre que l'augmentation de cette épaisseur diminue les consommations de chauffage et augmente les consommations de refroidissement. Le poids de ces deux types de consommations étant différent lors de la transformation en énergie primaire, leur somme en terme d'énergie primaire sera également influencée.
Nous savons cependant que l'effet de l'épaisseur d'isolant est surtout important pour les premiers centimètres. Notre outil s'adresse spécifiquement à des bâtiments neufs, situés en Belgique. Ces bâtiments doivent respecter la législation belge qui demande un coefficient K maximal de 65. Nous avons donc choisi de fixer notre isolation à 5 centimètres, ce qui correspond à ce que l'on trouve dans la majorité des immeubles de bureaux construits actuellement.

Choix des températures de consigne
Le choix des températures de consigne aurait certainement une influence marquée sur les consommations si elles pouvaient varier fortement. Cependant, il semble que dans la pratique actuelle, des valeurs de 15-21°C pour le chauffage et 25-30°C pour le refroidissement soient raisonnables et correspondent à la majorité des cas actuels.
Une des raisons qui nous ont poussés à fixer ces températures de consigne est que l'utilisateur de l'outil (architecte, bureau d'étude ou maître d'ouvrage) ne connaîtra pas précisément ces valeurs au moment où il utilisera l'outil, c'est à dire dans la phase de préconception du bâtiment. Il ne nous semblait donc pas utile de multiplier le nombre de simulations à réaliser pour tester différents cas de températures de consigne.

Pourcentage de surface vitrée par rapport à la surface de façade
Il est clair que la quantité de surface vitrée aura un impact certain tout autant sur les consommations thermiques que sur les consommations d'éclairage. De plus, la position de la surface vitrée a une grande importance sur la quantité de lumière naturelle captée ainsi que sur la répartition de celle-ci et donc sur les consommations d'éclairage.
Il nous paraissait donc essentiel de tester un grand nombre de configurations de façade. Celles-ci sont au nombre de neuf, pour chaque largeur de local, comme décrit au point 3: Configuration des façades.

Taille et géométrie du bâtiment
Il nous semblait clair qu'il fallait proposer plusieurs tailles de locaux aux utilisateurs du programme. Notre choix a été de prendre un module de base de 90 cm et de modéliser quatre locaux de largeur différente, multiple de 90 cm. La profondeur choisie est fixe et vaut 5,4 mètres. Ce choix a été réalisé à partir de renseignements pris chez des architectes concevant régulièrement des immeubles de bureaux. Les dimensions précises sont décrites au point 2.1: Le local de bureau. Le fait de garder un local de bureau de même profondeur mais de largeur variable permet de tester des locaux de différentes proportions.

Valeur des gains internes
Plusieurs valeurs de gains internes seront testées. Celles-ci sont décrites précisément au point 12 de ce chapitre.

Etanchéité du bâtiment
L'étanchéité du bâtiment a une grande influence sur les pertes par infiltration. En Belgique, les valeurs d'infiltration pour les immeubles de bureaux varient environ de 3 à 7 volumes/heure pour une pression de 50 Pa, ce qui correspond à un coefficient d'étanchéité de 0.15 à 0.35

Vol/h. L'incertitude qui se pose quant au choix de la valeur d'étanchéité lors de l'utilisation du programme est encore plus grande que dans le cas du choix des températures de consigne. Même pour un immeuble construit, il est très difficile, voir impossible d'évaluer son coefficient d'étanchéité sans réaliser des mesures très précises et coûteuses. Nous avons donc décidé de nous limiter à une seule valeur de coefficient d'infiltration correspondant, en moyenne, à des immeubles de bureaux neufs en Belgique. Pour un immeuble neuf, nous prenons donc la plus petite des valeurs actuellement mesurées dans les immeubles de bureaux belge, il s'agit donc de 0.15 Vol/h.

1.5 Choix du vitrage de référence

Pour réaliser les études paramétriques (point 1.4), nous avions choisi de prendre le double vitrage ordinaire comme vitrage de référence pour les fenêtres d'orientations différentes à celle pour laquelle on recherchait le vitrage optimal.
Nous allons essayer de voir si le choix du vitrage de référence peut avoir un impact sur le choix du vitrage optimal.
Nous choisissons des gains internes moyens et une photométrie de parois moyenne également (de type p2). La configuration de fenêtre analysée est la C3. Nous étudions le cas de l'immeuble de bureau sans inertie.
Procédons de deux manières différentes et comparons les résultats obtenus par les deux méthodes.

Méthode 1 :

En choisissant comme vitrage de référence le double vitrage ordinaire, calculons d'abord quel est le vitrage optimal pour une première orientation choisie. Dans notre cas, il s'agit de l'orientation sud mais ce choix est tout à fait arbitraire.
Une fois le vitrage optimal trouvé pour cette première orientation, nous plaçons ce vitrage sur toutes les fenêtres orientées au sud pour continuer nos calculs (calculs des vitrages optimaux pour une autre orientation, dans notre cas, le nord). Nous plaçons ensuite le vitrage trouvé pour la seconde orientation sur toutes les fenêtres ayant la seconde orientation, et ainsi de suite. Pour terminer nos calculs, nous recalculons le vitrage optimal pour la première orientation (le sud dans notre cas) et nous vérifions si les vitrages choisis au premier calcul correspondent au vitrage choisi une fois les autres orientations optimisées.

Méthode 2 :

Nous plaçons toujours du double vitrage ordinaire sur toutes les façades, exceptée celle pour laquelle on recherche le vitrage optimal.
Les graphiques suivants permettent de comparer les résultats obtenus au moyen des deux méthodes.
Le graphique placé à gauche se rapporte toujours à la méthode 1 tandis que le graphique de droite donne les résultats obtenus par l'utilisation de la méthode 2. Notons que nous introduisons les consommations d'éclairage artificiel dans les résultats.

Orientation Sud (premier passage)

Les graphiques correspondants aux cas étudiés se trouvent en annexe 1 (graphiques 1 à 5)
Nous observons que pour tous les locaux, le vitrage optimal pour l'orientation sud est le 70/40, suivi de près par le SKN172.

Orientation Nord

Méthode 1 :
Nous allons maintenant rechercher quel est le meilleur vitrage pour l'orientation nord, en plaçant le 70/40 pour tous les vitrages orientés sud.
Les vitrages équipant les fenêtres d'orientation est et ouest restent pour le moment des doubles vitrages ordinaires.

Méthode 2 :
Recherchons le vitrage optimal pour les fenêtres d'orientation nord, en équipant les fenêtres d'orientations est, sud et ouest de double vitrages ordinaires.

Les graphiques reprenant les résultats de ces simulations sont les graphiques 6 à 15, se trouvant en annexe 1.

Observations des résultats donnés par la méthode 1:
Nous remarquons que le vitrage le plus performant est le 70/40, sauf pour le local 3 pour lequel le PLTfut donne des résultats sensiblement meilleurs.
Pour le local 5, c'est le SKN 172 qui donne un meilleur résultat.

Cette différence de choix de vitrage entre les locaux de même orientation provient de la différence des gains internes dans ces locaux.
Observations des résultats donnés par la méthode 2 :
Le vitrage optimal est le 70/40 pour les 4 premiers locaux et le SKN172 pour le local 5.

Nous remarquons donc une différence dans le choix du vitrage équipant le local 3 selon la méthode choisie.
Le PLTfut donne une valeur de consommation de 52,15 kWh/m^{2}an et le 70/40 qui le suit directement dans l'ordre des consommations, donne une valeur de 52,68 kWh/m^{2}an. La différence entre les deux consommations est donc de l'ordre de 1 %.

Pour la suite des calculs, comme nous ne pouvons pas simuler séparément les locaux d'orientations autres que celle testée, nous considérons, lors de l'utilisation de la méthode 1, que les vitrages orientés au nord sont de type 70/40.

Orientation Est

Observations (graphiques 16 à 25) :
Dans les deux cas, c'est le 70/40 qui est toujours le vitrage optimal.
De même manière que précédemment, analysons les résultats obtenus pour l'orientation Ouest.

Orientation Ouest

Observation (graphiques 26 à 35) :
Dans les deux cas, le vitrage optimal est toujours le 70/40, quel que soit le local considéré.

Orientation Sud (second passage)

Observations (graphiques 36 à 40) :
Recalculons maintenant, selon la première méthode, le vitrage optimal pour l'orientation sud.
C'est également le vitrage 70/40 qui apparaît être le vitrage optimal pour l'orientation sud.

Conclusions

Voici sous forme de tableaux, les vitrages optimaux pour chaque local et pour les 4 orientations différentes.

Méthode 1	Nord	Sud (passage 2)	Est	Ouest
local 1	70/40	70/40	70/40	70/40
local 2	70/40	70/40	70/40	70/40
local 3	PLTfut	70/40	70/40	70/40
local 4	70/40	70/40	70/40	70/40
local 5	SKN172	70/40	70/40	70/40

Tableau 2.1

Méthode 2	Nord	Sud	Est	Ouest
local 1	70/40	70/40	70/40	70/40
local 2	70/40	70/40	70/40	70/40
local 3	70/40	70/40	70/40	70/40
local 4	70/40	70/40	70/40	70/40
local 5	SKN172	70/40	70/40	70/40

Tableau 2.2

Nous remarquons que les résultats sont quasi identiques et si nous observons les graphiques se rapportant aux différents cas, nous voyons que les tendances sont vraiment semblables quelle que soit la méthode choisie, même si les valeurs de consommation ne sont pas totalement identiques.

A la vue de ces observations et comme le but de l'outil est surtout de déterminer le groupe de vitrages le plus efficace au niveau de la combinaison thermique-éclairage et non pas précisément un vitrage particulier, nous décidons d'utiliser la méthode 2.
Ce choix se justifie également par le fait que choisir la méthode 1 augmenterait très fort le nombre de calculs tout en diminuant l'automatisation de ceux-ci, ce qui nous permettrait d'étudier beaucoup moins de cas.

2. Géométrie du modèle 2

2.1 Le local de bureau

Le local de bureau analysé a une profondeur de 5,4 m. Sa hauteur utile est de 2,7 m. Il est pourvu d'un faux plafond d'une épaisseur de 30 cm (voir Figure 2.7).

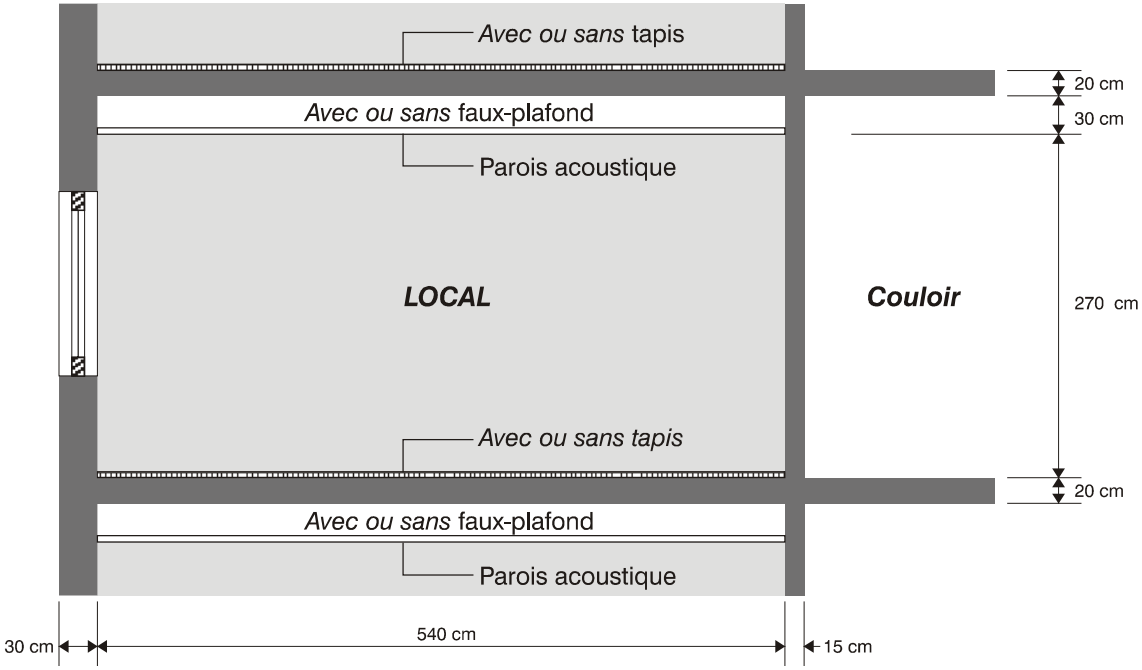


Figure 2.7: Vue en coupe d'un local de bureau analysé

Sa largeur varie selon un module de base de 0,9 m.
Nous analysons 5 locaux qui diffèrent soit par leur largeur soit par le nombre de personnes qui les occupent (voir Figure 2.8). Le nombre de personnes présentes dans un local influence la quantité de gains internes, de part leur métabolisme et de part le nombre de PC utilisés dans le local, puisque chaque personne dispose d'un PC. Elle a donc un impact direct sur les consommations.

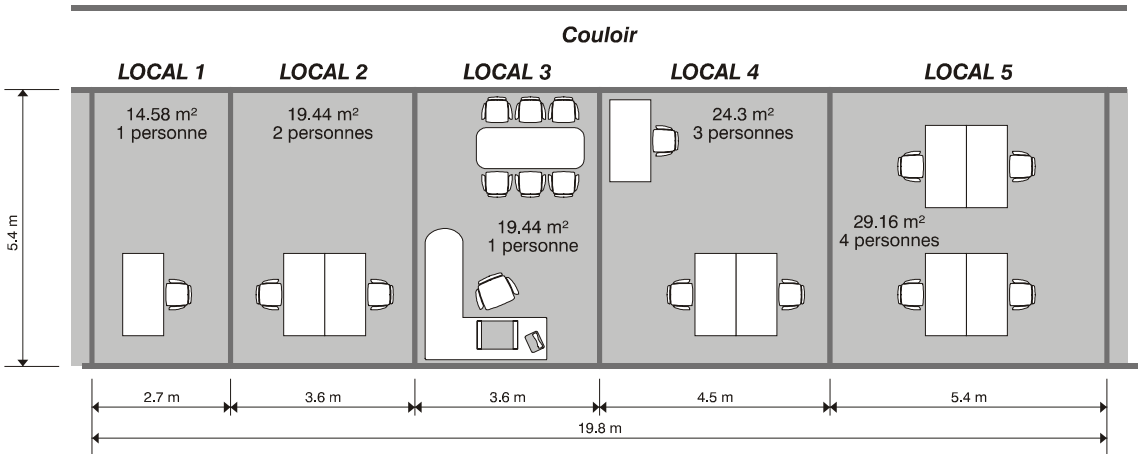


Figure 2.8: Vue en plan des cinq bureaux analysés

2.2 Le bâtiment

Ces bureaux sont intégrés dans un immeuble, au premier étage de celui-ci, afin de désolidariser au maximum les résultats des conditions frontières (température dans le sol, degré d'isolation de la toiture …).
La Figure 2.9 représente l'immeuble entier en coupe et en plan.

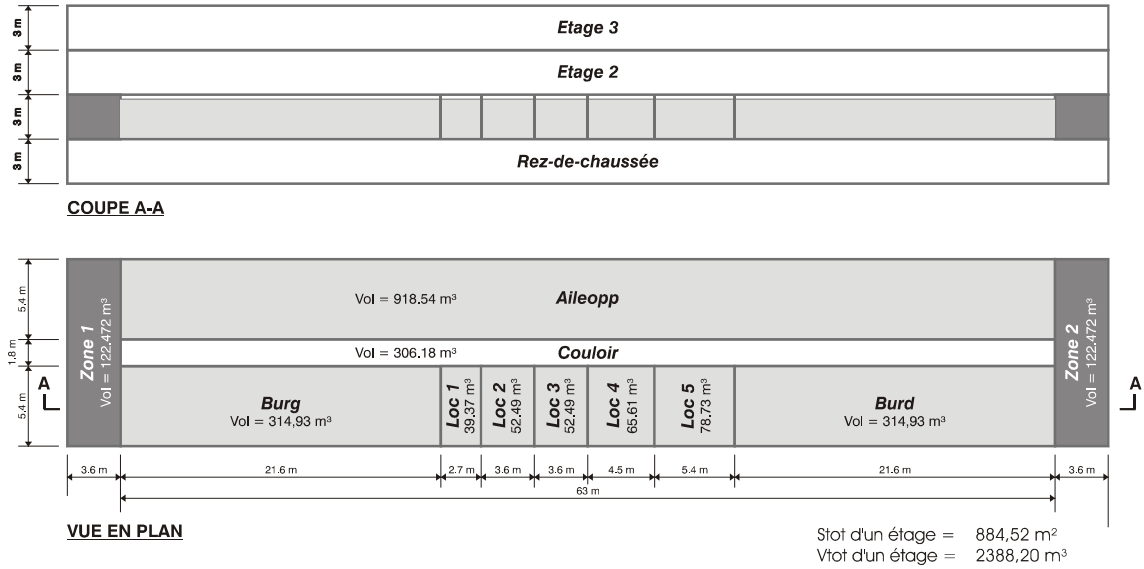


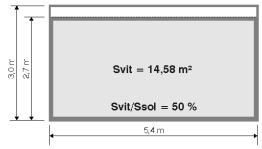
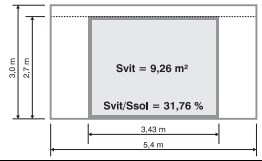
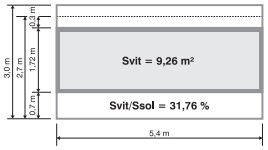
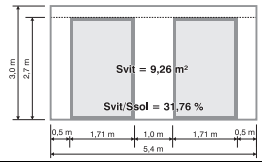
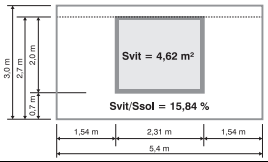
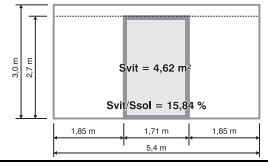
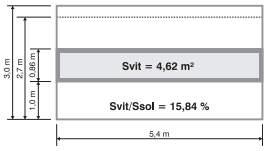
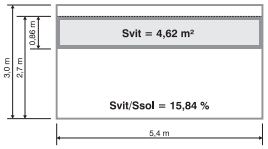
Figure 2.9: Vue en coupe et en plan du bâtiment modélisé

2.3 Les orientations

Les calculs sont réalisés pour les quatre orientations principales ; nord, sud, est et ouest.

3. Configuration des façades

Pour chaque largeur de local, nous testons 9 configurations de fenêtres.
Pour chaque numéro de configurations, le rapport de la surface de la fenêtre sur la surface au sol est constant (par exemple, C1 correspond à 50 %, C2, C3 et C4 à 9.26 %, etc …), quelle que soit la largeur du local. Le châssis occupe 20 % de la surface de la fenêtre. Il est en bois et son coefficient de conductivité thermique est de 6.13 kJ/hm^{2}K (1.7 W/m^{2}K).

Local 5 : l = 5,4 m ; S_{sol} = 29,16 m^2 et $S_{faç}$ = 16,2 m^2			
Numéro de la conf.	S_{fen} (m2)	S_{fen}/S_{sol} (%)	
C1 : tout vitré $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 90 %	14.58	50	
C2 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	9.26	31.76	
C3 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	9.26	31.76	
C4 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	9.26	31.76	
C5 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	4.62	15.84	
C6 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	4.62	15.84	
C7 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	4.62	15.84	
C8 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	4.62	15.84	

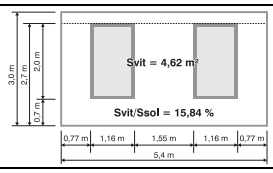
C9 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	4.62	15.84	

Tableau 2.3

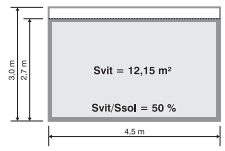
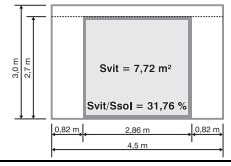
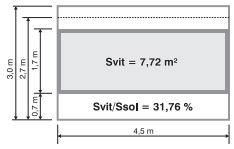
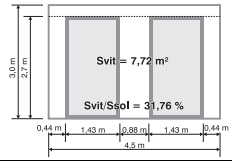
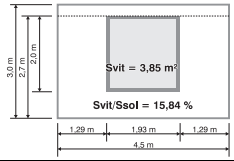
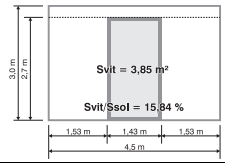
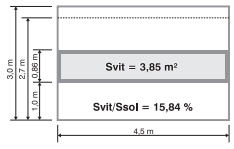
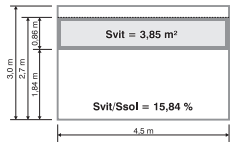
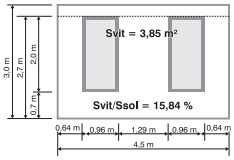
Local 4 : l = 4,5 m ; S_{sol} = 24,3 m^2 et $S_{faç}$ = 13,5 m^2			
Numéro de la conf.	S_{fen} (m2)	S_{fen}/S_{sol} (%)	
C1 : tout vitré $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 90 %	12.15	50	
C2 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	7.72	31.76	
C3 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	7.72	31.76	
C4 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	7.72	31.76	
C5 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.85	15.84	
C6 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.85	15.84	
C7 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.85	15.84	
C8 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.85	15.84	
C9 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.85	15.84	

Tableau 2.4

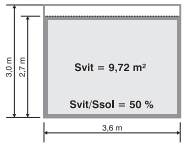
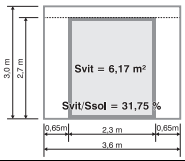
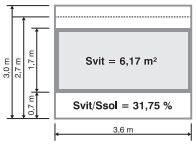
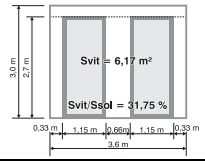
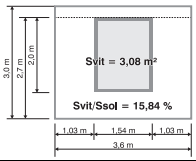
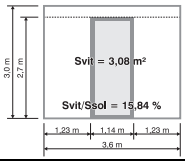
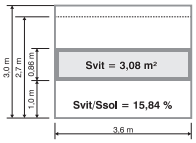
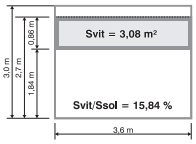
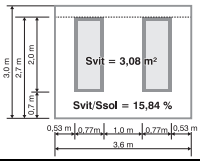
Locaux 2 et 3 : l = 3,6 m ; S_{sol} = 19,44 m^2 et $S_{faç}$ = 10,8 m^2			
Numéro de la conf.	S_{fen} (m2)	S_{fen}/S_{sol} (%)	
C1 : tout vitré $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 90 %	9.72	50	
C2 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	6.17	31.76	
C3 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	6.17	31.76	
C4 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	6.17	31.76	
C5 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.08	15.84	
C6 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.08	15.84	
C7 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.08	15.84	
C8 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.08	15.84	
C9 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	3.08	15.84	

Tableau 2.5

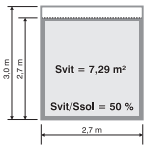
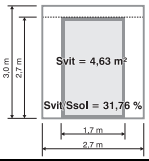
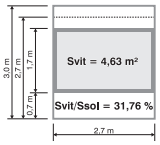
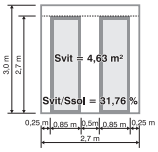
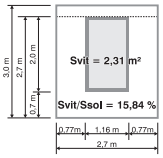
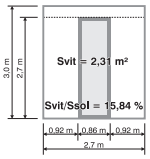
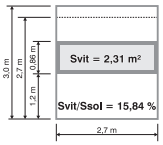
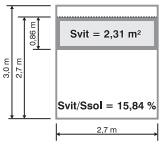
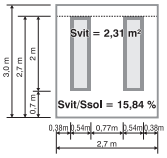
Local 1 : l = 2,7 m ; S_{sol} = 14,58 m^2 et $S_{faç}$ = 8,1 m^2			
Numéro de la conf.	S_{fen} (m2)	S_{fen}/S_{sol} (%)	
C1 : tout vitré $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 90 %	7.29	50	
C2 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	4.63	31.76	
C3 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	4.63	31.76	
C4 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 57 %	4.63	31.76	
C5 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	2.31	15.84	
C6 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	2.31	15.84	
C7 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	2.31	15.84	
C8 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	2.31	15.84	
C9 $S_{fenêtre}/S_{mur}$ = 28.5 %	2.31	15.84	

Tableau 2.6

4. Photométrie des parois intérieures

Nous traitons différents cas de photométrie des parois intérieures correspondant à un local aux murs très clairs, de clarté moyenne ou très sombres.

Type de photométrie	Parois	Coefficient de réflexion	Exemple de matériaux*
Très clair (p1)	sol	35 %	Béton (neuf) / fibre de bois clair (vieillie)
	mur	70 %	Plâtre blanc (neuf) / Enduit blanc (neuf) Aluminium brossé
	plafond	75 %	Peinture blanche Plâtre blanc (neuf) / Enduit blanc (neuf) Aluminium brossé
Moyen (p2)	sol	20 %	Textiles / moquette rouge ou bleue Carrelage terre cuite / Parquet de chêne (vieilli) Moquette gris clair
	mur	50 %	Inox propre Enduit blanc (vieilli) / Fibre de bois clair (neuve) Carrelages blancs (y compris joints)
	plafond	60 %	Panneaux acoustiques blancs (perforés) Enduit blanc (vieilli) / Fibre de bois clair (neuve) Inox propre Aluminium brossé
Foncé (p3)	sol	10 %	Moquette gris sombre / Linoléum brun / Bitume Pierre brute / Tomettes Textiles / moquette rouge ou bleue foncées
	mur	25 %	Acajou, Noyer Brique rouge (claire et propre) Textiles / moquette rouge ou bleue
	plafond	40 %	Béton (neuf) / Fibre de bois clair (vieillie) Bois de pin (neuf)

Tableau 2.7

* Données provenant du logiciel DIAL

Nous ne traitons pas les obstructions extérieures.

5. Caractérisation physique des vitrages

5.1 Le rayonnement électromagnétique [CSTC 1999] [AMCO 2361]

Les aspects d'apport d'énergie et de lumière sont souvent indissociables, leur origine se trouvant dans le rayonnement solaire. Le présent paragraphe aborde dans un premier temps le rayonnement électromagnétique, qui se rapporte à ces deux parties, pour ensuite étudier séparément les aspects énergétiques et les aspects optiques.

Les différents types de rayonnement

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique. Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

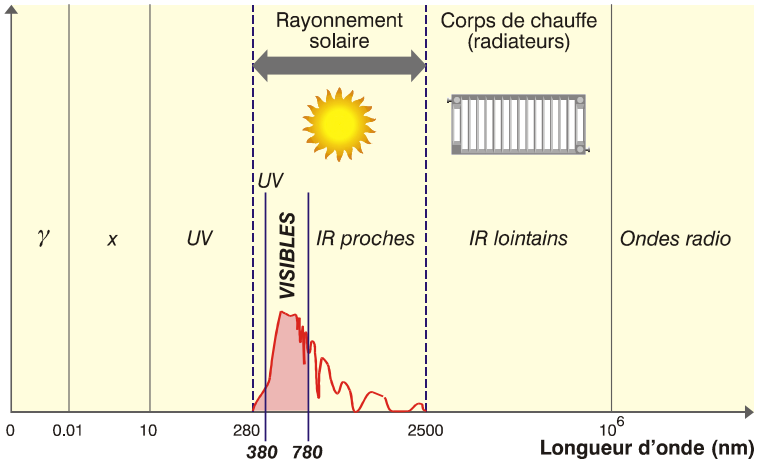


Figure 2.10: Classification des divers rayonnements électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde

Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde λ.
La Figure 2.10 donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

Le spectre solaire

Le rayonnement solaire, ayant comme origine le soleil, ne correspond qu'à une partie du spectre des ondes électromagnétiques (Figure 2.10). Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m^2, produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut 1353 W/m^2 et est appelée constante solaire. L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchi une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (Figure 2.11). L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

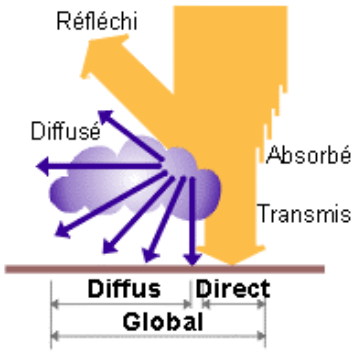


Figure 2.11

Le spectre solaire se réparti selon trois types de rayonnement (Figure 2.12):

- les ultraviolets (UVA et UVB) qui ont une longueur d'onde comprise entre 280 et 380 nm. Ils représentent environ 5 % de la quantité totale du rayonnement solaire.
- la partie visible du spectre. Il s'agit de la partie du rayonnement solaire compris entre 380 et 700 nm. C'est dans ce domaine visible que l'énergie solaire est la plus intense. Elle représente 50 % de la quantité totale du rayonnement solaire.
- les infrarouges (IRA et IRB) qui correspondent aux longueurs d'ondes comprises entre 700 et 2500 nm. Ils représentent environ 45 % du spectre solaire.

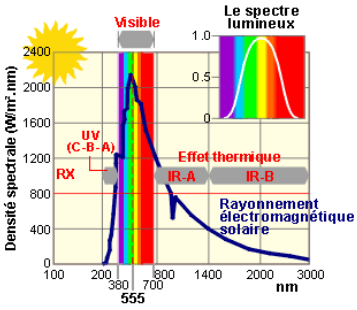


Figure 2.12 : spectre solaire

5.2 Les mécanismes de transfert de chaleur [AMCO 2361]

Le transfert de chaleur au travers d'une fenêtre se déroule selon trois mécanismes combinés : la conduction, la convection et la radiation.

La conduction

La conduction est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides.
La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, sa conductivité thermique, dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur.

La convection

On définit la convection comme
- l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact,
- le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre.

Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides.
Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide.
La quantité de chaleur ainsi transmise est proportionnelle à la différence de température entre paroi et fluide.

La radiation

Tous les matériaux rayonnent sans arrêt de l'énergie dans toutes les directions, à la suite du mouvement continuel de vibration de leurs molécules situées en surface. Alors que le rayonnement solaire comporte essentiellement des radiations de courtes longueurs d'onde émises à très hautes températures, le rayonnement thermique terrestre que nous ressentons comme échange radiatif de chaleur est principalement constitué de grandes longueurs d'onde et de l'infrarouge lointain, émises à une température bien inférieure.
Par exemple, lorsque le feu est mourant, les flammes et les braises prennent une coloration rouge sombre et donnent moins de lumière et à peine moins de chaleur. Au bout d'un moment, les flammes disparaissent, les braises encore rouges se ternissent, s'assombrissent et finalement ne rougeoient plus du tout. Les braises tièdes n'émettent plus de clarté, mais elles continuent à rayonner de la chaleur. On ressent la douce tiédeur du feu mourant pendant des heures, alors qu'il n'éclaire plus et émet de la chaleur seulement sous forme de radiations infrarouges.
L'intensité du rayonnement thermique émise par un corps dépend non seulement de sa température de surface mais aussi de son émissivité. D'une façon générale, la plupart des corps sont de bons émetteurs de rayonnement thermique, c'est-à-dire qu'ils rayonnent facilement de la chaleur sous forme d'énergie radiante infrarouge. L'émissivité d'un corps mesure son aptitude à émettre un rayonnement thermique. La plupart des matériaux de

construction par exemple ont une émissivité de 0,9 environ, ce qui signifie qu'ils rayonnent 90% du maximum théorique d'énergie radiante correspondant à une température donnée. Habituellement, les surfaces brillantes finement polies des métaux émettent un rayonnement thermique faible. Cela signifie qu'elles rayonnent très peu de chaleur à une température donnée.

Le passage de chaleur au travers d'une fenêtre résulte d'une interaction complexe entre ces trois modes de transfert de chaleur. C'est pour cette raison que la conduction, la convection et la radiation ne sont pas mesurées et discutées séparément. On utilise deux variables permettant de caractériser l'énergie transférée au travers d'un vitrage.
Il s'agit du coefficient de conductivité thermique k (aussi appelé U-value ou U-factor) et du facteur solaire du vitrage FS.

5.3 Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage [Car 1996], [CSTC 1999]

Le coefficient de conductivité thermique (k)

Quand il existe une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, de la chaleur est gagnée ou perdue au travers du vitrage et du châssis. La capacité de la fenêtre à résister à ce transfert de chaleur dépend de son coefficient de conductivité thermique. Le facteur k d'une fenêtre exprime la quantité de chaleur traversant celle-ci en régime permanent, par unité de temps, pour 1 mètre carré de surface et pour 1°C de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.
En plus des propriétés thermiques propres aux matériaux, le facteur k dépend des conditions climatiques comme par exemple le vent. Si la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur est plus importante que 1°C, on peut également observer une différence de facteur k par rapport aux valeurs mesurées en conditions standard ou calculées. La position du vitrage (vertical ou penché) peut aussi affecter son facteur k. Des conditions standard ont été déterminées afin de permettre de comparer les mesures réalisées dans les différents laboratoires.
Le coefficient k d'une fenêtre dépend du coefficient k du vitrage lui-même, des effets de bord qui apparaissent surtout dans le cas d'un double ou d'un triple vitrage et du coefficient k du châssis.

Le facteur k d'un vitrage dépend principalement du nombre de couches de verre, de la dimension de(s) l'espace(s) séparant ces couches de verres, du type de gaz qui remplit ces espaces et de la présence d'éventuelles couches déposées sur le verre.
En général, quand on parle du coefficient k d'un vitrage, on se réfère au coefficient k mesuré ou calculé au centre de celui-ci.

Le calcul du coefficient k d'une fenêtre suppose que les flux de chaleur soient perpendiculaires au plan de celle-ci. Cependant, les fenêtres sont des assemblages complexes tridimensionnels hétérogènes. Par exemple, les pièces intercalaires placées au bord du vitrage sont moins isolantes que le centre du vitrage en lui-même. Cela cause des échanges de chaleur plus importants au périmètre du vitrage. L'impact relatif de cet effet de bord devient plus important lorsque le vitrage est plus isolant.
Les châssis peuvent également être des pièces complexes dans lesquelles la conduction et la convection interagissent. De plus, les châssis présentent rarement la même coupe tout au long du périmètre du vitrage. De ce fait, il peut être très compliqué de déterminer précisément le facteur k d'un châssis. Cette valeur sera donc soit mesurée en laboratoire, soit calculée par ordinateur.

Le facteur solaire d'un vitrage (FS)

Le second facteur caractérisant les performances solaires d'une fenêtre est sa capacité à contrôler le passage du rayonnement solaire au travers du vitrage. Il s'agit du facteur solaire du vitrage.
Quand un rayonnement solaire frappe un vitrage, une partie de celui-ci est réfléchie, une partie est transmise directement au travers du vitrage et une partie est absorbée par le vitrage. La partie absorbée par le vitrage est ensuite partagée en une partie qui est réémise par le vitrage vers l'intérieur et une partie réémise vers l'extérieur. Le facteur solaire du vitrage est défini par la fraction du rayonnement solaire qui rentre à l'intérieur du bâtiment au travers de la fenêtre sur le rayonnement incident (voir Figure 2.13).

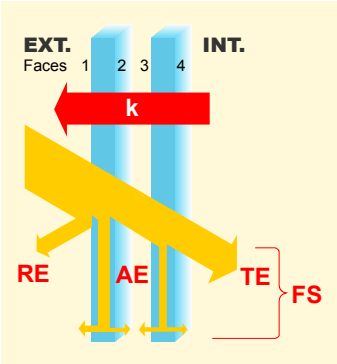


Figure 2.13 : Facteur solaire d'un vitrage

5.4 Les facteurs optiques d'un vitrage

Le coefficient de transmission lumineuse (Tl)

Par analogie aux facteurs énergétiques, les facteurs lumineux sont définis en tenant compte uniquement de la partie visible du spectre solaire (de 380 nm à 780 nm).

Le facteur de transmission lumineuse d'un vitrage est la fraction de lumière incidente qui traverse le vitrage. Le coefficient de transmission lumineuse d'un vitrage est influencé par le type de vitrage, le nombre de couches de verre et le type de revêtement qui pourrait être appliqué sur le verre.

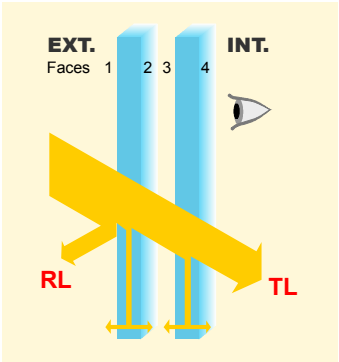


Figure 2.14: Coefficient de transmission et de réflexion lumineuse d'un vitrage

5.5 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie [Car 1996]

Le rayonnement solaire qui traverse un vitrage est en partie transmis, en partie réfléchi et en partie absorbé. Ce sont ces trois composantes qui déterminent la plupart des caractéristiques de performance énergétique d'un vitrage. La manipulation des proportions d'énergie transmise, réfléchie et absorbée pour différentes longueurs d'onde du rayonnement solaire sont à la source de beaucoup d'innovations récentes en ce qui concerne les performances énergétiques des vitrages.
Il existe plusieurs types de vitrages se différenciant par leur transparence par rapport à des différentes parties du spectre.
La plupart des verres sont partiellement transparents aux ultraviolets. Le verre est opaque aux rayonnements infrarouges à grandes longueurs d'onde mais généralement transparent aux infrarouges à courte longueur d'onde. Les quatre propriétés de base des vitrages qui affectent les transferts d'énergie radiante sont : la transmissivité, la réflectivité, l'absorption et l'émissivité.

La transmissivité

La transmissivité se rapporte au pourcentage de rayonnement qui peut traverser un vitrage. La transmissivité peut être définie pour différents types de lumière ou d'énergie, par exemple, on

parle de transmissivité dans le domaine du visible, par rapport aux ultraviolets ou par rapport au spectre solaire total. Chacun de ces termes décrivent une caractéristique différente du vitrage. La transmissivité dans le domaine du visible décrit la possibilité du vitrage à fournir de l'éclairage naturel et à permettre la vue au travers de la fenêtre. Par exemple, un vitrage teinté aura une transmissivité ou un coefficient de transmission lumineuse plus faible qu'un vitrage clair. Plus de la moitié de l'énergie solaire est invisible à l'œil et nous atteint soit sous forme de rayons ultraviolets (UV) ou, majoritairement, sous forme d'infrarouges proches (voir Figure 2.15). En conséquence, la transmissivité par rapport à l'entièreté du spectre solaire décrit comment le vitrage répond à une part plus large du spectre et est plus intéressant pour caractériser la quantité d'énergie solaire transmise par un vitrage.

Transmission idéale correspondant à un vitrage sélectif conçu pour minimiser les gains solaires: La portion visible du spectre est transmise au travers du vitrage alors que le rayonnement solaire infrarouge à courte longueur d'onde est réfléchi.

Transmission idéale correspondant à un vitrage à basse émissivité conçu pour favoriser des apports solaires importants : la partie visible du spectre et le rayonnement infrarouge de courte longueur d'onde sont transmis alors que le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde est réfléchi vers l'intérieur.

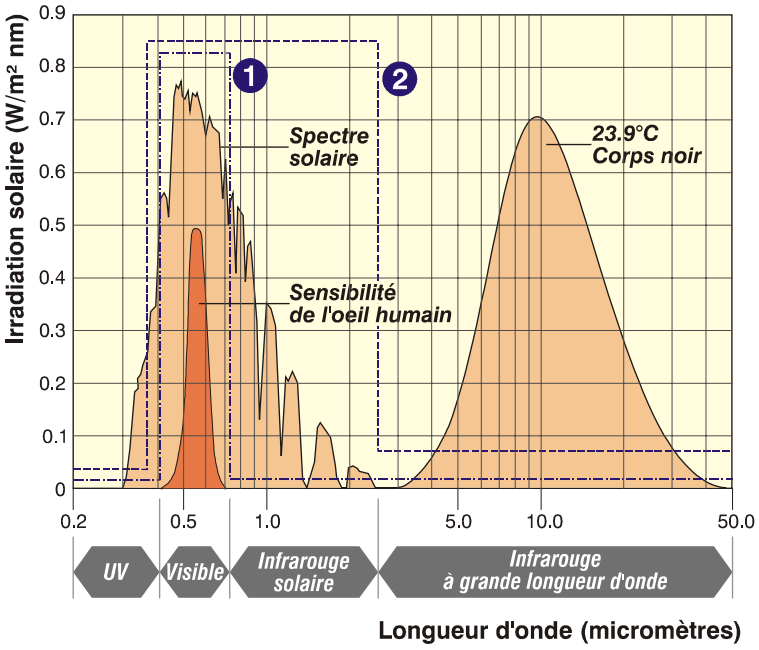


Figure 2.15: Transmission spectrale idéale pour deux vitrages selon différents climats

Les rayons ultraviolets font déteindre les meubles, les tentures, etc. Un vitrage bloquant le passage des rayons ultraviolets est donc considéré comme intéressant. La plupart des vitrages sont transparents aux ultraviolets, ce qui n'est pas le cas de plastiques. Il faut aussi savoir que la lumière visible fait également déteindre les tissus. Eliminer le passage de ultraviolets au travers du vitrage ne résoudra donc pas complètement ce problème. Grâce aux progrès réalisés actuellement, les producteurs de vitrages peuvent contrôler le comportement de ceux-ci selon les différentes parties du spectre. On peut soit altérer les propriétés de base du matériau de substrat (verre ou plastique) ou soit ajouter un revêtement (ou couche) sur la surface même des substrats. Par exemple, une fenêtre optimisée pour l'éclairage naturel et la réduction des gains de chaleur devrait transmettre la quantité adéquate de lumière dans la portion visible du spectre, tout en excluant les gains de chaleur superflus provenant des infrarouges à courte longueur d'onde (voir Figure 2.15). D'une autre manière, une fenêtre optimisée pour capter un maximum de gains solaires en hiver devrait transmettre le maximum de lumière et de rayons infrarouges de courte longueur d'onde tout en bloquant les transferts de chaleurs dans les infrarouges de grande longueur d'onde, qui sont des facteurs importants de perte de chaleur.
Ce sont les stratégies appliquées lors de la conception de couches sélectives à basse émissivité, décrites plus loin dans ce paragraphe.

La réflectivité

Il y aura toujours une partie du rayonnement solaire qui sera réfléchie à la surface du vitrage.

La réflectivité naturelle d'un vitrage dépend de la qualité de la surface du verre, de la présence de couche et de l'angle d'incidence de la lumière. Plus l'angle sous lequel la lumière atteint le vitrage (par rapport à la normale au vitrage) est important, plus la quantité de lumière réfléchie sera importante (Figure 2.16). Même un vitrage clair réfléchit 50 % ou plus de lumière quand l'angle d'incidence est supérieur à 70°.

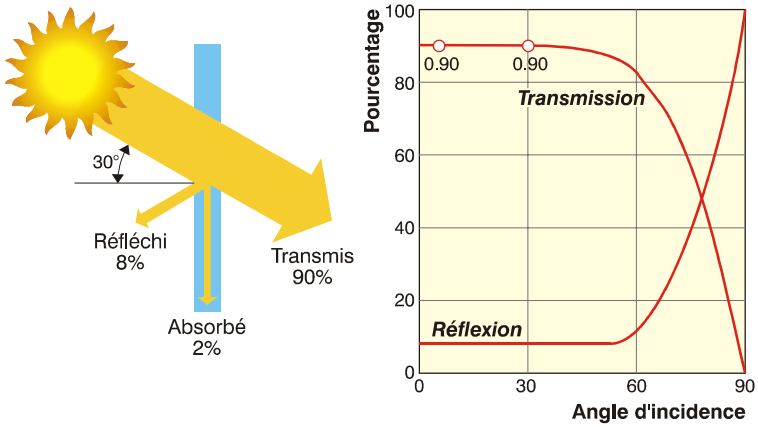


Figure 2.16: Evolution du pourcentage de rayonnement solaire réfléchi et transmis en fonction de l'angle d'incidence

Le coefficient de réflexion d'un vitrage peut être augmenté en appliquant différentes couches métalliques sur sa surface. La plupart des couches réfléchissent l'entièreté du spectre. Cependant, durant ces vingt dernières années, les chercheurs ont développé de nouvelles couches qui peuvent être appliquées sur le verre ou le plastique et réfléchir seulement une partie du spectre. Des couches ayant des coefficients de réflexion variables selon qu'ils s'agissent de rayonnements infrarouges à grande ou courte longueur d'onde permettent de créer des vitrages spécialement adaptés aux climats froids ou aux climats chauds.

L'absorption

L'énergie qui n'est ni transmise au travers du vitrage ni réfléchie par sa surface, est absorbée. Une fois que le verre a absorbé l'énergie, celle-ci est transformée en chaleur, et augmente la température du verre.
Un vitrage de 3 mm d'épaisseur n'absorbe que 4% du rayonnement incident. Le coefficient d'absorption d'un verre peut être augmenté en ajoutant au verre un produit chimique qui absorbe l'énergie solaire. Si il absorbe de la lumière visible, le verre apparaîtra foncé. Par contre, si il absorbe les rayonnements ultraviolets ou les infrarouges à courte longueur d'onde, il n'y aura pas ou peu de modifications dans l'apparence visuelle du vitrage. Tous les vitrages et la plupart des plastiques ont un grand coefficient d'absorption par rapport aux infrarouges de grande longueur d'onde. C'est cette propriété qui est à la base de l'effet de serre.

L'émissivité

Quand de la chaleur ou de l'énergie solaire est absorbée par un vitrage, elle est réémise par le vitrage, soit par convection d'air le long de sa surface, soit par radiation de la surface du vitrage vers les autres surfaces.
La capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative est appelée son émissivité. Les fenêtres, ainsi que les matériaux que l'on trouve habituellement à l'intérieur d'un bâtiment, émettent typiquement des radiations sous forme d'infrarouges de grande longueur d'onde. Cette émission de chaleur radiante représente un des plus importants modes de transfert de chaleur pour une fenêtre. Par conséquence, la réduction de la chaleur émise par les fenêtres sous forme de radiation peut améliorer fortement ses propriétés isolantes.
Les vitrages standard ont une émissivité de 0.84 sur l'entièreté du spectre. Cela signifie qu'ils émettent 84 % de l'énergie possible pour un objet à cette température. Cela signifie également qu'en ce qui concerne les rayonnements à grande longueur d'onde qui frappent la surface du verre, 84 % est absorbé et seul 16 % est réfléchi. Par comparaison, les couches basse-émissivité ont un coefficient d'émissivité de 0.04. Les vitrages sur lesquels on a déposé de telles couches émettront seulement 4 % de l'énergie possible à cette température et réfléchiront

96 % du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Les vitrages possédant une couche à basse émissivité sont également appelés vitrages Low-E.

5.6 Vitrages à haute efficacité énergétique [Car 1996]

Il existe trois approches fondamentales permettant d'améliorer les performances énergétiques des vitrages.

1. Modifier le verre en lui-même en changeant sa composition chimique ou ses caractéristiques physiques. Il s'agit par exemple du verre teinté.
2. Appliquer une couche à la surface du vitrage. Des couches réfléchissantes ou des films ont été développés afin de réduire les gains solaires et l'éblouissement, et plus récemment, des couches à basse émissivité ou sélectives spectralement ont été développées afin de répondre aux conditions spécifiques des climats froids ou chauds.
3. Assembler plusieurs vitrages et contrôler les propriétés de ou des espaces contenus entre ces vitrages.

Les vitrages teintés

Ces vitrages sont disponibles dans un grand nombre de teintes. La teinte absorbe une partie de la lumière et du rayonnement solaire. L'utilisation d'un vitrage teinté change l'apparence de la fenêtre et peut augmenter l'intimité dans un bâtiment.

Au départ, l'usage de vitrages teintés avait surtout pour but de réduire les problèmes d'éblouissement dus à un éclairage naturel trop intense ou de limiter les gains solaires au travers du vitrage. Les vitrages teintés gardent leur transparence depuis l'intérieur. Les couleurs les plus communes sont le gris neutre, le bronze, et le bleu-vert, qui n'affectent pas trop les couleurs perçues au travers de ceux-ci et tendent à s'accorder avec les autres couleurs couramment utilisées en architecture. Cependant, d'autres couleurs plus spéciales sont également disponibles.

On teinte le verre en ajoutant des additifs chimiques dans celui-ci. Sa couleur change en fonction de l'épaisseur du verre et des couches appliquées après sa fabrication. Tout changement de couleur affecte le coefficient de transmission du verre, son facteur solaire, son coefficient de réflexion et d'autres propriétés.

Les vitrages teintés sont spécialement étudiés pour maximiser leur absorption pour tout ou une partie du spectre. Toute l'énergie solaire absorbée est initialement transformée en chaleur dans le vitrage, augmentant ainsi sa température. Selon les conditions climatiques, jusqu'à 50 % de la chaleur absorbée par un simple verre teinté peut être transféré par rayonnement et convection vers l'intérieur. La réduction du facteur solaire du vitrage peut donc être faible, en comparaison avec d'autres types de vitrages. Les vitrages teintés fournissent un contrôle solaire plus efficace quand ils sont placés à l'extérieur, dans un double vitrage.

Il existe deux catégories de vitrage teinté : le vitrage teinté traditionnel qui diminue la lumière aussi bien que les gains solaires et le vitrage sélectif, qui réduit les gains solaires mais permet à plus de lumière de pénétrer à l'intérieur que le vitrage teinté traditionnel.

Les vitrages teintés traditionnels réduisent fortement la lumière disponible dans le bâtiment : bien souvent, l'architecte doit réaliser un compromis entre une diminution du facteur solaire et une réduction du coefficient de transmission lumineuse. Devant ce problème, les fabricants de vitrages ont développés un nouveau produit : le vitrage teinté sélectif spectralement. Ils transmettent de manière préférentielle la partie visible du spectre solaire mais absorbent les infrarouges à courte longueur d'onde. Ces vitrages sont réalisés au moyen d'additifs chimiques introduits dans le processus de float.

Ces vitrages, qui sont de couleur bleue claire ou verte, ont un coefficient de transmission lumineuse plus élevé que les vitrages teintés traditionnel de couleur bronze ou grise mais un facteur solaire moins élevé que ces derniers.
La Figure 2.17 donne la répartition spectrale de différents vitrages teintés, en comparaison avec un vitrage clair. Les vitrages teintés sélectifs peuvent également être équipés de couches à basse émissivité afin d'améliorer encore leur performance.
Les vitrages teintés peuvent apporter un gain d'intimité en limitant la vue depuis l'extérieur durant la journée mais cet effet sera inversé durant la nuit, rendant la vue de l'intérieur vers l'extérieur plus difficile.

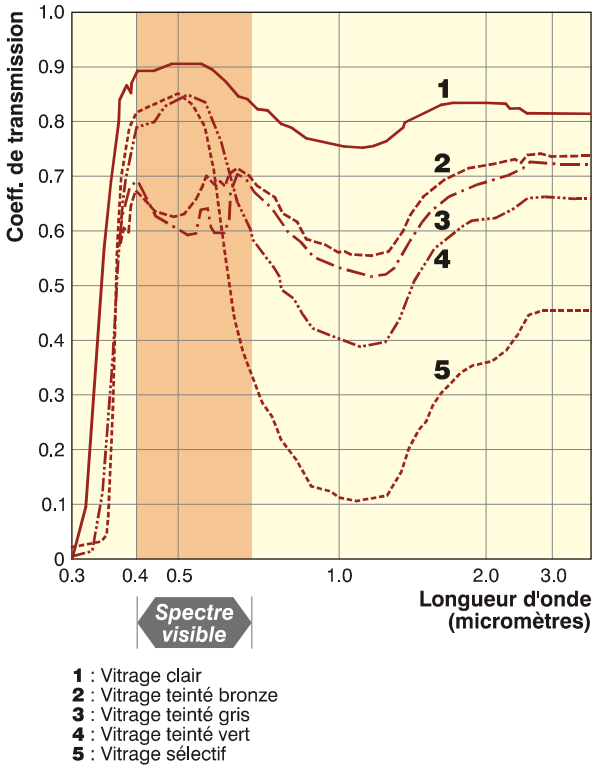


Figure 2.17: Transmission spectrale de différents vitrages teintés

Les couches réfléchissantes

Les vitrages teintés permettent de diminuer le facteur solaire mais en conséquence, le coefficient de transmission lumineuse descend très fort. Les vitrages teintés ne permettent pas non plus de descendre le facteur solaire en dessous d'une certaine limite.
Si on désire un facteur solaire plus faible que cette limite, on peut appliquer une couche réfléchissante sur le vitrage, ce qui augmentera le coefficient de réflexion de celui-ci.
En général, ces couches consistent en de très fines couches métalliques qui existent en différentes couleurs (argent, or et bronze) et qui peuvent être appliquées sur un vitrage clair ou teinté. Le facteur solaire du vitrage peut être diminué un peu ou très fort, en fonction de l'épaisseur et du coefficient de réflexion de la couche et de sa position dans la fenêtre.
Lorsqu'on décide d'utiliser un vitrage réfléchissant il faut être conscient du fait que la lumière réagira sur celui-ci comme sur un miroir et qu'il pourrait résulter des problèmes d'éblouissement qui pourraient gêner les piétons ou les automobilistes ou encore les personnes présentes dans les bâtiments voisins. De plus, il est important de rappeler qu'un vitrage réfléchissant joue le rôle d'un miroir, pour la face qui est exposée à la lumière. Il produira donc un effet de miroir depuis l'extérieur durant la journée mais ce rôle de miroir sera inversé et apparaîtra depuis l'intérieur du bâtiment durant la nuit, rendant difficile la vision vers l'extérieur.

Mise en œuvre des vitrages teintés ou des couches réfléchissantes dans un double vitrage

Les couches réfléchissantes ainsi que les vitrages teintés contribuent tous deux à réduire les gains solaires. Cependant, seules certaines des couches contribuent à réduire les pertes thermiques en hiver alors que les vitrages teintés n'affectent pas du tout le coefficient k du vitrage. Il est possible d'appliquer une couche réfléchissante sur chacune des 4 surfaces d'un double vitrage bien que celle-ci soit généralement localisée sur la surface extérieure ou sur la surface faisant face à la couche d'air. La position de la couche dépend aussi de son procédé de fabrication. Certaines de celles-ci doivent être appliquées à l'intérieur du double vitrage car elles ne résistent pas à l'exposition aux éléments extérieurs ou aux traces de doigts. Les couches réalisées par le procédé de pyrolyse sont extrêmement résistantes et peuvent être placées sur n'importe quelle face du vitrage. Chaque position produit un effet visuel différent ainsi qu'un transfert de chaleur distinct. Les couches telles que les couches sélectives

spectralement ou à basse émissivité sont généralement beaucoup plus fragiles que les couches pyrolytiques et sont couramment appliquées sur les faces attenantes à l'espace rempli de gaz d'un double vitrage.
Les doubles vitrages peuvent être assemblés en utilisant différents types de vitrages pour le verre intérieur et le verre extérieur. En général, le vitrage intérieur est un vitrage clair classique alors que le vitrage extérieur peut être teinté, réfléchissant ou les deux.

Les couches à basse émissivité et les couches sélectives

Comme nous l'avons déjà dit ci-dessus, le mécanisme principal de transfert de chaleur dans un double ou triple vitrage est le rayonnement thermique d'un verre chaud vers un verre plus froid. Le fait de placer une couche basse émissivité sur une des faces du vitrages attenante à la couche de gaz bloque une certaine partie de ce mode de transfert de chaleur, diminuant ainsi le flux total de chaleur au travers de la fenêtre. L'amélioration du coefficient k provenant de l'addition d'une couche à basse émissivité est grossièrement équivalente à l'amélioration qu'on aurait en ajoutant une couche supplémentaire de verre à la fenêtre.
Le coefficient de réflexion spectral de la couche à basse émissivité peut être manipulé de manière à laisser passer ou à rejeter des parties spécifiques du spectre. C'est l'origine de l'appellation "spectralement sélectif" qui signifie que certaines parties du spectre sont sélectionnées, c'est à dire que le rayonnement ayant une certaine longueur d'onde est réfléchi alors que le rayonnement ayant une autre longueur d'onde est transmis au travers du vitrage.

Avec un vitrage clair conventionnel, une partie significative du rayonnement solaire traverse la fenêtre et ensuite, la chaleur réémise par les objets se trouvant dans la maison est absorbée par le vitrage qui s'échauffe et réémet à son tour cette chaleur vers l'extérieur par radiation.

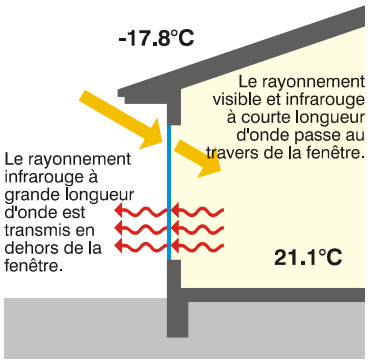


Figure 2.18: Transmission de chaleur au travers d'un vitrage conventionnel

Les premiers vitrages à basse émissivité ont été conçus afin de maximiser les gains solaires en hiver. Ils devaient donc avoir un grand facteur solaire et un coefficient de transmission lumineuse important afin de transmettre un maximum de gains solaires à l'intérieur du bâtiment ainsi qu'un coefficient faible coefficient k.
On appelle ces vitrages vitrage à basse émissivité et haute transmission. Ils sont très intéressants pour les climats froids.

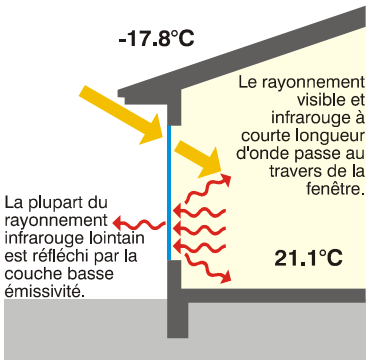


Figure 2.19: Transmission de chaleur au travers d'un vitrage basse-émissivité à haute transmission

Un vitrage conçu pour minimiser les gains solaires en été mais autoriser un maximum d'éclairage naturel devrait favoriser au maximum la transmission de la partie visible du spectre solaire tout en bloquant toutes les autres portions de celui-ci; les ultraviolets aussi bien que les infrarouges de courte longueur d'onde et les infrarouges de grande longueur d'onde qui pourraient être émis par les objets extérieurs tels que les bâtiments voisins ou le sol. Ces vitrages sont appelés vitrages à basse émissivité sélectifs. Ils permettent donc de limiter les gains solaires en été tout en garantissant une transmission visuelle élevée et un coefficient k faible, ce qui diminue les pertes thermiques en hiver.
On peut obtenir le même effet en combinant un vitrage à basse émissivité et haute transmission (lumineuse et thermique) avec un vitrage teinté sélectif spectralement.

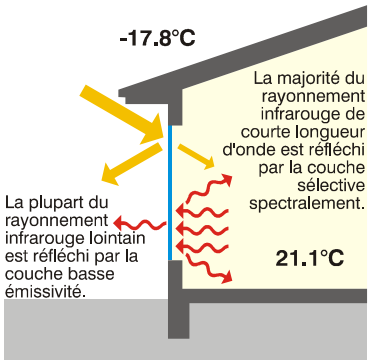
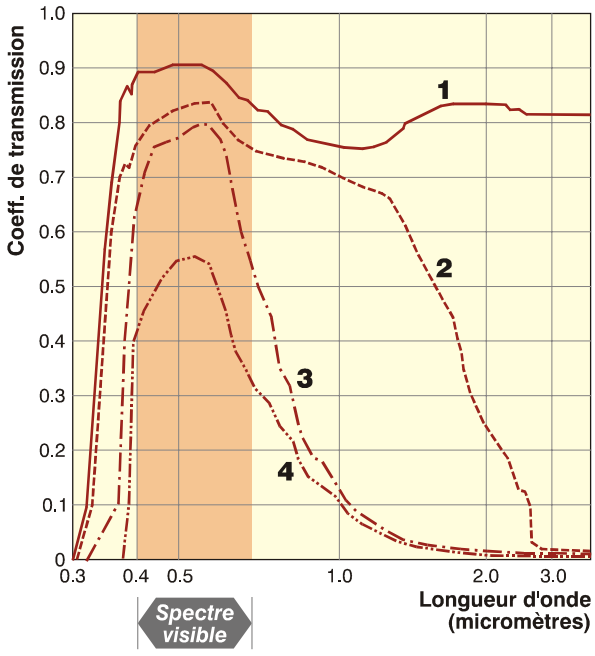


Figure 2.20: Transmission de chaleur au travers d'un vitrage à basse émissivité sélectif

On peut encore placer une couche basse émissivité sur un vitrage teinté foncé et/ou augmenter le coefficient de réflexion de la couche elle-même, créant ainsi un produit ayant les propriétés isolantes d'un vitrage low-E, conjugué à une limitation de l'éblouissement et un rejet des gains solaires. Ce produit est particulièrement adapté aux climats très chauds, profitant de beaucoup d'apports solaires et de lumière.

La Figure 2.21 représente la transmission spectrale de plusieurs vitrages basse-émissivité.



1 : Vitrage clair
2 : Vitrage Low-E à haute transmission
3 : Vitrage Low-E spectralement sélectif
4 : Vitrage Low-E spectralement sélectif à basse transmission

Figure 2.21: Transmission spectrale de différents vitrages basse-émissivité

Position de la couche basse émissivité [Car 1996] [Nis 1996]

La surface d'un vitrage, dans un double ou un triple vitrage, est référencée par un nombre, commençant par le numéro 1 pour la surface extérieure du vitrage extérieur vers la surface intérieure du vitrage intérieur. La surface intérieure d'un double vitrage porte donc le numéro 4.

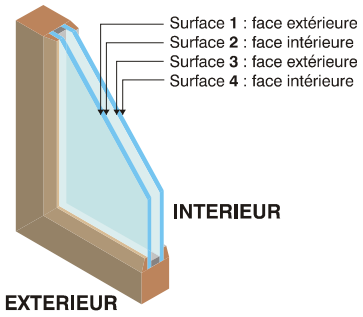


Figure 2.22: Numérotation des différentes faces de verre dans un double vitrage

La position de la couche basse émissivité dans un double vitrage n'affecte en rien le facteur k de celui-ci. En ce qui concerne les pertes de chaleur, il n'y a absolument aucune différence que la couche basse émissivité soit placée en position 2 ou en position 3.
Par contre, le facteur solaire du vitrage est influencé par la position de la couche.
En effet, en plus de sa capacité à inhiber les transferts d'infrarouges à grande longueur d'onde, une couche basse émissivité absorbe aussi une certaine quantité de l'énergie solaire incidente. Cette énergie absorbée est transformée en chaleur, provoquant ainsi un échauffement du vitrage.

Si la couche basse émissivité est placée en face 2 (voir Figure 2.23), la chaleur absorbée par le vitrage et réémise sous forme d'infrarouge de grande longueur d'onde, sera principalement réémise vers l'extérieur. Le facteur solaire du vitrage est donc diminué et ce vitrage convient mieux aux climats chauds.

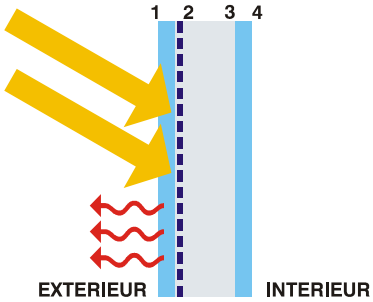


Figure 2.23: Comportement d'un double vitrage lorsque la couche basse émissivité est placée en face 2

Si la couche basse émissivité est placée en face 3 (voir Figure 2.24) la majorité de la chaleur absorbée par le vitrage est réémise vers l'intérieur, augmentant ainsi le facteur solaire du vitrage. Ce vitrage est donc plus adapté aux climats froids.

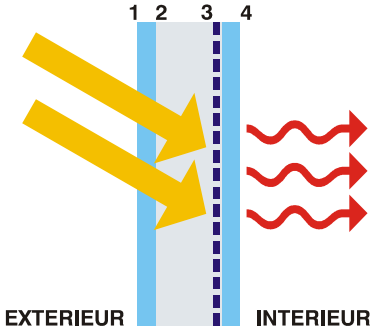


Figure 2.24: Comportement d'un double vitrage lorsque la couche basse émissivité est placée en face 3

Types de couche [Car 1996]

Il existe deux types principaux de couche à basse émissivité : soit les couches réalisées par pulvérisation cathodique soit les couches réalisées par pyrolyse.
La meilleure de chaque type de couche est incolore et invisible. Une couche réalisée par pulvérisation cathodique est en réalité multi-couche (typiquement trois couches primaires avec au moins une couche métallique) et est déposée sur le verre ou le plastique dans une chambre

sous vide. L'épaisseur totale d'une couche déposée par ce procédé est de seulement 1/10000 de l'épaisseur d'un cheveux humain. Ces couches contiennent souvent une couche d'argent et doivent être protégées de l'humidité et des contacts. C'est pour cette raison qu'on les qualifie souvent de "couche douce". Les couches réalisées par pulvérisation cathodique ont en général une émissivité plus basse que celle de couches pyrolytiques. Elle varie entre 0.2 et 0.04.
En général, une couche pyrolytique est formée d'un oxyde métallique, le plus communément, il s'agit d'oxyde d'étain plus certains additifs, qui est déposée directement sur la surface du verre, lorsque celui-ci est encore chaud. Le résultat est une couche cuite très dure et résistante, qu'on appelle parfois "couche dure". Une couche pyrolytique peut être dix à vingt fois plus épaisse qu'une couche réalisée par pulvérisation cathodique mais reste cependant extrêmement mince. Les couches pyrolitiques peuvent être exposées à l'air, nettoyées avec des produits de nettoyage classiques et exposées aux conditions climatiques extérieures sans perdre leurs propriétés de basse émissivité. Grâce à leur grande résistance, les couches pyrolytiques sont applicables sur des simples vitrages mais pas sur des plastiques puisqu'elles nécessitent un processus à haute température. Cependant, ces couches sont en général placées à l'intérieur de l'espace interstitiel d'un double vitrage. Bien que leurs propriétés puissent varier grandement, ces couches ont un coefficient d'émissivité variant de 0.4 à 0.15.
Les couches sélectives spectralement sont une version modifiée des couches pulvérisées par cathode. Le nombre de couches et leurs épaisseurs sont modifiés, ce qui a comme conséquence que la couche réfléchit les infrarouges solaires proches aussi bien que les infrarouges à grande longueur d'onde. Les couches pyrolytiques spectralement sélectives n'existent pas encore, bien qu'elles soient en cours de développement. Cependant, en additionnant une couche basse émissivité pyrolytique à un vitrage teinté sélectif, on peut atteindre le même but.

Gaz de remplissage

Une des manières de réduire le coefficient de conductivité thermique d'un double ou triple vitrage est de travailler sur l'espace interstitiel. On peut soit modifier le type de gaz qui remplit cet espace soit modifier son épaisseur. La Figure 2.25 représente l'évolution du coefficient k d'un double vitrage constitué de deux couches de verre de 4 mm en fonction de l'épaisseur de l'espace interstitiel. Les courbes sont tracées pour un double vitrage ordinaire (ε=0.84) et pour un double vitrage possédant une couche à basse émissivité sur la face 2 (ε=0.10). Le type de gaz remplissant l'espace interstitiel est soit de l'air, de l'argon ou du krypton. Le calcul du coefficient k est réalisé selon la norme européenne [prEN 673].

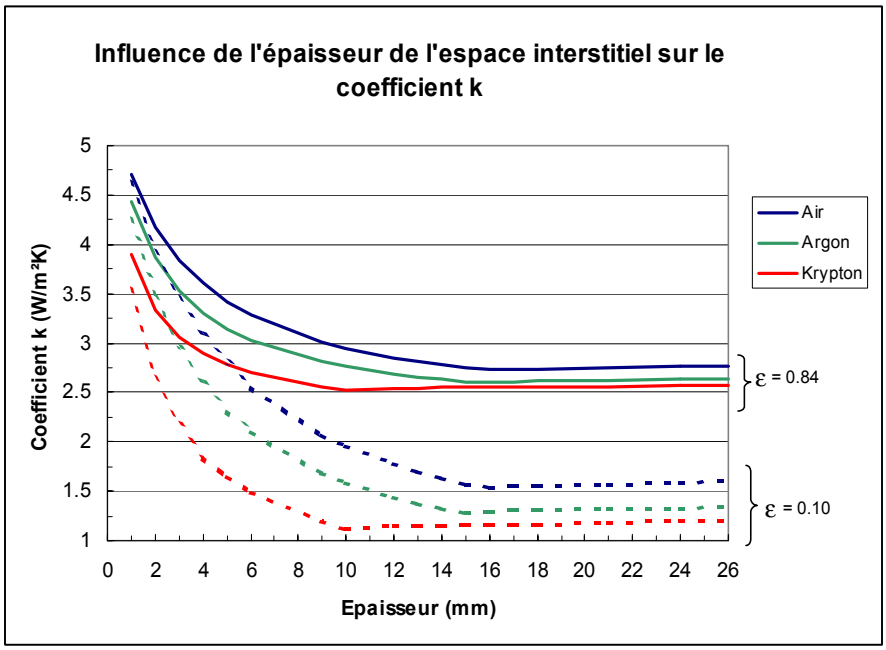


Figure 2.25 : Coefficient k au centre du vitrage en fonction de l'épaisseur de l'espace interstitiel pour différent gaz et différentes valeurs d'émissivité de la surface 2.

On peut voir sur la Figure 2.25 que le coefficient k diminue lorsque l'épaisseur de la cavité augmente. Il atteint ensuite une valeur minimum pour finalement se stabiliser ou remonter.
Ce minimum est atteint aux alentours de 15 mm pour les espaces remplis d'air ou d'argon et 12 mm pour les espaces remplis de krypton. En fait, remplacer l'air contenu dans cet espace interstitiel par un gaz moins conducteur, plus visqueux et se déplaçant plus lentement minimise la convection entre les parois de verre et le gaz et dans le gaz lui-même. Le transfert de chaleur total entre l'intérieur et l'extérieur du vitrage est ainsi réduit.
Cependant, au-delà d'une certaine épaisseur de l'espace interstitiel, une convection apparaît dans le gaz, augmentant ainsi les échanges de chaleur et par conséquence, le niveau d'isolation du vitrage.
Cette figure nous montre également qu'au niveau de l'isolation du vitrage, il est moins intéressant de modifier le gaz remplissant l'espace interstitiel que d'ajouter une couche à basse émissivité.
En ce qui concerne le type de gaz remplissant l'espace interstitiel, il faut savoir que l'argon est un gaz bon marché, non toxique, non réactif, clair et sans odeur. Le krypton présente de meilleures performances mais est plus cher à produire. Ce gaz est particulièrement intéressant quand l'espace interstitiel doit être restreint. On réalise parfois un compromis entre les performances thermiques et le coût en utilisant un mélange de krypton et d'argon.

5.7 Modélisation des vitrages dans les programmes de simulation

La modélisation des vitrages sélectifs pose un problème particulier. En effet, les modèles généraux n'utilisant qu'une valeur de transmissivité pour caractériser l'ensemble du spectre solaire ne peuvent pas être utilisés lorsque deux ou plusieurs couches de verre ont des transmissions spectrales différentes. Comme exemple extrême, considérons un vitrage qui aurait un coefficient de transmission solaire de 0.4, distribué sur une région allant de 360 à 550 nm. Si nous combinons ce vitrage avec un vitrage ayant également un coefficient de transmission solaire de 0.4, mais qui ne serait distribué que dans la région allant de 600 à 760 nm. La transmission solaire résultant de la combinaison de ces deux vitrages vaudra 0 (et pas 0.4 x 0.4 = 0.16) car chacun des vitrages est opaque pour les longueurs d'onde pour lesquelles l'autre est transparent. C'est pour cette raison qu'il est impératif d'utiliser des programmes de calcul multi-bande [McC 1991].

6. Modélisation des vitrages

6.1 Vitrages choisis

Les différents vitrages testés sont les suivants :

Nom du vitrage	k (W/m²K)	FS (%)	TI (%)	Notation
Double vitrage ordinaire	2.8	75	81	v1
SN150	2.7	47	45	v2
SS108	2.3	12	7	v3
KN155	1.5	36	49	v4
KN169	1.4	42	61	v5
SKN172	1.4	37	64	v6
PLTfut	1.4	57	69	v7
70/40	1.4	38	70	v8
Vide	0.7	64	74	v9

Tableau 2.8: Caractéristiques physiques des différents vitrages choisis

Les caractéristiques des vitrages sont représentées graphiquement sur la Figure 2.26.

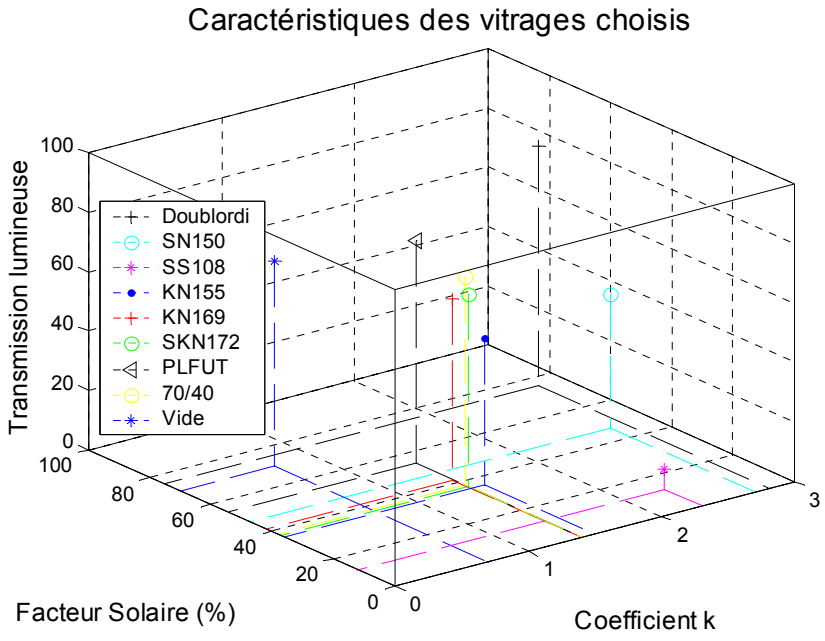


Figure 2.26

Certains vitrages ont des caractéristiques très particulières et ne devraient en principe pas être envisagés en Belgique. Leur présence parmi les vitrages testés correspond à une demande de la firme St-Gobain Bénélux qui désirait couvrir la plus large gamme de caractéristiques possibles.

Détaillons ces vitrages un à un :

Double vitrage ordinaire (4/15air/4)
Il s'agit du double vitrage conventionnel constitué de deux couches de verre séparées par un intercalaire rempli d'air.
SN150 (6/12air/6) ou SGG CLIMALIT COOL-LITE® NEUTRE-GRIS SN150
Ce vitrage est composé :

* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique,
* d'un espace intercalaire de 12 mm, rempli d'air déshydraté,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX® clair.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

SS108 (6/12air/6) ou SGG CLIMALIT COOL-LITE® ARGENT SS108

Ce vitrage est composé :

* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique,
* d'un espace intercalaire de 12 mm, rempli d'air déshydraté,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX® clair.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

Ce vitrage présente des coefficients de réflexion lumineuse et solaire très élevés. Il ne devrait être utilisé que dans les pays jouissants d'apports solaires très intenses tout au long de l'année. De part l'ambiance lumineuse intérieure qu'il procure, il devrait être totalement proscrit en Belgique.

KN155 (6/12argon/6) ou SGG CLIMAPLUS COOL-LITE® NEUTRE KN155

Ce vitrage est composé :

* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique,
* d'un espace intercalaire de 15 mm, rempli d'un gaz noble qui isole mieux que l'air au point de vue thermique,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX® clair.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

KN169 (6/12argon/6) ou SGG CLIMAPLUS COOL-LITE® NEUTRE KN169

Ce vitrage est composé :

* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique,
* d'un espace intercalaire de 15 mm, rempli d'un gaz noble qui isole mieux que l'air au point de vue thermique,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX® clair.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

SKN172 (6/12argon/6) ou SGG CLIMAPLUS COOL-LITE® NEUTRE SKN172

Ce vitrage est composé :

* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique.
* d'un espace intercalaire de 15 mm, rempli d'un gaz noble qui isole mieux que l'air au point de vue thermique,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX® clair.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

PLTfut (4/15argon/4) ou SGG CLIMAPLUS® SUPER

Ce vitrage est composé

* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair,
* d'un espace intercalaire de 15 mm, rempli d'un gaz noble qui isole mieux que l'air au point de vue thermique,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX® clair, revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

70/40 (4/12argon/4) ou SGG CLIMAPLUS® 4S
Vitrage de contrôle solaire à isolation thermique renforcée favorisant au maximum les apports d'éclairage naturel.
Ce vitrage est composé
* d'une glace extérieure en SGG PLANILUX® clair, revêtue sur la face côté intercalaire d'une couche métallique déposée sous vide par pulvérisation cathodique,
* d'un espace intercalaire de 15 mm, rempli d'un gaz noble qui isole mieux que l'air au point de vue thermique,
* d'une glace intérieure en SGG PLANILUX®clair.

Les deux glaces sont assemblées au moyen d'une double barrière d'étanchéité imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

Vitrage sous vide
Il s'agit d'un vitrage constitué de deux couches de verre de 6 mm d'épaisseur séparées par un intercalaire dans lequel on a réalisé le vide. Il n'y a donc théoriquement pas du tout de convection entre les deux couches de verre. Ce vitrage n'est pas encore commercialisé actuellement.

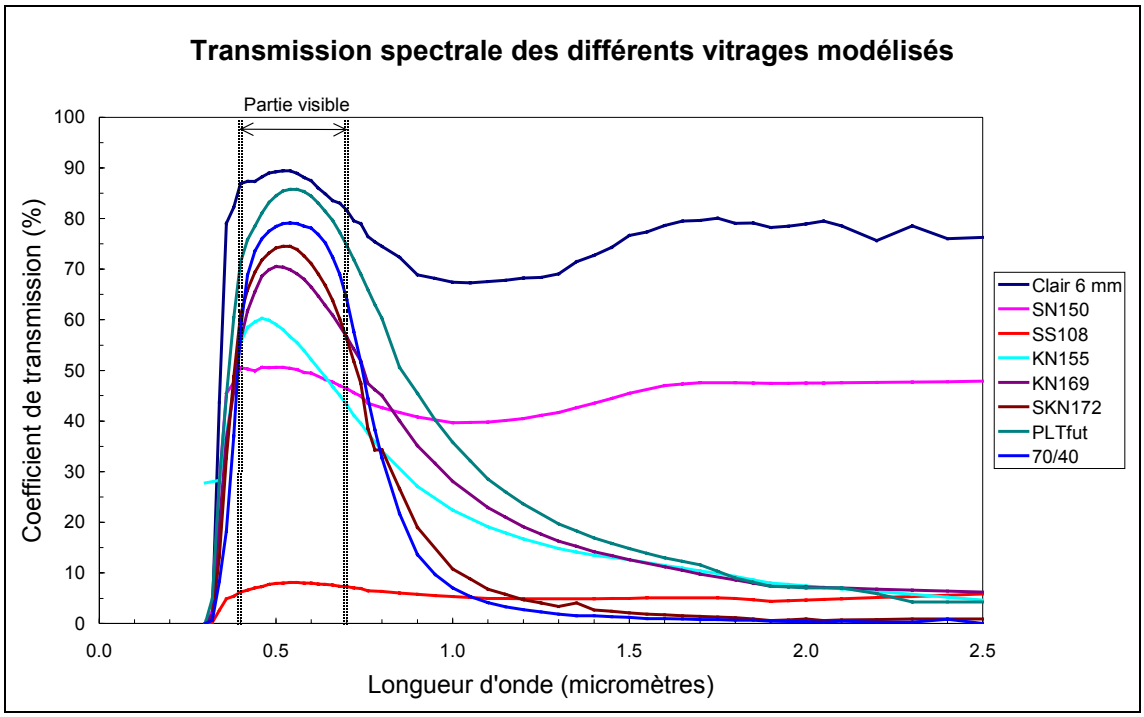


Figure 2.27: Transmission spectrale des différents vitrages modélisé

6.2 Traitement des vitrages dans TRNSYS

Comme nous l'avons montré ci-dessus et vu les caractéristiques des vitrages testés, il était indispensable d'utiliser un programme de calcul permettant de tenir compte des valeurs de transmission spectrale des vitrages. Nous avons choisi d'utiliser le programme WINDOW 4.1 [Ara 1994], qui permet de calculer les caractéristiques thermiques et optiques des vitrages choisis (à un incrément de 10°). Les caractéristiques des vitrages ont été calculées à partir des données spectrales fournies par le producteur de vitrage. L'explication technique de l'algorithme contenu dans Window 4.1 se trouve dans [Ara 1989].

7. Protections solaires

L'étude des protections solaires fait l'objet d'un chapitre spécifique. Le lecteur intéressé se reportera au chapitre 7.

8. Le climat

Les simulations sont réalisées sur base des données climatiques de Uccle (Belgique 50°47' Nord, 4°21' Est, altitude : 100 m).
D'un point de vue climatique, la Belgique est située dans la zone tempérée de l'hémisphère boréal. L'absence de reliefs côtiers engendre un climat tempéré à caractère maritime. L'amplitude annuelle de la température n'excède pas 12°C à 13°C avec des étés frais et des températures hivernales comprises entre 2°C et 4°C, plus rigoureuses dans les régions du sud-est.
Les précipitations atteignent 700 à 800 mm sur les côtes et montent jusqu'à 1400 à 1500 mm en Ardenne, frontière climatique entre les influences océaniques et continentales. Les vents sont fréquents et souvent assez forts de secteur sud à ouest.
Le nombre de degrés jours (15/15) est 2080 et la période de chauffage (en jours) commence le 01/09 et se termine le 28/06. Le nombre annuel d'heures d'insolation est de 1555. Ce nombre peut être précisé en fonction de la saison. Il est de 471 d'Octobre à Mars et de 1084 d'Avril à Septembre [Dog 1978]. La Figure 2.28 donne les valeurs de températures moyennes mensuelles ainsi que le rayonnement solaire global sur une surface horizontale, pour l'année climatique belge à Uccle.

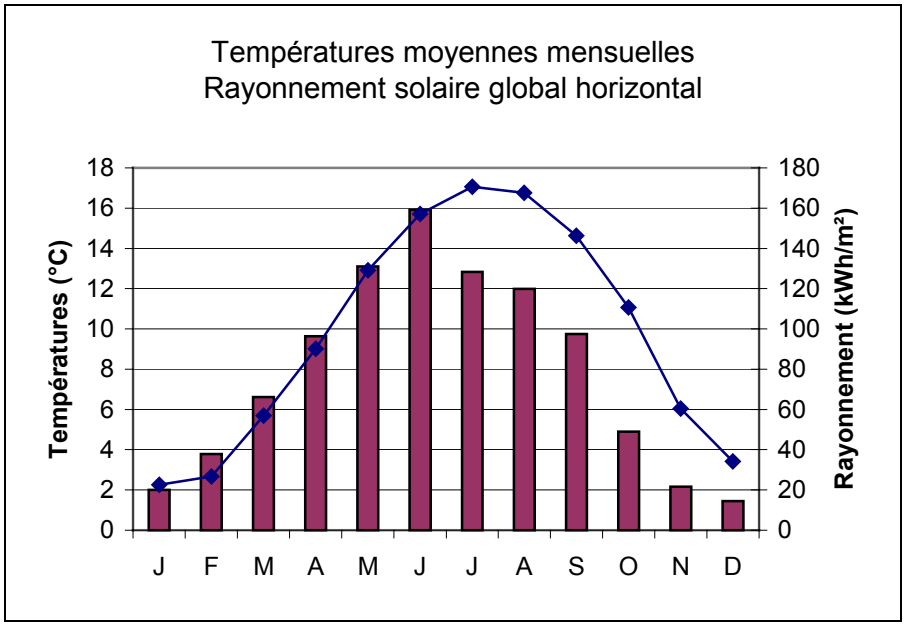


Figure 2.28: Températures moyennes mensuelles et rayonnement solaire global sur une surface horizontale pour la localité de Uccle

9. Façade, Construction et isolation

Nous décidons de tester deux types de bâtiment afin de mettre en évidence l'importance de la masse thermique dans la lutte contre les surchauffes.
Nous aurons donc un bâtiment de type "léger" et un bâtiment de type "lourd".

Composition des murs extérieurs (allèges) :

9.1 Mur de type "léger"

Les allèges sont composées d'un simple panneau sandwich contenant 5 cm d'isolation. Les couches sont les suivantes (de l'extérieur vers l'intérieur) :

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Plâtre synthétique*	12	0.175	0.84	1400
Isolation	50	0.043	0.84	32
Plaque synthétique	12	0.175	0.84	1400
Plâtre ou gypse	20	0.727	0.84	1602

Tableau 2.9: Composition du mur de type léger

* Promatec 12 mm

Le coefficient k de la paroi vaut donc : 0,66 W/m^{2}K.

9.2 Mur de type "lourd"

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Plâtre ou gypse	20	0.727	0.84	1602
Blocs pleins de béton	140	0.85	0.84	1800
Isolation	50	0.043	0.84	32
Couche d'air peu ou pas ventilée	30	R = 0.16 m^{2}K/W		
Briques de parement	90	1.1	0.84	2100

Tableau 2.10: Composition du mur de type lourd

Le coefficient k de la paroi vaut donc : 0.57 W/m^{2}K.

10. Inertie interne

Comme pour le choix du type de façade, nous considérons deux types de construction en ce qui concerne la masse thermique du bâtiment.

Les différences entre les deux cas seront marquées au niveau de l'accessibilité de l'inertie de la dalle (présence d'un tapis ou pas) et du type de béton ainsi qu'au niveau de la composition des parois internes. Le bâtiment présentant beaucoup d'inertie n'est pas équipé de faux-plafond.

La capacitance de l'air et du mobilier est calculée à partir du volume de la pièce concernée : cap = Vol * 1.012 (chaleur massique de l'air en kJ/kgK) *1.2 (masse volumique de l'air en kg/m^3) * 5. Elle sera identique dans les deux cas.

10.1 Inertie interne faible et peu accessible

Faux plafond thermique et/ou acoustique, fermé.
Dalle de sol recouverte d'un tapis.
Cloisons de séparation intérieures légères.

Composition de la dalle (du haut vers le bas) :

DALLESI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Tapis	10	0.08	0.84	600
Béton	200	1.4	0.84	2200
Air	300	R = 0.176 m^{2}K/W		
Paroi acoustique	19	0.061	0.84	481

Tableau 2.11: Composition de la dalle de sol à faible inertie

Composition des cloisons intérieures :

CLOISONSI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Plâtre	20	0.727	0.84	1602
Bois	100	0.121	2.51	593
Plâtre	20	0.727	0.84	1602

Tableau 2.12: Composition des cloisons intérieures à faible inertie

Composition de la toiture :

TOITURESI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Plâtre	20	0.727	0.84	1602
Lame d'air peu ou pas ventilée	150	R=0.14 m^{2}K/W		
Isolant	100	0.043	0.84	32
Etanchéité	Pas prise en compte			

Tableau 2.13: Composition de la toiture à faible inertie

Composition de la dalle du rez-de-chaussée à faible inertie :

DALLEREZSI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Tapis	10	0.08	0.84	600
Finition en béton léger	80	0.84	0.84	1600
Isolation	50	0.043	0.84	32
Dalle en béton armé	120	1.4	0.84	2200

Tableau 2.14:Composition de la dalle du rez-de-chaussée à faible inertie

10.2 Grande inertie interne accessible

Pas de faux plafond.
Cloisons de séparation intérieures en béton ou en maçonnerie.
Pas de revêtement de sol : béton apparent.
Composition de la dalle (du haut vers le bas) :

Composition des cloisons intérieures :

CLOISONAI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Plâtre	20	0.727	0.84	1602
Béton	200	1.038	0.84	977
Plâtre	20	0.727	0.84	1602

Tableau 2.15: Composition de la dalle de sol à grande inertie

Composition de la toiture :

TOITUREAI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Plâtre	20	0.727	0.84	1602
Hourdis en béton lourd	120	1.09	0.84	1125
Béton de pente	70	1.4	0.84	190
Isolant	100	0.043	0.84	32

Tableau 2.16: Composition de la toiture à grande inertie

Composition de la dalle du rez-de-chaussée à grande inertie :

DALLEREZAI

	Epaisseur (mm)	Conductivité (W/mK)	Capacité (kJ/kgK)	Densité (kg/m^3)
Finition en béton léger	80	0.84	0.84	1600
Isolation	50	0.043	0.84	32
Dalle en béton armé	120	1.4	0.84	2200

Tableau 2.17: Composition de la dalle de rez-de-chaussée à grande inertie

11. Les systèmes de chauffage, refroidissement et ventilation

Nous supposons que l'immeuble est occupé de 8h à 18h.
Les valeurs de ventilation hygiénique sont calculées de manière à respecter la norme belge. Pendant les heures d'occupation (de 8h à 18h), celle-ci impose de respecter des valeurs de ventilation hygiénique de 2,9 m^3 d'air /m^2 de surface/h. Ce qui nous donne un coefficient de ventilation de 1.074V/h, quel que soit le local étudié.
En ce qui concerne la valeur d'infiltration, nous considérons que l'outil s'adresse principalement à la construction de bâtiments neufs, nous prenons une valeur moyenne du coefficient d'infiltration de 0,15 V/h.

Les systèmes de chauffage et de refroidissement doivent permettre d'atteindre les températures de consigne durant ces heures. En dehors de ces heures et le week-end, des valeurs de températures minimales (pour le chauffage, en hiver) et maximale (pour le refroidissement, en été), doivent également être respectées.

Nous considérons trois cas différents :

11.1 Système de chauffage et de refroidissement – pas de ventilation nocturne (stratégies 1 et 2)

Nous considérons un système de chauffage de puissance suffisante pour que les températures soient d'au moins 15°C en dehors des heures d'occupation et de 21°C pendant les heures d'occupation.
Le système de refroidissement devra être dimensionné de manière à ce que les températures de 25°C (pendant les heures d'occupations) et 30°C (en dehors des heures d'occupation) ne soient pas dépassées.

Dans le cas de la présence d'un système de chauffage et d'un système de refroidissement, nous étudions les consommations de chauffage, de refroidissement, d'humidification et de déshumidification.
Ces études sont réalisées pour le cas d'un bâtiment de type léger et présentant peu d'inertie interne (stratégie 1) et pour le cas d'un bâtiment de type lourd et présentant une inertie interne importante (stratégie 2).

11.2 Système de chauffage. Pas de refroidissement ni de ventilation nocturne (stratégies 3 et 4).

Dans le deuxième cas, nous considérons qu'il n'y a pas de système de conditionnement d'air. Seul un système de chauffage est installé. Nous analysons donc dans ce cas-ci les consommations de chauffage ainsi que le nombre d'heures de surchauffe.
Il n'existe pas de législation belge concernant le nombre d'heures de surchauffe acceptables dans un immeuble de bureaux. Nous nous basons donc sur la norme hollandaise [Sti 1994] qui nous permet de déterminer si le confort est atteint dans un local qui n'est pas équipé de système de climatisation.
Le nombre d'heures annuel maximal pendant lesquelles la température intérieure du local de bureau dépasse 25,5°C est de 100 (pendant les heures de bureau).
Le nombre d'heures annuel maximal pendant lesquelles la température intérieure du local de bureau dépasse 28°C est de 20 (pendant les heures de bureau).
Si ces deux conditions ne sont pas respectées simultanément, les conditions de confort thermique d'été ne sont pas respectées.

Ces études sont également réalisées pour les deux types de bâtiments cités au point précédent.

11.3 Système de chauffage. Pas de refroidissement mais une ventilation nocturne (stratégies 5 et 6)

Dans le troisième cas, nous considérons qu'il n'y a toujours pas de système de conditionnement d'air mais qu'on met en place une ventilation nocturne qui devrait permettre de réduire la surchauffe dans le bâtiment. Nous analysons les consommations de chauffage ainsi que le nombre d'heures de surchauffe sur l'année entière, pour les deux types de bâtiment.

Modélisation de la ventilation nocturne dans le programme TRNSYS

Pour modéliser la ventilation nocturne, nous avons dû créer un nouveau composant que nous avons intégré dans le programme TRNSYS. Ce composant, programmé en fortran, est basé sur l'algorithme décrit ci-dessous et est appelé « type 97 ».

Dans le programme TRNSYS, c'est le module appelé « type 56 » qui est le composant de calcul thermique dynamique du comportement du bâtiment.
Pour modéliser la ventilation nocturne, nous avons dû mettre au point l'astuce suivante :
On considère que le bâtiment est équipé d'un système de chauffage et d'un système de refroidissement fictif dont nous contrôlons la puissance en fonction de l'heure et du taux de ventilation naturelle maximal admissible.
A chaque pas de temps, on réalise donc deux passages dans le type 56. Lors du premier passage, celui-ci calcule si il faut refroidir. Dans ce cas, il est alors nécessaire de vérifier si la puissance de refroidissement peut être atteinte au moyen de la ventilation à partir de l'air extérieur et si on est bien la nuit. C'est le type 97 qui réalise ce calcul. Soit il calcule le taux de ventilation correspondant à cette puissance de refroidissement, soit il limite la puissance de refroidissement à la puissance maximale que l'on peut atteindre en ventilant avec de l'air extérieur. Cette puissance maximale dépend de la valeur maximale de renouvellement d'air. Celle-ci est de 8 volume/heure, dans notre cas.
La puissance de refroidissement équivalente est ensuite réinjectée dans le type 56 qui recalcule alors la température atteinte dans le local à la fin du pas de temps.

Le schéma de modélisation suivi dans le cas des stratégies 5 et 6 est représenté à la Figure 2.29.

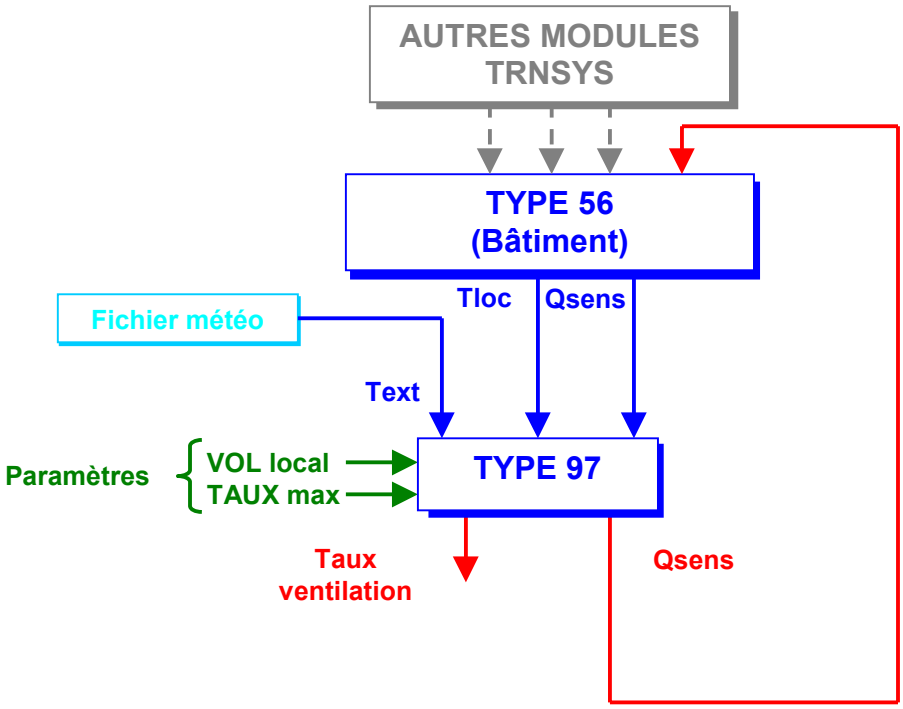


Figure 2.29 : Schéma de modélisation en cas de ventilation nocturne

Tloc = Température de l'air du local,
Qsens = Chaleur sensible (> 0 si refroidissement),
Text = température de l'air extérieur,
Vol local = volume du local considéré,
Taux max = Taux de renouvellement d'air maximale admissible (8 vol/h dans notre cas),
Taux ventilation = Taux de renouvellement d'air.

L'algorithme du type 97 est le suivant :

S'il faut refroidir, on regarde si on est bien la nuit. Si oui, le programme calcule Qmax, c'est-à-dire la puissance maximale équivalente admissible, en fonction de taux max.

- Si Qsens > Qmax, on limite Qsens à Qmax et le taux de ventilation est égal au taux de ventilation maximal admissible.
- Sinon, Qsens garde la valeur calculée par le type 56 et le taux de ventilation est calculé en fonction de Tloc, Text et Qsens.

TYPE 97

```
Si Qsens < 0 (c'est-à-dire s'il faut chauffer) alors
        out(1) = 0
        out(2) = 0
Sinon (si le type 56 dit qu'il faut refroidir pour atteindre la consigne)
        Si on est la journée
                out(1) = 0
                out(2) = 0
        Sinon (si on est la nuit (de 21 h à 7 h))
                Calcul de Qmax = puissance de refroidissement maximale calculée à
                                 partir de Text, Tint et Taux max.
                Si Qsens > Qmax alors (si on dépasse le taux de ventilation admissible)
                    out(1) = Qmax
                    out(2) = Tau max
                sinon
                    out(1) = Qsens
                    calcul de out(2) à partir de Text, Tloc et Qsens
                end
        end
end
```

12. Les gains internes

En plus du système de chauffage, nous devons considérer les gains de chaleur provenant de l'occupation du bâtiment, c'est à dire la chaleur dégagée par le métabolisme des personnes, par l'éclairage artificiel et par l'usage d'appareils de bureau, principalement des ordinateurs.
Ces trois types de gains internes sont calculés séparément.
Les heures d'occupation sont les suivantes :
L'immeuble est occupé de 8h à 18h mais nous considérons qu'entre 8h et 9h et entre 17h et 18h tout le monde n'est pas présent et les gains internes sont légèrement plus faibles.
Ils sont donc réduits à 75 % du total durant ces heures.

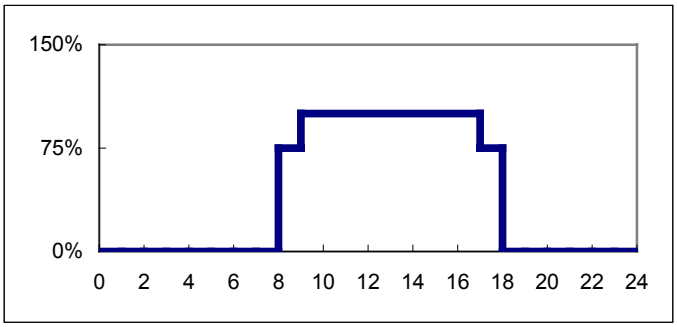


Figure 2.30: Evolution des gains internes au cours de la journée

12.1 Métabolisme

Nous considérerons qu'une personne dégage approximativement 80 W de chaleur.

12.2 Eclairage

Pour les locaux 1 à 5, les gains internes dus à l'éclairage sont calculés précisément, heure par heure, par le programme d'éclairage Superlink.
Pour les autres locaux, on prend une valeur de 10 W/m^2.
Nous considérons que 2/3 de la puissance d'éclairage est dégagée par convection et 1/3 par rayonnement.

12.3 Appareils de bureau

Nous considérerons trois cas différents :
- gains internes faibles : 1PC (115 W) par personne,
- gains internes moyens : 1 PC par personne + 1 imprimante deskjet (45 W) par local,
- gains internes élevés : 1 PC par personne + 1 imprimante laser (100 W) par local.

Calcul des gains internes de bureautique :

	Gains internes faibles		**Gains internes moyens**		**Gains internes élevés**	
	W	W/m^2	W	W/m^2	W	W/m^2
local 1	115	7.9	160	11.0	215	14.8
local 2	230	11.8	275	14.1	330	17.0
local 3	115	5.9	160	8.2	215	11.1
local 4	145	6.0	190	7.8	245	10.1
local 5	460	15.8	505	17.3	560	19.2
moyenne		9,5		11,7		14,44

Tableau 2.18: Valeurs des gains internes de bureautique pour différents locaux, selon le cas choisi

Pour les autres locaux, les gains internes de bureautique ont été calculés à partir de la valeur moyenne (9,5 W/m^2 dans le cas de gains internes faibles, 11,7 W/m^2 pour des gains internes moyens et 14,4 W/m^2 pour des gains internes élevés).

Nous ne tenons pas compte de gains internes de bureautique dans les zones de circulation.
Calcul des gains internes dûs au métabolisme :

	Métabolisme (1h)	
	W	W/m^2
local 1	120	8.23
local 2	240	12.35
local 3	120	6.17
local 4	360	14.81
local 5	480	16.46

Tableau 2.19: Valeurs des gains internes de métabolisme, pour différents locaux

12.4 Gains internes dans les couloirs et les autres zones de circulation (escaliers-ascenseurs-sanitaires)

Nous prenons une valeur de 6 W/m^2 dans les zones de circulation.

12.5 Gains internes dans les autres étages

Pour calculer le nombre de personnes présentes par étage, nous nous basons sur une valeur de 10 m^2/personne. Cette valeur nous permet de calculer les gains internes dûs au métabolisme dans les autres étages.

13. Le système d'éclairage artificiel

Les calculs d'éclairage artificiel sont réalisés par le programme Superlink faisant partie du "package" ADELINE. Ils sont basés sur plusieurs hypothèses que nous allons détailler ici.

13.1 Efficacité lumineuse des lampes

Pour rappel, l'efficacité lumineuse (lm/W) est définie comme le quotient du flux lumineux par la puissance électrique absorbée. Elle permet donc d'évaluer la qualité économique de la lampe. La consommation électrique d'éclairage est directement proportionnelle à l'efficacité lumineuse des lampes installées.
Nous avons décidé de fixer cette valeur à 70 lm/W, ce qui correspond à la valeur moyenne de l'efficacité lumineuse d'un tube fluorescent, celle-ci variant de 45 lm/W à 90 lm/W.

13.2 Valeur d'éclairement de consigne

Nous avons choisi de fixer la valeur d'éclairement de consigne à 500 lux, comme recommandé dans les normes pour des locaux de bureaux.

13.3 Position du capteur d'éclairement

Dans le programme Superlink, les calculs sont réalisés pour 25 points du plan de travail. Le capteur doit être placé en un de ces points. Nous avons choisi de placer le capteur au centre de la pièce. Ce point ne correspond peut-être pas toujours à l'emplacement exact du plan de travail mais représente assez bien l'éclairement global atteint dans la pièce étudiée.

13.4 Calcul d'éclairement (éclairage artificiel)

Le calcul d'éclairement réalisé par Superlink considère que la disponibilité de l'éclairage artificiel est uniforme. On ne tient pas compte de la distribution lumineuse des luminaires ni des coefficients de réflexion des parois dans cette partie du calcul.
On ne tient pas non plus compte du fait qu'on doit généralement surdimensionner un système d'éclairage soit par le fait que "la plus petite unité" est LE luminaire et non le lumen ou pour des raisons de symétrie (si on doit placer deux rangées de luminaires dans un local, on placera deux rangées de trois luminaires même si en théorie une rangée de deux et une rangée de trois luminaires suffiraient pour atteindre la valeur d'éclairement de consigne).

14. Références

[AMCO 2361] Gratia E.: Physique appliquée au bâtiment I : thermique, acoustique, éclairage, Notes de cours, UCL, 2000.

[Ara 1989] Arasteh D.K., Reilly M.S., Rubin M.D.: A versatile procedure for calculating heat transfer through windows, ASHRAE Transactions, Vol 95, part 2, p 755-765, 1989.

[Ara 1994] Arasteh D.K., Finlayson E.U., Huizenga C.: Window 4.1: Program Description, Windows and Daylighting Group, Building Technologies Program, Energy and environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, March 1994.

[Car 1996] Carmody J., Selkowitz S., Heschong L. : Residential windows, a guide to new technologies and energy performances, Norton, NY, 1996.

[CSTC 1999] CSTC : Le verre et les produits verriers - les fonctions du vitrage, Note d'information technique n°214, Centre Scientifique et Technique de la Construction, 1999.

[Dog 1978] Dogniaux R. : Recueil de données climatologiques exigentielles pour le calcul des gains solaires dans l'habitat et l'estimation de la consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments. Bruxelles : Institut Royal Météorologique de Belgique, 1978.

[GRA 1998] Gratia E., Saelen M. : Optimalisation de la conception énergétique des bâtiments et des systèmes complémentaires, financé par la Région Wallonne, division des technologies de la recherche et de l'énergie.

[McC 1991] Mac Cluney R.: The death of the shading coefficient ?, ASHRAE Journal vol 33, n°3, p 36-45, March 1991.

[Nis 1996] Nisson N.: Energy-efficient windows : research, ideas, and product reviews, Energy Design Update, Cutter Information Corp., 1996.

[prEN 673] European committee for standardization: Glass in building - Determination of thermal transmittance (U value) - Calculation method, Final Draft, 1996.

[Sti 1994] Stichting bouwresearch, “Energie-efficiënte kantoorgebouwen – binnenklimaat en energiegebruik” , ISSO / SBR 300, Rotterdam, NL, 1994.

CHAPITRE 3. La lumière

En premier lieu, le chapitre 3 propose une définition du confort visuel ainsi qu'un descriptif des paramètres qui régissent le confort visuel. Ensuite, il résume la recherche bibliographique qui a été réalisée à ce sujet et montre qu'il est actuellement impossible de fixer des valeurs de paramètres permettant de déterminer si le confort visuel est atteint ou pas.
Le point 2 aborde plus précisément la quantification des économies d'énergie réalisables dans les immeubles de bureaux grâce à l'utilisation de l'éclairage naturel.
En préliminaires à la présentation des calculs, nous rappelons quelles sont les stratégies d'éclairage existantes ainsi que les dispositifs de gestion de l'éclairage auxquels peuvent être liées ces stratégies. Nous donnons ensuite une piste quant au choix d'un système de gestion de l'éclairage.
Après la présentation proprement dite des résultats de calcul et une analyse des paramètres influençant les économies d'énergie réalisables, nous concluons ce chapitre en discutant de la précision des résultats et des hypothèses choisies pour les calculs.

1. Le confort visuel 70
1.1 L'éclairement 70
1.2 La luminance 73
1.3 Uniformité de la luminance et de l'éclairement autour de la tâche 74
1.4 Uniformité de la luminance et de l'éclairement dans toute la pièce 75
1.5 L'éblouissement 75
1.6 Le clignotement des lampes (flickering) 77
1.7 Distribution spectrale de la lumière 78
1.8 Combinaison indice de rendu des couleurs, température de couleur et niveau d'éclairement 81
1.9 Présence d'éclairage naturel 82
1.10 Type de système d'éclairage 83
1.11 Les systèmes de gestion de la lumière 83
1.12 Conclusion 84

2. Economies d'énergie réalisables par l'utilisation de l'éclairage naturel 86
2.1 Les stratégies d'éclairage 86
2.2 Les dispositifs de gestions de l'éclairage 87
2.3 Le choix d'un système de gestion de l'éclairage 90
2.4 Impact du dimming en fonction de l'éclairage naturel 92
2.5 Résultats des simulations d'éclairage 94
2.6 Part de la consommation d'éclairage artificiel sur la consommation totale du bâtiment 97
2.7 Influence de la clarté des parois sur la consommation globale 99
2.8 Influence de la présence du système de gestion de l'éclairage sur la consommation globale 101
2.9 Conclusion 102

3. Références 103

1. Le confort visuel

L'environnement visuel procure une sensation de confort lorsqu'il est possible de voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable. Le confort visuel peut aussi être interprété comme la réception claire d'un message provenant de l'environnement visuel. Il est fonction de la quantité, la distribution et la qualité de la lumière. Ces trois paramètres dépendent principalement des cinq principaux paramètres physiques suivants [Bod 1999] :

- l'éclairement,
- la luminance,
- le contraste,
- l'éblouissement,
- le spectre lumineux.

S'ajoutent à ceux-ci des paramètres liés à la personne : l'âge, l'acuité visuelle, le temps disponible pour l'exécution de la tâche, et des paramètres propres à l'objet en question, comme sa taille, par exemple.

J. Veitch [Vei 1996a] et [Vei 1996b] étend ces critères et cite :

- l'éclairement et son uniformité,
- la luminance ainsi que sa distribution,
- l'éblouissement,
- le clignotement des lampes (ou flickering),
- la distribution spectrale de la lumière,
- la présence et l'utilisation de la lumière naturelle,
- le type de système d'éclairage (% de lumière directe et indirecte),
- la possibilité de contrôle individuel de la lumière.

Cependant, il est très difficile d'établir et encore plus de chiffrer l'influence de ces paramètres sur la qualité de la lumière et donc le confort visuel.
La lecture d'articles relatifs à la qualité de la lumière nous apprend qu'il est difficile de tirer des généralités à partir des recherches réalisées jusqu'à présent.
On peut donner deux raisons à ces observations :
Premièrement, les études ne sont pas toujours statistiquement valables (nombre d'individus trop faible).
Deuxièmement, les observations dépendent d'un très grand nombre de variables et il n'existe aucune standardisation des méthodes expérimentales.

Cependant, Boyce [Boy 1998] différencie deux domaines pour lesquels les résultats d'études évoluent de manière différente :

- le domaine relatif aux performances visuelles.

En ce qui concerne ce domaine, les études montrent en général des différences entre les individus mais les effets des changements des conditions lumineuses vont toujours dans le même sens. C'est-à-dire que la variation d'un des paramètres induira, pour tous les individus, soit une amélioration, soit détérioration des performances visuelles.

- le domaine relatif à l'inconfort visuel.

Les études portant sur le domaine de l'inconfort visuel sont, par contre, caractérisées par des différences individuelles très marquées. Dans ce cas, la variation d'un des paramètres physiques pourra induire soit une amélioration, soit une détérioration du confort visuel, selon l'individu considéré.

1.1 L'éclairement

Définition

Pour bien comprendre ce qu'est l'éclairement, il est nécessaire de définir préalablement le flux lumineux.

Le flux lumineux d'une source est la quantité de lumière rayonnée dans tout l'espace par cette source.
Il s'exprime en lumen (lm).

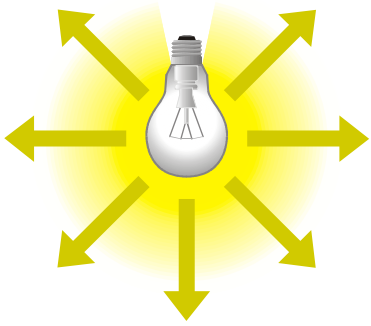


Figure 3.1: Flux lumineux d'une source

L'éclairement en un point d'une surface est le rapport du flux lumineux reçu par unité de surface.
L'éclairement est exprimé en lux.
1 lux = 1 lumen /m^2

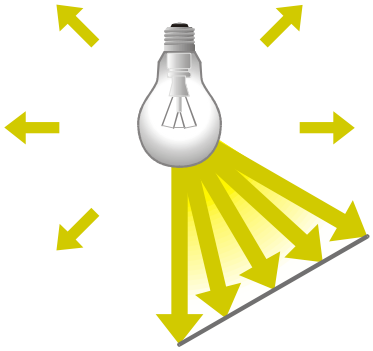


Figure 3.2: Eclairement lumineux en un point d'une surface

L'éclairement caractérise donc la quantité de lumière reçue par une surface. Cependant, cette grandeur est très difficilement perceptible par l'œil humain. De par ses facultés d'adaptation, celui-ci évalue en réalité des différences d'éclairement dans l'espace ou dans le temps.

Influence de l'éclairement sur la performance visuelle

La visibilité est le critère principal par lequel les recommandations d'éclairement sont appréciées [Vei 1995b].
Veitch nous apprend [Vei 1996b] que les études relatives à l'évolution des performances visuelles en fonction du niveau d'éclairement sont mitigées. Certaines montrent une relation certaine entre ces deux paramètres : la performance visuelle augmente rapidement avec le niveau d'éclairement mais on atteint rapidement un seuil au-dessus duquel une augmentation d'éclairement n'induit plus de variation de la performance visuelle. D'autres ne montrent pas de corrélation entre les deux paramètres.
On remarque cependant que les études réalisées ne peuvent pour la plupart pas être traduites en termes de statistiques.
Une explication à ces observations contradictoires serait qu'il existe effectivement une relation entre le niveau d'éclairement et la performance de la tâche mais que cette relation est transitoire : après une période temporaire, les personnes s'adaptent aux nouvelles conditions lumineuses et ont de bonnes performances, indépendantes du niveau d'éclairement.

Influence de l'éclairement sur les interactions sociales, la communication et l'éveil

D'après le review de Veitch [Vei 1996b], de hauts niveaux d'éclairement induisent plus de conversation et de communication. Au niveau de l'éveil, c'est plus complexe. On aurait tendance à dire que de hauts niveaux d'éclairement induisent un éveil plus grand mais on observe des différences entre la population masculine et féminine. Les difficultés rencontrées dans les études concernant l'éveil proviendraient de la faiblesse de la théorie concernant ce concept.

Préférences en ce qui concerne l'éclairement et effets sur l'humeur

Selon J. Veitch [Vei 1996b], bien que quelques études montrent le contraire, la majorité des personnes ont tendance à préférer des niveaux d'éclairement supérieurs aux valeurs prescrites par les normes.
Au niveau des préférences, on évoque également des différences entre les sexes (éventuellement juste pour certaines tâches).
La littérature est équivoque en ce qui concerne l'influence de l'âge sur les préférences.
Par contre, il est assez clair que le type de tâche influence les préférences de niveau d'éclairement.
On préfère des niveaux d'éclairement plus bas pour des travaux sur PC que pour des tâches sur papier. Des tâches contraignantes au niveau visuel (lecture, étude) demandent un niveau d'éclairement plus important que des tâches relaxantes. De plus, les niveaux de préférence varient avec la situation sociale, particulièrement pour des tâches peu astreignantes au point de vue visuel.

Effet biologique de l'éclairement et conséquences sur la santé

D'après Veitch [Vei 1996b], le rôle de la lumière sur le rythme circadien (rythme biologique d'un individu sur 24 h) est bien connu. L'exposition à la lumière supprime les sécrétions de mélatonine qui induit le sommeil.
Cependant, il n'est pas certain que ces diminutions de mélatonine aient une influence sur l'humeur ou sur le rythme biologique des individus.

Plusieurs auteurs suggèrent qu'une exposition trop faible à la lumière est associée à des dépressions, bien qu'ils ne soient pas capables de démontrer un lien causal clair. Il est possible qu'un tel mécanisme puisse exister mais les preuves ne sont pas encore assez importantes pour justifier une augmentation des normes.
Les coûts énergétiques d'un tel changement seraient considérables; de plus, les niveaux qui induisent des effets biologiques sont tellement hauts qu'il existe un risque important d'augmentation des problèmes d'éblouissement, à moins qu'on ne prenne grand soin de cet aspect lors du design.

Il a également été observé que les utilisateurs tendent à modifier leur position pour maintenir leurs performances visuelles lorsque les conditions lumineuses ne sont pas satisfaites autrement. Ceci peut avoir des conséquences très importantes : une mauvaise position peut conduire à des problèmes de dos ou de santé qui peuvent être coûteux pour l'employeur et la société en terme d'absentéisme, de perte de productivité et de frais de soins de santé.

Influence de l'âge de l'observateur

Comme l'âge opacifie le cristallin, l'éclairement de la rétine décline ; l'adaptation effective à la luminance ou à l'éclairement est plus faible pour des adultes plus âgés. Pour cette raison, les adultes plus âgés requièrent un meilleur contraste, une plus grande luminance (ou un éclairement plus important) de la tâche ou des objets plus grands pour obtenir la même visibilité que de jeunes adultes. Cette diminution de la vision apparaît aux alentours de 40 ans.

Conclusions et recommandations en ce qui concerne les valeurs d'éclairement à atteindre

Les paragraphes précédents nous montrent que, bien que l'éclairement soit un des aspects les mieux connus du confort visuel, il est difficile de déterminer précisément l'impact d'un éclairement trop faible ou trop élevé sur celui-ci. Citons cependant les normes belges qui donnent des recommandations quant à la valeur moyenne de l'éclairement à maintenir sur le plan de travail entre deux remplacements de lampes en fonction du type d'activité [IBN 1992].

Niveau d'éclairement recommandé (lx)	Type d'activité
50 100 150	Simple orientation ou passage dans une aire de circulation
100 150 200	Tâches n'exigeant aucune perception de détails, dans un local à usage discontinu
200 300 500	Tâches n'exigeant qu'une perception visuelle simple
300 500 750	Tâches exigeant une perception visuelle moyenne (écriture et détails similaires)
500 750 1000	Tâches exigeant une bonne perception visuelle
750 1000 1500	Tâches à perception visuelle difficile
1000 1500 2000	Tâches spéciales exigeant une perception visuelle de détail très fin
>2000	Tâches requérant une perception visuelle très exacte

Tableau 3.1: Niveaux d'éclairement recommandés en fonction du type d'activité

Miller [Mil 1998] recommande de choisir un éclairement de la tâche plus important que le minimum nécessaire, de manière à ce que l'utilisateur soit poussé psychologiquement à accepter le système d'éclairage.

Elle recommande également de veiller à ce que les valeurs d'éclairement du plan de travail soient relativement uniformes et que le rapport de l'éclairement le plus important sur l'éclairement minimal atteints sur le plan de travail ne soit pas supérieur à 3.

1.2 La luminance

Définition

Avant de définir la luminance, il est nécessaire de définir l'intensité lumineuse.

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par unité d'angle solide dans une direction donnée.
Elle est mesurée en candela.
1 candela = 1 lumen/stéradian

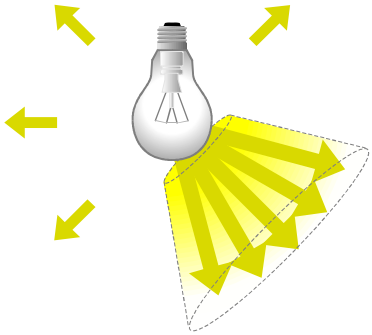


Figure 3.3 : Intensité lumineuse d'une source

La luminance d'une source (principale telle qu'une lampe ou secondaire telle qu'une surface éclairée) est le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans une direction et la surface apparente de la source dans la direction considérée.
Elle s'exprime en candela/m^2.
La luminance d'une surface dépend de l'éclairement reçu par celle-ci, de son coefficient de réflexion et de sa brillance.

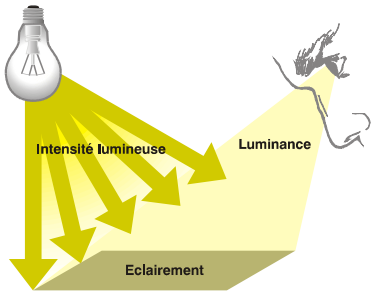


Figure 3.4 : Luminance d'une source

Comme nous l'avons dit au point 1.1, la visibilité d'une tâche est directement liée à son éclairement. Or les notions d'éclairement et de luminance sont liées puisque quand l'éclairement d'un point augmente, sa luminance dans une direction donnée augmente proportionnellement. Les observations réalisées en ce qui concerne l'éclairement sont donc également valables pour la luminance.

Recommandations concernant les valeurs de luminance à atteindre

Veitch [Vei 1995b] nous apprend que van Ooyen et al ont déterminé expérimentalement des valeurs de luminance préférées dépendant du type de tâche à réaliser.
Ils ont observé que les luminances préférées sont plus faibles pour la réalisation de travaux sur écrans que pour des travaux de lecture, d'écriture et d'interview.

Pour le travail sur écran, les valeurs préférées sont comprises entre:
- 20 et 45 cd/m² pour les murs,
- 40 et 65 cd/m² pour le plan de travail.

Pour les autres tâches :
- 30 et 60 cd/m² pour les murs,
- 45 et 105 cd/m² pour le plan de travail.

Le rapport préféré entre la tâche, le plan de travail et la luminance des murs est de 10:4:3 (pour un éclairement horizontal de 750 lux).

1.3 Uniformité de la luminance et de l'éclairement autour de la tâche

Selon Veitch [Vei 1995b], l'uniformité a toujours été désirable, autant sur le plan de travail qu'au travers toute la pièce.
Cependant, Slater et Boyce [Sla 1990] ont trouvé que l'uniformité de l'éclairement sur le plan de travail n'a aucune influence sur la performance et que les rapports acceptables dépendent du type de tâche à accomplir.
D'après le review réalisé par Veitch [Vei 1996b], lorsqu'on parle d'uniformité, deux quantités sont importantes :

- le rapport éclairement minimal / éclairement maximal sur le plan de travail,
- le rapport luminance de la tâche / luminance de l'environnement.

Lorsque le premier de ces paramètres est faible, le second le sera aussi, à moins que l'on ne se trouve dans des conditions très particulières.
Nous discuterons en même temps l'uniformité de la luminance et l'éclairement car ces quantités ne sont pas indépendantes.

Performance visuelle et exécution de la tâche

En Amérique du Nord, le rapport 1:1 est considéré comme optimal mais un rapport de 3:1 est encore acceptable (tâche plus brillante que l'environnement).
La littérature montre cependant qu'on peut être plus flexible.
Diverses études ont montré que ces rapports ont moins d'importance qu'on ne le croyait précédemment à partir du moment où les luminances sont suffisantes pour réaliser la tâche.

Préférence, confort et acceptabilité

Avant l'apparition de l'éclairage de la tâche (lampes individuelles), on pensait que l'uniformité du plan de travail était très importante mais apparemment, ce n'est pas vraiment le cas.

1.4 Uniformité de la luminance et de l'éclairement dans toute la pièce

Performance

D'après Veitch [Vei 1996b], il a été montré qu'on augmente l'attention vers une tâche en la rendant plus brillante que son environnement. Des études dans des salles de classes ont montré que l'attention des enfants est plus focalisée sur le tableau si on éclaire celui-ci de manière directionnelle. Des études sur des adultes n'ont cependant pas conduit aux mêmes conclusions.

Impression esthétique

La non-uniformité, particulièrement en ce qui concerne l'éclairage des murs, favoriserait la relaxation.
La perception de clarté est renforcée par une luminance horizontale élevée, centrale.
L'effet de grandeur est lié à un éclairage uniforme et des murs lumineux.

Satisfaction et préférence

Beaucoup d'études montrent que les personnes préfèrent des murs lumineux plutôt que des murs sombres.
C'est pour cette raison qu'une combinaison d'un éclairage indirect et un éclairage ponctuel est souvent moins appréciée qu'un éclairage direct qui fournit des luminances verticales plus importantes.
Dans les bureaux paysagers, pour des travaux sur écran, deux paramètres principaux sont à prendre en compte :

- la luminance moyenne des panneaux de séparation faisant face à l'utilisateur,
- les réflexions éventuelles des luminaires dans les écrans.

La qualité de l'éclairage est jugée d'autant meilleure que les panneaux de séparation sont fort lumineux et que l'on a peu de réflexions sur les écrans.

Notons encore qu'à bas niveaux d'éclairement, les personnes désirent plus d'uniformité.

Conclusions et recommandations

Selon Miller [Mil 1998], des taches de lumière, qu'elles soient désirables ou pas, peuvent être créées dans un espace par la distribution de la lumière et l'espacement des luminaires, aussi bien que par la présence d'objets qui peuvent générer des ombres.
Ces taches et leur gradients affectent la manière dont notre système visuel interprète les informations d'une scène et peuvent modifier notre perception psychologique.

Les gradients d'éclairement des surfaces (ou les taches de lumière) affectent probablement la perception de clarté. Ils doivent avoir un objectif bien précis (par exemple, mise en évidence d'un objet particulier), sinon ils deviennent distrayants.
Il faut aussi noter que des surfaces plus claires dans le champ de vision attirent l'attention.

1.5 L'éblouissement

Dans son review, Veitch [Vei 1996b] nous apprend que les professionnels de la lumière font la distinction entre deux types d'éblouissement :

- l'éblouissement perturbateur
  Celui-ci est provoqué par la réflexion d'une source lumineuse ou d'une surface brillante sur un objet, diminuant ainsi le contraste entre l'objet et son environnement et le rendant alors plus difficile à distinguer.
- l'éblouissement inconfortable
  Celui-ci se rapporte à la présence d'une source lumineuse dans le champ visuel et qui perturbe alors la vision.

On peut donc distinguer ces deux types d'inconfort en terme d'effet sur le comportement : l'éblouissement perturbateur a un effet sur les performances visuelles alors que l'éblouissement inconfortable a un effet sur le confort et la santé.

Performance visuelle et luminance de voile (éblouissement perturbateur)

La luminance de voile se rapporte à de la lumière diffusée uniformément dans le champ de vision soit directement par un luminaire, soit indirectement, après réflexion. Cette lumière diminue le contraste entre la tâche et son environnement, réduisant ainsi la performance visuelle.
Il y a eu diverses tentatives de quantification de la réduction de la visibilité basée sur les conditions spécifiques de l'installation d'éclairage. Actuellement, le IESNA handbook (Illuminating Engineering Society of North America) recommande une formule dans laquelle la luminance de voile est calculée à partir de l'éclairement de l'œil provenant de la source d'éblouissement et de l'angle entre l'objet à voir et la source d'éblouissement.

Inconfort et source lumineuse dans le champ de vision (éblouissement inconfortable)

La présence d'une source très lumineuse ou d'une distribution de luminance très peu uniforme peut causer un inconfort. Le mécanisme physiologique relatif à l'effet de cet inconfort n'est pas connu mais on est actuellement convaincu que ce type d'éblouissement peut causer des maux de tête.
Le modèle le plus connu actuellement pour évaluer l'inconfort est le VCP (Visual comfort Probability model). Cependant, ce modèle a été établi pour des luminaires à ventelles planes, qui ne correspondent plus à la plupart des luminaires modernes (particulièrement ceux présentant une distribution de lumière non-uniforme). Les travaux réalisés par Waters, Mistrick et Bernecker [Wat 1995] suggèrent que les modèles actuels d'éblouissement d'inconfort, le modèle VCP inclus, sont trop conservateurs lorsqu'ils prédisent l'inconfort venant de luminaires non-uniformes.
De plus, les variables psychologiques ne sont pas inclues dans les modèles. Il faudrait en fait tenir compte de différences individuelles (dont, entre autres, le sexe et la classe sociale). Actuellement, les modèles peuvent surestimer l'inconfort dans certaines conditions ou le sous-estimer dans d'autres conditions. Ils ne peuvent pas non plus être appliqués à toute la population et toutes les conditions lumineuses existant dans leur environnement.

L'utilisation d'écrans

L'utilisation d'écrans visuels présente des problèmes particuliers pour les concepteurs d'installations d'éclairage.
Contrairement aux travaux conventionnels de bureau, qui sont des travaux sur papier sur une surface horizontale, l'écran visuel possède sa propre luminance et la tâche n'est plus horizontale mais verticale.
L'éclairage général qui serait requis pour une tâche sur papier devient vite source de luminance de voile sur l'écran de l'ordinateur. C'est sans doute la raison pour laquelle on préfère généralement des luminances plus faibles dans les bureaux équipés de PC.
On sait maintenant que les écrans présentant un fond clair sont nettement plus performants que les écrans à fond noirs.
Les écrans visuels demandent une attention particulière dans la sélection et le positionnement des luminaires afin d'éviter la réflexion de ceux-ci dans l'écran. La réflexion d'images dans les écrans de PC réduisent la visibilité et causent un inconfort.

Conclusions et recommandations

Les recommandations de Naomi Miller [Mil 1998] sont les suivantes :

Pour les sources lumineuses situées près de l'axe de vision :
- Essayer de minimiser les contrastes qu'elles induisent pour éviter tout éblouissement inconfortable ou gênant.
- Cacher la source de lumière de la vue ou réduire les contrastes entre la source de lumière et son environnement.

Pour les sources lumineuses situées au-dessus de la tête, limiter le contraste de manière à minimiser l'inconfort provenant d'angles de vue élevés (par exemple, peindre le plafond en couleur claire).

1.6 Le clignotement des lampes (flickering)

Introduction

Les tubes fluorescents font partie des sources lumineuses les plus répandues dans les environnements de travail, partout dans le monde.
Depuis longtemps déjà, on soupçonne l'oscillation (ou flickering) de l'intensité lumineuse produite par les lampes à décharge (dont font partie les tubes fluorescents), d'être source de stress, spécialement dans les environnements disposant de peu ou pas d'éclairage naturel.

Définition

D'une manière générale, le flickering peut être défini de la manière suivante [Sch 1993] : "Variation de la sensation visuelle induite par un stimulus lumineux de luminance ou de distribution spectrale fluctuant dans le temps".
Cette définition du flickering au sens large inclut toute sorte de flickering et pas seulement celui produit par les lampes.
La notion qui nous intéresse dans cette étude peut être définie plus précisément [Sch 1993] comme la sensation du système visuel humain lorsqu'il est soumis à des variations d'intensité lumineuse d'une source (une lampe, dans notre cas).

Effet du flickering sur la physiologie et les performances

D'une manière générale, les différents auteurs ayant travaillé sur le flickering s'accordent à dire que l'utilisation de ballasts électromagnétiques conventionnels induit une oscillation qui n'est pas visible par l'œil humain mais est perçue par le système nerveux [Kul 1998].
La fréquence des oscillations d'une lampe est proportionnelle à la fréquence de la source lui fournissant la puissance [Sch 1993]. En Europe, la fréquence d'oscillation des tubes fluorescents équipés de ballasts électromagnétiques est de 50 Hz. Les ballasts électroniques opèrent à des fréquences beaucoup plus élevées (20 à 60 kHz), qui ne peuvent pas être détectées par le système nerveux humain. C'est la raison pour laquelle les ballasts électroniques éliminent les oscillations.
Dans son article [Kül 1998], Küller nous apprend que de nombreuses études médicales ont établi que le flickering, dans le domaine visible, peut influencer le comportement cérébral de base. Cependant, il existe peu d'études sur l'impact du flickering non visible des tubes fluorescents.
Par la lecture de l'article de Küller [Kül 1998], nous apprenons que Rey et Rey [Rey 1963], West et Boyce [Wes1968], Wilkins [Wil1986], et Veitch et MC Coll [Vei 1995a] ont prouvé que le flickering provenant de tubes fluorescents interfère avec le mouvement normal des yeux, par exemple lors de tâches de lecture. La preuve la plus claire du fait que le flickering des tubes fluorescents peut causer un inconfort visuel et un stress général vient de l'étude de Wilkins et al. [Wil 1989]. Ces auteurs ont comparé un groupe d'employés de bureaux exposés à un éclairage régulé par des ballasts conventionnels et un autre groupe soumis à un éclairage régulé par des ballasts électroniques. Après un certain temps, les conditions ont été inversées. Lorsque le flickering disparaît, les plaintes de maux de tête et de fatigue des yeux, dans le groupe exposé précédemment au flickering, ont diminué de plus de moitié.
Küller [Kül 1998] a remarqué que certaines personnes sont plus sensibles au flickering que d'autres. Il s'agit des personnes plus jeunes, qui boivent peu d'alcool et qui ne fument pas ou peu. Pour ce groupe de personnes, il a observé une augmentation de l'éveil induisant une augmentation de la vitesse d'exécution de la tâche en parallèle avec une diminution de la performance d'exécution de cette tâche.
En ce qui concerne les activités de type industriel, il faut noter que le flickering pourrait provoquer un effet stroboscopique sur certaines machines en mouvement et induire ainsi des risques d'accidents.

Conclusions et recommandations

En conclusion, Küller [Kül 1998] affirme que l'éclairage réalisé au moyen de tubes fluorescents a rarement été considéré comme une source potentielle de stress. Dans la plupart des manuels d'éclairage, le flickering est rarement mentionné et dans la grande majorité des environnements de travail, les ballasts sont encore de type conventionnel. Donc, en supposant que tous les tubes fluorescents d'une pièce soient alimentés par une seule phase du courant

alternatif, la lumière directe ainsi que la lumière réfléchie par le plafond, les murs et le plan de travail vont également varier en phase.
Durant une journée de travail, les yeux et le système nerveux peuvent être exposés durant 8 heures ou plus à une modulation synchronisée, juste en dessous de la limite de visibilité. Comme cette modulation n'est pas perceptible, on ne fait aucune tentative pour l'éliminer.
Jusqu'à présent, il n'existait aucune alternative réaliste aux ballasts conventionnels. A présent, la disponibilité de ballasts électroniques à haute fréquence a considérablement changé la situation.
Il est donc impératif que la modulation de la lumière soit prise en compte lors de la conception d'une installation d'éclairage.

Dans son article [Mil 1998], Miller recommande l'utilisation de ballasts électroniques dès que c'est abordable financièrement, dans le cadre du projet considéré.

1.7 Distribution spectrale de la lumière

Définitions

La répartition spectrale lumineuse d'une source ou spectre lumineux donne le flux énergétique rayonné dans le domaine visible en fonction de la longueur d'onde.

La lumière d'une source est constituée généralement d'une infinité de radiations qui déterminent sa couleur apparente.
C'est de cette distribution que dépendent la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs (IRC) que nous définissons ci-dessous.

La température de couleur caractérise principalement l'ambiance lumineuse donnée au local.

Cette température s'exprime en Kelvin [K].
On dit qu'une source lumineuse émet un rayonnement de couleur dite blanc chaud (contenant beaucoup de radiations oranges et rouges) si sa température de couleur est inférieure à 3300 K et de couleur dite blanc froid si elle est supérieure à 5000 K. Une lampe de température de couleur intermédiaire est dite de couleur blanc neutre.

L'indice de rendu des couleurs (IRC) caractérise l'effet d'une source lumineuse sur des objets de couleur bien définie.

Il donne une indication sur la faculté de la lampe à « rendre » leur couleur naturelle aux objets.
Il est classifié selon les classes 1 à 4 ou selon sa valeur, dénommée par ses initiales IRC qui varie de 20 à 100.
Un indice de rendu des couleurs maximum (= 100) correspond à une lumière blanche naturelle qui possède un spectre à la fois complet et continu et donc qui restitue toutes les nuances de couleur du spectre.

Les principales informations concernant l'effet de la distribution spectrale de la lumière et plus particulièrement l'influence des lampes à spectre continu sont tirées de Veitch [Vei 1994].

La croyance actuelle est qu'il existe des distributions spectrales de la lumière plus intéressantes que d'autres.

Etudions paramètre après paramètre ce qu'il en est.

Comportement et performance [Vei 1996b]

Lorsque des jugements très fins des couleurs sont requis, il apparaît que toute source de lumière ayant un haut indice de rendu des couleurs, la lampe à spectre continu inclue, peut être bénéfique. En ce qui concerne l'apparence générale des personnes ou de l'espace, il n'existe aucune preuve disant que le type de lampe a un effet. En ce qui concerne l'activité, l'éveil et les performances à la tâche, il n'existe aucune preuve montrant une quelconque influence du type de lampe.

Il existe des preuves qui suggèrent que des réactions subtiles liées à l'éclairement intérieur influencent notre comportement mais elles ne sont pas du tout associées aux lampes à spectre continu.

Santé mentale

Il n'existe aucune preuve permettant de dire que les lampes à spectre continu utilisées en éclairage intérieur peuvent améliorer l'humeur et le bien-être des personnes.
Il peut cependant exister des différences individuelles et certaines personnes plus sensibles pourraient être influencées par la qualité du spectre de la source lumineuse.

Physiologie et santé

Il est clair que la lumière affecte la physiologie et la santé humaine. Cependant, le but de ce paragraphe est de déterminer si l'utilisation de lampes à spectre continu en éclairage général intérieur influence la physiologie humaine et la santé. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de preuves concernant de tels effets. Le problème est le suivant : même si on peut trouver des effets sur le comportement humain, on ne sait pas comment des changements peuvent être intégrés par les différentes classes de population.
Par exemple, ce qui peut être désirable pour un groupe peut être indésirable pour un autre (une augmentation des ultraviolets peut être favorable pour une catégorie d'individus qui ne peuvent pas obtenir ces apports à partir de sources naturelles mais indésirable pour d'autres, comme ceux qui souffrent de problèmes de photosensitivité).

Conclusions et recommandations

Malgré les efforts de nombreux scientifiques et la publication de douzaines de rapports, notre connaissance des effets de la lumière sur le comportement humain, l'humeur et le bien-être reste pauvre.
Si l'on regarde les effets de la lumière sur la santé et la physiologie, notre compréhension est meilleure, mais nous ne comprenons toujours pas certains mécanismes spécifiques explicitant les effets qui existent. Il est clair que dans beaucoup de domaines, la qualité de la recherche est pauvre et qu'il est impossible de dire si les lampes fluorescentes à spectre continu ont un effet sur le comportement humain.
Cependant, les meilleures preuves disponibles montrent que ce ne sont pas des différences dans les caractéristiques spectrales des sources de lumière mais bien dans l'intensité, la variabilité, le flickering et les interactions plus complexes sur les personnes et les conditions physiques qui peuvent expliquer l'effet de l'environnement lumineux sur la performance, l'humeur et la santé.
Les chercheurs travaillant sur les effets de la lumière sur les hommes ont cru bon d'ignorer la possibilité que différentes personnes peuvent avoir des sensibilités différentes par rapport à l'environnement lumineux. Une partie de la population peut être particulièrement sensible à la présence ou l'absence de certaines parties du spectre lumineux ou de singularités dans la distribution de la lumière. Les professionnels médicaux le savent depuis longtemps car ils ont remarqué l'existence de réactions photo-allergiques spécifiques aux longueurs d'ondes. Cependant, les autres disciplines n'ont pas encore étudié d'effets similaires sur les aspects les concernant.

Il apparaît par contre, que l'effet de flickering serait plus important pour les lampes à spectre continu que pour les lampes fluorescentes communes. Il faudrait donc porter une attention particulière à ce phénomène dans le cas d'utilisation de lampes à spectre continu.

Certains auteurs ont évoqué, comme argument en faveur des sources lumineuses qui copient l'éclairage naturel, l'évolution humaine : l'argument était que l'éclairage naturel est l'unique source de lumière sous laquelle l'espèce humaine a évolué. Le processus physiologique serait donc optimal lorsque l'homme est exposé à la lumière naturelle. La logique de cet argument, cependant, ne tient pas compte du fait que l'espèce humaine à dû s'adapter successivement à une large variété d'environnements et donc à une large variété de conditions lumineuses. De plus, l'exposition à la lumière ne dépend pas uniquement du type de source mais aussi de la lumière réfléchie et filtrée. La composition spectrale de la lumière du jour dépendra des couleurs des murs, des coefficients de réflexion et de transmission des fenêtres, du port éventuel de lunettes ou de lentilles de contact et de l'œil lui-même. L'intensité de l'éclairage naturel dépend aussi des conditions du ciel, de la latitude, de la longueur de la journée, …

Même s'il est attractif de penser que nous pouvons directement agir sur la santé, le bien-être et le comportement en jouant simplement sur la prescription d'un type de lampe ou de source lumineuse spécifique, le fait reste que la source lumineuse elle-même n'est pas le seul facteur qui entrerait en compte mais fait partie d'une équation complexe. La relation entre l'éclairage et le comportement humain est loin d'être simple et déterministe. Il apparaît que d'énormes efforts de recherche restent encore à faire dans le domaine abordé ici.

L'état des connaissances actuelles nous apprend quand même que la composition spectrale de la source a une influence directe sur deux paramètres : la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs. Nous pouvons quand même suggérer quelques recommandations concernant le deuxième de ces paramètres.
En effet, nous savons que les préférences concernant la température de couleur sont culturelles et dépendent du climat. Il est donc, d'après Miller [Mil 1998], difficile de déterminer des valeurs de température de couleurs idéales pour les espaces de travail.
En ce qui concerne l'indice de rendu des couleurs, il convient de ne pas descendre en dessous de 70 si des personnes ou de la nourriture sont concernées.
Il faut garder un indice de rendu des couleurs d'au moins 50 si la tâche est basée sur des contrastes de couleurs ou une identification grossière des couleurs.
Il convient également de ne pas descendre en dessous d'un IRC de 90 pour des tâches critiques au niveau des couleurs.
Ces recommandations sont un peu plus sévères que celles données par la norme belge et reprises ci-dessous dans le Tableau 3.2.

La norme Belge L 13-001 (addendum) [IBN 1979] donne des valeurs minimales d'indice de rendu des couleurs des lampes à utiliser en fonction de quatre groupes différents.

Groupe de rendu des couleurs	Valeurs de l'indice de rendu des couleurs	Aspect coloré de la lumière	Exemples d'utilisation
1	IRC ≥ 85	froid	industries textiles, industries de peintures et de l'imprimerie
		intermédiaire	magasins, hôpitaux
		chaud	habitations, hôtels, restaurants
2	65 ≤ IRC < 85	froid	bureaux, écoles, grands magasins, travaux industriels fins (en climat chaud)
		intermédiaire	idem (en climat tempéré)
		chaud	idem (en climat froid)
3	lampes avec IRC < 65 mais avec des propriétés de rendu des couleurs suffisamment acceptables pour être utilisées dans des locaux de travail en général.		intérieurs où le rendu des couleurs est d'importance relativement secondaire
S spécial	lampes avec des propriétés spéciales de rendu des couleurs.		applications spéciales

Tableau 3.2 : Groupes de rendu des couleurs recommandés par la norme belge NBN L-13-001 (addendum)

1.8 Combinaison indice de rendu des couleurs, température de couleur et niveau d'éclairement

Choix de la température de couleur en fonction du niveau d'éclairement

Selon la norme belge NBN L 13-001 [IBN 1972], la température de couleur de la lumière doit être adaptée au niveau d'éclairement atteint. Quand le niveau d'éclairement augmente, la température de couleur de la source lumineuse doit également augmenter. Le diagramme de Kruithof (voir Figure 3.5) donne à cet effet les valeurs d'éclairement recommandées en fonction de la température de couleur.

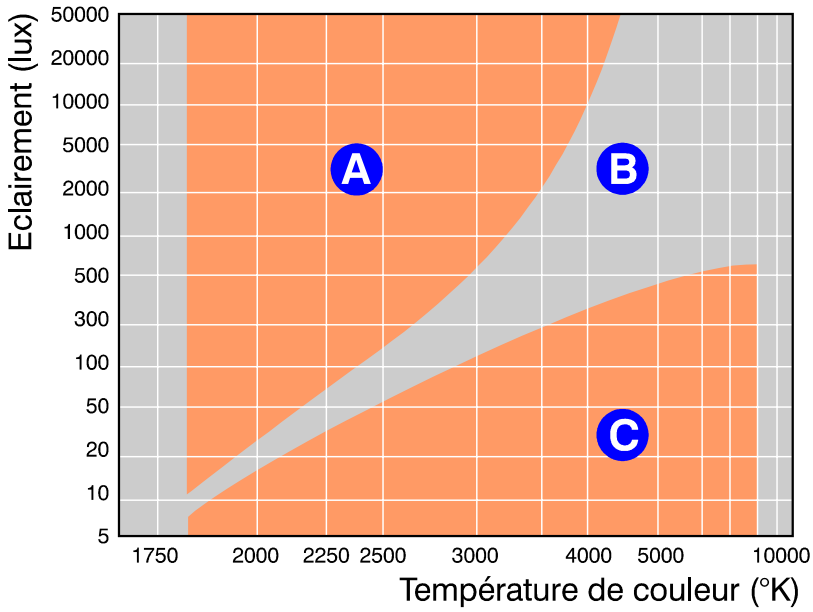


Figure 3.5: Diagramme de Kruithof: températures de couleur recommandées selon le niveau d'éclairement atteint

Seule la zone B correspond à la zone de confort. Si on se trouve dans la zone A, l'impression visuelle ressentie est désagréable ; la température de couleur est trop faible pour le niveau d'éclairement considéré. Si on se trouve dans la zone C, l'impression visuelle est également désagréable, la température de couleur de la source est trop importante par rapport au niveau d'éclairement atteint.
On remarque que l'utilisation de sources lumineuses dont la température de couleur augmente, c'est-à-dire se rapproche de la température de couleur de la lumière du jour, a une influence favorable sur la sensation de confort, élargissant ainsi la zone d'impression agréable limitée par les courbes de Kruithof.

Influence de l'indice de rendu des couleurs et de la température de couleur sur l'humeur, en fonction du sexe de l'individu

Igor Knez [Kne 1997] a analysé les changements d'humeur des personnes en fonction du niveau d'éclairement, de la température de couleur et de l'indice de rendu des couleurs.
Il parle d'humeur positive et d'humeur négative. L'humeur positive donne une idée du sentiment d'enthousiasme, d'activité et d'éveil de la personne alors que l'humeur négative donne une idée du sentiment de stress, de mal-être, etc. de la personne.
Il remarque une nette différence entre les préférences des femmes et celles des hommes.
Parmi les conditions lumineuses testées, celles qui induisent le plus haut niveau d'humeur positive sont :
- pour les femmes : 300 lux avec IRC = 95,
- pour les hommes : 300 lux avec IRC = 55 ou 1500 lux avec IRC 95.

En ce qui concerne les niveaux d'humeur négative, on a surtout analysé l'influence d'un changement de température de couleur et on voit que :

- pour les femmes, à IRC de 55, le passage d'une température de couleur de 3000 K à 4000 K augmente l'humeur négative alors que lorsque la source de lumière a un IRC de 95, c'est le contraire qui se produit.
- pour les hommes : à IRC de 55, pas de changement de l'humeur lorsque la température de couleur varie de 3000 K à 4000 K alors qu'à IRC de 95, on observe une nette augmentation de l'humeur négative pour un passage de 4000 K à 3000 K.

Ce qu'il est important de retenir de cette étude est que la différence entre les préférences selon le sexe des individus est très marquée. Lorsqu'on conçoit un projet d'éclairage, on devrait donc théoriquement ajouter une variable supplémentaire qui est le sexe des occupants des locaux. Il est assez illusoire de penser qu'on pourrait modifier un éclairage en fonction du sexe des occupants, puisque cela peut varier très régulièrement en fonction de la mobilité du personnel et des changements d'organisation de la société.

Autres paramètres influençant l'humeur

Dans un article très récent, Mc Cloughan [McC 1999] a analysé quel pouvait être l'impact de la lumière sur l'humeur. Ses conclusions sont qu'il y a bien un impact de la lumière sur l'humeur des individus mais que la nature de cet effet est complexe. La meilleure façon de l'expliquer est de le diviser en deux :

Les premiers effets sont appelés effets initiaux. Ils ont lieu dans les 5 minutes après que l'individu soit entré dans la pièce. L'effet le plus important à ce moment agit sur une variable caractérisant l'humeur et appelée "recherche de sensation". Cette variable est plus importante pour des faibles luminances que pour des luminances élevées. Il existe également un effet de la température de couleur : celle-ci agit sur l'hostilité qui est significativement plus élevée sous des conditions de lumière chaude.
Finalement, on remarque que les femmes ont en général un indice caractérisant l'humeur positive plus élevé que les hommes.

Viennent ensuite les effets à long terme. Ces effets caractérisent les sentiments observés après une période de plus de 30 minutes dans la pièce. Les changements observés concernent uniquement les aspects d'humeur négative. Ils sont le fruit d'interactions complexes entre le sexe des individus, le niveau d'éclairement atteint dans la pièce et la température de couleur de la source.

Conclusions

Il semblerait que la lumière ait effectivement bien un impact sur l'humeur des individus.
Cependant, la prise compte de cet impact dans la conception des installations d'éclairage semble très difficile à réaliser actuellement, vu les interactions complexes entre les différents paramètres influençant l'humeur (sexe, indice de rendu des couleurs, température de couleur, niveau d'éclairement, durée d'exposition à la lumière, etc.)

1.9 Présence d'éclairage naturel

D'après Miller [Mil 1998], la présence de fenêtres dans les locaux de bureaux présente beaucoup d'avantages. Les fenêtres ont l'avantage de ne pas couper l'individu de l'extérieur (conditions météo, moment de la journée) et de lui fournir l'occasion de reposer ses yeux en lui permettant de regarder des objets lointains.
Si elles sont conçues pour permettre à l'éclairage naturel de pénétrer dans le local sans causer de problèmes d'éblouissement, les ouvertures peuvent améliorer l'éclairage ambiant tout en réduisant les besoins en lumière artificielle et donc les consommations électriques.

Performances visuelles

Bien qu'il n'existe aucune étude de visibilité en relation avec la présence d'éclairage naturel [Vei 1996b), on peut appliquer à l'éclairage naturel les mêmes principes que pour toute source de lumière. L'éclairage naturel apporté par une fenêtre peut être cause d'éblouissement, peut créer des problèmes de luminance de voile, réduire les contrastes et diminuer ainsi la visibilité de la tâche. La présence d'une fenêtre peut aussi causer des problèmes d'adaptation et réduire

ainsi la visibilité (si la fenêtre est beaucoup plus claire que l'environnement intérieur). C'est pour cela que la présence de protections solaires (stores, rideaux, stores vénitiens) est indispensable pour assurer un éclairage de qualité.

Quelle que soit la croyance répandue, il est difficile de dire si la présence d'éclairage naturel a un réel impact sur les performances visuelles. En tout cas, si cet impact existe, il est certainement moindre que l'effet psychologique et l'effet sur la santé de la présence d'éclairage naturel.

Santé

De nombreux employés de bureau souscrivent au fait que l'éclairage naturel est meilleur pour la santé physique, visuelle et psychologique. Les personnes qui croient que l'éclairage a un effet sur la santé tendent à préférer l'éclairage naturel par rapport à l'éclairage artificiel.

Préférences et satisfaction

Selon les travaux de Veitch [Vei 1996b], l'importance donnée à la présence d'une fenêtre varie avec les personnes. En général, les personnes travaillant dans des bureaux préfèrent avoir une fenêtre. Cependant, les personnes qui profitent de l'éclairage naturel apportent moins d'importance à la présence de fenêtres que les personnes qui n'ont pas d'apport de lumière naturelle. Les préférences concernant la taille de la fenêtre dépendent du type de vue (on préfère une ouverture plus grande lorsque la vue est belle), des recommandations en terme de valeur minimale d'éclairement, de la taille et de la forme du local.
La qualité de la lumière dans un bureau éclairé naturellement résultera de la combinaison de tous ces facteurs, parmi d'autres caractéristiques lumineuses de l'espace, en considérant que l'éclairage naturel est une source de lumière et en incorporant sa complexité et sa variabilité.

Conclusions et recommandations

La présence d'éclairage naturel dans les locaux de travail est certainement bénéfique mais la plupart des auteurs s'accordent à recommander la présence de systèmes de contrôle de l'éclairage naturel (protections solaires de divers types).

1.10 Type de système d'éclairage

Les systèmes d'éclairage classiques directs ont été largement répandus dans les locaux de travail. Cependant, avec l'apparition des PC et les besoins d'économies d'énergie, d'autres systèmes (indirect ou combinaison direct/indirect) ont fait leur apparition. Veitch [Vei 1996b] a recensé plusieurs études de l'influence du type de système d'éclairage sur le comportement humain.
Voyons les conclusions qu'elle a pu tirer de ces travaux.

Performance visuelle

Des différentes études, on ne peut rien conclure en ce qui concerne l'influence du type de système d'éclairage sur la performance visuelle.

Humeur, satisfaction et préférence

En général, les personnes préfèrent les systèmes combinés direct / indirect aux systèmes directs sauf si la partie directe de la lumière est trop ponctuelle et entraîne ainsi des zones d'ombre et de lumière très marquées.

Santé

Nous ne connaissons actuellement qu'une seule étude relative à l'effets des types de système sur la santé. Celle-ci ([Hed 1995]) a montré moins de problèmes de fatigue des yeux et de mise au point sous les systèmes indirects.

1.11 Les systèmes de gestion de la lumière

La sophistication et la complexité des systèmes de gestion de la lumière ont fortement augmenté depuis ces dernières années.
Des appareils tels que des systèmes de dimming liés à la disponibilité d'éclairage naturel et des capteurs de présence permettent de gérer la lumière artificielle de manière à limiter son utilisation au strict nécessaire afin de favoriser au maximum les économies d'énergie.

Le succès de tels systèmes dépendra de leur capacité à fournir les conditions lumineuses nécessaires.
Certains concepteurs pensent que le fait de permettre un contrôle individuel de l'éclairage, par la mise en place d'un système individuel d'éclairage à la tâche aura des effets bénéfiques car chaque individu pourra adapter son éclairage personnel à ses besoins.

Santé

Dans la plupart des cas, le fait d'avoir une possibilité d'agir sur l'environnement est un des composants de la qualité de l'environnement de travail dans lequel les employés se sentent compétents et satisfaits, ce qui peut n'avoir que des influences positives sur leur santé.

Performance visuelle

D'après Veitch [Vei 1996b], il existe très peu d'expériences portant sur l'effet de la possibilité de gérer soi-même son éclairage sur la performance. Elle a constaté qu'on ne doit pas s'attendre à une augmentation des performances lorsque les employés ont la possibilité d'agir sur leur condition d'éclairage personnelle ; au contraire, on montrerait même une diminution de la performance à la tâche.
Boyce, dans une étude plus récente [Boy 2000], pose des conclusions qui vont dans le même sens que celles de Veitch. Selon lui, le fait de pouvoir modifier sa propre disponibilité en éclairage n'a pas d'influence sur la performance visuelle.

Préférences et satisfaction

Selon Veitch [Vei 1996b], toutes les études s'accordent à dire que la majorité des employés préfèrent avoir un certain contrôle de leurs conditions d'éclairage. D'après Boyce [Boy 2000], la présence d'un système de gestion individuel fait que la tâche apparaît comme plus facile à réaliser.
Boyce [Boy 2000] montre aussi que lors de son expérience, les sujets ont utilisé le système de gestion pour adapter leurs luminances mais que les valeurs choisies étaient très différentes d'un individu à l'autre.
La possibilité de graduer l'éclairage est considérée comme très positive, rend la tâche moins difficile à réaliser et permet d'économiser de l'énergie.
Cependant, elle ne met pas le sujet de meilleure humeur, ne le rend pas plus alerte et n'affecte pas sa performance à la tâche.

Conclusions et recommandations

Quel que soit le système de gestion adopté, il est impératif qu'il soit correctement intégré et adopté par les occupants sans quoi on risque de produire l'inverse des effets escomptés. Tous les auteurs ayant étudié les possibilités d'économie d'énergie par l'utilisation de l'éclairage naturel s'accordent à dire que cette gestion peut apporter des économies d'énergie d'éclairage importantes mais qu'elle ne peut pas se faire au détriment du confort visuel. Il faut aussi veiller à l'acceptabilité du système de gestion de l'éclairage, sous peine de le voir contrecarré par les occupants, ramenant ainsi les économies d'énergie à zéro [Emb 1997].

1.12 Conclusion

Nous notons qu'un effort important doit encore être réalisé afin d'identifier les meilleures conditions lumineuses, et cela par rapport à de nombreux types de comportements.
Actuellement, on ne peut établir que des conclusions générales sur la qualité de la lumière et il existe plus de désaccords que d'accords pour beaucoup de paramètres, que ce soit dans la communauté scientifique ou entre les recommandations pratiques et la littérature scientifique.

Cela fait déjà longtemps que les auteurs font des critiques sur les recherches dans le domaine de la qualité de la lumière. Ces critiques concernent la pauvreté de procédures scientifiques ainsi que les analyses statistiques. Déjà en 1981, Boyce [Boy 1981], donne comme argument sur la nécessité d'approfondir les recherches le fait que la pratique passée (antérieure à 1981) était excessive et que déjà à ce moment-là, nous ne pouvions plus nous permettre d'utiliser autant d'énergie. Cet argument reste valable aujourd'hui mais on pense actuellement que pour atteindre des résultats, il est nécessaire que des psychologues et d'autres scientifiques comportementaux soient mieux impliqués dans les recherches.

Ces personnes ont aussi un rôle important à jouer dans le développement de la législation, de recommandations pratiques et de normes.

Cela fait plus de 20 ans qu'on parle de qualité de la lumière sans beaucoup d'évolution. Ce n'est que si les recommandations pratiques sont basées sur des preuves empiriques qu'il sera possible d'argumenter le fait qu'une installation d'éclairage n'est pas uniquement efficace énergétiquement mais apporte également une bonne qualité de la lumière en rencontrant les besoins humains.

Toutes ces raisons font qu'il est actuellement très difficile, voir impossible, de chiffrer le confort visuel dans une situation particulière. C'est la raison pour laquelle nous avons dû nous limiter, dans le cadre de ce doctorat, à une évaluation du niveau d'éclairement atteint sur le plan de travail et une comparaison de ce niveau à la valeur recommandée par les normes actuelles. La norme belge [IBN 1992] recommande des valeurs comprises entre 300 et 750 lux d'éclairement de service pour les travaux d'écriture et demandant une perception de détails similaires. Nous avons choisi d'utiliser une valeur moyenne de 500 lux sur le plan de travail, comme c'est couramment fait dans la réalité. Les autres aspects du confort visuel ne seront donc pas abordés dans la suite de ce travail.

2. Economies d'énergie réalisables par l'utilisation de l'éclairage naturel

2.1 Les stratégies d'éclairage [Bod 1999]

Le système ON/OFF

La stratégie la plus primitive de contrôle de l'éclairage artificiel est l'utilisation du simple système ON/OFF que nous connaissons tous.
En principe, ce système engendre une grande consommation d'énergie d'éclairage puisqu'en général, on allume l'éclairage le matin, en arrivant dans son bureau, car à ce moment-là l'éclairage naturel disponible n'est pas encore suffisant pour mener à bien une tâche de travail de bureau, et on n'éteint l'éclairage qu'en partant le soir, sans penser à l'éteindre au milieu de la journée lorsque les fenêtres apportent un éclairage naturel suffisant.
S'il s'agit d'un bureau pour quelques personnes seulement, on peut espérer que les utilisateurs se sentiront concernés par l'éclairage et éteindront les lampes durant le temps de midi et en partant le soir. Mais dans la plupart des immeubles, l'éclairage reste très souvent allumé jusqu'au passage des équipes de nettoyage, en fin de journée.
Un premier pas vers une gestion intelligente d'un système ON/OFF est la division du local à éclairer en différentes zones et la répartition de la distribution électrique afin de regrouper les commandes en tenant compte de ces zones. Celles-ci sont déterminées par le type d'activité pratiquée et donc par le niveau d'éclairement qui y est nécessaire ainsi que par les apports d'éclairage naturel qui y sont disponibles.

Exemple de zonage selon les apports d'éclairage naturel

Prenons le cas d'un local dans lequel on doit pouvoir effectuer la même tâche, quel que soit l'endroit où on se place.
Si ce local est éclairé naturellement par une fenêtre latérale, la courbe de facteur de lumière du jour aura l'apparence décrite à la Figure 3.6.
On peut alors imaginer une division du local en trois zones d'éclairage distinctes.
Tous les luminaires appartenant à une même zone sont gérés de la même manière mais de façon totalement indépendante par rapport aux luminaires des autres zones.
Les numéros des zones représentent l'ordre d'enclenchement des différents groupes de luminaires lors d'une diminution de l'éclairage naturel.

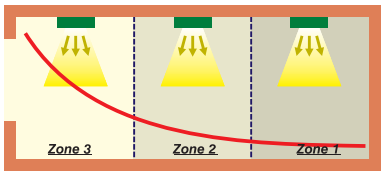


Figure 3.6 : Zonage de l'éclairage artificiel : ouverture unilatérale

Dans le cas d'un local éclairé bilatéralement, on a la distribution décrite à la Figure 3.7 (cas d'un ciel couvert).
Comme la répartition de l'éclairage naturel est symétrique, on peut alors n'avoir que deux zones indépendantes, les deux parties proches des fenêtres ne formant qu'une seule zone de luminaires.

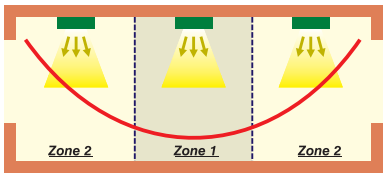


Figure 3.7: Zonage de l'éclairage artificiel : ouvertures bilatérales

Le fait de « zoner » l'éclairage artificiel apporte donc à l'utilisateur une plus grande souplesse et lui permet d'économiser de l'énergie en n'éclairant que les zones pour lesquelles les apports d'éclairage naturel ne sont pas suffisants.
Le zonage permet aussi, surtout dans le cas de grands bureaux, de ne pas éclairer inutilement des zones inoccupées, surtout en début et en fin de journée.

La régulation par pas

La régulation par pas contrôle le niveau d'éclairement simplement en éteignant ou en allumant les lampes par étapes successives. A son niveau le plus simple, il s'agit d'un système On/Off traditionnel.
On peut travailler en trois pas, par exemple, pour des luminaires équipés de deux lampes.
Pas 1 : l'éclairage naturel étant suffisant pour pouvoir atteindre le niveau d'éclairement recommandé, tout est éteint.
Pas 2 : l'éclairage naturel ayant diminué, une lampe sur deux est allumée.
Pas 3 : tout est allumé.
La régulation à 4 pas est réalisée avec des luminaires à trois lampes. On peut aussi travailler en éteignant, par exemple, un luminaire sur deux ou sur trois mais on risque de perdre l'uniformité d'éclairement du local et de créer ainsi des zones d'ombre.
La régulation pas à pas sera difficile à réaliser manuellement. Pour bien faire, elle devrait être automatisée par l'utilisation de cellules de mesure d'éclairement ou de luminance.
Cependant, ce type de régulation basé sur des variations plus ou moins brusques des niveaux d'éclairement n'est pas idéale et rencontre beaucoup de réticence de la part des occupants.

Le dimming

Le dimming est un ajustement continu de l'éclairage artificiel qui peut être fait en fonction des apports extérieurs et qui permet également de doser précisément l'éclairage dans le but de créer des ambiances lumineuses particulières.
En général, le dimming est réalisé de manière automatique.
L'avantage principal d'un système de dimming est que l'éclairage artificiel est constamment réajusté en fonction des apports extérieurs et que cet ajustement n'est pas perçu par l'œil humain.

2.2 Les dispositifs de gestions de l'éclairage [Bod 1999]

La première considération à faire avant de choisir un dispositif de gestion est d'étudier la compatibilité des lampes et de leurs accessoires avec ce système de commande. Beaucoup de lampes à décharge vieillissent prématurément lorsqu'elles sont soumises à de fréquents enclenchements ou déclenchements. D'autres mettent plusieurs minutes pour s'allumer lorsqu'elles sont chaudes. Une gradation continue de la lumière émise n'est possible qu'avec quelques types de lampes et de ballasts.

Notons que pour qu'un système de gestion de l'éclairage fonctionne bien, il faut qu'il soit parfaitement accepté par les utilisateurs des locaux. L'imagination de ceux-ci est incroyable quand il s'agit de contrarier un système automatique. Celui-ci doit donc être soit parfaitement compris et accepté par l'occupant soit imperceptible par celui-ci. Si ces conditions ne sont pas remplies, les réactions de l'occupant pour contrecarrer le système peuvent conduire, non pas à des économies d'énergie mais à des dépenses encore plus importantes que si celui-ci gérait lui-même le système.

Les systèmes d'horaire et de minuterie

Un simple système ON/OFF peut déjà être automatisé, soit en fonction d'un horaire d'allumage et d'extinction des lampes, soit par le choix d'une durée pendant laquelle on accepte que l'éclairage reste allumé, à partir du moment où quelqu'un a appuyé sur l'interrupteur.
Le premier type de gestion est en général centralisé pour tout un ensemble de locaux ou pour tout le bâtiment. La seconde solution est gérée ponctuellement, pour chaque local concerné.

Les systèmes d'horaire (ou horloges)
Dans les bâtiments où l'horaire de travail est bien fixé (immeubles de bureaux ou les écoles), il est possible d'assurer, par zone ou pour l'ensemble du bâtiment, une commande d'allumage ou d'extinction de l'éclairage sur base de signaux horaires.
Il existe une grande variété de dispositifs d'horloge allant du simple interrupteur électromagnétique multi positions jusqu'aux interrupteurs à cristaux liquides. Les commandes peuvent aussi provenir de systèmes de gestion centrale et être transmis aux luminaires.
Lorsque l'on envisage le placement d'une horloge sur l'installation d'éclairage, il faut avoir à l'esprit que :

- il est souvent préférable de ne commander via l'horloge que l'extinction des luminaires, pour laisser aux occupants la liberté d'allumage ;

- il est important d'inclure, dans le système, des commandes locales apportant une possibilité de dérogation de façon à pouvoir rétablir l'éclairage si les occupants en ont besoin ;

- la possibilité de dérogation doit aussi prévoir un retour au mode automatique, par exemple en répétant la commande d'extinction à intervalle régulier après l'arrêt normal des activités ou en commandant un retour au mode automatique après un temps défini (ex : 1 h après la pression sur l'interrupteur) ;

- les horaires d'extinction peuvent également comprendre la période de midi si elle est significative d'un arrêt général des activités.

La solution d'extinction de la lumière selon un horaire n'est évidemment pas concevable pour des endroits où elle pourrait avoir des conséquences fâcheuses, voire dangereuses (en cas d'utilisation de machines, par exemple).

Les systèmes de minuterie
L'usage des minuteries assurant l'extinction automatique de l'éclairage est très répandu et utilisé depuis longtemps dans les circulations (escaliers, halls, ...) où les utilisateurs ne font que passer.
L'éclairage, commandé par bouton poussoir, s'éteint après un temps réglable déterminé par la durée que l'utilisateur mettra pour parcourir la zone.
Actuellement les détecteurs de présence sont souvent préférés aux minuteries.

Les détecteurs de présence

Le système de détection de présence est un système qui permet d'éclairer uniquement quand la pièce est occupée.
Le détecteur de présence allume les appareils d'éclairage lors de l'entrée de l'occupant et les éteint quelque temps après sa sortie. Une temporisation à l'extinction est nécessaire pour ne pas réduire la durée de vie des lampes par des cycles d'allumage/extinction trop fréquents. Ainsi, une absence de 1 ou 2 minutes ne peut entraîner l'extinction des lampes.
Dans de nombreux cas, il sera plus rentable d'investir directement dans un détecteur de présence (par exemple dans des sanitaires) que dans la rénovation de l'appareil d'éclairage. Ceci permet d'éviter des investissements importants et de réaliser immédiatement des économies substantielles.
Le contrôle de la présence des occupants peut ainsi être recommandé dans les locaux où la présence de personnes est occasionnelle, comme par exemple dans les salles de réunion, dans les locaux d'archives ou encore dans certains couloirs comme des couloirs d'hôpitaux, la nuit, ...
Son utilisation implique une certaine prudence en cas d'application en environnement de bureau. Les détecteurs peu sensibles (détecteurs infrarouges) risquent de ne pas détecter les mouvements légers engendrés par le travail sur ordinateur ou la lecture. Par contre, des détecteurs à ultrasons peuvent être trop sensibles et commander l'allumage au passage d'une mouche! Mieux vaut donc choisir un détecteur qui combine ces deux techniques.
Le choix de l'emplacement du détecteur a une grande importance sur son bon fonctionnement. Il ne faut pas que le détecteur soit influencé par un mouvement en dehors de la zone commandée (ouverture de porte, ...).

Les cellules d'éclairement

Très souvent, l'éclairage artificiel n'est nécessaire, dans les zones proches des fenêtres, que le matin, le soir ou la nuit. Le reste de la journée, l'apport en éclairage naturel peut y être suffisant pour assurer le confort visuel.
Pour gérer l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel disponible, on place une ou plusieurs cellules de mesure continue de l'éclairement soit à l'extérieur du local à gérer (sur la façade ou sur le toit) soit dans le local lui-même.
Que la cellule soit placée à l'extérieur ou à l'intérieur, le système fonctionne suivant le même principe :

Par exemple, pour un simple système ON/OFF, les lampes sont toutes éteintes lorsque l'éclairement extérieur ou intérieur provenant de l'éclairage naturel est plus grand ou égal à la valeur d'éclairement de consigne (pas 1). Elles sont ensuite allumées quand l'éclairement provenant de la lumière du jour est plus faible que la valeur de consigne (pas 2).

Enclenchement et déclenchement en fonction de la lumière extérieure

Un régulateur est programmé pour enclencher ou déclencher l'éclairage artificiel en fonction des seuils d'éclairement extérieur.

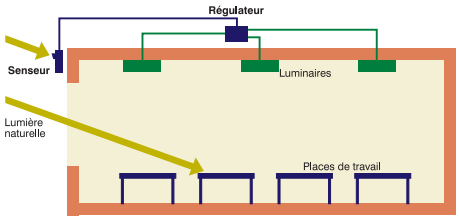


Figure 3.8: Gestion de l'éclairage artificiel en fonction de la lumière extérieure disponible

Des temporisations sont intégrées au système pour éviter des enclenchements ou des déclenchements trop fréquents (passage d'un nuage). Chaque rampe de luminaires peut avoir un seuil différent pour, par exemple, intégrer la décroissance de l'éclairage naturel en fonction de la profondeur du local.
On dispose en général d'un ensemble senseur - régulateur par orientation des locaux (façade).

L'avantage d'un tel système est :
- son faible coût vu le nombre limité de cellules (on traite tous les locaux d'une même façade de la même manière).

Ses inconvénients sont que :
- il ne permet pas d'intégrer la présence de protections solaires ;
- il n'est pas facile à régler car il dépend de la configuration de la pièce à gérer (type et taille de la fenêtre) et doit être réglé différemment selon l'éloignement, par rapport à la fenêtre, des luminaires qu'il gère ;
- c'est un simple système de commande, sans effet de rétroaction possible ;
- il est difficile à mettre en œuvre si la façade peut être ombrée par des bâtiments voisins ou par des arbres ;
- le système est peu ergonomique car il engendre de brusques variations d'éclairement intérieur.

Enclenchement et déclenchement en fonction de la lumière intérieure

Une cellule mesure en continu l'éclairement qu'elle reçoit et le régulateur gère l'éclairage artificiel afin d'assurer le niveau d'éclairement de consigne.
Des temporisations sont intégrées au système pour éviter des variations trop brusques lorsque le ciel est très changeant. Chaque local est équipé d'un système de régulation indépendant.

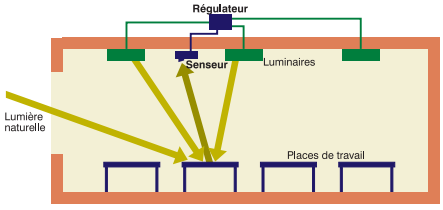


Figure 3.9: Gestion de l'éclairage artificiel en fonction de la lumière inérieure disponible

Les avantages d'un tel système sont :
- l'intégration de la majorité des paramètres influençant l'éclairement d'un plan de travail par la mesure de l'éclairement de ce plan de travail ;
- l'intégration par le système des baisses de performance de l'installation.

Les inconvénients d'un tel système sont :
- la difficulté du choix de la position du capteur : si on place le capteur sur le plan de travail, il risque d'être obstrué, volontairement ou non, par l'utilisateur ; si on le place à l'endroit le mieux éclairé, on va sous éclairer tous les autres endroits du local et inversement, si on le place à un point peu éclairé, on va sur éclairer le local et gaspiller de l'énergie. Le choix d'un compromis est donc essentiel ;
- son coût : dans ce cas-ci, on a absolument besoin d'un système par local.

Les systèmes de gestion localisés

Il existe maintenant des systèmes de contrôle indépendants à placer sur chaque luminaire. Ce type de cellule mesure la luminance de la surface au dessus de laquelle elle est placée et ajuste le flux lumineux de la ou des lampes qu'elle contrôle afin d'atteindre une valeur de consigne.
Outre les avantages propres au réglage en continu du flux lumineux (prise en compte du surdimensionnement, non perception du réglage par les occupants), les avantages d'un tel système sont que :

- un réglage précis de chaque appareil s'effectue en fonction des conditions particulières de chaque poste de travail ou zone de local. Le gain énergétique est ainsi optimisé ;
- l'équipement de chaque luminaire est indépendant et ne demande pas de gestion centralisée ;
- contrairement aux systèmes à régulation centrale, ce système ne demande pas de câblage spécial, ni d'ordinateur central. Il s'applique donc très facilement en rénovation.

Bien sûr, la quantité d'énergie économisée dépend fortement de la taille de la fenêtre, de son orientation et de la position des luminaires par rapport à celle-ci.
Un tel système peut également être couplé à un autre système de contrôle tel qu'un détecteur de présence ou une minuterie.
La meilleure solution est de coupler le système de gestion localisée à un système d'horloge.

2.3 Le choix d'un système de gestion de l'éclairage [Bod 1999]

Le choix d'un système de gestion de l'éclairage est particulièrement difficile car il dépend de nombreux paramètres : éclairage naturel disponible, types de lampes et disposition des luminaires, type d'occupation, taille du local, nombre d'occupants, etc. Chaque cas doit être étudié séparément.
Grossièrement, on peut simplement dire que, pour un local bien éclairé naturellement, l'éclairage artificiel n'est utilisé qu'en début et en fin de journée et qu'un simple système de contrôle ON/OFF doit permettre de réaliser des économies d'énergie importantes. Pour un local faiblement éclairé naturellement, l'éclairage artificiel doit toujours assurer un appoint et seul un réglage fin en continu peut apporter une économie d'énergie.

Critères de choix

Les divers critères menant au choix d'un système sont les suivants :

La disponibilité d'éclairage naturel
La probabilité d'allumer l'éclairage lorsqu'on arrive dans une pièce est directement liée à la disponibilité d'éclairage naturel à ce moment alors que l'on n'éteint pratiquement jamais l'éclairage avant que la dernière personne ne quitte la pièce.
La stratégie de contrôle présentée dans le diagramme a pour but :

- soit de pousser l'utilisateur à reprendre la décision d'allumer ou d'éteindre la lumière à plusieurs moments de la journée (extinction automatique suivant un horaire).
- soit de lui donner la possibilité de prendre cette décision en fonction de l'éclairement de l'endroit où il se trouve (interrupteurs locaux).

Pour beaucoup de locaux, cette solution donne déjà de bons résultats. Cependant, des économies d'énergie plus importantes peuvent être réalisées en utilisant des cellules d'éclairement et des détecteurs de présence.
Le choix de ces options dépend du type d'occupation. Pour des espaces ayant peu d'apport d'éclairage naturel, une combinaison d'un contrôle selon un horaire et d'interrupteurs locaux couvrira presque toutes les situations. Pour des locaux occupés de manière intermittente et aléatoire tels que des grands bureaux, des interrupteurs locaux ainsi que des détecteurs de présence permettront, si le système est divisé en zones, d'éviter d'allumer tout le local, lorsque celui-ci n'est occupé que par un petit nombre de personnes.

La densité d'occupation
Après l'éclairage naturel, le facteur le plus important à considérer est la densité d'occupation.
Par exemple, la consommation d'éclairage artificiel dans un bureau paysager, même s'il est bien éclairé naturellement, sera toujours supérieure à celle d'une série de bureaux individuels

occupant la même surface et ayant la même disponibilité d'éclairage naturel. En effet, le bureau paysager restera allumé tout au long de la journée alors que, en moyenne, l'occupant d'un bureau individuel quittera 3 fois par jour celui-ci et fera, à chacun de ses retours, le choix d'allumer ou non l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel disponible à ce moment-là.

Le type d'occupation
On peut décrire les types d'occupation de différentes manières. Dans notre cas (choix d'un système de contrôle de l'éclairage), ceux-ci se réfèreront à la fréquence des entrées et des sorties des personnes dans le local considéré.

Nous avons divisé le type d'occupation en 4 catégories :

Occupation variable :
Locaux utilisés par des personnes qui travaillent relativement souvent sur le terrain ou avec d'autres personnes, dans d'autres parties du bâtiment, et qui se trouvent peu souvent dans leur bureau.

Occupation intermittente programmée :
Pièces utilisées selon un horaire bien précis, comme des classes de cours ou des halls de sport.

Occupation complète :
Pièces occupées toute la journée.

Occupation intermittente occasionnelle :
Pièces qui ne représentent pas l'endroit principal de travail et qui sont visitées occasionnellement durant la journée (archives, endroits de stockages, etc.).

Choix du système

La Figure 3.10 [BRE 1990], résume les diverses possibilités de gestion de l'éclairage et permet de réaliser le choix le plus adéquat en fonction de la situation dans laquelle on se trouve.

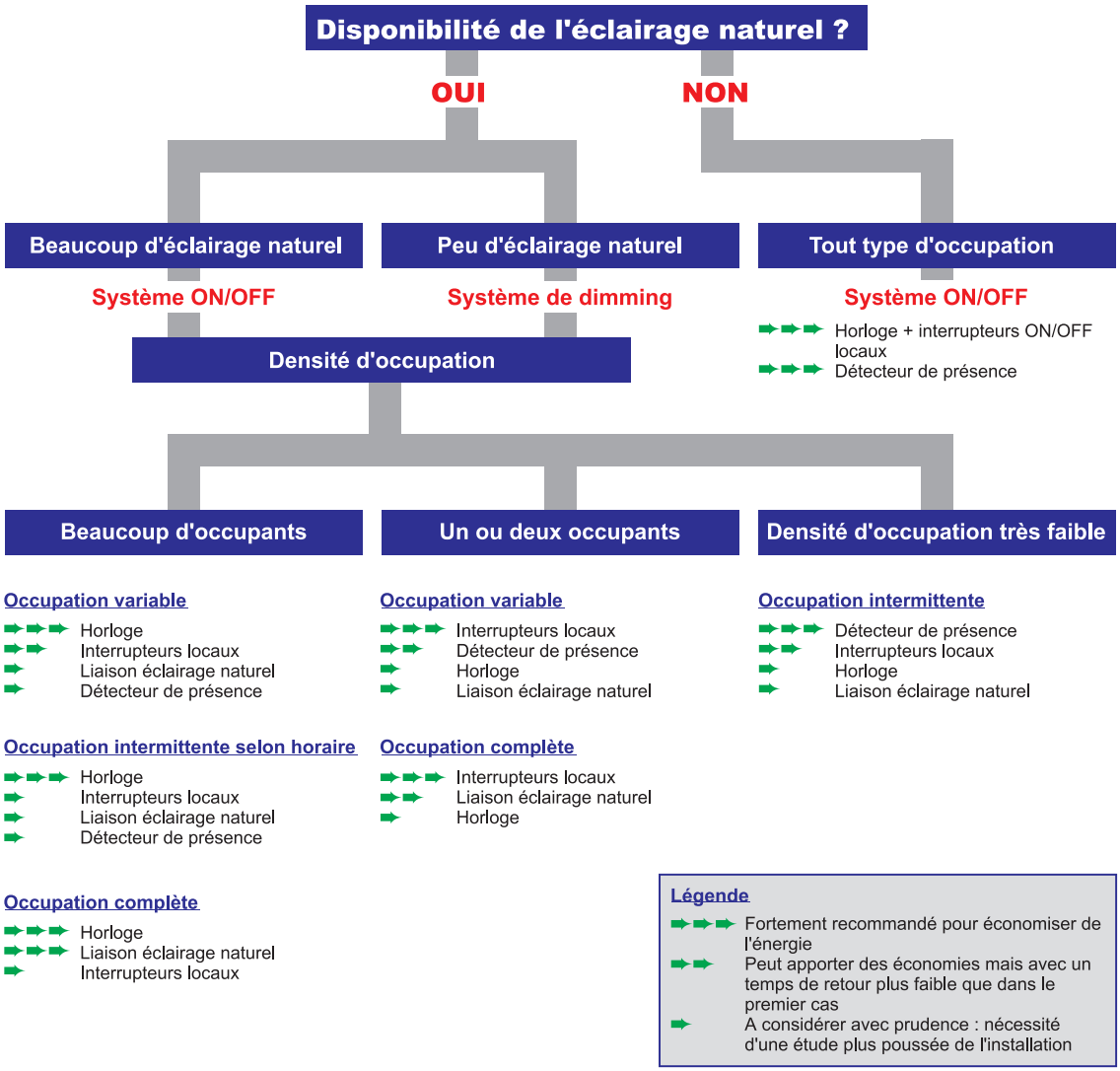


Figure 3.10

2.4 Impact du dimming en fonction de l'éclairage naturel

La gestion de l'éclairage artificiel par un système de dimming en fonction des disponibilités d'éclairage naturel nous semblant le mode de gestion le plus intéressant, nous avons décidé de nous limiter à celui-ci dans le cadre de cette thèse.
Les recherches bibliographiques ainsi que les résultats de calculs présentés dans ce rapport concernent donc uniquement ce mode de gestion.

Des recherches dans la littérature nous montrent qu'il est très difficile d'évaluer l'impact du dimming de l'éclairage artificiel en fonction des disponibilités d'éclairage naturel sur les consommations. Pour les immeubles de bureaux, équipés de fenêtres classiques (pas de système spécifique d'éclairage naturel), Szerman [Sze 1993] avance les valeurs (calculées par simulation) de 77 % d'économie d'éclairage, et de 14 % d'économie de consommation totale. Zeguers [Zeg 1993], lui, parle de 20 % d'économies d'éclairage. Embrechts [Emb 1997] a mesuré qu'un système individuel de dimming peut apporter de 20 à 40 % d'économies de consommation d'éclairage. Opdal [Opd 1995] a, quant à lui, comparé des résultats de calculs et de mesures et obtenu des valeurs d'économie d'éclairage de 40 % (calcul) et de 30 % (mesures).
Dans son cas, il n'a pas calculé de différences de consommation de chauffage et de refroidissement induite par la gestion de l'éclairage.
Zonneveldt [Zon 1993] prédit une diminution de la consommation d'éclairage pouvant aller jusqu'à 30 %. Quant à Rutten [Rut 1991], il parle de 46 % d'économie d'électricité réalisable

par la gestion de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel, pour le parc immobilier hollandais.
Andresen [And 1995] a calculé que pour Trondheim, en Norvège (63.5°N), on peut s'attendre à 40 ou 48 % d'économie d'éclairage, lors de l'utilisation d'un système de dimming de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel, respectivement pour les orientations nord et sud. Cependant, d'après des comparaisons avec des valeurs mesurées, il semblerait que ces valeurs soient surévaluées.
Sullivan et al [Sul 1992] a calculé qu'on pouvait atteindre 73% d'économies d'énergie d'éclairage, pour le climat Californien.
L'étude de la bibliographie donne donc des valeurs très différentes. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que de nombreuses hypothèses interviennent dans les résultats et que la modification d'une seule de ces hypothèses peut changer considérablement les résultats. Les valeurs présentées ci-dessus sont donc difficilement comparables entre elles puisqu'elles sont chacune propres à un climat, un bâtiment et un système d'éclairage particuliers. Cependant, tous les auteurs s'accordent pour dire que la gestion de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel peut apporter des économies d'énergie d'éclairage importantes mais que cette gestion ne peut pas se faire au détriment du confort visuel. Il faut aussi veiller à l'acceptabilité du système de gestion de l'éclairage, sous peine de le voir contrecarré par les occupants, ramenant ainsi les économies d'énergie à zéro [Emb 1997].

La première partie de notre étude, présentée dans ce chapitre, tente de vérifier si la prise en compte de l'éclairage naturel a un impact sur les consommations globales du bâtiment, sous le climat belge.
Elle a également comme objectif la comparaison de diverses configurations de façade, pour différents vitrages, en terme de consommation d'énergie d'éclairage et d'énergie globale.

Depuis quelques années, il existe des programmes qui permettent d'évaluer l'impact de la prise en compte de l'éclairage naturel sur les consommations d'éclairage artificiel.
Le programme SUPERLINK [Sze 1993], qui fait partie du package ADELINE, permet de calculer la consommation horaire d'éclairage artificiel en fonction de la configuration du local étudié et du système de gestion utilisé. De ces résultats, on peut déduire, non seulement la consommation annuelle d'éclairage du local considéré mais également la valeur horaire des gains internes d'éclairage artificiel. Le programme de simulation thermique TRNSYS 14.2 [Bla 1996] peut ensuite calculer les consommations globales du local ou du bâtiment considéré à partir des valeurs précises des gains internes d'éclairage.

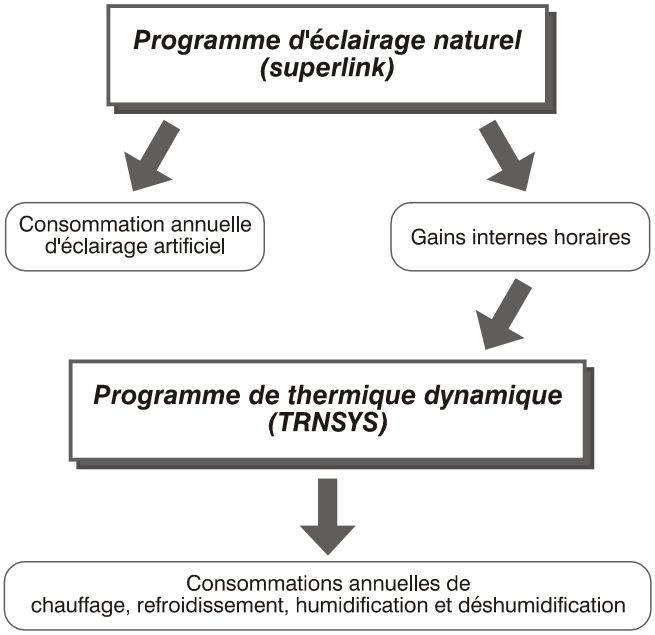


Figure 3.11 : Schéma général de simulation

Les calculs réalisés au cours de ce travail de thèse et présentés dans ce rapport nous apprennent, premièrement, que le coefficient de transmission lumineuse du vitrage, la

configuration de la façade, l'orientation de l'ouverture ainsi que la largeur du local ont une influence marquée sur les consommations d'éclairage artificiel. Nous observons également que les coefficients de réflexion des murs, qui caractérisent leur degré de clarté, ont une influence sur ces consommations. Les économies d'énergie d'éclairage réalisables par le dimming de l'éclairage artificiel varient entre 50 % et 80 % pour un vitrage ayant un coefficient de transmission lumineuse de 60 %.
Deuxièmement, pour le bâtiment simulé, la part, en terme de consommation primaire, de l'éclairage artificiel sur les consommations globales varie entre 40 et 50 %, lorsque aucune gestion de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel n'est mise en place. Lorsqu'on tient compte des disponibilités d'éclairage naturel, cette valeur atteint au minimum 7 % et au maximum 40 % des consommations globales.
Nous apprenons également que les effets des diminutions des charges d'éclairage par la prise en compte de l'éclairage naturel sur les consommations totales du bâtiment sont très importants. D'après les résultats des simulations, elles seraient de l'ordre de 40 % pour les vitrages couramment utilisés dans les immeubles de bureaux.

2.5 Résultats des simulations d'éclairage

Tous les résultats des calculs sont repris dans les graphiques placés en annexe 2. Ces graphiques représentent les valeurs de consommations annuelles d'éclairage artificiel par m^2 de surface au sol en fonction du coefficient de transmission lumineuse du vitrage.
Chaque page de 4 graphiques se réfère à une configuration de façade particulière (c1 à c9), pour une combinaison de photométrie de parois précise (p1, p2 ou p3).
Le numéro du local détermine quel graphique considérer. (Il est utile de rappeler que les locaux 2 et 3, ayant la même largeur, donneront les mêmes résultats de consommation d'éclairage artificiel). Il reste ensuite à se référer à la courbe correspondant à l'orientation choisie.

Attention, il faut garder en mémoire toutes les hypothèses de calcul lorsqu'on analyse les valeurs de consommations.
En effet, un changement dans les horaires d'occupation ou les caractéristiques d'efficacité lumineuse des lampes pourrait avoir des effets sensibles sur les valeurs des consommations.
Cette étude de sensibilité n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail.

Influence du coefficient de transmission lumineuse du vitrage sur les consommations d'éclairage

Assez logiquement, on remarque que plus le coefficient de transmission lumineuse augmente, moins on consomme d'éclairage artificiel.
Cependant cette diminution n'est pas linéaire. En effet, les calculs des consommations sont basés sur un seuil d'éclairement à atteindre (500 lux dans notre cas). A un moment donné, une fois que ce seuil est atteint, une augmentation des apports d'éclairage naturel n'a plus d'influence sur les consommations d'éclairage artificiel.

On peut donc dire que plus le coefficient de transmission lumineuse d'un vitrage est important, plus le bénéfice en terme de consommation d'énergie est important. Cependant au-delà d'une certaine valeur, les bénéfices diminuent.
Si on tient compte des aspects de confort lumineux, nous savons qu'il n'est pas toujours avisé de laisser pénétrer le maximum de lumière possible dans le local. Il n'est donc pas judicieux de conseiller l'utilisation d'un vitrage ayant un coefficient de transmission lumineuse très élevé, quel que soit le cas considéré.

Il existe un point particulier qui correspond au cas où le coefficient de transmission du vitrage est nul. Ce cas correspondrait en pratique à un local sans fenêtre, ce qui est irréaliste. Ce cas a été étudié pour simuler un local dont l'éclairage ne serait pas géré en fonction de l'éclairage naturel.
Dans ce cas, la consommation spécifique d'éclairage artificiel est identique :
- quelles que soient la surface et la configuration de la fenêtre, puisqu'on ne profite d'aucun éclairage naturel.
- quelle que soit l'orientation de l'ouverture, pour la même raison que ci-dessus.
- quelles que soient la surface au sol du local considéré ainsi que la photométrie des parois.

Ce dernier point nécessite une explication plus précise :

Cela provient en fait des hypothèses posées par le programme Superlink.
En effet, celui-ci considère :

1. que l'éclairage artificiel est uniformément réparti dans toute la pièce et est dimensionné pour répondre exactement à la valeur d'éclairement prescrite par la norme (500 lux, dans notre cas).
2. que le degré de clarté des parois n'influence pas la consommation d'éclairage artificiel.

Ces deux hypothèses sont simplistes car :

1. au niveau du dimensionnement de l'éclairage artificiel, la plus petite unité est le luminaire (ou même parfois la paire de luminaires, pour des raisons de symétrie). Les systèmes d'éclairage sont donc toujours plus ou moins surdimensionnés. Cependant, l'utilisation d'un ballast électronique dimmable permettant de graduer la lumière de manière à atteindre précisément la valeur de consigne d'éclairage sur le plan de travail permet de gommer cette différence de puissance spécifique installée provenant uniquement d'une différence de la taille du local à éclairer.
   L'hypothèse de l'utilisation d'un tel type de ballast dans notre cas nous permet donc de négliger ce surdimensionnement. Notons que cette hypothèse correspond assez bien au type de système qu'il convient d'installer actuellement dans les immeubles de bureaux afin de répondre aux critères d'utilisation rationnelle de l'énergie.

   Remarquons cependant qu'un ballast électronique dimmable ne permet pas de graduer l'éclairement de sa valeur maximale à sa valeur minimale de manière linéaire. Il existe toujours un seuil minimal en dessous duquel le ballast ne peut descendre. Ce seuil est nommé "Base load" et représente un certain pourcentage de la puissance électrique d'éclairage installée.
   Dans le cas de deux locaux ayant des puissances d'éclairage spécifiques différentes, cette fameuse consommation "de base" sera également différente et peux expliquer des consommations inégales pour des locaux de taille différente, quand le coefficient de transmission lumineuse est très grand.

2. le dimensionnement de tout système d'éclairage artificiel tient compte de la distribution lumineuse des luminaires et de la réflexion de l'éclairage sur les parois. Pratiquement, un local à parois claires nécessite donc une puissance d'éclairage moindre qu'un local à parois foncées, ce qui n'est pas pris en compte dans le programme.

Influence de la configuration de la façade sur les consommations d'éclairage

Si on classe les configurations dans l'ordre des consommations, on remarque que les différences de consommation entre les différentes configurations sont significatives. On obtient, pour tous les cas (largeur du local et photométrie des parois), de la configuration qui induit la consommation la plus faible vers celle qui induit la consommation la plus importante, le classement suivant :
c1-c3-c2-c4-c8-c5-c7-c9-c6.

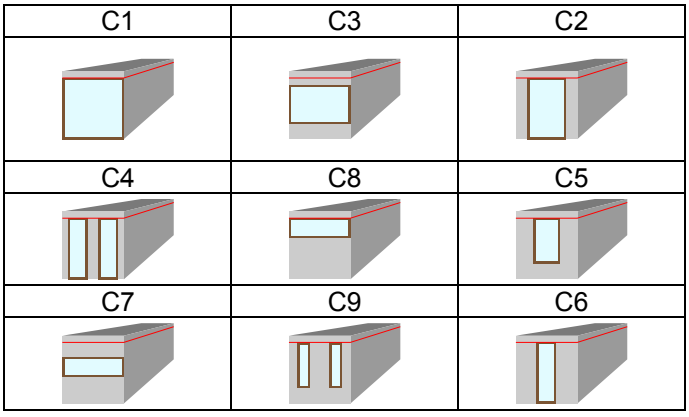


Figure 3.12 : Classement des configurations (de la moins consommatrice vers la plus consommatrice), à lire de gauche à droite et de haut en bas

Remarque
- Il faut bien garder en tête le fait que ce classement est strictement lié aux hypothèses décrites dans le chapitre 2. Si, par exemple, le capteur d'éclairage à partir duquel la régulation de l'éclairage artificiel est gérée était placé autre part qu'au centre du local, le classement serait modifié.

- A surfaces d'ouvertures égales, certaines configurations de fenêtre peuvent donner des résultats très proches, voir identiques. C'est surtout le cas pour un local de grande largeur, lorsque les parois sont de couleur claire, c'est à dire quand les apports de lumière naturelle sont importants.

Influence de l'orientation de l'ouverture sur la consommation d'éclairage

Les bureaux d'orientation nord consomment toujours plus. Viennent ensuite, dans l'ordre, les bureaux d'orientation Est, Ouest et Sud.
La différence entre l'orientation Est et l'orientation Ouest vient du fait qu'en Belgique le ciel est moins souvent couvert l'après-midi que le matin. La probabilité d'ensoleillement sur l'année est de 30 % plus importante pour l'après-midi que pour le matin.
Les résultats des simulations montrent également que, quand l'apport intérieur de lumière naturelle est important, c'est à dire quand le coefficient de transmission lumineuse est élevé et/ou que la taille de l'ouverture est importante, l'influence de l'orientation peut être minime voire nulle.
Cela s'explique de la manière suivante : pendant les heures de clarté, l'apport d'éclairage naturel est tellement important que le rayonnement diffus et réfléchi extérieur additionnés au rayonnement réfléchi intérieur permettent à eux seuls d'atteindre la valeur intérieure de consigne d'éclairage (500 lux). Le rayonnement solaire direct permet bien entendu d'augmenter cette valeur atteinte sur le plan de travail mais au-delà de la valeur de consigne. Il y aura donc une différence de clarté dans les locaux de différentes orientations mais celle-ci n'aura pas d'implication en terme de consommation électrique d'éclairage.

Influence de la taille du local sur la consommation d'éclairage

Plus le local est grand (à configuration de façade constante), moins la consommation d'éclairage artificiel par m^2 sera importante.
Cette observation est valable quelle que soit le type de configuration d'ouverture.
Elle est explicable par le fait que le capteur de lumière est placé au centre de chaque local. Ces locaux ont tous la même profondeur mais ont des largeurs différentes, ce qui fait que l'angle de vue du ciel à partir du point où le capteur se trouve est différent pour chaque local. Cet angle augmente lorsque la largeur du local augmente. La quantité de lumière naturelle atteignant le capteur étant directement proportionnelle à cet angle de vue, il est normal que les locaux de petite largeur consomment plus d'éclairage artificiel que les locaux de grande largeur.
La Figure 3.13 représente les différents angles de vue du ciel à partir du point central pour les 4 locaux différents.

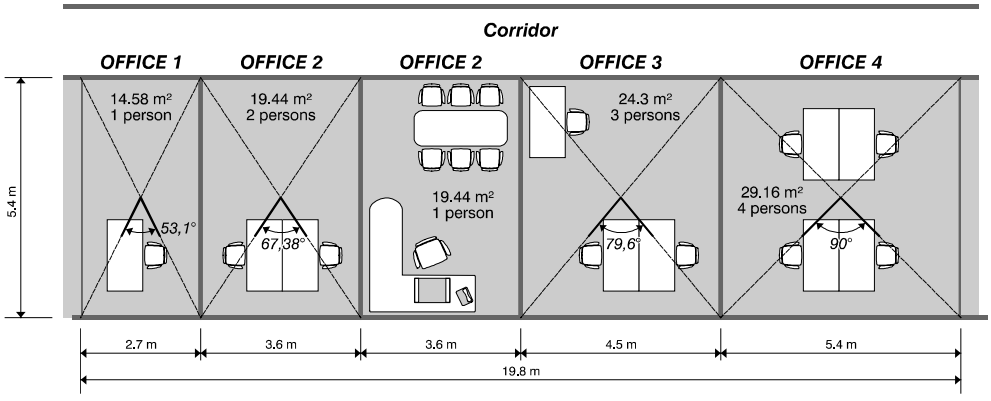


Figure 3.13 : Angles de vue du ciel pour les différents locaux

Ces différences de consommation entre les locaux sont d'autant plus marquées que les parois du local sont foncées.

Influence de la photométrie des parois sur la consommation d'éclairage

Logiquement, on remarque que, plus les parois intérieures du local sont foncées, plus celui-ci consommera d'éclairage artificiel. Mais les résultats montrent également que plus le local est foncé, plus la différence entre les configurations et les tailles de locaux est marquée.

Influence de la présence du système de gestion de l'éclairage sur la consommation d'éclairage artificiel

La Figure 3.14 présente les économies d'énergie réalisables par le dimming de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel disponible. Le vitrage choisi est un vitrage réfléchissant couramment utilisé dans les immeubles de bureau qui ne possèdent pas de système d'ombrage extérieur.

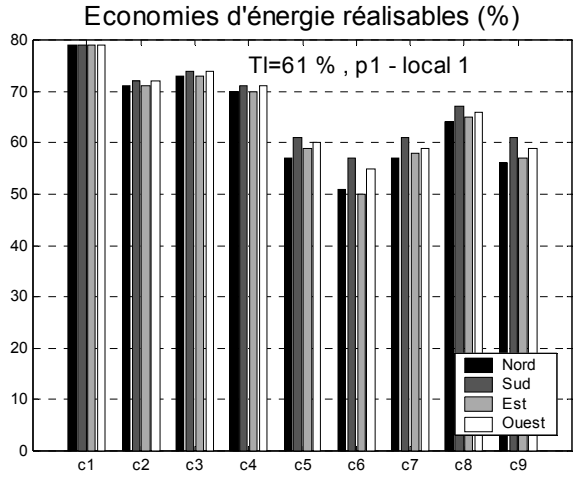


Figure 3.14: Economies d'énergie d'éclairage réalisables avec un vitrage de Tl = 61 %

Une analyse de la Figure 3.14 nous apprend que les économies d'énergies d'éclairage artificiel réalisables par la prise en compte de l'éclairage naturel sont très importantes, quelles que soient l'orientation et la configuration de la fenêtre. Pour un vitrage réfléchissant (TL = 61 %), elles varient de 50 à 80 %, pour un local de 2,7m de large.
Rappelons que ces résultats se basent sur une occupation journalière de 10h (de 8 à 18h), toute l'année.
Si l'on couple ce système de capteur d'éclairage naturel avec un détecteur de présence, on peut encore augmenter les économies.
Il faut cependant tempérer les résultats pas le fait que nous n'avons pas tenu compte d'éventuelles protections solaires qui seraient de toute façon indispensables pour limiter les problèmes d'éblouissement pour les fenêtres de toute autre orientation que le nord.
Cependant, le potentiel d'économie d'énergie est très important, même pour les façades d'orientation nord et cette piste devrait certainement être exploitée dans la mise en place de stratégies destinées à limiter les consommations d'énergie et les rejets de CO_2 et d'autres gaz toxiques dans l'atmosphère.

2.6 Part de la consommation d'éclairage artificiel sur la consommation totale du bâtiment

Calcul de la consommation globale du bâtiment

Pour calculer la part de l'éclairage et l'influence de la prise en compte de l'éclairage naturel sur la consommation globale du bâtiment, nous avons lié le programme de simulation d'éclairage à un programme multi zone dynamique de thermique : TRNSYS. Les consommations horaires d'éclairage artificiel, calculées par Superlink, et qui représentent les gains internes d'éclairage, sont introduites dans TRNSYS. Celui-ci calcule alors les besoins d'énergie de chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification, pour une année entière.

Les consommations électriques des appareils de bureautique et des pompes ne sont pas prises en compte dans le bilan réalisé ici.

Conversion des besoins net en énergie primaire

Il n'est pas correct d'additionner les différents besoins nets calculés par les logiciels Superlink et TRNSYS (chauffage, éclairage, refroidissement, …) de manière directe.
Nous travaillons donc en terme d'énergie primaire. Pour les consommations en gaz et mazout, le facteur de conversion utilisé est de 1 ; en ce qui concerne l'électricité, le facteur de conversion est de 2.8. Ces valeurs correspondent au parc belge de production d'électricité et nous ont été fournies par le producteur belge d'électricité ELECTRABEL. Nous devons également tenir compte des rendements moyens des diverses installations. Le Tableau 3.3 donne les valeurs de consommations primaires associées à la production de chaud, de froid et d'éclairage pour les différentes énergies.

		Rendement bâtiment moyen	Taux de conversion	Energie primaire (KWh)
Froid	Electricité	2.5	2.8	1.1
Chaud	Electricité	0.9	2.8	3.1
	Gaz	0.7	1	1.43
	Mazout	0.66	1	1.52
Eclairage	Electricité	0.9	2.8	3.1

Tableau 3.3 : Rendements et consommations d'énergie primaire associés aux différents type d'énergie

Lorsqu'il n'y a pas de gestion en fonction de l'éclairage naturel

Pour analyser l'effet de la gestion de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel, nous avons considéré que lorsque qu'aucune gestion n'est mise en place, l'éclairage artificiel est allumé à pleine puissance pendant la plupart de la journée. Nous avons juste tenu compte d'une certaine répartition des arrivées des employés en début de journée et de leurs départs en fin de journée, en limitant la puissance d'éclairage à 75 % de sa puissance totale pour la première et la dernière heure de travail de la journée.
Le Tableau 3.4 donne les pourcentages de consommation d'énergie primaire pour l'éclairage artificiel par rapport à la consommation totale pour deux configurations de façade différentes.
Nous avons considéré les deux cas extrêmes, c'est à dire le cas c1 (Svit/Ssol=50 %), et c6 (Svit/Ssol=16%). Les observations sont faites pour le local de 2,7 m de largeur (local 1).

local 1	**TI = 81 %**				**TI = 7 %**			
	Nord	**Sud**	**Est**	**Ouest**	**Nord**	**Sud**	**Est**	**Ouest**
c1	46 %	43 %	40 %	40 %	47 %	47 %	45 %	45 %
c6	53 %	54 %	51 %	51 %	52 %	52 %	52 %	52 %

Tableau 3.4 : Part de la consommation d'éclairage sur le consommation globale du bâtiment (énergie primaire) quand on ne profite pas de l'éclairage naturel

La conclusion que nous pouvons tirer de ces chiffres est que l'éclairage artificiel représente une part très importante des consommations totales d'un bâtiment. Celle-ci peut dépasser 50 % lorsque aucune gestion rationnelle de l'éclairage n'est mise en place. Attention, quand nous parlons de consommation globale du bâtiment, nous ne considérons ni la consommation des appareils de bureautique, ni celle des pompes du système HVAC.

Lorsqu'il y a gestion en fonction de l'éclairage naturel

Les Tableau 3.5 et Tableau 3.6 présentent les pourcentages de consommation d'énergie primaire pour l'éclairage artificiel par rapport à la consommation totale.
Le premier tableau se rapporte au cas où les parois sont de couleur claire, le second étant relatif à des parois de couleur foncée. Les cas considérés sont les mêmes que ceux analysés au point précédent (local 1, configurations c1 et c6).

local 1 p1	TI = 81 %				TI = 7 %			
	Nord	**Sud**	**Est**	**Ouest**	**Nord**	**Sud**	**Est**	**Ouest**
c1	9 %	8 %	7 %	7 %	33 %	22 %	30 %	29 %
c6	22 %	22 %	21 %	20 %	41 %	39 %	40 %	39 %

Tableau 3.5 : Part de la consommation d'éclairage sur la consommation globale du bâtiment (énergie primaire) lorsqu'on tient compte des apports d'éclairage naturel (local à parois claires)

local 1 p3	TI = 81 %				TI = 7 %			
	Nord	**Sud**	**Est**	**Ouest**	**Nord**	**Sud**	**Est**	**Ouest**
c1	14 %	12 %	11 %	11 %	35 %	33 %	33 %	32 %
c6	32 %	29 %	30 %	28 %	41 %	41 %	41 %	40 %

Tableau 3.6 : Part de la consommation d'éclairage sur la consommation globale du bâtiment (énergie primaire) lorsqu'on tient compte des apports d'éclairage naturel (local à parois foncées)

L'éclairage artificiel, lorsqu'il est pris en complément à l'éclairage naturel, représente une part de 7 % à 40 % de la consommation totale d'énergie, toute orientation confondue.

Si on étudie séparément les différentes orientations, nous obtenons les valeurs suivantes :
- Nord : de 9 à 35 %
- Sud : de 8 à 41 %
- Est : de 7 à 41 %
- Ouest : de 7 à 40 %.

Nous voyons donc que les plages de valeurs ne sont pas fortement influencées par l'orientation. Par contre, ces valeurs sont aussi bien influencées par les configurations de façades que par les types de vitrages.

2.7 Influence de la clarté des parois sur la consommation globale

Pour évaluer l'influence de la clarté des parois sur la consommation globale, nous comparons deux cas qui diffèrent uniquement par la clarté des parois. Dans un premier temps, nous réalisons cette comparaison pour deux vitrages différents : un double vitrage classique (v1 : k=2.8 W/m^{2}K, TI = 81 % et FS = 75 %) et un vitrage très opaque (v3 : k=2.3 W/m^{2}K, TI = 7 % et FS = 12 %). Nous traçons donc, à la Figure 3.15, les différences relatives de consommation globale entre le cas p3 et le cas p1.

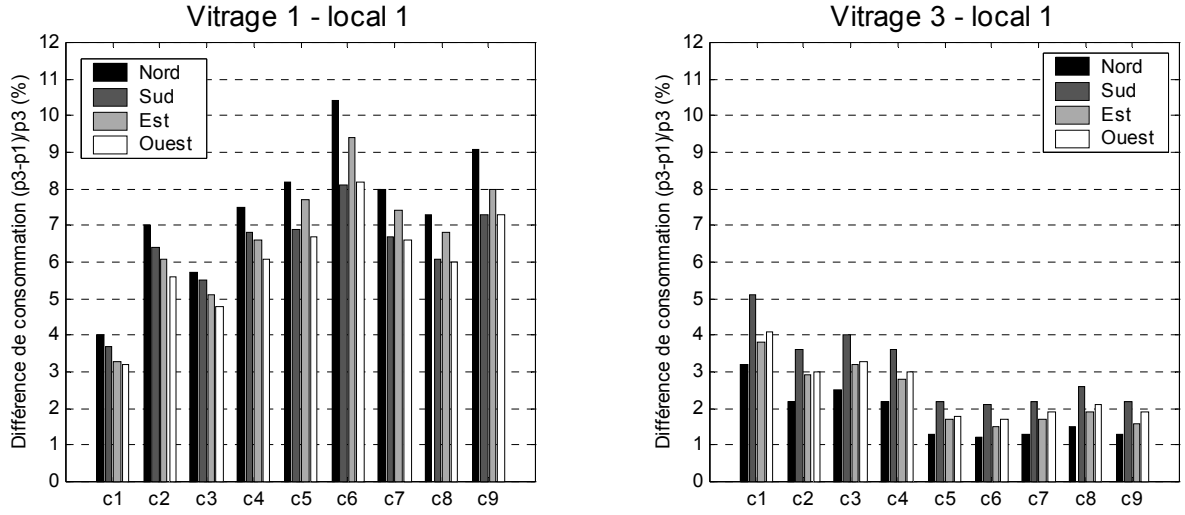


Figure 3.15 : Différences de consommation globale en énergie primaire entre les photométries p1 et p3 (cas des vitrages v1 et v3)

Les valeurs varient de 1.2 % à 10.4 %.
Quand le facteur de transmission lumineuse du vitrage est très important, c'est la configuration c1, qui profite des apports d'éclairage naturel les plus importants, qui est la moins influencée par la photométrie des murs. La configuration c6, qui est assez défavorable au point de vue de l'éclairage naturel, est la plus fortement influencée par la photométrie des parois.
Assez curieusement, cette observation s'inverse totalement pour le vitrage très opaque.

Nous pouvons expliciter ces résultats comme suit :

- Dans le cas du vitrage ayant un coefficient de transmission lumineuse de 7 %, la clarté de la paroi n'intervient que très peu car il y a très peu de soleil qui entre dans la pièce, sauf éventuellement pour une façade entièrement vitrée (c1). Sinon, on doit donc presque toujours éclairer artificiellement et comme la photométrie des parois n'intervient pas dans le calcul de l'éclairage artificiel réalisé par Superlink, les différences sont très faibles.

- Dans le cas du vitrage ayant un coefficient de transmission lumineuse de 81 % :
  Quand la fenêtre est très grande, la quantité de lumière naturelle qui pénètre dans le local est tellement importante qu'elle répond presque toujours à la demande, même quand les parois sont de couleur foncée. Le fait de remplacer ces parois par des parois plus claires n'a donc que très peu d'influence sur la consommation d'éclairage artificiel et donc sur la consommation totale.

Quand la fenêtre est très petite et que le coefficient de transmission lumineuse du vitrage est important, on se situe alors dans un cas intermédiaire. L'influence de la photométrie des parois est alors nettement plus importante.

Il est intéressant d'analyser les résultats obtenus pour un vitrage intermédiaire (v5 : k=1.4 W/m^2K, TI = 61 % et FS = 42 %).

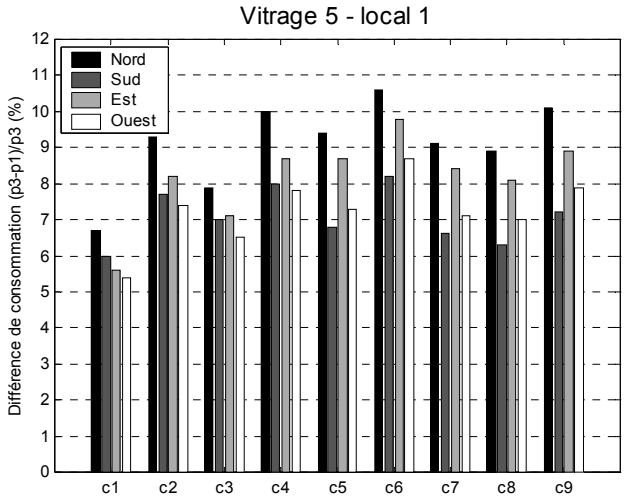


Figure 3.16 : Différences de consommation globale en énergie primaire entre les photométries p1 et p3 (vitrage v5)

La valeur moyenne est de 8 %.
En conclusion, on peut dire que le fait d'avoir des parois intérieures claires est toujours bénéfique en terme d'éclairage et plus particulièrement en terme de distribution de l'éclairage et donc de confort lumineux. Cependant, ce bénéfice n'est conséquent en terme de consommation que dans le cas de locaux bénéficiant d'apports moyens d'éclairage soit parce que le coefficient de transmission lumineuse du vitrage est très bas, soit parce que l'ouverture est relativement restreinte ou mal positionnée sur la façade.

2.8 Influence de la présence du système de gestion de l'éclairage sur la consommation globale

Nous évaluons maintenant l'impact de la présence d'un système de dimming de l'éclairage artificiel en fonction des disponibilités d'éclairage naturel sur les consommations globales du bâtiment.
Nous comparons donc les valeurs de consommation globale obtenues lorsqu'on ne tient pas compte des apports d'éclairage naturel (éclairage artificiel allumé toute la journée) avec les valeurs obtenues dans le même cas, lorsqu'on tient compte de disponibilité d'éclairage naturel au moyen d'un système de dimming.

Nous décidons de réaliser cette analyse pour un vitrage couramment utilisé dans les immeubles de bureau, c'est à dire le vitrage v5.

local 1	**Nord**	**Sud**	**Est**	**Ouest**
c1	42 %	43 %	39 %	39 %
c2	41 %	42 %	39 %	40 %
c3	42 %	43 %	40 %	40 %
c4	41 %	42 %	39 %	39 %
c5	36 %	39 %	37 %	37 %
c6	35 %	38 %	35 %	36 %
c7	36 %	39 %	37 %	37 %
c8	38 %	40 %	39 %	39 %
c9	36 %	39 %	37 %	37 %

Tableau 3.7 : Economies d'énergie primaire globale réalisées par le dimming en fonction de l'éclairage naturel pour un vitrage performant (Tl = 61%, FS = 42%, k=1.4 W/m²K)

En moyenne, les économies d'énergie réalisables valent 39 %. Par rapport à cette valeur de 39 %, on enregistre une variation dont l'intensité dépend de la configuration de façade étudiée et de son orientation.
Si nous réalisons le même type de calcul pour les différents vitrages choisis (toute la famille de vitrages utilisés actuellement dans les immeubles de bureaux), nous observons que les économies réalisables tournent toujours aux alentours de 40 % d'économie d'énergie primaire.
Des calculs pour des vitrages extrêmes nous donnent des valeurs minimales de 18 % et maximales de 55%.
Nous pouvons donc conclure que les économies d'énergie totale (chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification) réalisables par la prise en compte de la disponibilité de l'éclairage naturel sont de l'ordre de 40 % pour les vitrages couramment utilisés dans les immeubles de bureaux.
Elles pourraient même monter jusqu'à plus de 50 % pour un vitrage très performant (double vitrage sous vide).

2.9 Conclusion

Les valeurs élevées des gains d'énergie par l'utilisation de l'éclairage naturel peuvent surprendre. L'idéal serait de pouvoir comparer ces résultats avec des mesures réelles de consommation d'énergie, ce qui nous permettrait d'évaluer les performances du programme Superlink, pour le climat belge. Malheureusement, cette comparaison n'a pas pu être réalisée dans le cadre de ce travail de doctorat, par manque de mesures de ce type en Belgique.

En ce qui concerne les autres climats, il existe très peu de littérature décrivant de tels travaux. Seul Opdal [Opd 1995] a comparé des résultats de calculs réalisés au moyen de Superlink et des mesures. Dans son cas, les résultats des calculs surévaluaient d'environ 30 % les valeurs mesurées.
Par contre, Reinhart [Rei 2000], affirme que la combinaison de différents types de ciel au cours d'une année, réalisée par ADELINE, implique une sous-évaluation de l'éclairement atteint dans un local et donc des économies d'énergie d'éclairage possibles par la prise en compte de l'éclairage naturel.

Il est donc difficile de tirer des conclusions quand à la précision des résultats donnés par Superlink mais il est clair que le potentiel d'économies d'énergie provenant de la valorisation de l'éclairage naturel est très important, tant par la diminution des consommations d'éclairage que par le diminution des charges internes dissipées par les lampes.

Les limites de l'étude présentée ici sont les suivantes :
- la non prise en compte de protections solaires alors que pratiquement, les locaux de bureaux actuels en sont presque toujours équipés (au moins, de protections solaires intérieures). L'impact de ces protections sur le bénéfice apporté par l'éclairage naturel dépend fortement du type de gestion mise en place.
- la non prise en compte d'obstructions extérieures dues à la présence de bâtiments voisins. Cet aspect est également assez délicat à traiter car il doit être vu au cas par cas. Il faudrait aussi tenir compte du fait que les bâtiments voisins peuvent également réfléchir le soleil vers des façades qui ne devraient à priori pas, par leur orientation, profiter de soleil direct.

Les protections solaires et leur mode de gestion seront traités au chapitre 7.

3. Références

[And 1995] Andresen I., Aschehoug O., Thyholt M. : “Computer simulations of energy consumption for lighting, heating and cooling for an office using different light control strategies”, SINTEF report N° STF62 A95015, SINTEF Architecture and Building Technology, Trondheim, Norway, 1995.

[Bla 1996] Blair N. J., Begkman W.A., Klein S.A., Mitchell J.W. : "TRNSYS for Windows Packages", Proceedings of the 1996 Annual Conference of the American Solar Energy Society, Asheville, North Carolina, p. 297-301, April 13-18, 1996.

[Bod 1999] Bodart M., De Herde A.: "Guide d'aide à l'utilisation de l'éclairage artificiel en complément à l'éclairage naturel, pour un meilleur confort visuel et de substantielles économies d'énergie", Ministère de la Région Wallonne, 1999.

[Boy 1981] Boyce P. R.:"Human factors in lighting", *London: Applied Science Publisher,* 1981.

[Boy 1998] Boyce P. R.: "Lighting quality: the unanswered questions", Proceedings of first CIE symposium on Lighting Quality (1998, Ottawa, CANADA), p.72-84, 1998.

[Boy 2000] Boyce P. R., Eklund N., Simpson N.: "Individual lighting control: task performance, mood and illuminance", *Journal of the Illuminating Engineering Society, Volume 29, N°1, winter 2000,* p.131-142, 2000.

[BRE 1990] Building Research Establishment,:”Lighting controls and daylight use”, BRE Digest 272, 1990.

[Emb 1997] Embrechts R., Van Bellegem C.: "Increased Energy Savings by Individual Light Control", Proceedings of Right Light 4 (1997, Copenhagen, DK), p.179-182, 1997.

[Hed 1995] Hedge A., Sims W.R., Becker F.D.: "Effect of lensed-indirects and parabolic lighting on the satisfaction, visual health, and productivity of office workers", *Ergonomics*, vol. 38, p. 260-280, 1995.

[IBN 1972] Institut belge de normalisation: "Eclairage intérieur des bâtiments: principes généraux", NBN L 13-001, 1972.

[IBN 1979] Institut belge de normalisation: "Eclairage intérieur des bâtiments: principes généraux, addendum 1", NBN L 13-001, addendum 1, 1979.

[IBN 1992] Institut belge de normalisation: "Eclairage des lieux de travail", NBN L 13-006, février 1992.

[Kne 1997] Knez I.: "Change in females' and males' positive and negative moods as a result of variations in CCT, CRI and Illuminance levels", *Proceedings of Right Light 4 (1997, Copenhagen, DK),* p.149-154, 1997.

[Kül 1998] Küller R., Laike T.: "The impact of flicker from fluorescent lighting on well-being, performance and physiological arousal", *Ergonomics,* vol.41, n°4, p. 443-447, 1998.

[McC 1999] Mc Cloughan C.L.B., Aspinall P.A., Webb R.S. : "The impact of lighting on mood", *Lighting research and technology, 31(3)*, p.81-88, 1999.

[Mil 1998] Miller N.: "A recipe for lighting quality", Proceedings of first CIE symposium on Lighting Quality (1998, Ottawa, CANADA), p.40-47, 1998.

[Opd 1995] Opdal K., Brekke B.: "Energy saving in lighting by utilisation of daylight", *Proceedings of Right Light 3 (1995, Newcaste-upon-Tyne,UK)*, p.67-74, 1995.

[Rei 2000] Reinhart C., Herkel S.: "The simulation of annual daylight illuminance distributions – a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods", Energy and Buildings n°32, p.167-187, 2000.

[Rey 1963] Rey P., Rey J.P.: "Les effets comparés de deux éclairages fluorescents sur une tâche visuelle et des tests de fatigue", *Ergonomics*, vol. 6, p.393-401, 1963.

[Rut 1991] Rutten A. J. F.:"Daylight-controlled artificial lighting: a potential energy saver; right interior light by sky luminance tracking", *Proceedings of Right Light 1 (1991, Stockholm, S)*, p.47-56, 1991.

[Sch 1993] Schnegg P.: "Flicker and flickmeter", *Proceedings of Right Light 2 (1993, Arnhem, NL)*, p.396-405, 1993.

[Sla 1990] Slater A. I., Boyce P.: "Illuminance uniformity on desk: Where is the limit?", *Lighting Research and Technology,* 22, p.165-174*, 1990.*

[Sul 1992] Sullivan R., Lee E.S., Selkowitz S.:"A method of optimizing solar control and daylighting performances in commercialoffice buildings", LBL report n° 32931, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, 1992.

[Sze 1993] Szerman M., "Superlink: a computer tool to evaluate the impact of daylight – controlled lighting system onto the overall energetic behavior of buildings", Proceedings of Right Light 2, *(1993, Arnhem, NL)*, p.673-685, 1993.

[Vei 1994] Veitch J., "Full-spectrum lighting effects on performance, mood, and health", Internal report N° 659, available at the National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, June 1994.

[Vei 1995a] Veitch, J., McColl S. L.: "Modulation of fluorescent light: flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort", *Lighting Research and Technology*, 27, p.243-256, 1995.

[Vei 1995b] Veitch J., Newshman G.: "Quantifying lighting quality based on experimental investigations of end user performance and preference", *Proceedings Right Light 3, (1995, Newcastel-upon-Tyne, UK)*, p. 119-127, 1995.

[Vei 1996a] Veitch J., Newshman G. : "Determinants of lighting Quality I : State of the Science", Proceedings of the annual Conference of the Illuminating Engineering Society of North America, (1996, Cliveland, USA), 1996.

[Vei 1996b] Veitch J., Newshman G.: "Determinants of lighting Quality II : Research and Recommendations", Annual Convention of the American Psychological Association, (1996, Toronto, Canada), 1996.

[Wat 1995] Waters C.E., Mistrick R. G., Bernecker C. A.: "Discomfort glare from sources of nonuniform luminance", *Journal of The Illuminating Engineering So*ciety, 24 p.73-85, 1995.

[Wes 1968] West D.C., Boyce P.R.: "The effect of flickering on eye movements, Vision Research, 8, p.171-192, 1968.

[Wil 1986] Wilkins A. J.: "Intermittent illumination from visual display units and fluorescent lighting affects movements of the eyes across text", *Human Factors*, 28, p.75-81, 1986.

[Wil 1989] Wilkins A. J., Nimmo-Smith I., Slatter A. and Bedocs L.: "Fluorescent lighting, headaches and eyestrain", *Lighting Research and Technology*, 21, p. 11-18, 1989.

[Zeg 1993] Zeguers J.D.M.: "Energy-saving lighting electronics. A triple win: for the organization, for the human being and for the environment", *Proceedings of Right Light 2 (1993, Arnhem, NL)*, p.158-163, 1993.

[Zon 1993] Zonneveldt L., Rutten A.: "The electronic control of lighting", *Proceedings of Right Light 2 (1993, Arnhem,NL)*, p.151-157, 1993.

CHAPITRE 4. Les aspects thermiques

Le chapitre 4 est divisé en trois parties.
Après une brève introduction théorique traitant des aspects du confort thermique, nous présentons l'analyse des résultats de simulations qui a été faite en vue de donner des pistes quand au choix du vitrage, selon le cas dans lequel on se trouve.
Nous étudions ensuite l'influence de divers paramètres sur les consommations de chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification ainsi que sur les consommations totales (en ajoutant les consommations d'éclairage si c'est pertinent). Les paramètres étudiés sont les suivants : valeur des gains internes, stratégie et inertie thermique.
Nous terminons le chapitre en montrant comment le type de vitrage peut agir sur les consommations d'humidification et de déshumidification.

1. Le confort thermique 108
1.1 Le métabolisme 108
1.2 L'habillement 108
1.3 La température du corps 109
1.4 La température ambiante 109
1.5 La température des parois 109
1.6 L'humidité relative 109
1.7 La vitesse de l'air 109
1.8 Le confort thermique 109
1.9 Conclusion 111

2. Choix des vitrages 112
2.1 Etude générale 112
2.2 Etude configuration par configuration 115
2.3 Etude des écarts entre les différents vitrages 119
2.4 Conclusion 120

3. Influence de divers paramètres sur les consommations 122
3.1 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de chauffage 122
3.2 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de refroidissement 122
3.3 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation totale d'énergie primaire 123
3.4 Influence des gains internes sur les consommations de chauffage et de refroidissement 124
3.5 Influence des stratégies de refroidissement sur les consommations 126
3.6 Influence de l'inertie thermique sur la consommation totale d'énergie 129
3.7 Influence de l'inertie thermique sur la consommation de chauffage 131
3.8 Influence de l'inertie thermique sur la consommation de froid 131
3.9 Influence de l'inertie thermique sur le nombre d'heures de surchauffe 131
3.10 Influence du type de vitrage sur les consommations d'humidification et de déshumidification 133
3.11 Conclusion 136

4. Références 138

1. Le confort thermique

La sensation de confort thermique est l'expression du bien-être d'un individu en rapport avec la chaleur. Elle est le résultat de l'interaction entre l'individu et son environnement [DeH 1992].
Le niveau de confort thermique est influencé par l'activité et la tenue vestimentaire de l'individu d'une part et par les caractéristiques physiques de l'ambiance dans laquelle il se trouve, d'autre part.

Mais la sensation de confort peut aussi être influencée par d'autres éléments comme l'état de santé, l'âge ou l'état psychologique de l'individu.

La sensation de confort thermique dépend de 7 paramètres. Trois sont relatifs à l'individu :
- le métabolisme
- l'habillement
- la température du corps

Les quatre autres concernent l'ambiance dans laquelle l'occupant se trouve :

- la température ambiante
- la température des parois
- l'humidité relative
- la vitesse de l'air

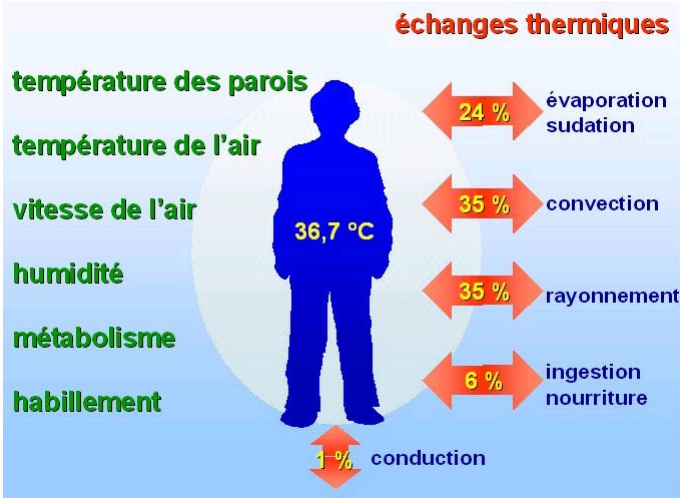


Figure 4.1 : Paramètres influençant le confort thermique

1.1 Le métabolisme

Le métabolisme représente la production de chaleur interne du corps humain nécessaire pour le maintenir à la température constante de 36,8°C. La température du corps humain étant généralement supérieure à celle de l'ambiance, il doit donc compenser les pertes de chaleur vers celle-ci. Le métabolisme est représenté par l'effort physique dépensé dans une activité, rapporté à l'unité de surface du corps de l'individu: il s'exprime en W/m^2.

Le métabolisme de base est celui d'un individu normalement constitué et au repos. Il est évalué à environ 45 W/m^2, soit un effort de 80 W pour une surface du corps humain fixée en moyenne à 1,8 m^2.
Le métabolisme de travail s'ajoute au métabolisme de base afin de compenser le travail effectué par l'individu par une production de chaleur supplémentaire.

1.2 L'habillement

L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur qui ont lieu entre la surface de la peau et l'ambiance.

1.3 La température du corps

La température du corps prise en considération est la température de surface du corps ou température de la peau. Celle-ci n'est pas constante: elle varie principalement en fonction du métabolisme et de l'habillement.

1.4 La température ambiante

La température ambiante est un des facteurs les plus importants car plus de 50% des pertes de chaleur du corps humain se font par convection et évaporation avec l'air ambiant.

1.5 La température des parois

La température de surface des parois, dite température moyenne de rayonnement, est la moyenne des températures des parois qui délimitent l'ambiance considérée, proportionnellement à leurs surfaces. Ce paramètre influence principalement les pertes de chaleur par rayonnement et subsidiairement les pertes par conduction à l'endroit des contacts entre l'individu et les parois.

1.6 L'humidité relative

L'humidité relative de l'air est le rapport exprimé en % entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à la même température. Ce facteur influence le confort du fait que les échanges thermiques ont lieu également par évaporation à la surface de la peau. Entre 30% et 70%, l'humidité relative n'influence pratiquement pas la sensation de confort thermique.

1.7 La vitesse de l'air

La vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

1.8 Le confort thermique

Comme le corps humain se trouve à une température interne constante et qu'il ne s'y produit pas d'accumulation de chaleur, il ne peut que perdre la chaleur produite par le métabolisme. Lorsqu'il y a équilibre entre la production de chaleur interne et les pertes thermiques du corps, la sensation de confort thermique est optimale. Cet équilibre dépend des sept paramètres du confort thermique et plus précisément de six d'entre eux: en effet, la température de la peau est fonction du métabolisme et de l'habillement. Le confort thermique dépend donc du métabolisme, de l'habillement, de la température ambiante, de la température de surface des parois, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air. Chaque combinaison des six paramètres donne un niveau de confort ou d'inconfort thermique. D'autres combinaisons des paramètres peuvent donner le même niveau de confort ou d'inconfort. Enfin, certaines combinaisons donnent le niveau de confort thermique optimal: chacune de ces combinaisons est définie par la température de confort thermique appelée température opérative optimale.

Mais le corps humain possède un mécanisme de régulation qui, sans intervention de la volonté de l'individu, adapte ses pertes de chaleur aux conditions thermiques de l'ambiance. Ce mécanisme d'autorégulation laisse apparaître une zone où les variations de sensation de confort thermique est faible: c'est la zone dite de confort thermique. Ainsi, dans une situation donnée, la température opérative peut varier dans une certaine mesure autour de la température de confort thermique sans que le niveau de confort thermique de l'individu ne soit modifié. Il existe donc pour chaque situation une plage de températures confortables. C'est ce qui explique qu'en été la température opérative peut être élevée afin d'éviter aussi l'effet du choc thermique lorsqu'une personne pénètre dans un bâtiment.
Cette zone étant déterminée, la sensation de confort peut aussi être influencée par d'autres éléments comme l'état de santé, l'âge ou l'état psychologique de l'individu. Dans chacun de ces cas, il faudra admettre une température d'ambiance différente qui peut être située hors de la zone de confort thermique. De plus, la qualité ou "chaleur" humaine qui entoure l'individu participe à la sensation de confort ou d'inconfort. Enfin, la possibilité d'une intervention personnelle sur la détermination des caractéristiques de l'ambiance de son lieu d'activité est importante si on veut éviter tout sentiment de frustration ou d'enfermement et donc d'inconfort.

La Figure 4.2 considère le sentiment de confort thermique tel qu'il est exprimé par les sujets eux-mêmes. Il s'agit de pourcentages prévisibles d'insatisfaits (PPD), exprimés sur l'axe vertical, pour des personnes au repos en position assise ou effectuant un travail léger, en fonction de la température de l'air. On remarque qu'il est impossible de définir une température qui convienne à tous : il reste au mieux 5 % d'insatisfaits. La courbe représentant le travail léger glisse vers les basses températures : les personnes ayant plus de chaleur à perdre préfèrent des températures plus basses. Par contre, la courbe des sujets au repos est plus resserrée : ces personnes sont plus sensibles à de faibles variations de température.

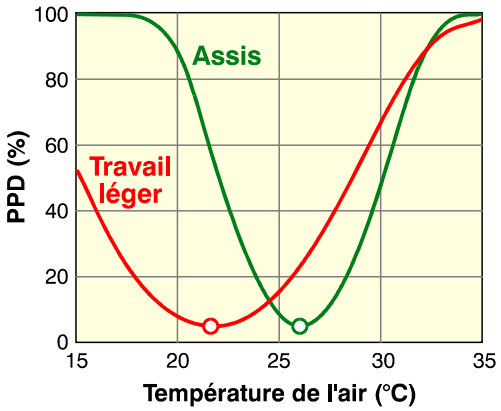


Figure 4.2 : Pourcentage prévisible d'insatisfaits en fonction de l'activité

Le Règlement Général pour la protection du travail (RGPT), dans son article 64 du titre II, impose des températures de l'air minimum-maximum en fonction du travail effectué, c'est à dire du métabolisme, pour une humidité relative comprise entre 40 et 70%.

Les valeurs de référence admises pour les températures de l'air sont données dans le Tableau 4.1. Celles-ci sont calculées pour une valeur moyenne de surface des parois inférieure de 2°C à la température de l'air. Ces valeurs peuvent être minorées si la différence est plus petite et doivent être majorées si la différence est plus grande.

Type de local	Température de l'air
Locaux où des gens habillés normalement sont au repos ou exercent une activité physique très légère. par ex.: bureaux, salles de cours, salles d'attente, restaurants, salles de réunion ou de conférence.	21°C
Locaux où des gens peu ou pas habillés sont au repos ou exercent une activité physique très légère. par ex.: salles d'examens ou soins médicaux, vestiaires.	23 à 25 °C
Locaux où des gens habillés normalement exercent une activité physique légère. par ex.: ateliers, laboratoires, cuisines	17°C
Locaux où des gens peu habillés exercent une grande activité physique. par ex.: salles de gymnastique, salles de sport	17°C
Locaux qui ne servent que de passage pour des gens habillés normalement. par ex.: corridors, cages d'escalier, vestiaires, sanitaires	17°C
Locaux uniquement gardés à l'abri du gel. par ex.: garages, archives	5°C

Tableau 4.1 : Valeurs de référence de température de l'air (RGPT)

Il faut remarquer que ces valeurs de référence, bien qu'elles se trouvent dans la zone de confort, ne sont pas les températures d'ambiance optimales de confort. Elles sont plus basses que celles-ci et sont acceptées dans le cadre d'une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie.

1.9 Conclusion

Bien que les conditions de confort thermique ne soient pas identiques pour tous les individus, nous remarquons que les critères de confort thermique sont nettement mieux définis que ceux qui régissent le confort visuel.

Nous voyons qu'il est possible de satisfaire une majorité de personnes en fixant des conditions de température et d'humidité relative, en fonction de l'activité exercée dans le local.
C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de fixer des températures de consigne ainsi que des valeurs d'humidité relative à respecter dans les locaux de bureaux au cours de l'année.
Le respect de ces températures garantira pratiquement le confort thermique dans le local considéré. Dans la suite de ce travail, nous ne parlerons donc plus de confort thermique mais bien de respect des températures et des valeurs d'humidité relative durant et en dehors des heures d'occupation du local.

2. Choix des vitrages

2.1 Etude générale

Le nombre total de simulations thermiques réalisées dans le cadre de cette étude s'élève à 17496 (9 configurations x 3 photométries x 4 orientations x 6 stratégies x 3 types de gains internes x 9 vitrages). Pour chacune de ces simulations, nous avons les résultats pour 5 locaux.
Nous avons donc réalisé le classement de 9 vitrages pour 9720 cas différents (17496 x 5 locaux / 9 vitrages). Il est dès lors clair que nous ne pouvons pas étudier les résultats obtenus pour chaque cas différent et que nous devons donc procéder par des analyses statistiques.

Premièrement, il nous a semblé intéressant d'établir des statistiques quand au choix du vitrage. En effet, nous savons que la modification de certains paramètres influence le choix du vitrage mais il apparaît également que certains vitrages ne seront jamais choisis comme le meilleur vitrage. Le Tableau 4.2 rappelle les caractéristiques des vitrages testés.
Les Tableau 4.3, Tableau 4.4 et Tableau 4.5 synthétisent tous les cas calculés pour la réalisation de l'outil.
Nous avons calculé combien de fois chaque vitrage apparaît comme le meilleur vitrage dans les cas étudiés. Nous nous rapportons toujours aux consommations d'énergie primaire. C'est à dire que les rendements des installations de chauffage, de refroidissement et d'éclairage sont pris en compte dans les calculs de consommations, ainsi que les valeurs de conversion de la demande d'énergie en énergie primaire, selon les valeurs données au chapitre 3.
Dans le cas des stratégies 1 et 2, nous considérons que le meilleur vitrage est le vitrage entraînant la plus petite consommation d'énergie primaire totale (chaud, froid, humidification, déshumidification et éclairage).
Dans le cas des stratégies 3, 4, 5 et 6, nous considérons que le meilleur vitrage est le vitrage entraînant la plus petite consommation d'énergie primaire totale (chaud, humidification et éclairage) tout en respectant les conditions relatives aux heures de surchauffe (pas plus de 100 heures au-dessus de 25,5 °C et pas plus de 20 heures au-dessus de 28°C).
La colonne de droite des Tableau 4.3, Tableau 4.4 et Tableau 4.5, intitulée "total" permet de voir s'il existe au moins un vitrage permettant d'atteindre le confort, pour chaque cas considéré (pour les stratégies 3, 4, 5 et 6). Si le total est inférieur à 180 (qui est égal au nombre de cas traités par ligne), c'est que le confort n'est pas atteint dans tous les cas. Si le total vaut 0, c'est que le confort n'est jamais atteint pour la stratégie étudiée, quel que soit le cas et le vitrage considérés.

Nom du vitrage	k (W/m^2K)	FS (%)	TI (%)	Notation
Double vitrage ordinaire	2.8	75	81	v1
SN150	2.7	47	45	v2
SS108	2.3	12	7	v3
KN155	1.5	36	49	v4
KN169	1.4	42	61	v5
SKN172	1.4	37	64	v6
PLTfut	1.4	57	69	v7
70/40	1.4	38	70	v8
Vide	0.7	64	74	v9

Tableau 4.2: Caractéristiques des vitrages testés

stratégie	configuration	gains internes	photométrie	local	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	Total
1	1 à 9	F	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	3	46	92	39	180
2	1 à 9	F	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	5	55	89	31	180
3	1 à 9	F	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	F	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	F	p1	1 à 5	0	0	61	7	0	0	49	29	25	171
6	1 à 9	F	p1	1 à 5	0	0	27	0	0	0	31	36	86	180
				tot	0	0	88	7	0	8	181	246	181	
1	1 à 9	M	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	4	58	98	20	180
2	1 à 9	M	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	5	46	115	14	180
3	1 à 9	M	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	M	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	M	p1	1 à 5	0	4	62	1	0	0	46	33	20	166
6	1 à 9	M	p1	1 à 5	0	0	36	3	0	0	51	24	66	180
				tot	0	4	98	4	0	9	201	270	120	
1	1 à 9	E	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	6	41	126	7	180
2	1 à 9	E	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	5	37	137	1	180
3	1 à 9	E	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	E	p1	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	E	p1	1 à 5	0	0	68	2	0	0	19	48	20	157
6	1 à 9	E	p1	1 à 5	0	0	45	4	0	0	62	20	49	180
				tot	0	0	113	6	0	11	159	331	77	

Tableau 4.3 : Synthèses de tous les calculs réalisés, nombre de fois que le vitrage est choisi, photométrie p1

stratégie	configuration	gains internes	Photométrie	local	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	Total
1	1 à 9	F	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	54	95	31	180
2	1 à 9	F	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	58	95	27	180
3	1 à 9	F	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	F	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	F	p2	1 à 5	0	0	61	4	0	1	50	28	24	168
6	1 à 9	F	p2	1 à 5	0	0	27	3	0	0	36	33	81	180
				tot	0	0	88	7	0	1	198	251	163	
1	1 à 9	M	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	61	101	18	180
2	1 à 9	M	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	50	120	10	180
3	1 à 9	M	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	M	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	M	p2	1 à 5	0	0	66	1	0	0	44	35	20	166
6	1 à 9	M	p2	1 à 5	0	0	37	2	0	0	52	24	65	180
				tot	0	0	103	3	0	0	207	280	113	
1	1 à 9	E	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	44	132	4	180
2	1 à 9	E	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	40	140	0	180
3	1 à 9	E	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	E	p2	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	E	p2	1 à 5	0	0	62	1	0	0	19	48	17	147
6	1 à 9	E	p2	1 à 5	0	0	45	5	0	2	62	20	46	180
				tot	0	0	107	6	0	2	165	340	67	

Tableau 4.4 : Synthèses de tous les calculs réalisés, nombre de fois que le vitrage est choisi, photométrie p2

stratégie	configuration	gains internes	Photométrie	local	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	Total
1	1 à 9	F	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	60	93	27	180
2	1 à 9	F	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	68	96	16	180
3	1 à 9	F	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	F	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	F	p3	1 à 5	0	0	63	5	0	0	50	29	21	168
6	1 à 9	F	p3	1 à 5	0	0	27	4	0	0	37	32	80	180
				tot	0	0	90	9	0	0	215	250	144	
1	1 à 9	M	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	67	101	12	180
2	1 à 9	M	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	58	120	2	180
3	1 à 9	M	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	M	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	M	p3	1 à 5	0	0	65	1	0	0	43	36	20	165
6	1 à 9	M	p3	1 à 5	0	0	39	1	0	0	56	23	61	180
				tot	0	0	104	2	0	0	224	280	95	
1	1 à 9	E	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	49	131	0	180
2	1 à 9	E	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	42	138	0	180
3	1 à 9	E	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1 à 9	E	p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 à 9	E	p3	1 à 5	0	0	59	2	0	0	15	51	16	143
6	1 à 9	E	p3	1 à 5	0	0	45	7	0	0	62	22	44	180
				tot	0	0	104	9	0	0	168	342	60	

Tableau 4.5: Synthèses de tous les calculs réalisés, nombre de fois que le vitrage est choisi, photométrie p3

Les tableaux nous montrent que :
- Le confort n'est jamais atteint lorsqu'il n'y a pas de système de refroidissement ni de ventilation nocturne, quel que soit le vitrage considéré (stratégies 3 et 4).
- Le confort n'est pas toujours atteint lorsqu'il n'y a pas de système de conditionnement d'air et qu'on met en place une stratégie de ventilation nocturne, dans le cas d'un bâtiment présentant peu d'inertie (stratégie 5).

Le Tableau 4.6 représente en pourcentage, le nombre de fois que chaque vitrage apparaît comme meilleur vitrage.
Nous observons donc que la stratégie mise en place a une influence très marquée sur le choix du vitrage. En effet, par exemple, les vitrages 3 et 4, qui n'apparaissent jamais comme meilleurs vitrages dans le cas des stratégies 1 et 2, peuvent prendre cette place dans le cas des stratégies 5 et 6.

	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9
strat 1 et 2	0 %	0 %	0 %	0 %	0%	1 %	29 %	62 %	8 %
strat 5 et 6	0 %	0 %	29 %	2 %	0 %	0 %	26 %	19 %	25 %

Tableau 4.6 : nombre de fois que chaque vitrage apparaît comme meilleur vitrage

Une première conclusion de cette étude est qu'il est essentiel de tenir compte de la présence ou de l'absence d'un système de conditionnement d'air lorsqu'on choisit le vitrage du bâtiment.

Le Tableau 4.7 reprend des valeurs déjà présentées dans le Tableau 4.3, mais organisé d'une autre manière et exprimés sous forme de pourcentage, afin d'analyser l'influence des gains internes sur le choix du vitrage.

stratégie	configuration	gains internes	photométrie	local	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9
1	1 à 9	F	p1	1 à 5	0%	0%	0%	0%	0%	2%	26%	51%	22%
1	1 à 9	M	p1	1 à 5	0%	0%	0%	0%	0%	2%	32%	54%	11%
1	1 à 9	E	p1	1 à 5	0%	0%	0%	0%	0%	3%	23%	70%	4%
6	1 à 9	F	p1	1 à 5	0%	0%	15%	0%	0%	0%	17%	20%	48%
6	1 à 9	M	p1	1 à 5	0%	0%	20%	2%	0%	0%	28%	13%	37%
6	1 à 9	E	p1	1 à 5	0%	0%	25%	2%	0%	0%	34%	11%	27%

Tableau 4.7 : Influence des gains internes sur le choix du vitrage, pour deux stratégies différentes

Ce tableau nous montre que les gains internes ont une grande influence sur le choix du vitrage. En effet, si on étudie le cas de la stratégie 1, l'augmentation des gains internes induit une plus grande occurrence de v8 comme meilleur vitrage alors que v9 perd de son intérêt.
Par contre dans le cas de la stratégie 6, l'augmentation des gains internes induit une diminution de l'intérêt de v8 au profit de v3 et v7.

Le Tableau 4.8 reprend également des résultats provenant des Tableau 4.3, Tableau 4.4 et Tableau 4.5, exprimés sous forme de pourcentages. Son but est de montrer, par deux exemples, l'influence des coefficients de réflexion des parois intérieures du local sur le choix du vitrage.

stratégie	configuration	gains internes	photométrie	local	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9
1	1 à 9	F	p1	1 à 5	0%	0%	0%	0%	0%	3%	26%	64%	8%
1	1 à 9	F	p2	1 à 5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	53%	17%
1	1 à 9	F	p3	1 à 5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	52%	15%
6	1 à 9	F	p1	1 à 5	0%	0%	15%	0%	0%	0%	17%	20%	48%
6	1 à 9	F	p2	1 à 5	0%	0%	15%	2%	0%	0%	20%	18%	45%
6	1 à 9	F	p3	1 à 5	0%	0%	15%	2%	0%	0%	21%	18%	44%

Tableau 4.8 : Influence des photométries sur le choix du vitrage, pour deux stratégies différentes

Nous remarquons que la clarté des parois intérieures a aussi une influence sur le choix des vitrages mais cette influence est moins marquée que celle des gains internes.

2.2 Etude configuration par configuration

Les Tableau 4.9 et Tableau 4.10 reprennent le même type de résultat en séparant les différentes configurations.
Leur intérêt est directement plus concret que celui des tableaux précédents :
En effet, lors de la conception d'un immeuble de bureaux, la plupart des paramètres intervenant dans le choix du vitrage ne sont pas déterminés (couleur des parois, équipement informatique, etc.). Même si ces paramètres sont déterminés, rien ne prouve qu'ils ne seront pas modifiés en cours de vie du bâtiment.
Par contre, nous jugeons acceptable de faire l'hypothèse que la géométrie des façades est choisie une fois pour toute et que les orientations des différents locaux sont connues. Nous fixons également le type de stratégie (avec système de refroidissement ou sans système de refroidissement, inertie accessible ou pas).

stratégie	configuration	gains internes	photométrie	local	**v1**	**v2**	**v3**	**v4**	**v5**	**v6**	**v7**	**v8**	**v9**	total
1 à 2	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	28	0	332	0	360
1 à 2	2	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	35	324	1	360
1 à 2	3	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	32	327	1	360
1 à 2	4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	35	324	1	360
1 à 2	5	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	165	142	53	360
1 à 2	6	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	177	143	40	360
1 à 2	7	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	162	146	52	360
1 à 2	8	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	159	139	62	360
1 à 2	9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	169	142	49	360
					0%	0%	0%	0%	0%	1%	29%	62%	8%	

Tableau 4.9 : Nombre de fois que le vitrage est choisi comme meilleur vitrage, stratégies 1 et 2

stratégie	configuration	gains internes	photométrie	local	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	
5 à 6	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	240	11	0	0	15	45	0	311
5 à 6	2	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	4	168	13	0	1	50	76	19	331
5 à 6	3	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	172	13	0	1	50	76	19	331
5 à 6	4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	174	15	0	1	50	73	18	331
5 à 6	5	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	30	0	0	0	124	58	143	355
5 à 6	6	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	27	1	0	0	124	64	136	352
5 à 6	7	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	27	0	0	0	123	62	140	352
5 à 6	8	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	30	0	0	0	123	55	148	356
5 à 6	9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	27	0	0	0	125	62	138	352
					0%	0%	29%	2%	0%	0%	26%	19%	25%	

Tableau 4.10 : Nombre de fois que le vitrage est choisi comme meilleur vitrage, stratégies 5 et 6

Observations

Les Tableau 4.9 et Tableau 4.10 nous confirment le fait que la stratégie intervient dans le choix du vitrage.
Lorsqu'on a un système de conditionnement d'air, le vitrage qui revient très souvent comme meilleur vitrage est le 70/40. Viennent ensuite dans l'ordre les PLTfut, vide et SKN172. Le vitrage 70/40, qui présente un très bon coefficient de transmission lumineuse par rapport à facteur solaire, est donc un vitrage fort intéressant dans les immeubles de bureaux, lorsqu'on a un système de conditionnement d'air.
Lorsqu'on n'a pas de conditionnement d'air, on trouve, dans l'ordre, le SS108, le PLTfut, le vide, le 70/40 et le KN155. Il est assez inquiétant de retrouver le SS108 comme meilleur vitrage, vu son très faible coefficient de transmission lumineuse, mais il s'agit de cas pour lesquels c'est le seul vitrage qui permette d'atteindre des conditions de confort thermique !

Les Tableau 4.11 et Tableau 4.12 détaillent les résultats déjà synthétisés dans les Tableau 4.9 et Tableau 4.10, mais en séparant les différentes orientations et en regroupant les cas relatifs à des surface vitrées identiques.
En analysant ces tableaux, nous observons de grandes tendances :

Stratégies 1 et 2 (Tableau 4.11)

Stratégies 1 et 2														
orientation	config.	gains internes	Photom.	locaux	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	total
Nord	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	25	0	65	0	90
Nord	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	102	165	3	270
Nord	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	293	2	155	450
Sud	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	90	0	90
Sud	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	270	0	270
Sud	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	234	116	100	450
Est	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	3	0	87	0	90
Est	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	270	0	270
Est	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	133	317	0	450
Ouest	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	90	0	90
Ouest	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	0	270	0	270
Ouest	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	172	277	1	450

Tableau 4.11: Meilleurs vitrages, classés par orientations et tailles de surfaces vitrées, stratégies 1 et 2

Configuration c1
Pour une grande surface vitrée (c1), on préférera pour l'orientation Nord un vitrage de type SKN172 ou 70/40. Pour les trois autres orientations, c'est le vitrage 70/40 qui est le meilleur dans pratiquement tous les cas. Ces deux vitrages présentent des rapports TI/FS élevés. (1.75 et 1.84) tout en ayant un facteur solaire assez faible. Ils favorisent donc la transmission de la partie visible du spectre solaire.
Nous retenons de ce fait que pour une grande surface vitrée, il est essentiel de choisir un vitrage spectralement sélectif qui laisse passer un maximum de lumière et un minimum de chaleur.

Configurations c2 à c4
Pour une surface vitrée moyenne (c2 à c4), un vitrage tel que le PLTfut (vitrage présentant un plus grand facteur solaire et une meilleure transmission lumineuse que les deux vitrages intéressants pour la configuration c1) est assez souvent intéressant pour le Nord.
Le 70/40 reste le plus intéressant pour tous les autres cas.
Nous retenons donc que lorsque la façade n'est pas complètement vitrée, on éprouve déjà un besoin plus important de laisser pénétrer la chaleur pour les fenêtres d'orientation nord.
On choisit donc un vitrage ayant un facteur solaire plus élevé que dans le cas précédent.

Configurations c5 à c9
Dans ce cas-ci, on voit une nette diminution de l'intérêt du vitrage 70/40, pour une augmentation de l'intérêt du PLTfut (pour toutes les orientations) et du vitrage sous vide (pour le Nord et le Sud).

Nous voyons donc que, même au sud, un vitrage très isolant peut devenir intéressant, dans le cas d'ouvertures de petite taille.
Cela vient du fait que le vitrage est vertical. Les gains solaires au sud sont donc limités en été, même pour un vitrage ayant un grand facteur solaire, comme c'est le cas du vitrage sous vide.
Les problèmes de surchauffes sont donc limités par rapport aux orientations est et ouest. Par contre, en hiver, les gains solaires sont plus importants et les charges de chauffages sont ainsi réduites.
En ce qui concerne l'éclairage, le très haut facteur de transmission lumineuse du vitrage sous vide est toujours intéressant.

Stratégies 3 et 4

Le confort n'est jamais atteint dans le cas de ces deux stratégies. Nous ne ferons donc pas d'analyse détaillée des résultats obtenus pour ces stratégies.

Stratégies 5 et 6 (Tableau 4.12)

Stratégies 5 et 6														
orientation	config.	gains internes	Photom.	locaux	**v1**	**v2**	**v3**	**v4**	**v5**	**v6**	**v7**	**v8**	**v9**	**total**
Nord	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	19	11	0	0	15	45	0	90
Nord	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	19	9	0	0	150	36	56	270
Nord	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	0	0	40	12	398	450
Sud	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	72	0	0	0	0	0	0	72
Sud	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	4	179	1	0	0	0	53	0	237
Sud	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	46	0	0	0	196	121	73	436
Est	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	73	0	0	0	0	0	0	73
Est	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	163	20	0	0	0	57	0	240
Est	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	47	0	0	0	192	99	99	437
Ouest	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	76	0	0	0	0	0	0	76
Ouest	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	153	11	0	3	0	79	0	246
Ouest	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	48	1	0	0	191	69	135	444

Tableau 4.12: Meilleurs vitrages, classés par orientations et tailles de surfaces vitrées, stratégies 5 et 6

Une première remarque intéressante est qu'au nord, on atteint toujours le confort (le nombre de cas repris dans la colonne « total » correspond toujours au nombre de cas étudiés.
Pour les surfaces vitrées allant de c1 à c4, on devra parfois avoir recours à un vitrage extrêmement opaque, avec des réserves que nous allons détailler mais pour les ouvertures de plus petite taille, d'autres vitrages permettent d'atteindre le confort.

Configuration c1 :
Le seul vitrage admissible pour les orientation sud, est et ouest, lorsqu'on a une façade entièrement vitrée et pas de système de conditionnement d'air est le vitrage SS108. Cependant, ce vitrage présente un coefficient de transmission lumineuse tellement petit qu'il est très inconfortable au niveau visuel.
Nous pensons que la mise en place de ce vitrage n'est pas à conseiller dans un pays tel que la Belgique. Dans le cas où l'architecte tient à vitrer entièrement la façade du bâtiment et qu'il ne désire pas de système de conditionnement d'air, il est impératif de prévoir une combinaison d'un vitrage moins réfléchissant et de protections solaires extérieures mobiles ou

éventuellement de s'acheminer vers une solution de double peau ou de double fenêtre si la solution de protection solaire extérieure n'est pas envisageable.
Pour l'orientation nord, le choix du meilleur vitrage dépend fort des hypothèses mais on remarque qu'un vitrage tel que le 70/40 peut être assez intéressant.
La configuration c1 est donc une configuration de façade difficile à gérer si on ne veut ni système de conditionnement ni système d'ombrage. Dans ce cas, on devrait s'attendre à des problèmes de confort thermique ou visuels assez conséquents.

Configurations c2 à c4 :
Nous observons une très nette différence entre le nord et les trois autres orientations.
Pour le nord, c'est le PLTfut qui est le plus souvent le vitrage optimal (suivi par le vitrage sous vide). Pour les trois autres orientations, c'est principalement le SS108 qui apparaît comme le meilleur vitrage, suivi par le 70/40.

Configurations c5 à c9 :
Dans ce cas-ci, on doit encore faire la distinction entre les orientations sud, est et ouest et l'orientation nord.
Pour cette dernière, comme les surfaces vitrées deviennent très petites, le vitrage sous vide, qui a un très bon facteur solaire et un coefficient de conductivité thermique très petit devient le vitrage le plus performant dans la majorité des cas.
Pour les autres orientations, on est partagé entre le PLTFut, le 70/40 et le vitrage sous vide.
Le SS108 apparaît encore comme meilleur vitrage mais dans nettement moins de cas que pour les configurations précédentes.

2.3 Etude des écarts entre les différents vitrages

Jusqu'à présent, nous avons étudié le meilleur vitrage, c'est à dire le vitrage qui induit le moins de consommation d'énergie possible.
Nous aimerions étudier les différences de consommation entre ce vitrage et les autres vitrages testés.
C'est pour cette raison que nous avons reproduit les mêmes tableaux que les Tableau 4.11 et Tableau 4.12 mais en associant au meilleur vitrage les autres vitrages qui donnent des valeurs de consommation de moins de 5 % supérieures à la consommation donnée par le meilleur vitrage (voir Tableau 4.13 et Tableau 4.14).

Stratégies 1 et 2

orientation	config.	gains internes	photom.	locaux	**v1**	**v2**	**v3**	**v4**	**v5**	**v6**	**v7**	**v8**	**v9**
Nord	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	29	90	90	89	90	6
Nord	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	268	270	270	270	190
Nord	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	152	376	450	428	450
Sud	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	44	74	90	0	90	0
Sud	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	5	268	270	155	270	0
Sud	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	8	0	0	0	337	398	450	429	367
Est	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	72	90	90	0	90	0
Est	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	66	270	270	148	270	0
Est	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	450	450	450	450	285
Ouest	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	72	90	90	0	90	0
Ouest	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	32	270	270	174	270	0
Ouest	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	450	450	450	450	330

Tableau 4.13 : Meilleurs vitrages et vitrages se rapprochant à moins de 5% de celui-ci, stratégies 1 et 2

Stratégies 5 et 6

orientation	config.	gains internes	photom.	locaux	**v1**	**v2**	**v3**	**v4**	**v5**	**v6**	**v7**	**v8**	**v9**
Nord	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	19	11	38	45	15	45	0
Nord	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	19	9	28	36	150	50	56
Nord	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	0	0	12	14	433	52	398
Sud	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	72	0	0	0	0	0	0
Sud	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	4	179	1	25	45	0	53	0
Sud	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	61	0	46	0	95	121	196	121	73
Est	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	73	0	0	0	0	0	0
Est	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	163	20	27	54	0	57	0
Est	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	14	0	47	0	95	104	274	209	99
Ouest	1	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	76	0	0	0	0	0	0
Ouest	2 à 4	F à E	p1 à p3	1 à 5	0	0	153	11	44	80	0	79	0
Ouest	5 à 9	F à E	p1 à p3	1 à 5	32	0	48	1	63	101	272	186	135

Tableau 4.14: Meilleurs vitrages et vitrages se rapprochant à moins de 5% de celui-ci, stratégies 5 et 6

Etudions maintenant les résultats obtenus pour les vitrages donnant des résultats différents de moins de 5 % du meilleur vitrage.

Stratégies 1 et 2

Configuration c1
Pour l'orientation Nord, deux nouveaux vitrages s'ajoutent à ceux que nous avions déterminés à partir du Tableau 4.11. Il s'agit du KN169 (qui est fort semblable au 70/40) et du PLTfut (qui a, lui des caractéristiques plus différentes des autres vitrages).
Pour les orientations sud, est et ouest, la première analyse nous donnait le 70/40 comme vitrage le plus intéressant. On peut maintenant y ajouter le KN169 et le SKN172, ainsi que le KN155, dans certains cas.

Configurations c2 à c4
Pour le nord, on trouve 4 vitrages intéressants : le KN169, le SKN172, le PLTfut (déjà cité à partir du Tableau 4.11) et le 70/40.
Pour les autres orientations, le PLTfut apparaît comme moins intéressant que les trois autres, sans doutes à cause de son facteur solaire relativement élevé.

Configurations c5 à c9
Pour les orientations nord et sud, le KN169 devient nettement moins intéressant alors que le vitrage sous vide peut apparaître comme une bonne solution dans 20 à 25 % des cas.
Pour les deux autres orientations, les vitrages les plus intéressants restent les mêmes que ceux apparaissant dans le Tableau 4.11 mais le vitrage sous vide commence à être intéressant dans un certain nombre de cas non négligeable (14 à 18 %).
Nous voyons donc que lorsque la surface vitrée diminue, l'objectif principal à remplir par le vitrage tend à être la compensation des pertes de gains solaires par la protection contre le froid, plutôt que la protection contre les surchauffes.

Stratégies 5 et 6

Configuration c1
Pour l'orientation nord, des vitrages comme le KN169, le SKN 172 et le 70/40 peuvent être intéressants dans 22 à 26 % des cas. Le SS108 n'est intéressant que dans 11 % des cas, lorsqu'il est le seul à permettre le confort.
Pour les autres orientations, seul le SS108 permet d'atteindre le confort.

Configurations c2 à c4
Pour le nord, c'est principalement le PLTfut qui est intéressant.
Pour les trois autres orientations, c'est principalement le SS108 qui est intéressant. Il est suivi par le 70/40 mais également par le SKN 172 qui n'était pas apparu dans le Tableau 4.12.

Configurations c5 à c9
Dans ce cas-ci, nous devons à nouveau distinguer l'orientation nord des autres orientations.
Pour la première, ce sont le PLTfut et le vitrage sous vide qui sont les plus intéressants. Pour les trois autres, on peut ajouter le SKN172 et le KN169 aux autres vitrages déjà cités d'après le Tableau 4.12 (PLTfut, 70/40 et vitrage sous vide).

2.4 Conclusion

Les paramètres qui influencent le choix du vitrage sont : la configuration et l'orientation de la façade, la valeur des gains internes, les coefficients de réflexion des parois intérieures, l'inertie thermique du bâtiment et le type de stratégie mise en place. Détaillons un par un ces différents paramètres.

- L'orientation de la façade
  Le choix du vitrage doit se faire en fonction de l'orientation de la façade vitrée. Cette conclusion essentielle peut être confirmée par les résultats de travaux de plusieurs chercheurs comme par exemple, ceux présentés par M.C. Dubois [Dub 1998].
  Notons qu'il est toujours intéressant d'étudier le groupe de meilleurs vitrages plutôt que LE meilleur vitrage.
  Cela permet parfois de choisir un vitrage plus polyvalent et de réaliser un bon compromis si on ne veut pas trop de vitrages différents pour un même bâtiment.

- Les gains internes
  Les gains internes ont une grande influence sur le choix du vitrage.

- Les coefficients de réflexion des parois intérieures
  Ceux-ci ont aussi une certaine importance, cependant cette influence sur le choix du vitrage est moindre que celle des gains internes.

- La stratégie mise en place et l'inertie du bâtiment sont liées et ont une influence très marquée sur le choix du vitrage.
  En effet, quel que soit le type de vitrage, le confort n'est jamais atteint lorsqu'il n'y a ni système de refroidissement ni ventilation nocturne.
  Le confort n'est pas toujours atteint, quel que soit le type de vitrage, lorsqu'il n'y a pas de système de conditionnement d'air et qu'on met en place une stratégie de ventilation nocturne, dans le cas d'un bâtiment présentant peu d'inertie.

Nous pouvons alors dissocier deux cas très différents et établir quelques recommandations quant au choix du vitrage.

Lorsqu'on a un système de refroidissement

- dans le cas où la façade est complètement vitrée, il est essentiel de choisir un vitrage réfléchissant qui laisse toutefois passer un maximum de lumière.
- lorsque la façade n'est pas complètement vitrée, on éprouve déjà un besoin plus important de laisser pénétrer les rayons solaires en augmentant le facteur solaire du vitrage.
- dans les cas de petite surface vitrée, il est essentiel de favoriser les vitrages très isolants qui laissent toutefois passer un maximum de gains solaires et de lumière, pour les orientations nord et sud. Pour les autres orientations, il faut encore, dans la majorité des cas, se protéger des gains solaires trop importants en choisissant un vitrage ayant un facteur solaire pas trop élevé.

Lorsqu'on n'a pas de système de refroidissement

Lorsqu'on n'a pas de système de refroidissement, on se trouve alors dans un cas nettement plus délicat à traiter.
Il apparaît qu'on peut se passer de système de conditionnement d'air si on applique une stratégie de ventilation nocturne, si on laisse un maximum de masse thermique accessible afin d'augmenter l'inertie du bâtiment et si on porte un soin particulier au choix du vitrage.
Ce choix doit découler d'une étude précise du bâtiment et des différents locaux.
Il faut impérativement que le choix du vitrage ne se fasse pas au détriment du confort lumineux, point qui n'a pas pu être quantifié dans cette étude.
Il est également impératif de dissocier les différentes orientations et, même si certains vitrages permettent d'atteindre le confort, la meilleure solution semble se trouver dans une combinaison des différentes stratégies citées ci-dessus (ventilation nocturne et masse thermique accessible) et de la mise en place d'un système d'ombrage (voir chapitre 6 : prise en compte des protections solaires).

3. Influence de divers paramètres sur les consommations

3.1 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de chauffage

Nous désirons analyser l'influence du rapport surface_du_vitrage/surface_du_local sur les consommations de chauffage.

Nous décidons de nous limiter aux cas c1 (Svit/Ssol=50%), c2 (Svit/Ssol=31.8%) et c5 (Svit/Ssol=15.8%), puisque pour les cas c3 et c4, ces rapports sont également de 31.8% et pour les cas c6 à c9, de 15.8%.
Nous traçons donc pour les 9 vitrages les courbes représentant les consommations d'énergie primaire de chauffage en fonction du rapport Svit/Ssol.

Les graphiques 1 à 32, tracés pour les locaux 1 et 5, les photométries p1 et p3, des gains internes faibles et élevés, les stratégies 1, 2, 5 et 6 et les quatre orientations, se trouvent en annexe 3.
Pour ne pas surcharger ces graphiques par l'utilisation d'une légende, nous avons indiqué le numéro de chaque vitrage à droite de la courbe lui correspondant.

Observations

Nous remarquons que l'évolution de la courbe dépend du type de vitrage considéré.
En général, la consommation de chauffage tend à augmenter avec le rapport Surface vitrée/surface au sol, sauf pour un vitrage très performant comme le vitrage sous vide ou le vitrage PLTfut. Cela s'explique par le fait que ces deux vitrages ont un facteur solaire assez élevé, combiné à un coefficient k faible. L'augmentation de leur taille induit donc une augmentation des gains solaires qui n'est pas compensée par la perte de chaleur provenant de la variation du coefficient k moyen de la paroi.

Pour certains vitrages (KN169, SKN172, 70/40), l'augmentation n'est pas très marquée.
Ces observations sont identiques pour toutes les orientations, dans pratiquement tous les cas.

Conclusion

Dans la plupart des cas, la consommation de chauffage augmente lorsque la surface vitrée augmente.

3.2 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de refroidissement

Nous désirons analyser l'influence du rapport surface_du_vitrage/surface_du_local sur les consommations de froid.
Les graphiques 33 à 48, tracés pour les locaux 1 et 5, les photométries p1 et p3, des gains internes faibles et élevés, les stratégies 1et 2 et les quatre orientations, se trouvent en annexe 3.

Conclusion

Nous observons et concluons que la consommation d'énergie primaire de froid augmente toujours lorsque la surface vitrée augmente, sauf pour des vitrages extrêmement opaques (le SS108, dans notre cas). Dans ce cas, l'augmentation est moins rapide ou alors la courbe reste stable.

3.3 Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation totale d'énergie primaire

Etudions à présent l'influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation totale d'énergie primaire. Il s'agit de la somme des consommations d'énergie primaires de chauffage, refroidissement, humidification, déshumidification et éclairage, dans le cas des stratégies 1 et 2 ou de la somme des consommations d'énergie primaire de chauffage, humidification et éclairage, dans le cas des stratégies 5 et 6.
Les graphiques 49 à 80, tracés pour les locaux 1 et 5, les photométries p1 et p3, des gains internes faibles et élevés, les stratégies 1, 2, 5 et 6 et les quatre orientations, se trouvent en annexe 3.

Stratégies 1 et 2
Nous observons que les consommations totales d'énergie primaire augmentent toujours lorsque le rapport Svit/Ssol augmente sauf pour le cas de la stratégie 1, orientation nord et local 1.
Dans ce cas, pour les vitrages v4 à v9, les consommations peuvent diminuer ou rester stables, lorsque Svit/Ssol augmente.

Stratégies 5 et 6
En ce qui concerne les stratégies 5 et 6, la tendance est tout à fait inversée : la consommation totale d'énergie primaire a tendance à diminuer lorsque la taille de la surface vitrée augmente, pour la plupart des vitrages.
Deux vitrages font cependant exception :
Pour le SS108, le vitrage qui est souvent le seul admissible, si on tient compte des critères du nombre d'heure de surchauffe maximal, cette consommation augmente toujours lorsque la surface vitrée augmente. Pour le SN150, la consommation augmente en général mais peut diminuer dans certains cas. Le comportement de ces deux vitrages peut être expliqué par le fait que leur coefficient k est relativement élevé, par rapport au coefficient k des autres vitrages.

Dans le cas de tous les autres vitrages, on peut facilement expliciter la diminution des consommations de la manière suivante :
Lorsque les surfaces vitrées augmentent, les gains solaires augmentent et par conséquence, les charges de chauffages diminuent.
Les apports d'éclairage naturel augmentent également, ce qui induit une diminution des consommations d'éclairage artificiel.

Attention, l'interprétation de ces résultats pourrait pousser l'architecte à augmenter les surfaces vitrées lorsque le bâtiment n'est pas équipé de système de conditionnement d'air. Ce serait une erreur grossière car rappelons que les courbes présentées en annexe 3 ne tiennent pas compte des heures de surchauffe, critère essentiel dans le cas des stratégies 5 et 6. Même si les consommations globales diminuent lorsque la surface vitrée augmente, le nombre d'heures de surchauffe augmente en parallèle et le confort thermique diminue.

3.4 Influence des gains internes sur les consommations de chauffage et de refroidissement

Nous désirons étudier l'influence des gains internes de métabolisme et d'équipement (à gains internes d'éclairage constants) sur les consommations d'énergie primaire. Nous représentons les résultats sous forme graphique. Ceux-ci sont placés en annexe 3 (Graphiques 81 à 107).
Cette étude a été réalisée pour toutes les configurations et tous les vitrages, pour les stratégies 1 et 2, pour les 4 orientations et pour deux combinaisons de photométrie des parois (p1et p3).
Nous avons tracé trois courbes différentes : la première reprend la consommation totale (chauffage + humidification + refroidissement + déshumidification) en énergie primaire, la seconde donne la consommation de froid et de déshumidification et la troisième donne la consommation de chauffage et d'humidification.
Vu la quantité de cas étudiés, nous n'avons pas placé tous les graphiques en annexe. Cependant les observations sont identiques dans tous les cas (sauf une exception dont nous parlerons ensuite) : la consommation d'énergie de chauffage diminue lorsque les gains internes augmentent, la consommation d'énergie de refroidissement augmente lorsque les gains internes augmentent mais leur somme diminue toujours lorsque les gains internes augmentent.
Attention, cette observation est valable dans l'intervalle de gains internes choisi pour réaliser les simulations. Si les gains internes augmentent au-delà de la valeur maximale testée ici, on arrivera, à un moment, à ne plus devoir chauffer. La consommation de refroidissement augmentera donc et ne sera plus compensée par la réduction de consommation de refroidissement.

Il est également utile de rappeler que l'évolution des courbes de consommations dépend des facteurs de conversion en énergie primaire et pourrait varier en fonction des rendements des systèmes considérés et de changement dans les modes de production d'électricité par le fournisseur belge.

Le seul cas que nous avons décelé pour lequel les consommations globales n'augmentent pas lorsque la valeur des gains interne augmente est le cas de la configuration c1, stratégie 1, photométrie 3, dans le cas du vitrage sous vide, pour l'orientation sud.

Dans ce cas-là, nous obtenons la Figure 4.3 :

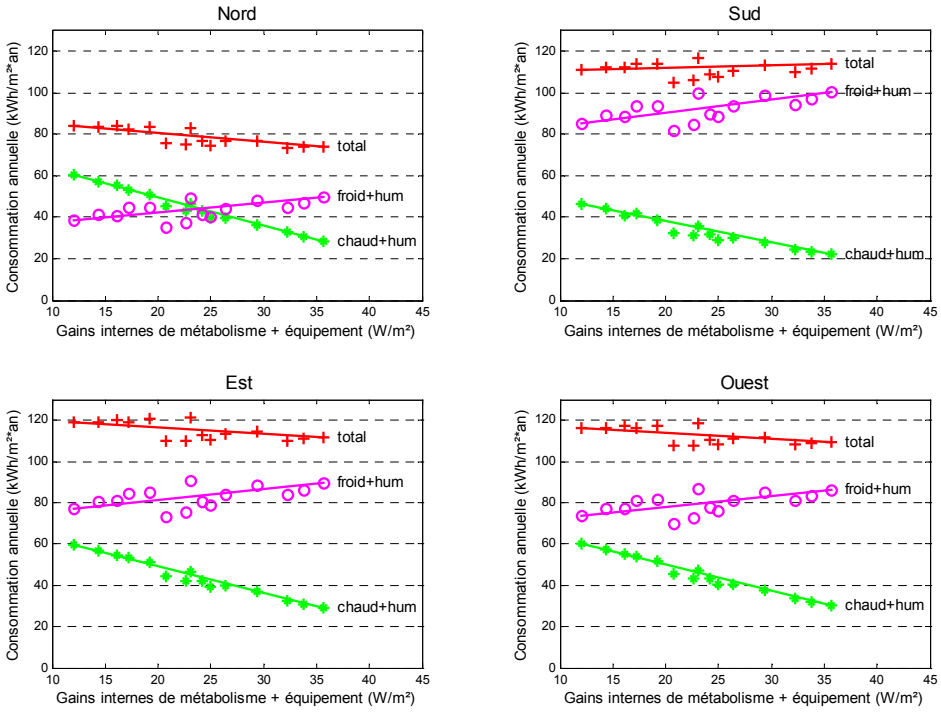


Figure 4.3 : Evolution des consommations annuelles en fonction des gains internes : stratégie 1, c1, p3, vitrage sous vide

Pour l'orientation sud, nous voyons que la diminution des consommations de chauffage (+ humidification), lorsque les gains internes augmentent, ne compense pas l'augmentation des consommations de refroidissement (+ déshumidification).
C'est un cas très particulier qui souffre très rapidement de gains internes très importants (façade entièrement vitrée, orientation sud et vitrage très isolant ayant un haut facteur solaire).

3.5 Influence des stratégies de refroidissement sur les consommations

Observations

En principe, le choix d'une stratégie de refroidissement par conditionnement d'air ou par ventilation nocturne ne devrait avoir d'influence que sur les consommations de refroidissement. Les consommations de chauffage ne devraient pas varier lorsqu'on ventile la nuit, en période chaude.
Cependant, ceci est théorique car il est très difficile de gérer la ventilation nocturne de manière idéale afin de refroidir au maximum le bâtiment durant la nuit sans devoir relancer le système de chauffage en début de journée.

Si nous soustrayons les consommations de chauffage obtenues pour tous les cas calculés, et pour deux stratégies différentes (respectivement s5 soustrait à s1 et s6 soustrait à s2), nous obtenons toujours des valeurs négatives.
Cela signifie qu'on consomme donc toujours plus de chauffage lorsqu'on met en place une stratégie de ventilation nocturne que lorsqu'on refroidit au moyen d'un système de conditionnement d'air.

Cette augmentation de consommation ne varie pas dans les mêmes proportions selon la masse thermique du bâtiment et est due à une gestion non optimalisée de la ventilation nocturne.

Dans nos simulations, nous avons décidé d'adapter, heure par heure, le taux de ventilation nocturne pour qu'à la fin de chaque heure la température ne soit pas descendue en dessous de 21°C puisque c'est à partir de cette température qu'on devrait chauffer le bâtiment. Nous avons également fixé la valeur de ventilation maximale à 8 Vol/h, ce qui explique le fait qu'on ne descende pas toujours à 21°C à la fin de la nuit. Nous remarquons que ce mode de fonctionnement n'est pas optimisé puisqu'il implique une augmentation des consommations de chauffage. Cela provient du fait que le calcul du taux de ventilation est fait sur une heure alors que le fait d'envoyer un certain débit d'air dans un bâtiment à une influence sur les heures qui suivent et pas uniquement pendant l'heure durant laquelle ce débit est mis en place.

En principe, on devrait pouvoir mettre en place la ventilation nocturne de manière à ce qu'on ne doive pas chauffer le bâtiment plus que lorsqu'on a un système de refroidissement. Cette optimisation du mode de ventilation nocturne n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail. Elle devrait certainement être étudiée très précisément en fonction d'autres caractéristiques que le degré d'inertie du bâtiment.

Les Tableau 4.16 et Tableau 4.15 donnent, pour le local 1 et la photométrie p1, les écarts maximaux de consommation de chauffage obtenus pour les stratégies citées.
Si nous observons le Tableau 4.15, qui se rapporte au bâtiment avec beaucoup d'inertie, nous voyons que les différences de chauffage ne sont pas très importantes.
Par contre, le Tableau 4.16 montre des valeurs nettement plus élevées.

Avec inertie	Valeur correspondant au vitrage qui donne l'écart le plus important											
(s2-s6)/s2	F				M				E			
(%)	N	S	E	O	N	S	E	O	N	S	E	O
c1	-3.7%	-5.2%	-2.1%	-2.2%	-3.6%	-5.1%	-2.1%	-2.3%	-4.0%	-5.2%	-2.0%	-2.1%
c2	-3.1%	-2.6%	-1.5%	-1.6%	-2.8%	-2.9%	-1.7%	-1.6%	-2.8%	-3.1%	-1.6%	-1.8%
c3	-3.1%	-2.6%	-1.6%	-1.6%	-2.8%	-2.9%	-1.7%	-1.7%	-2.8%	-3.2%	-1.7%	-1.8%
c4	-3.1%	-2.5%	-1.5%	-1.6%	-2.8%	-2.9%	-1.7%	-1.6%	-2.8%	-3.1%	-1.6%	-1.8%
c5	-2.3%	-1.2%	-1.7%	-1.9%	-2.3%	-1.3%	-1.4%	-1.7%	-2.0%	-1.2%	-1.4%	-1.5%
c6	-2.2%	-1.2%	-1.6%	-1.9%	-2.3%	-1.2%	-1.4%	-1.7%	-2.0%	-1.2%	-1.4%	-1.5%
c7	-2.3%	-1.2%	-1.7%	-1.9%	-2.3%	-1.2%	-1.4%	-1.7%	-2.0%	-1.2%	-1.4%	-1.5%
c8	-2.3%	-1.2%	-1.7%	-1.9%	-2.4%	-1.3%	-1.5%	-1.8%	-2.1%	-1.3%	-1.4%	-1.5%
c9	-2.3%	-1.2%	-1.7%	-1.9%	-2.3%	-1.2%	-1.4%	-1.7%	-2.0%	-1.2%	-1.4%	-1.5%

Tableau 4.15: Ecarts de consommation de chauffage selon le type de refroidissement choisi, bâtiment présentant beaucoup d'inertie

Sans inertie	Valeur correspondant au vitrage qui donne l'écart le plus important											
(s1-s5)/s1	F				M				E			
(%)	N	S	E	O	N	S	E	O	N	S	E	O
c1	-17%	-24%	-14%	-14%	-18%	-26%	-15%	-15%	-21%	-28%	-16%	-17%
c2	-16%	-20%	-14%	-14%	-17%	-38%	-15%	-15%	-19%	-26%	-17%	-17%
c3	-16%	-20%	-14%	-14%	-17%	-23%	-15%	-15%	-19%	-26%	-17%	-17%
c4	-16%	-20%	-14%	-14%	-17%	-23%	-15%	-15%	-19%	-26%	-17%	-17%
c5	-16%	-17%	-13%	-14%	-17%	-19%	-14%	-15%	-18%	-21%	-16%	-17%
c6	-16%	-17%	-14%	-14%	-17%	-19%	-14%	-15%	-18%	-21%	-16%	-17%
c7	-16%	-17%	-13%	-14%	-17%	-19%	-14%	-15%	-18%	-21%	-16%	-17%
c8	-16%	-17%	-13%	-14%	-17%	-19%	-14%	-15%	-18%	-21%	-16%	-16%
c9	-16%	-17%	-13%	-14%	-17%	-19%	-14%	-15%	-18%	-21%	-16%	-17%

Tableau 4.16 : Ecarts de consommation de chauffage selon le type de refroidissement choisi, bâtiment présentant peu d'inertie

En observant ces tableaux, nous pouvons conclure que la gestion de la ventilation nocturne a été bien adaptée pour le cas du bâtiment présentant beaucoup d'inertie puisque les différences de consommation entre les stratégies 2 et 6 sont assez faibles.
Par contre, lorsque le bâtiment présente peu d'inertie, il faudrait prendre un soin plus particulier au choix de la température de consigne.
Il est fort probable qu'elle devrait être augmentée.
A titre d'exemple, la Figure 4.4 représente l'évolution des températures opératives dans le local 1, pour les deux bâtiments. L'évolution de la chaleur sensible pour les deux cas y est aussi représentée et est à lire sur l'axe de droite. Lorsque la chaleur sensible est négative, cela signifie que le chauffage fonctionne.
Nous observons que la température intérieure chute beaucoup plus vite dans le bâtiment présentant moins d'inertie. A la fin de la nuit (16/09 et 23/09), il faut parfois relancer le chauffage dans le cas du bâtiment présentant peu d'inertie afin d'éviter que la température intérieure ne continue à descendre.

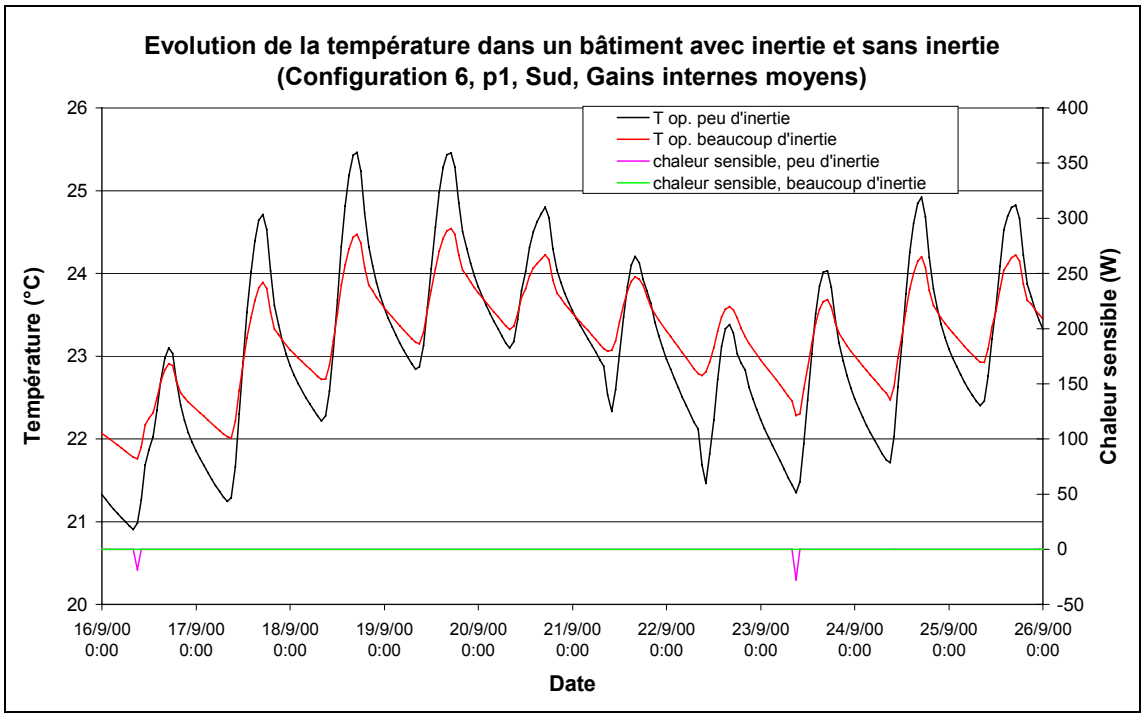


Figure 4.4 : Evolution des températures dans le local 1, pour un bâtiment avec beaucoup ou peu d'inertie

Remarque : Le 23/09, en début de matinée, il faut relancer le système de chauffage alors que la température opérative n'est pas descendue en dessous de 21°C. Cela provient du fait que la gestion des systèmes est réalisée sur base de la température de l'air et pas de la température opérative. A ce moment, la température de l'air est sans doute inférieure à 21 °C.

Conclusion

La gestion de la ventilation nocturne est assez compliquée. Si elle n'est pas étudiée précisément en fonction du bâtiment, elle peut provoquer des augmentations de consommation de chauffage. La stratégie de ventilation nocturne semble plus aisée à mettre en œuvre dans un bâtiment présentant beaucoup d'inertie.

3.6 Influence de l'inertie thermique sur la consommation totale d'énergie

Etudions maintenant l'influence de l'inertie sur la consommation totale d'énergie primaire (chauffage + refroidissement + humidification + déshumidification + éclairage).

Observations

Les tableaux placés en annexe 3 donnent, pour une partie des cas simulés, les différences relatives entre la consommation totale obtenue pour un bâtiment présentant peu d'inertie et un bâtiment présentant beaucoup d'inertie.

Orientation Ouest
Dans un premier temps, on peut voir qu'on ne peut pas tirer de conclusion générale. En effet, dans certains cas, le bâtiment présentant peu d'inertie consomme plus d'énergie et dans d'autre cas, c'est le contraire.
On remarque cependant que les différences de consommation maximales sont d'environ 5 % et qu'elles apparaissent lorsque la façade est entièrement vitrée (cas c1).

Nous remarquons également une tendance générale qui est la suivante, pour le local 1 :
- quand les surfaces vitrées sont importantes (cas c1 à c4), c'est l'immeuble qui présente le plus d'inertie qui consomme le plus.
- quand les surfaces vitrées sont faibles (cas c5 à c9), c'est le bâtiment qui présente le moins d'inertie qui consomme le plus.

Cependant, ces observations peuvent parfois dépendre du type de vitrage considéré. En effet, le vitrage v1 (double vitrage ordinaire) donne parfois des résultats différents des autres.
Cette observation n'est pas valable pour tous les locaux. En effet, dans le cas du local 5, par exemple, les tableaux placés en Annexe 3 montrent que, pour le cas de la photométrie p1, le bâtiment présentant plus d'inertie consomme toujours plus, quelle que soit la configuration de façade.

Influence des gains internes
Lorsque les gains internes augmentent, les différences diminuent en valeur absolue et deviennent même négatives. On aurait donc intérêt à prévoir moins d'inertie dans un bâtiment profitant de plus de gains internes.
Cette observation est confirmée par les valeurs que l'on obtient dans le cas du local 5 qui profite de beaucoup de gains internes puisque, dans ce cas, toutes les valeurs sont négatives.

Orientations Nord, Sud et Est
On observe la même grande tendance que pour l'orientation Ouest, c'est à dire que selon la superficie du vitrage, c'est un ou l'autre type de bâtiment qui consomme le plus.
Cependant, on remarque quelques exceptions pour des vitrages comme le double vitrage ordinaire ou le vitrage sous vide.

Observations en terme de statistiques

Nous avons calculé, pour le cas des stratégies 1 et 2, le pourcentage de cas dans lesquels le bâtiment présentant beaucoup d'inertie consomme plus que le bâtiment présentant peu d'inertie.
Au total, nous obtenons la valeur moyenne de 63 %. Cette valeur peut être précisée en fonction du local considéré :

Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
57 %	75 %	45 %	49 %	89 %

Tableau 4.17: Pourcentage de cas dans lesquels le bâtiment présentant beaucoup d'inertie consomme plus que le bâtiment présentant peu d'inertie

Nous observons donc une tendance générale qu'a un bâtiment présentant beaucoup d'inertie à consommer plus que le même bâtiment mais présentant peu d'inertie.

Néanmoins, l'effet d'une différence d'inertie sur la consommation d'énergie primaire varie uniquement entre -6 et + 6%.

Conclusion

Il n'est pas possible de donner de conclusion générale.
Ce qu'on peut dire, c'est que l'influence de l'inertie du bâtiment peut être positive ou négative par rapport aux consommations totales du bâtiment.
Elle dépend de la configuration de la façade, du type de vitrage considéré, du local étudié et, dans certains cas, de l'orientation.
Si la question de l'inertie thermique se pose dans un bâtiment qui est refroidi par un système de conditionnement d'air, il est donc nécessaire d'étudier plus précisément ce bâtiment.

3.7 Influence de l'inertie thermique sur la consommation de chauffage

Nous décidons d'étudier ici l'influence de l'inertie sur la consommation d'énergie primaire de chauffage.
Nous désirons étudier si le fait de construire un bâtiment plus lourd et de le concevoir de manière à ce que sa masse thermique soit accessible apporte des effets bénéfiques en terme de consommation de chauffage.
Pour répondre à cette question, nous avons comparé les résultats obtenus pour les stratégies 1 et 2. Nous n'avons pas comparé les stratégies 5 et 6 en terme de consommation de chauffage car nous avons vu au point 3.5 que la gestion de la ventilation nocturne a été défavorable à la stratégie 5.
La comparaison est réalisée, dans ce cas-ci, en terme de statistiques.

Observations

Le Tableau 4.18 donne le pourcentage de cas pour lesquels le bâtiment présentant peu d'inertie consomme moins que le bâtiment présentant beaucoup d'inertie.

Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5	Total
35 %	51 %	33 %	37 %	86 %	48 %

Tableau 4.18 : Pourcentage de cas pour lesquels le bâtiment présentant peu d'inertie consomme moins que le bâtiment présentant beaucoup d'inertie

Nous observons également qu'un immeuble présentant beaucoup d'inertie peut consommer de 16,5 % de plus à 7 % de moins d'énergie de chauffage qu'un immeuble présentant peu d'inertie.

Conclusion

Dans 48 % des cas, le bâtiment qui présente peu d'inertie consomme moins de chauffage que le bâtiment qui offre beaucoup d'inertie.
On ne peut donc rien conclure en ce qui concerne l'influence de l'inertie sur la consommation de chauffage. L'inertie a, dans certains cas, une influence positive et dans d'autres cas, une influence négative sur la consommation de chauffage lorsque le bâtiment est équipé d'un système de chauffage et d'un système de conditionnement d'air et que l'on n'applique pas de stratégie de ventilation nocturne.

3.8 Influence de l'inertie thermique sur la consommation de froid

Dans 34 % des cas, les immeubles présentant peu d'inertie thermique consomment plus d'énergie de refroidissement que les immeubles présentant beaucoup d'inertie thermique.
Dans le reste des cas, c'est le contraire.
Le bâtiment présentant beaucoup d'inertie peut consommer de 24 % de moins à 50 % de plus, d'énergie de refroidissement, que le bâtiment présentant peu d'inertie.
Nous ne pouvons donc pas dire qu'un type de bâtiment induira plus ou moins de consommation d'énergie de refroidissement que l'autre type de bâtiment.

3.9 Influence de l'inertie thermique sur le nombre d'heures de surchauffe

Observations

Le bâtiment qui présente beaucoup d'inertie doit toujours supporter moins d'heures de surchauffe que le bâtiment qui présente peu d'inertie, quelles que soient les hypothèses choisies. Il est donc très important de rendre un maximum de masse thermique accessible, afin de limiter le nombre d'heures de surchauffe dans le bâtiment.

De plus, comme nous avons pu remarquer au point 3.5, la gestion de la ventilation nocturne est plus aisée lorsque le bâtiment présente une grande masse thermique accessible.

Conclusions

Lorsqu'on décide de mettre en place une stratégie de ventilation nocturne pour diminuer les surchauffes d'été, il faut concevoir un bâtiment lourd et rendre un maximum de masse thermique accessible.

3.10 Influence du type de vitrage sur les consommations d'humidification et de déshumidification

En étudiant nos résultats, nous observons une différence de consommation d'énergie d'humidification (et de déshumidification) selon le type de vitrage mis en place.
Pour comprendre d'où vient cette différence d'énergie d'humidification (et de déshumidification), nous décidons d'étudier précisément comment se fait le calcul de chaleur latente dans le programme TRNSYS.

Description du modèle

TRNSYS propose actuellement deux modèles de calcul de la chaleur latente. Lors du début de nos travaux, seule la première méthode de calcul était disponible et c'est celle-là que nous avons donc utilisée. Nous allons décrire l'algorithme relatif à cette méthode.

Equation à résoudre
Dans ce modèle, l'effet d'adsorption et de désorption des matériaux, des meubles ou des plantes est considéré en tenant compte d'une 'capacitance effective d'adsorption' qui est définie comme étant le produit de la masse de l'air de la zone considérée par un certain coefficient.

$$M_{eff,1} = coefficient \times M_{air,i} \qquad [1]$$

avec $M_{eff,i}$ = Capacitance effective d'adsorption de la zone
$M_{air,i}$ = masse de l'air de la zone
Coefficient = facteur multiplicatif qui a une valeur généralement comprise entre 1 et 10 (dans notre cas coefficient = 1)

Il s'agit de résoudre l'équation différentielle suivante :

$$M_{eff,i}\frac{\delta\omega_i}{\delta t} = \underbrace{\dot{m}_{\inf,i}(\omega_a - \omega_i)}_{infiltration} + \underbrace{\dot{m}_{v,i}(\omega_{v,i} - \omega_i)}_{ventilation} + \underbrace{W_{g,i}}_{gain\,internes} + \underbrace{\sum^{(i-j)murs} m_{cplg,s}(\omega_j - \omega_i)}_{humdesautrespièces} \qquad [2]$$

avec ω_i = humidité absolue de la zone considérée (g eau/kg air sec)
ω_a = humidité absolue extérieure (g eau/kg air sec)
$\omega_{v,i}$ = humidité absolue de l'air de ventilation (g eau/kg air sec)
$W_{g,i}$ = humidité provenant des gains internes
ω_j = humidité provenant de la zone adjacente j

Cette équation représente l'évolution de l'humidité absolue de la zone au cours du pas de temps considéré. Cette évolution dépend de la masse d'air qui pénètre dans la zone par infiltration et ventilation, ainsi que de la différence d'humidité absolue entre l'air de ventilation (ou d'infiltration) et l'air intérieur de la zone.
Elle dépend également de l'humidité absolue apportée par l'occupation (principalement le métabolisme humain) et du bilan d'humidité absolue entre l'air qui provient des zones voisines à la zone étudiée et l'air qui part vers ces zones.

Première étape : calcul de l'humidité provenant des apports internes et des pièces voisines.
Pour chaque zone :
- calcul de WGAIN(I) (g d'eau/h) (termes 3 et 4 de l'équation).

Seconde étape : Résolution de l'équation différentielle [2]

On calcule les deux termes ACON et BCON qui représentent respectivement la part d'humidité qui quitte le local et la part d'humidité qui entre dans le local.

$$ACON = \frac{-\left(\dot{m}_{inf} + \dot{m}_v\right)}{Meff} \quad [3]$$

$$BCON = \frac{\left(\dot{m}_{inf} \times \omega_a + \dot{m}_v \times \omega_{vi} + WGAIN\right)}{Meff} \quad [4]$$

Pour simplifier la résolution de l'équation [2], on prend les valeurs de ω à la fin du pas de temps précédent.
La résolution de l'équation différentielle [2], réalisée par la sous-routine DIFFEQINT, nous permet alors de calculer indépendamment ω_f et $\overline{\omega}$ (humidité moyenne sur le pas de temps).

La valeur de l'humidité absolue finale est donnée par l'équation [5].

$$\omega_f = \left(\omega_i + \frac{BCON}{ACON}\right)\exp^{ACON \times \Delta t} - \frac{BCON}{ACON} \quad [5]$$

La valeur de l'humidité moyenne est donnée par l'équation [6]:

$$\overline{\omega} = \left(\frac{\omega_i + \frac{BCON}{ACON}}{ACON} \times \Delta t \times \left(\exp^{ACON \times \Delta t} - 1\right) - \frac{BCON}{ACON}\right. \quad [6]$$

Comparaison des valeurs obtenues avec les valeurs de consigne
Les valeurs d'humidité minimale et maximale admissible (consignes) sont respectivement appelées WHUMA et WDHUMA.
A ce stade du calcul, on connaît la valeur d'humidité moyenne que l'on aurait sur le pas de temps si on n'agissait pas sur l'humidification du local. Cette valeur est $\overline{\omega}$.

On va regarder si cette valeur est dans la zone admissible. On travaille de la manière suivante :

si $WHUM \ \overline{\omega} \ WDHUM$ alors

OK $\rightarrow$ on ne doit ni humidifier ni déshumidifier le local. On passe directement au calcul du gain net d'énergie latente.

sinon

si $\overline{\omega} \ WHUM$ alors il faut déshumidifier $\rightarrow \overline{\omega} = WDHUM$ et $\omega_f = \overline{\omega}$.

sinon ($\overline{\omega} \langle WHUM$) alors il faut humidifier $\rightarrow \overline{\omega} = WHUM$ et $\omega_f = \overline{\omega}$.

Calcul du gain net d'énergie latente (QLGAIN)

$$QLGAIN = \left[\dot{m}_{inf} \times \left(\omega_a - \overline{\omega}\right) + \left(m_v\left(\dot{\omega}_v - \overline{\omega}\right)\right) + WGAIN\right] \times h_{vap} \quad [7]$$

avec h_{vap} = chaleur de vaporisation de l'eau = 2453kJ/kg

Calcul de la demande d'énergie en chaleur latente

Si on doit humidifier ou déshumidifier, il faut apporter une certaine énergie appelée "chaleur latente".
Elle se calcule de la manière suivante :

$$QLAT = QLGAIN - Meff(\omega_f - \omega_i) \times h_{vap} \quad [8]$$

Rem : le calcul de QSENS et QLAT correspond à une transformation à enthalpie constante : on chauffe et on pulvérise de la vapeur.

Exemple de calcul

Voici l'exemple d'un calcul réalisé pour comparer un vitrage sous vide et un vitrage 70/40.
Ce calcul simule le comportement d'un bâtiment de faible inertie, pour la configuration c1 et beaucoup de gains internes.

Analysons les résultats obtenus pour le début du mois de mars, qui est un des mois de l'année pour lesquels les différences sont les plus marquées.

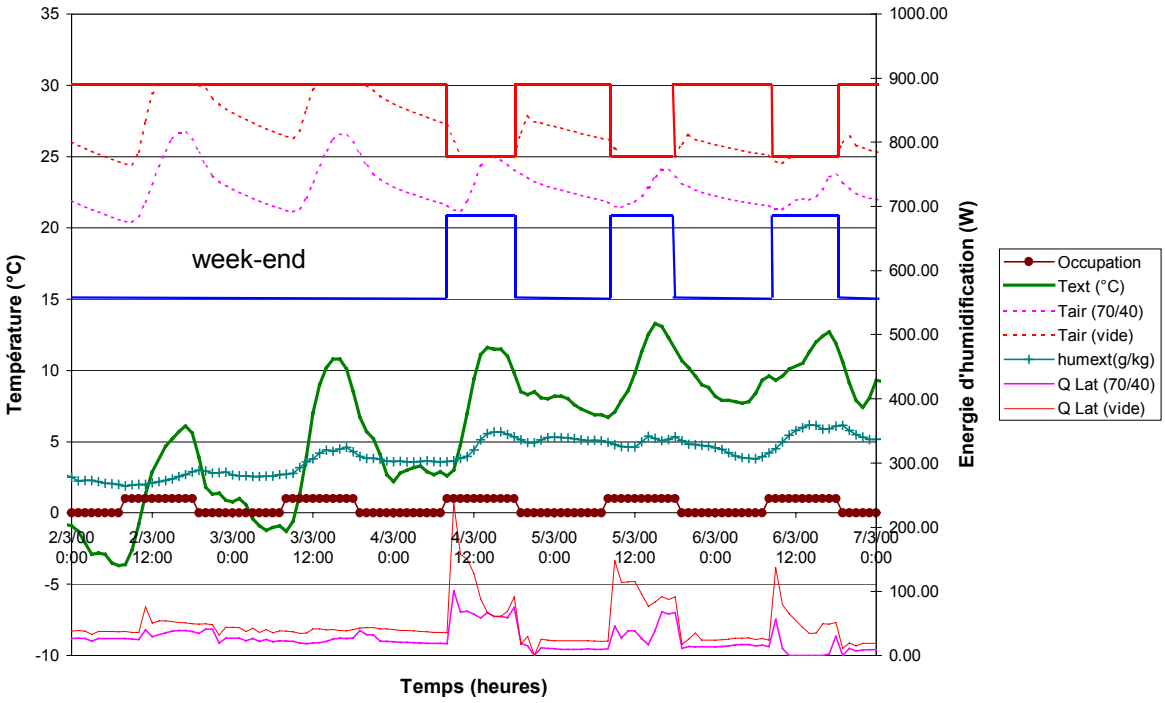


Figure 4.5 : Evolution des température et consommation d'énergie d'humidification : exemple

Nous avons représenté la température de l'air intérieur en pointillé pour les deux vitrages étudiés. Les lignes brisées rouge et bleue représentent l'intervalle dans lequel la température intérieure de l'air doit se trouver.
Les deux premiers jours sont des jours de week-end et donc les températures minimales et maximales sont de 15 et 30°C. Pendant les heures d'occupation du bâtiment, cet intervalle de température est réduit à 21-25°C.
En ce qui concerne les températures, nous observons qu'il fait toujours plus chaud dans le local équipé d'un vitrage sous vide que dans le local équipé d'un vitrage 70/40.
Ceci est facilement explicable par le fait que le double vitrage sous vide possède un très bon facteur solaire et profite beaucoup mieux de apports solaires que le vitrage 70/40. De plus, comme son coefficient de conductivité thermique est très faible, les pertes vers l'extérieur le sont également.
Nous avons également tracé sur la courbe l'énergie d'humidification nécessaire dans les deux cas pour maintenir le degré d'humidité relative à 40 % (QLat).
Nous remarquons que cette énergie est toujours plus importante lorsqu'on considère le local équipé d'un vitrage sous vide.

Nous pouvons expliquer ce fait par un exemple :
Supposons que l'air intérieur soit à 40 % d'humidité. Pour un jour comme le 15 mars, l'humidité absolue extérieure est d'environ 5 g d'eau par kg d'air sec.
Le programme considère qu'on agit sur l'air qui pénètre dans le local (par infiltration, ventilation ou par couplage avec ses locaux voisins c'est à dire par mouvements d'air entre locaux).
Dans le cas du vitrage sous vide, l'air qui pénètre dans le local va être chauffé à 25°C, principalement par l'effet des gains internes et des gains solaires. Pour garder une valeur d'humidité relative de 40%, l'air qui pénètre dans le local va devoir atteindre une humidité absolue de 8 g/kg (voir diagramme de l'air humide).
Dans le cas du vitrage 70/40, l'air qui pénètre dans le local va être chauffé à 21°C. Il va donc devoir atteindre une valeur d'humidité absolue de 6,24 g/kg.
Nous voyons donc que dans les deux cas, il va falloir humidifier l'air qui pénètre dans le local mais que la valeur d'humidité absolue à atteindre dans le local équipé d'un vitrage sous vide étant plus importante, l'énergie nécessaire pour humidifier l'air le sera aussi.

Remarque : notons que les différences d'énergie d'humidification entre les locaux équipés de différents vitrages sont surtout marquées pour les mois de mi-saison, au moment où ces différences de température entre ces locaux sont plus importantes.
En effet, en hiver, lorsqu'il faut chauffer tous les locaux, quel que soit le vitrage installé, les températures atteintes dans ces pièces sont pratiquement toujours les températures de consigne. Les différences entre les locaux équipés de vitrage différents sont alors intégrées dans les consommations de chauffage.

3.11 Conclusion

Cette étude, basée sur un très grand nombre de simulations, nous a montré que le choix d'un vitrage dépend de beaucoup de paramètres.
L'essentiel est de pouvoir déterminer ces paramètres dans l'étude du bâtiment que l'on désire concevoir afin de pouvoir déterminer ensuite, au moyen de l'outil, le ou les vitrages les mieux adaptés à la situation.

Nous remarquons que si l'on désire concevoir un bâtiment répondant non seulement aux critères actuels de confort mais également à ceux du développement durable (minimisation des consommations thermique et d'éclairage, dans notre cas), le choix du vitrage peut s'avérer un élément critique.
Il est tout à fait possible de concevoir un bâtiment confortable et consommant un minimum d'énergie. Cependant, cette démarche doit être poursuivie durant la phase entière de la conception du bâtiment ainsi qu'au cours de son utilisation.

Influence de l'inertie thermique et de la stratégie de refroidissement

Nous avons vu que des critères tels que l'inertie du bâtiment ou le mode de ventilation peuvent modifier considérablement le confort atteint dans le bâtiment.
En effet, si l'architecte décide d'installer un système de conditionnement d'air, il est quasi certain de pouvoir toujours atteindre le confort. L'inertie thermique du bâtiment n'aura alors pas un rôle très important sur les résultats obtenus. Mais son bâtiment consommera d'office plus d'énergie qu'un bâtiment refroidi naturellement.

Par contre, si l'architecte fait le pari de se passer de système de climatisation, il devra être nettement plus attentif à la présence de masse thermique. Il devra également veiller à ce que celle-ci reste accessible tout au cours de la vie du bâtiment.
Le choix des vitrages devra être étudié le plus précisément possible. Le concepteur veillera à ce que la gestion du bâtiment réponde aux exigences inhérentes à sa conception.
En effet, si il conçoit un bâtiment en supposant qu'il sera ventilé naturellement et que cette ventilation naturelle n'est pas bien gérée lors de l'utilisation du bâtiment, le but recherché ne sera pas du tout atteint.
L'inconfort qui résultera de ce manque de gestion du bâtiment conduira inévitablement aux conséquences classiques telles que la diminution de productivité des occupants, les plaintes, un taux d'absentéisme élevé, etc … ainsi qu'à une généralisation et une mauvaise réputation de l'architecture "durable".

Démarche de choix du vitrage en fonction de l'orientation de la façade

En observant les résultats des simulations d'éclairage (chapitre 3), nous avons pu constater que les orientations ont une influence sur les consommations d'énergie d'éclairage.
Nous avons pu constater également que si l'on ajoute les résultats des simulations thermiques aux résultats des simulations d'éclairage, les différences entre orientations sont encore plus marquées.

Notre analyse a été menée orientation par orientation et nous sommes convaincus qu'il est essentiel de réaliser une telle démarche et d'envisager, lors de la conception d'un bâtiment, le choix de vitrages différents selon les orientations des façades concernées.

Cette différentiation façade par façade sera plus ou moins marquée selon la stratégie mise en place et nous pouvons conclure qu'elle est d'autant plus critique lorsqu'il n'existe pas de système permettant de limiter l'impact du choix du vitrage (système de refroidissement dans ce cas-ci).
Nous affirmons donc que si l'architecte envisage une démarche de conception d'un bâtiment répondant aux critères du développement durable, critères principalement d'économie d'énergie et de confort, dans le cas qui nous concerne, il doit impérativement aller jusqu'au bout de sa démarche en différentiant les vitrages en fonction des orientations des locaux dans lesquels ils seront intégrés.

Si cette différentiation façade par façade n'est pas envisageable pour des raisons pratiques, il conviendra à l'architecte de choisir le meilleur compromis. Ce choix devra se faire en étudiant chaque façade distinctement grâce à notre outil. L'architecte devra alors réaliser le choix final en fonction des éléments dont il dispose (par exemple, surface totale vitrée selon les orientations) et en étant conscient du fait qu'il ne choisit pas la solution optimale en terme de thermique et d'éclairage.

Remarquons cependant que dans certains cas (mais pas toujours), certains vitrages sont assez polyvalents et constituent une solution acceptable pour les 4 orientations.

4. Références

[DeH 1992] De Herde A., "Le manuel du responsable énergie", Ministère de la Région Wallonne, 1992.

[Dub 1998] Dubois M.C., "Awnings and solar-protective glazing for efficient energy-use in cold climates", Proceedings of the Renewable Energy Technologies in Cold Climates ’98 conference, 4-6 May, Montreal, Canada, p.380-385, 1998.

CHAPITRE 5. Critères de choix du vitrage

Ce chapitre montre d'abord, par la présentation d'un exemple, que le fait de ne pas tenir compte des aspects d'éclairage lors des calculs de simulations peut mener à des erreurs grossières dans le choix du vitrage.
Le lecteur peut ensuite visualiser comment les valeurs de rendement des systèmes ainsi que les facteurs de conversion en énergie primaire peuvent influencer le choix du vitrage.
Pour terminer le chapitre, nous montrons comment nous avons introduit les critères économiques et environnementaux dans l'outil et comment ceux-ci peuvent intervenir dans le choix du vitrage.

1. Importance de l'intégration des aspects d'éclairage 140
1.1 Introduction 140
1.2 Résultats des simulations 140

2. Influence des valeurs de rendement des systèmes 142

3. Importance du choix des facteurs de conversion en énergie primaire 143

4. Critères économiques 145
4.1 Coût des consommations 145
4.2 Temps de retour de l'investissement 145

5. Critères environnementaux 147
5.1 Introduction 147
5.2 Etablissement des écobilans et calcul de l'énergie grise contenue dans les vitrages 147
5.3 Conclusions 149

1. Importance de l'intégration des aspects d'éclairage

1.1 Introduction

Une des principales originalités de la démarche développée dans le cadre de cette thèse de doctorat est la prise en compte de la disponibilité de l'éclairage naturel. Comme nous l'avons déjà explicité au chapitre 3, cette intégration est réalisée de la manière suivante :
A partir de la configuration du local envisagé et principalement de son ouverture en façade, le programme Superlink calcule, heure par heure, pour une année entière, les besoins d'éclairage artificiel, complémentaire à l'éclairage naturel disponible.
En additionnant ces valeurs pour l'année entière nous obtenons la consommation totale d'éclairage artificiel. Les valeurs horaires, qui représentent les gains internes provenant du système d'éclairage, sont ensuite utilisées par le programme de thermique (TRNSYS).
Il nous semblait essentiel de combiner les facteurs d'éclairage et de thermique sans quoi le choix du vitrage n'aurait pas été optimal.

1.2 Résultats des simulations

Nous pouvons facilement montrer, grâce aux résultats de nos simulations, que si l'aspect éclairage avait été négligé nous aurions pu risquer de favoriser un vitrage présentant de bonnes propriétés thermiques mais de mauvaises propriétés visuelles.

Prenons par exemple, le cas de la configuration c3, avec des gains internes élevés, pour une combinaison de parois p2, dans le local 2 et sous la stratégie 1. Les Figure 5.1 et Figure 5.2 représentent les résultats obtenus en tenant compte des disponibilités d'éclairage naturel (Figure 5.1) et sans tenir compte de ces disponibilités (Figure 5.2).

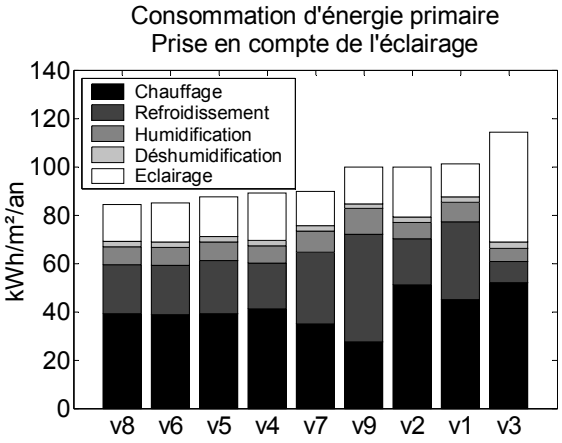


Figure 5.1 : Consommation d'énergie primaire en tenant compte des consommations d'éclairage artificiel

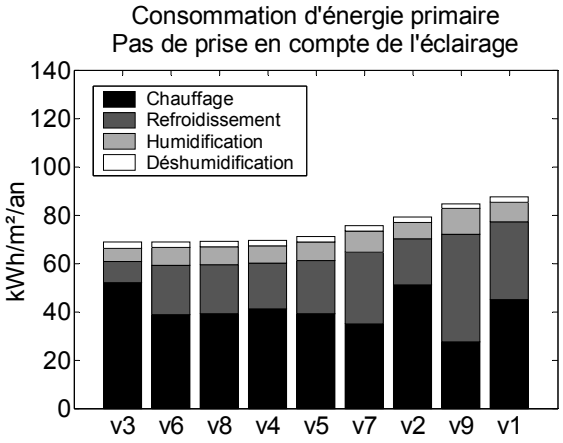


Figure 5.2 : Consommations d'énergie primaire sans tenir compte des consommations d'éclairage artificiel

Cet exemple nous montre clairement que si on ne tient pas compte des consommations d'éclairage naturel, le vitrage qui implique le moins de consommation d'énergie est le vitrage n°3 (SS108) (voir Figure 5.2).
Par contre, si on tient compte des consommations d'éclairage artificiel, nous voyons que ce vitrage est le moins intéressant de tous les vitrages testés car il consomme nettement plus d'éclairage artificiel que les autres.
Il est donc absolument nécessaire de tenir compte de la combinaison des caractéristiques visibles et thermiques du vitrage de manière à ne pas favoriser un des aspects au préjudice de l'autre.
Bien sûr, cette hypothèse suggère une mise en place d'une gestion automatique de l'éclairage artificiel en fonction des disponibilités d'éclairage naturel. Nous sommes convaincus que c'est la seule manière de tenir compte de l'éclairage naturel disponible dans un local, à tout instant, en fonction des conditions d'ensoleillement extérieures. Il existe actuellement une grande

variété de systèmes permettant de réaliser ce type de gestion et de réaliser ainsi des économies d'énergie importantes.
Si on veut étudier le choix du vitrage dans un bâtiment dans lequel il n'est pas envisagé d'installer un tel système de gestion, il ne faut certainement pas négliger les aspects d'éclairage pour autant. En effet, même si la gestion de l'éclairage artificiel est réalisée manuellement par chaque occupant du local, il est clair qu'un vitrage opaque à la lumière induira toujours une consommation d'éclairage artificiel plus importante qu'un vitrage plus clair. Il est donc primordial de toujours garder en tête les aspects d'éclairage, lors du choix d'un vitrage.

2. Influence des valeurs de rendement des systèmes

Pour établir tous les graphiques et réaliser les comparaisons que nous avons présentées au chapitre 4, nous avons considéré que le système de chauffage était un système au gaz. L'exemple suivant montre que le choix du type de système peut influencer le choix du vitrage. Les Figure 5.3 et Figure 5.4 présentent les résultats obtenus pour le même cas (configuration c3, gains internes élevés, combinaison de parois p2, local 2 et stratégie 1) équipé d'un système au gaz (Figure 5.3) ou d'un système de chauffage électrique (Figure 5.4).

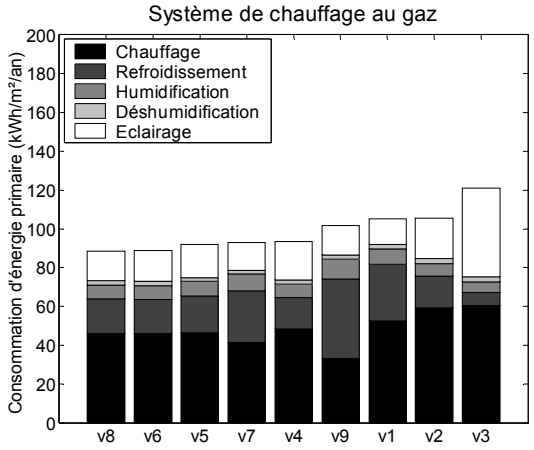


Figure 5.3 : Consommations d'énergie primaire, système de chauffage au gaz

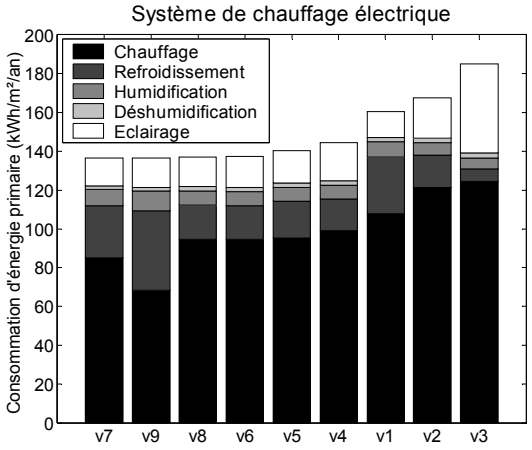


Figure 5.4 : Consommations d'énergie primaire, système de chauffage électrique

Nous remarquons sur ces figures que le vitrage n°7 (PLTfut), qui se classe quatrième lorsque l'on chauffe au gaz, devient premier lorsqu'on chauffe à l'électricité. La raison est que le chauffage électrique est fort énergivore et que les vitrages demandant peu de chauffage sont plus intéressants lorsqu'on chauffe à l'électricité.
Il est clair que les rendements des systèmes influencent les résultats. Comme nous le verrons au point 3, les facteurs de conversion en énergie primaire peuvent aussi avoir un impact très important sur le choix du vitrage. Il est donc très important de fixer ces facteurs le plus précisément possible car la précision des résultats des calculs thermiques et visuels peut être perdue si les facteurs de conversion ne sont pas choisis avec soin. Notons également que ces valeurs de rendement peuvent varier au cours du temps et qu'il est important de pouvoir tenir compte de l'évolution des techniques lors de l'établissement du classement des vitrages.

C'est ici qu'on peut juger de l'importance de disposer d'un outil informatique gérant la base de donnée réalisée à partir des simulations. En effet, l'utilisateur peut choisir le type de système de chauffage qui correspond à celui installé dans son projet, ainsi que le rendement des systèmes de chauffage et de refroidissement. Le programme calcule ensuite automatiquement les valeurs d'énergie primaire consommées en tenant compte des rendements choisis.
Le lecteur plus particulièrement intéressé par le fonctionnement de l'outil développé dans le cadre de cette thèse de doctorat se rapportera au chapitre 7, décrivant très précisément l'outil.

3. Importance du choix des facteurs de conversion en énergie primaire

Jusqu'à présent nous avons travaillé avec un facteur de conversion de l'énergie électrique en énergie primaire de 2.8. Ce nombre correspond au rendement moyen de production d'électricité belge. C'est à dire que pour produire 1kWh d'électricité, il faut brûler 2.8 kWh d'énergie de base. Ce facteur est appelé à évoluer dans les années qui viennent et le producteur d'électricité belge aimerait atteindre la valeur de 1.8 dans les prochaines années, en abandonnant totalement la production d'électricité dans les centrales à charbon et en remplaçant celles-ci par des centrales TGV ayant un facteur de rendement variant de 55 à 57 %.
Les facteurs de conversion des différentes énergie, présenté au chapitre 3 et rappelés au Tableau 5.1 vont donc évoluer vers les valeurs présentées au Tableau 5.2.

		Rendement bâtiment moyen	Taux de conversion	Energie primaire (KWh)
Froid	Electricité	2.5	2.8	1.1
Chaud	Electricité	0.9	2.8	3.1
	Gaz	0.7	1	1.43
	Mazout	0.66	1	1.52
Eclairage	Electricité	0.9	2.8	3.1

Tableau 5.1: Valeurs des rendements et des facteurs de conversion en énergie primaire : situation actuelle

		Rendement bâtiment moyen	Taux de conversion	Energie primaire (KWh)
Froid	Electricité	2.5	1.8	0.72
Chaud	Electricité	0.9	1.8	2
	Gaz	0.7	1	1.43
	Mazout	0.66	1	1.52
Eclairage	Electricité	0.9	1.8	2

Tableau 5.2: Valeurs des rendements et des facteurs de conversion en énergie primaire : situation théorique future

Les demandes de froid et d'éclairage auront moins d'impact par rapport aux demandes de chaud (lorsqu'on chauffe au gaz ou au mazout) et les vitrages induisant de faibles demandes de chaud présenteront alors des meilleurs résultats que ceux qu'ils donnent lorsqu'on utilise les valeurs actuelles de conversion en énergie primaire.
Par exemple, la Figure 5.5 représente le classement des vitrages dans le cas de la configuration c3, pour des valeurs de gains internes faibles, la stratégie 1, dans le local 1 avec une combinaison de murs p2, le local étant orienté au sud. Les facteurs de conversion utilisés sont les facteurs correspondant aux valeurs actuelles. Les vitrages, en plus d'être classés en fonction de leur consommation totale, ont pu être distribués en trois catégories différentes :

- la catégorie verte correspond au meilleur vitrage et aux vitrages dont la consommation totale ne dépasse pas de plus de 10 % la consommation du meilleur vitrage.
- la catégorie orange correspond aux vitrages dont la consommation totale ne dépasse pas de plus de 25 % la consommation du meilleur vitrage.
- la catégorie blanche correspond aux vitrages dont la consommation dépasse de plus de 25 % la consommation du meilleur vitrage.

Nous observons que le vitrage sous vide se classe sixième, lorsque nous utilisons les valeurs de conversion actuelles. Nous voyons aussi que ce vitrage se situe dans la catégorie orange (Figure 5.5).
Par contre, si nous traçons le même graphique en utilisant les facteurs de conversion futurs (Figure 5.6), nous observons que le vitrage sous vide se classe alors second et qu'il fait partie de la catégorie verte. Comme nous l'avions prédit, le vitrage sous vide, qui induit de très faibles demandes de chauffage, devient alors plus intéressant en terme de consommation totale d'énergie primaire.

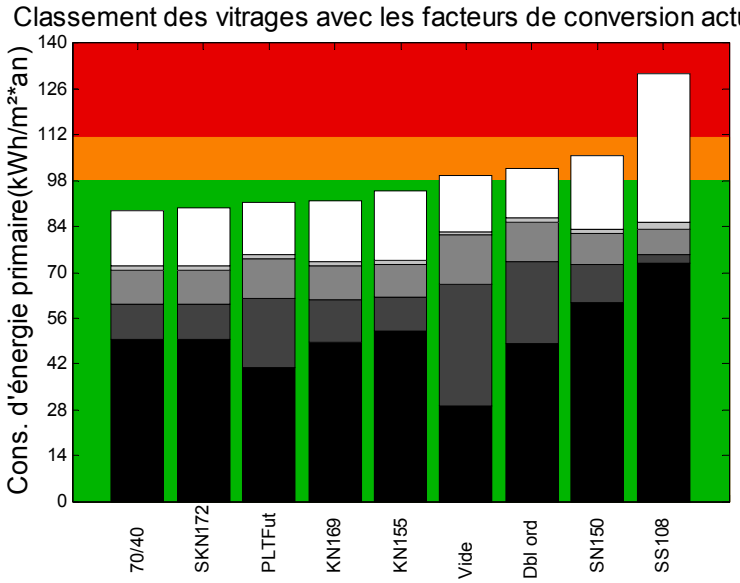


Figure 5.5 : Exemple de classement des vitrages en tenant compte des facteurs de conversion actuels

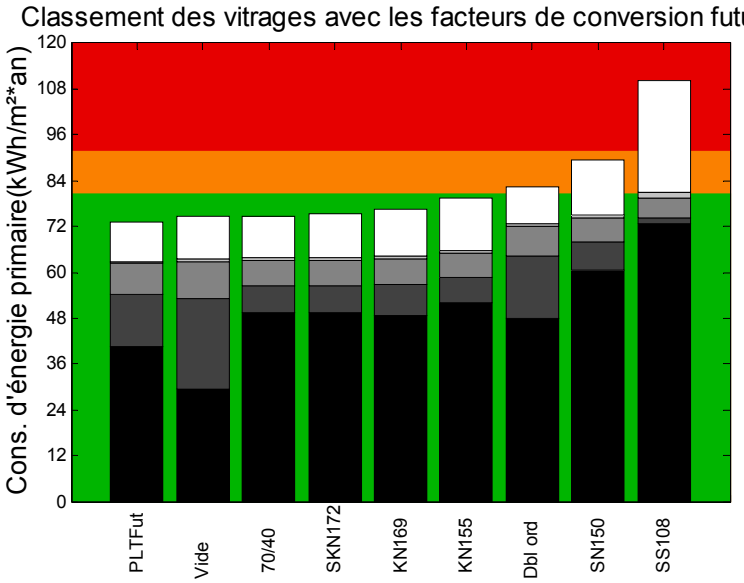


Figure 5.6 : Exemple de classement des vitrages en tenant compte des facteurs de conversion futurs

4. Critères économiques

4.1 Coût des consommations

Jusqu'à présent, nous avons uniquement parlé en terme de consommation d'énergie primaire. Cependant, le critère de sélection de l'architecte ou du maître d'ouvrage est plus souvent un critère de coût. Si nous décidons de classer les vitrages en fonction du coût de la consommation qu'ils induisent, ce classement pourrait varier par rapport au classement en énergie primaire.
Actuellement, en Belgique, les coûts d'un kWh d'énergie primaire sont relativement similaires pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Ils sont donnés au Tableau 5.3.

		Facteur de conversion en énergie primaire (kWh)	Coût (Euro)	Coût de 1kWh d'énergie primaire (Euro/kWh)
Froid	Electricité	1.1	0.04	0.036
Chaud	Electricité	3.1	0.11	0.036
	Gaz	1.43	0.03	0.022
	Mazout	1.52	0.05	0.033
Eclairage	Electricité	3.1	0.1	0.032

Tableau 5.3: Coût des consommations d'énergie primaire de chauffage, refroidissement et éclairage (situation actuelle)

Le classement des vitrages sera donc similaire si nous choisissons le critère "coût" plutôt que le critère "consommation d'énergie primaire".
Cependant, il n'en sera pas toujours ainsi. En effet, nous savons que les prix des énergies sont fort variables actuellement et qu'à tout moment, la hausse ou la baisse du coût d'un type d'énergie pourrait modifier fortement les valeurs de coût d'un kilowattheure d'énergie primaire.

Nonobstant le fait que des variations du coût des énergies puissent influencer le choix du vitrage, la seule évolution des facteurs de conversion en énergie primaire influencera le classement des vitrages. En effet, si nous reproduisons le Tableau 5.3 en prenant les facteurs de conversion futurs, nous obtenons les valeurs de coût d'énergie primaire reprises au Tableau 5.4.

		Facteur de conversion en énergie primaire	Coût (Euro)	Coût de 1kWh d'énergie primaire (Euro/kWh)
Froid	Electricité	0.72	0.04	0.056
Chaud	Electricité	2	0.11	0.055
	Gaz	1.43	0.03	0.021
	Mazout	1.52	0.05	0.033
Eclairage	Electricité	2	0.1	0.050

Tableau 5.4 : Coût des consommations d'énergie primaire de chauffage, refroidissement et éclairage (situation future)

Les valeurs nous montrent que, à moins de se chauffer à l'électricité, les coûts d'un kilowattheure d'énergie primaire sont nettement plus différenciés que ceux correspondant à la situation actuelle. Pour un même cas, le classement des vitrages pourrait donc être différent si l'on parle en terme de consommation d'énergie primaire ou si l'on parle en terme de coût des consommations.

4.2 Temps de retour de l'investissement

En plus du critère de coût des consommations, le maître d'ouvrage et l'architecte prennent en considération le coût d'achat du vitrage. Bien qu'il soit important de tenir compte du prix du vitrage lors du choix de celui-ci, il est impératif de combiner ce critère avec le critère de coût des consommations au cours de la vie du vitrage.

Nous avons décidé d'en tenir compte de la manière suivante :

- Premièrement, nous fixons la durée de vie moyenne du vitrage. Dans notre cas, nous avons décidé, d'un commun accord avec les producteurs de vitrages, de la fixer égale à 20 ans. Cette valeur est importante car si nous voulons évaluer la rentabilité d'un vitrage, il faudra tenir compte d'une durée maximum de 20 ans.
- Ensuite, connaissant le coût d'achat d'un mètre carré de vitrage, nous pouvons le rapporter au m^2 de sol, en connaissant la surface du vitrage et la surface du local considéré (à partir de la configuration de façade et du local choisis). C'est cette valeur qui déterminera l'ordonnée du point correspondant à 0 ans.

A partir de ces valeurs, nous pouvons tracer la Figure 5.7 (nous nous sommes limités à six vitrages différents, pour une question de lisibilité du graphique) :

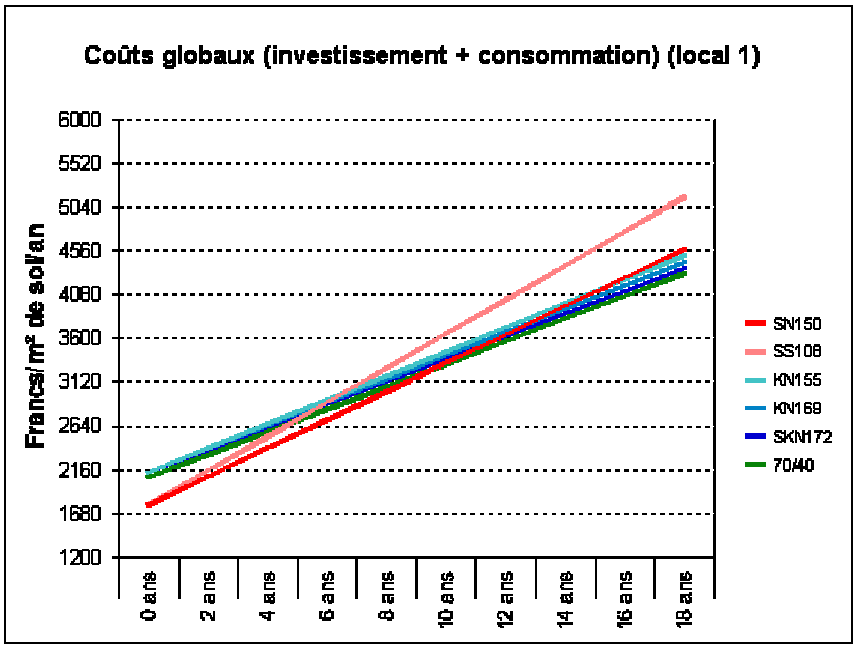


Figure 5.7 : Comparaison de divers vitrages en terme de coût global

A l'abscisse 0 ans correspond le prix du vitrage. La pente de la droite est proportionnelle au coût des consommations d'énergie, calculé grâce à l'outil.
Ce type de graphique nous permet de voir qu'un vitrage plus performant mais également plus cher, peut être rentabilisé au bout de quelques années seulement. Par exemple, dans le cas présenté à la Figure 5.7, le choix d'un vitrage 70/40 plutôt que d'un SS108, qui serait moins cher, sera rentabilisé au bout de 5 ans.
Note : nous sommes conscients du fait que ce calcul ne tient ni compte de l'évolution des coûts de l'énergie ni de l'évolution des rendements au cours du temps (valeurs très difficiles à évaluer) mais il permet cependant déjà une comparaison intéressante des vitrages.

5. Critères environnementaux

5.1 Introduction

Actuellement, on ne peut plus envisager le choix d'un matériau ou d'un système sans tenir compte des aspects environnementaux découlants de ce choix. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'établir l'écobilan des différents vitrages testés. L'écobilan est un outil d'évaluation de l'impact environnemental d'un produit ou d'un système nécessaire à une fonction particulière. Dans notre cas, nous calculons les émissions de CO_2, NO_x et SO_2 lors de la production du vitrage et au cours de sa vie. Nous calculons également l'énergie grise contenue dans chaque vitrage. L'énergie grise d'un ensemble de matériaux est la quantité d'énergie contenue dans cet ensemble (le vitrage dans notre cas), c'est à dire la quantité d'énergie totale qu'il a fallut consommer afin de produire ce matériau, de l'acheminer jusqu'à son endroit d'assemblage, de l'assembler avec les autres matériaux formant le vitrage, etc...
L'établissement de l'écobilan d'un vitrage ainsi que le calcul de son énergie grise nécessitent la décomposition du vitrage en matériaux de base, l'établissement de l'écobilan et le calcul de l'énergie grise pour chacun de ces matériaux.

5.2 Etablissement des écobilans et calcul de l'énergie grise contenue dans les vitrages

Emissions de polluants liées à la consommation énergétique

Les données environnementales utilisées dans l'outil de choix du vitrage nous ont été fournies par Electrabel. Elles sont tirées du rapport de statistiques environnementales 1999.

Emissions de CO_2

Les émissions de CO_2 sont proportionnelles à la consommation d'énergie primaire et dépendent du type de combustible. Nous utilisons les valeurs suivantes :

- Gaz naturel : 0.198 kg CO_2/kWh
- Mazout : 0.264 kg CO_2/kWh
- Electricité : le CO_2 produit en centrale est fonction de la saison et de l'heure de la journée. Dans notre outil, nous utilisons une valeur moyenne de 0.27 kg CO_2 par kWh électrique produit en centrale.

Ces taux d'émission de CO_2 ont été déterminés au niveau des centrales électriques du parc belge (selon le programme PROMIX) dans le cadre du projet "Connaissance des émissions de CO_2" – Electrabel – SPE. Ces taux doivent être multipliés par le facteur 1.109 pour les clients basse tension, afin de tenir compte des pertes en ligne et de transformation.

Notons que pour être tout à fait précis, il faut encore tenir compte des rendements des systèmes.

Emissions de NO_x

Les émission de NO_x ne sont pas seulement liées au combustible mais également au mode de combustion de celui-ci (taux d'excès d'air, température de flamme, …).
Les valeurs utilisées dans l'outil correspondent :
- pour le gaz naturel : à une chaudière atmosphérique moderne : 140 mg de NO_x par kWh,
- pour le mazout : à une chaudière moderne (non low NO_X) : 165 mg de NO_x par kWh,
- pour l'électricité : 420 mg de NO_x par kWh produit en centrale.

Comme pour les émissions de CO2, cette valeur doit être multipliée par 1.109 et divisée par le rendement des systèmes.

Emissions de SO_2

Actuellement, nous ne connaissons que la valeur de production de SO_2 liée à la production d'un kWh électrique.
Elle est de 430 mg/kWh d'électricité produite en centrale.

Emissions de polluants liées à la fabrication des vitrages

Données

Les seules valeurs que nous avons pu obtenir du producteur de vitrage sont reprises dans le Tableau 5.5. Elles nous ont été procurées par la firme St-Gobain et sont basées sur une étude d'écobilan menée dans le Groupe environnement de St-Gobain avec une université allemande. Malheureusement, on peut constater, en observant le tableau, qu'elles ne sont pas fort différentes d'un vitrage à l'autre alors que différents facteurs tels que l'épaisseur du verre, le type de gaz, etc., devraient influencer les valeurs.
Les hypothèses prises afin de mesurer ou calculer les valeurs présentées dans le Tableau 5.5 ne sont pas connues précisément. On sait néanmoins que les limites du système sont assez restreintes. En effet, ces valeurs ne prennent en compte que les effets énergétiques de production du verre auxquels on ajoute l'effet de l'énergie électrique nécessaire au dépôt de la couche.

	k (W/m2K)	TI (%)	FS (%)	Durée de vie (ans)	CO_2 (g/m2)	NO_x (g/m2)	SO_2 (g/m2)	Energie grise (kWh/m^2)
Dbl ordi (4/15air/4)	2.8	81	75	20	30.8	196	65	103
SN150 (6/12air/6)	2.7	45	47	20	38.5	238	83	128
SS108 (6/12air/6)	2.3	7	12	20	30.8	238	83	128
KN155 (6/12argon/6)	1.5	49	36	20	39	240	85	130
KN169 (6/12argon/6)	1.4	61	42	20	39	240	85	130
SKN172 (6/12argon/6)	1.4	65	37	20	39	240	85	130
PLTFut (4/15argon/4)	1.4	75	54	20	32.8	200	69	106
70/40 (4/12argon/4)	1.4	70	38	20	-	-	-	-
Vide	0.7	69	70	20	-	-	-	-

Tableau 5.5 : Emissions toxiques lors de la production des différents vitrages

Nous n'avons pas d'informations relatives au vitrage 70/40 et au vitrage sous vide, raison pour laquelle nous ne procédons pas actuellement aux calculs pour ceux-ci.

Durée de vie

La durée de vie des vitrages est identique à celle fixée pour déterminer le coût de ceux-ci. Il s'agit donc de 20 ans.

Traitement des vitrages en fin de vie

Les valeurs données ici ne prennent pas en compte le recyclage ou la mise en décharge des vitrages en fin de vie.

5.3 Conclusions

A partir des calculs réalisés dans l'outil, nous pouvons établir que quelle que soit le local de bureau analysé, les productions de polluants liées à la fabrication des vitrages sont minimes par rapport aux émissions de polluants liées aux consommations d'énergie au cours de la vie des vitrages.
Si l'on veut diminuer les productions de polluants, il est donc essentiel de limiter les consommations d'énergie du bâtiment.

Nous ne poussons pas plus loin nos analyses en terme de production de polluants et d'énergie grise car l'incertitude par rapport aux données nous semble trop grande pour pouvoir comparer les vitrages entre eux.

CHAPITRE 6. Prise en compte des protections solaires

Après un bref aperçu bibliographique de la problématique des protections solaires, ce chapitre présente la manière dont celles-ci ont été traitées dans nos calculs de simulation et une liste des paramètres pouvant influencer leur rentabilité.
Ce chapitre montre également l'intérêt de l'usage d'une protection solaire intérieure ou extérieure et met l'accent sur deux des paramètres qui influencent réellement l'efficacité d'un système d'ombrage.
Il montre la complexité du mécanisme de gestion associé à un système d'ombrage, mécanisme qui doit notamment être lié au type de protection envisagé et au type de vitrage qui y est associé et donne une piste quand à la suite des travaux à réaliser afin d'optimiser le choix d'un système d'ombrage et de son mode de gestion.

1. Introduction : la problématique des protections solaires 152
1.1 Propriétés physiques des systèmes d'ombrages 152
1.2 Influence des protections solaires sur les consommations d'énergie et sur l'éclairage naturel disponible dans un bâtiment 153
1.3 Méthodes de calcul permettant d'évaluer les performances des bâtiments équipés de protections solaires ou de vitrages de contrôle solaire 154

2. Prise en compte des protections solaires dans les programmes de simulation 155
2.1 Prise en compte des protections solaires dans SUPERLINK 155
2.2 Prise en compte des protections solaires dans TRNSYS 155
2.3 Combinaison des deux programmes 155

3. Paramètres influençant la rentabilité d'un système d'ombrage 156

4. Objectifs des travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat 158

5. Modes d'influence des différents paramètres en cas de chauffage et de refroidissement (stratégie 1) 159
5.1 Choix du vitrage 159
5.2 Choix de la protection solaire 159
5.3 Influence de la température de gestion d'une protection solaire extérieure ou intérieure sur les consommations. 159
5.4 Evolution du nombre d'heures de surchauffe en présence d'un protection solaire extérieure ou intérieure 166
5.5 Influence de la valeur du rayonnement solaire minimal de consigne sur les consommations 166

6. Conclusion 170

7. Références 171

1. Introduction : la problématique des protections solaires

Les systèmes d'ombrage affectent la consommation d'énergie des bâtiments en réduisant les gains solaires et en modifiant les pertes thermiques au travers des fenêtres. Les protections solaires influencent aussi le niveau d'éclairage naturel atteint à l'intérieur et la vue vers l'extérieur. Les ombrages influencent donc directement les consommations d'énergie de chauffage, refroidissement et éclairage ainsi que le confort visuel et thermique.
Ces aspects de confort aussi bien que ces aspects de consommation sont importants. En effet, les consommations d'énergie sont liées à des critères économiques et environnementaux alors que les aspects de confort influencent le bien-être et la productivité des occupants d'un bâtiment.
Il est fort compliqué de mettre en place de l'ombrage dans un bâtiment en tenant compte de tous ces aspects.

L'étude réalisée par M. C. Dubois [Dub 1997] montre que la connaissance par rapport aux systèmes d'ombrage peut être organisée selon trois thèmes principaux :

- les propriétés physiques (thermiques et optiques) des systèmes d'ombrages (ou des vitrages de contrôle solaire, puisque ceux-ci sont en quelque sorte similaires à la combinaison obtenue par la mise en place d'un vitrage et d'un système d'ombrage).
- l'effet des protections solaires sur les consommations d'énergie et l'éclairage naturel disponible dans un bâtiment.
- les méthodes de calcul permettant d'évaluer les performances des bâtiments équipés de protections solaires et/ou de vitrages de contrôle solaire.

Détaillons ces différents points

1.1 Propriétés physiques des systèmes d'ombrages

Coefficient de transmission thermique

Un grand nombre d'études ayant pour but de quantifier la réduction du flux de chaleur au travers des fenêtres, pour différents types de protections solaires, ont été réalisées dans les années 70 et 80. Ces études ont montré que la présence d'un système d'ombrage affecte de manière significative les flux de chaleur au travers des fenêtres, spécialement dans le cas d'un simple vitrage clair. La résistance thermique d'un tel système est fortement améliorée si le système d'ombrage piège une couche d'air derrière le vitrage. Il existe différentes manières d'améliorer encore la résistance thermique d'un système ombrage-vitrage comme par exemple en scellant les côtés de l'ombrage à la fenêtre ou en utilisant des systèmes d'ombrage intégrés au vitrage.
Les valeurs de réduction de flux de chaleur mesurées lors de tests réalisés avec différents systèmes d'ombrage varient selon le type d'ombrage testé, les conditions expérimentales et le type et la taille de la fenêtre utilisée lors des expériences. En résumé, la plupart des auteurs s'accordent à dire que les stores vénitiens, les tentures et les stores enroulables, placés derrière un simple vitrage, réduisent les pertes de chaleur de 25 à 40 %. Les stores enroulables réfléchissants placés à l'intérieur du vitrage réduisent les pertes de chaleur de 45 à 58 %, selon le type de matériel et la méthode de montage utilisée [Dub 1997].

Coefficient de transmission solaire et facteur solaire de l'ombrage

Lorsque le rayonnement solaire est intercepté par une paroi, une partie de l'énergie incidente est directement réfléchie vers l'extérieur, une partie est directement transmise vers l'intérieur et une partie est absorbée par le matériau. Ce dernier, va s'échauffer et réémettre une partie de cette énergie vers l'intérieur et une partie vers l'extérieur.
Le pourcentage d'énergie transmise directement vers l'intérieur est appelé coefficient de transmission thermique de l'ombrage.
Le pourcentage total d'énergie transmise au travers d'une paroi simple ou composée, vers l'intérieur d'un local est appelé facteur solaire de la paroi. On parlera souvent du facteur solaire d'un ensemble protection solaire + vitrage. Le facteur solaire ainsi défini tient compte de l'effet d'une éventuelle couche d'air échauffé prisonnier entre la protection solaire et le vitrage.

Certains fabricants caractérisent les protections solaires par leur facteur d'ombrage plutôt que leur facteur solaire. Le facteur d'ombrage d'une combinaison vitrage + protection solaire est le rapport entre l'apport d'énergie au travers de la fenêtre protégée et l'apport d'énergie au travers d'un simple vitrage clair. D'une manière générale, on peut dire que le facteur solaire vaut 0.86 fois le facteur d'ombrage [Cli 1997].

Depuis les années 50, de nombreux chercheurs ont tenté de déterminer les propriétés optiques des ombrages. Ces propriétés optiques ont été exprimées en terme de transmission solaire, de valeurs de réflexion solaire, facteur solaire ou facteur d'ombrage. Ces études ne permettent généralement pas de conclure quoi que ce soit en terme de consommation annuelle d'énergie dans les bâtiments mais elles indiquent, d'une manière générale, de quelle manière l'ombrage protège la fenêtre à laquelle il est associé. Elles ne fournissent donc pas de piste quand aux stratégies optimales d'ombrage à adopter en fonction du climat [Dub 1997].

Coefficient de transmission lumineuse

Le coefficient de transmission lumineuse d'un ombrage est le pourcentage de lumière visible qui traverse celui-ci.
Dans la littérature, il est très difficile de trouver des recommandations quant à la valeur du coefficient de transmission lumineuse à choisir. Celle-ci dépendra surtout de la couleur et du type de protection solaire.
La couleur de la protection solaire sera souvent choisie en fonction de sa position ; une protection solaire intérieure devra être la plus claire possible afin de réfléchir un maximum de chaleur alors que si cette protection est placée à l'extérieur, sa teinte aura moins d'influence sur ses caractéristiques thermiques et sera généralement choisie en fonction de critères esthétiques.
Quand aux protections de type store en tissus, c'est le mode de tissage de celui-ci qui influencera principalement la quantité de chaleur et de lumière le traversant.

1.2 Influence des protections solaires sur les consommations d'énergie et sur l'éclairage naturel disponible dans un bâtiment

Depuis le développement des programmes informatiques performants, un grand nombre d'études paramétriques sur les protections solaires et leur influence sur les consommations d'énergie ont été réalisées. La relation entre l'utilisation de protections solaires et les variations de consommation d'énergie a aussi été étudiée expérimentalement. Au commencement de leurs travaux sur ce sujet, les chercheurs ont concentré leur attention sur la relation qui existe entre les charges de refroidissement et les protections solaires. Ensuite, l'impact des protections solaires sur les charges de chauffage et les consommations annuelles d'énergie a été étudié. Cependant, depuis le milieu des années 80, le développement des systèmes de dimming permettant de remplacer en partie l'éclairage artificiel par de l'éclairage naturel a introduit un nouvel aspect qui se définit comme l'influence des protections solaires sur les consommations d'électricité d'éclairage. Cet aspect doit dès lors être couplé aux aspects de chauffage et refroidissement [Dub 1997].

Les charges de chauffage et de refroidissement

Des travaux étudiant l'effet des protections solaires sur les charges de chauffage et de refroidissement ont montré que les stratégies d'ombrage à adopter dépendent du climat. Alors que la plupart des auteurs s'accordent à dire que l'usage de protections solaires réduit la quantité d'énergie nécessaire pour refroidir et tend à augmenter les consommations d'énergie de chauffage, peu d'entre eux donnent les mêmes valeurs d'économies potentielles ni la même stratégie optimale [Dub 1997].

Les consommations annuelles d'énergie y compris l'éclairage artificiel

Il est clair que l'utilisation d'un système de dimming de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel disponible réduit les consommations d'éclairage artificiel.
Les auteurs ont cependant du mal à s'accorder sur la quantification des bénéfices de l'utilisation de l'éclairage naturel sur la consommation d'énergie totale.

En résumé, on peut voir au travers des différents articles, que la stratégie à adopter quand on compte sur l'éclairage naturel pour diminuer les charges électriques d'un bâtiment n'est pas encore claire et que c'est un problème complexe. Bien que tous les travaux de recherche montrent que l'utilisation de l'éclairage naturel permet des réductions de consommations d'énergie, plus de travail doit encore être réalisé afin de définir les systèmes d'ombrages appropriés ainsi que les stratégies optimales de contrôle de l'éclairage naturel [Dub 1997].

Les systèmes d'ombrage et l'éclairage naturel

Il existe très peu d'études sur la liaison entre les caractéristiques des systèmes d'ombrage et les niveaux d'éclairement atteints.

1.3 Méthodes de calcul permettant d'évaluer les performances des bâtiments équipés de protections solaires ou de vitrages de contrôle solaire

Modèles géométriques

Depuis le début des années 80, de nombreux programmes informatiques ont été développés afin de déterminer précisément la forme optimale des systèmes d'ombrages extérieurs – comme les marquises et les surplombs – en tenant compte de la position du soleil. La plupart de ces programmes traitent spécifiquement de la géométrie des systèmes d'ombrage et ne contiennent pas d'algorithmes permettant d'évaluer les performances des systèmes en terme de consommation d'énergie [Dub 1997].

Programmes permettant de calculer la quantité de rayonnement solaire pénétrant dans un bâtiment

Parallèlement à ce travail sur les modèles géométriques, des programmes dynamiques de calcul du flux énergétique passant au travers des vitrages équipés de protections solaires ont été développés depuis le milieu des années 80. Certains auteurs ont identifié certains des problèmes qu'il reste encore à résoudre dans les modèles de calcul : le remplacement du concept de facteur d'ombrage par les propriétés appropriées dépendant de l'angle solaire et une représentation précise des transferts de chaleurs et des échanges radiatifs au travers des systèmes complexes que sont les fenêtres couplées à des systèmes de protection solaire. De nombreux travaux sur ce sujet sont en cours actuellement et les nouveaux développements qui en résulteront contribueront à améliorer la précision des programmes de calcul dynamique pour des bâtiments équipés de systèmes de fenêtre et d'ombrage complexes [Dub 1997].

2. Prise en compte des protections solaires dans les programmes de simulation

2.1 Prise en compte des protections solaires dans SUPERLINK

Le système d'ombrage considéré dans SUPERLINK peut être fixe ou variable [Chr 1999]. Superlink travaille à partir d'un facteur d'ombrage qui correspond au rapport du rayonnement solaire qui traverse la fenêtre équipée de l'ombrage sur le rayonnement solaire qui traverse la fenêtre sans ombrage.

Le type d'ombrage mobile modélisable au moyen de SUPERLINK correspond donc uniquement à un ombrage de type 'store en tissu' (mais Superlink permet cependant de modéliser des surplombs).

En ce qui concerne le mode de gestion de la protection solaire, Superlink ne donne pas beaucoup de possibilités :
- soit le système d'ombrage est fixe, c'est à dire que l'ombrage est constamment maintenu devant la fenêtre
- soit SUPERLINK propose un mode de gestion optimalisé en fonction de l'éclairage naturel disponible à l'intérieur du local. Il calcule en fait la valeur exacte du facteur d'ombrage nécessaire pour atteindre la consigne d'éclairement, si possible à ce moment-là.

SUPERLINK ne permet donc pas de gérer un ombrage en fonction d'une valeur de rayonnement ou d'éclairement atteignant la fenêtre. Pour modéliser le type de gestion utilisé dans la pratique, il faut alors combiner deux fichiers de résultats de SUPERLINK, comme c'est expliqué au point 2.3.

2.2 Prise en compte des protections solaires dans TRNSYS

TRNSYS permet de modéliser des protections solaires extérieures et intérieures. Celles-ci peuvent être définies exclusivement pour chaque fenêtre du bâtiment.

Pour la modélisation des protections intérieures, le modèle tient compte de l'absorption, par les différentes couches de la fenêtre, du rayonnement solaire réfléchi par celles-ci. De ce fait, la valeur calculée de la température de surface intérieure du vitrage est très réaliste. Le programme tient aussi compte de la convection provenant de l'effet de cheminée dû à l'échauffement de l'air situé entre la fenêtre et la protection solaire.

Cependant, la version 14.2 de TRNSYS que nous avons utilisée pour nos calculs ne permet pas de modéliser en même temps une protection intérieure et une protection extérieure pour la même fenêtre. La version 15, disponible actuellement, ne présente plus cet inconvénient.

2.3 Combinaison des deux programmes

Pour combiner les programmes Superlink et TRNSYS lors de nos calculs de simulation nous avons dû procéder de la manière suivante :
Premièrement, nous avons calculé les consommations horaires d'éclairage artificiel dans le cas où la protection solaire est en place et dans le cas contraire. Nous disposions donc de deux fichiers de consommation distincts.
C'est ensuite le programme TRNSYS qui a déterminé, heure par heure et en fonction de différents critères explicités ultérieurement dans ce chapitre, si la protection solaire était mise en place ou pas.
Le choix du fichier dans lequel la valeur de consommation d'éclairage artificiel devait être prise découlait donc de TRNSYS et c'est celui-ci qui était chargé d'aller rechercher cette valeur dans le fichier correspondant à la situation.

3. Paramètres influençant la rentabilité d'un système d'ombrage

Paramètres relatifs au mode de gestion de la protection solaire

En pratique, les principaux paramètres pris en compte lors de la gestion automatique d'une protection solaire sont des paramètres de temps (horloge), de climat intérieur (détecteur de fumée et température intérieure) et de climat extérieur (lumière disponible, vent, température extérieure et pluie) [Hel 1999].

Ces paramètres agissent de la manière suivante :

- Horloge (quotidienne ou hebdomadaire) : il s'agit d'une minuterie qui ferme ou ouvre les stores à heures fixes. Par exemple, on peut décider de remonter tous les stores d'un bâtiment durant la nuit pour éviter tout problème de détérioration de ceux-ci lié au vandalisme.

- Détecteur de fumée : ce détecteur signale la présence de fumée et commande l'enroulement des stores, pour garantir un accès et une évacuation en toute sécurité en cas d'incendie.

- Température intérieure ou extérieure : le capteur de température empêche le store de descendre si une température intérieure ou extérieure minimale n'est pas atteinte. Il peut aussi descendre la protection lorsqu'on atteint une certaine température.

- Capteur de lumière : ce capteur mesure l'éclairement et active le système de protection solaire en cas de dépassement d'une valeur de consigne.

- Capteur de vent ou anémomètre : il mesure la vitesse du vent et protège les stores contre tout dommage en cas de menace de tempête, par un enroulement préventif.

- Détecteur de pluie : ce capteur permet de remonter le store en cas de pluie.

En ce qui concerne nos simulations, nous travaillerons avec les paramètres suivants :
Valeur d'éclairement, température extérieure ou intérieure et vitesse du vent.
Selon la firme SOMFY, qui commercialise des systèmes d'automatisation de protections solaires, les valeurs de consigne choisies sont en général les suivantes :

- Valeurs d'éclairement
  En général, la protection solaire est baissée lorsque l'éclairement extérieur arrivant sur la façade concernée vaut 10 à 50 klx. Cet intervalle est assez étendu et peut être restreint, si on regarde les cas les plus courants, à une valeur variant entre 25 et 30 klx.

- Température
  Le plus souvent, on travaille en fonction de la température intérieure. La protection solaire n'est pas abaissée si celle-ci ne vaut pas au moins 20°C.

- Vitesse du vent
  Le réglage de la gestion des protections solaires peut s'avérer assez délicat. En effet, l'anémomètre est souvent placé en toiture. Or, le vent peut varier en fonction de la hauteur de la protection solaire sur la façade, de la façade (si celle-ci est protégée par d'autre bâtiments, par exemple), du type de protection (mode de fixation), des dimensions de celle-ci, etc.
  Les valeurs de vent à partir desquelles les protections sont remontées varient de 7m/s à 25 m/s. Il s'agit de valeurs extrêmes. La plage de valeur la plus fréquemment rencontrée est de 10 à 12 m/s. Les nouveaux systèmes d'automatisation admettent au maximum 15 m/s.

Nous notons donc qu'on ne rencontre en général pas de capteurs d'ensoleillement. Les mesures d'ensoleillement sont remplacées par des mesures d'éclairement, réalisées au moyen de luxmètres.

Introduction de ces paramètres dans les simulations

- Eclairement
  Dans la pratique, c'est donc une valeur d'éclairement qui est à la base de la gestion de la protection solaire. Cependant, nous ne disposons pas des valeurs d'éclairement dans le fichier météo utilisé dans TRNSYS. Pour pouvoir simuler l'usage de protections solaires au moyen du logiciel TRNSYS, il nous faut donc lier les valeurs d'éclairement à des valeurs de rayonnement solaire. Cette liaison peut être établie à partir de valeurs d'efficacité lumineuse de l'éclairage naturel. Paul Littlefair [Lit 1985], dans sa revue de la littérature, avance des valeurs de 95 à 115 lm/W lorsque le ciel est clair et de 105 à 120 lm/W en cas de ciel couvert.
  Dans les travaux précédents que nous rencontrons dans la pratique, nous pouvons observer le choix de valeurs suivantes :

  Piet Standaert, dans le logiciel qu'il a réalisé pour la firme Hélioscreen, a choisi de prendre une valeur de 100 W/m^2. Ceci correspondrait à un intervalle de valeurs d'éclairement allant de 9500 à 12000 lux (1 lux = 1lm/m^2).

  Elisabeth Gratia, dans les calculs qu'elle avait réalisés dans le cadre de la conception de la maison PLEIADE, avait choisi une valeur de 150 W/m^2. Cette valeur correspondrait à un intervalle allant de 14250 à 18000 lux.

  Nous observons donc que nous sommes encore largement en-dessous des valeurs proposées par la firme SOMFY (25000 à 30000 lx). Pour atteindre celles-ci, il faudrait prendre une valeur de rayonnement de 250 W/m^2, ce qui correspondrait à une fourchette de 23750 à 30000 lx.

  Dans le cadre de ce travail, nous étudierons l'influence du choix de cette valeur sur les différentes consommations.

- Température
  La valeur minimale de température intérieure de 20°C nous paraît très faible. Dans les simulations réalisées jusqu'ici et présentées dans les chapitres précédents, nous prenions une température de consigne de chauffage de 21°C. L'utilisation de la valeur de 20°C comme température à partir de laquelle la protection solaire peut être abaissée reviendrait à baisser la protection solaire alors que le système de chauffage fonctionne encore. Il en résulterait alors une perte certaine des gains gratuits et une augmentation conséquente des consommations de chauffage. Nous étudierons également dans la suite de ce travail comment le choix de la température intérieure à partir de laquelle la protection solaire peut être mise en place influence les différentes consommations.

- Vitesse du vent
  Si nous observons le fichier météo utilisé pour nos simulations, nous remarquons que le vent ne dépasse jamais 13.7 m/s et que cette valeur n'est atteinte que très ponctuellement au cours de l'année. Nous décidons donc de ne pas tenir compte des valeurs de vitesse du vent dans nos calculs, ce qui simplifiera les fichiers de données, sans induire d'erreur importante dans les calculs.

4. Objectifs des travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat

Le but des simulations de systèmes d'ombrage réalisées au cours de cette thèse n'était pas, comme dans le cas des vitrages, d'optimiser le choix de l'ombrage et de son mode de gestion, pour tous les cas proposés par l'outil informatique.
Il s'agissait plutôt de la réalisation de la première étape de cette démarche. Nous avons en fait effectué une première étude paramétrique qui devait nous permettre de mettre en évidence certains des paramètres influençant la rentabilité ou le bon fonctionnement d'une protection solaire.
Il s'agissait également de montrer que le choix d'une bonne combinaison vitrage + ombrage pouvait réduire les consommations globales et s'avérer plus intéressant que le choix d'un vitrage sans protection solaire.

Dans ce chapitre, nous avons choisi arbitrairement un type de vitrage et un type de protection solaire. Cet ensemble vitrage + protection solaire ne représente sans doute pas la meilleure solution pour les cas étudiés.
Très vite, nous réalisons que l'optimisation du choix d'un système d'ombrage devrait passer par plusieurs étapes dont notamment l'optimisation du choix de la combinaison vitrage + ombrage ainsi que du mode de gestion associé à ce système.

Il faudrait donc étudier, pour chaque cas de figure (configuration, orientation, type de gains internes, etc.), quel est le système répondant le mieux aux critères de confort et de consommation d'énergie et quelles sont les valeurs à donner aux paramètres influençant la gestion de l'ombrage.

La méthodologie serait donc la suivante :

- Détermination des paramètres influençant la rentabilité d'un système d'ombrage ;
- Choix de différents systèmes d'ombrage (vitrage+ombrage) ;
- Choix de l'intervalle de variation et des différentes valeurs des paramètres déterminés au premier point ;
- Modélisation de toutes les combinaisons possibles (plusieurs milliers de calculs) pour tous les cas de figure déjà proposés par l'outil (configurations c1 à c9, différentes stratégies, 4 orientations, …) ;
- Comparaison des résultats afin de déterminer le système optimal ainsi que son mode de gestion associé pour chacun des cas modélisés.

Les calculs présentés au point 5 abordent la première étape décrite dans la méthodologie ci-dessus. Ils n'ont pas la prétention de déterminer tous les paramètres ayant une influence sur le choix d'un système vitrage+ombrage. Cependant, la démarche décrite ci-dessous donne déjà un aperçu de la complexité de l'optimisation du choix de ce système.

Nous nous sommes volontairement limités au type de protection 'store en tissus' car, après lecture de divers articles et livres, il nous semble que les chercheurs et les industriels ont trop tendance à chercher à développer de nombreux nouveaux systèmes de protections solaires complexes alors que de nombreuses questions restent ouvertes quand au choix et à l'utilisation de protections solaires 'simples'. Ils nous semble que ces protections peuvent, si elles sont associées à l'étude complète du bâtiment, répondre à un bon nombre de demandes, qu'elles soient de l'ordre thermique ou visuel. Tout comme lors du choix d'un système de chauffage, il est essentiel que le choix de la protection solaire soit intégré et étudié lors de la conception du bâtiment et que son rôle soit de compléter les stratégies mises en place lors de la conception du bâtiment, plutôt que la correction d'erreurs qui auraient été réalisées plus tôt dans la démarche de conception.

5. Modes d'influence des différents paramètres en cas de chauffage et de refroidissement (stratégie 1)

5.1 Choix du vitrage

Pour réaliser les simulations que nous présentons dans ce chapitre, nous avons choisi de prendre un vitrage ayant un facteur solaire et un coefficient de transmission lumineuse élevés.
En effet, il nous semblait important de pouvoir profiter d'un maximum de gains solaires et d'apports d'éclairage lorsque la protection n'est pas en place. Ce sentiment est confirmé par les conclusions du travail de M. C. Dubois, présenté dans [Dub 1998]. Le vitrage choisi est le vitrage nommé climaplus® eko plus de la firme Saint Gobain. Dans notre cas, il est composé de deux couches de verres de 4 mm emprisonnant 12 mm d'argon.
Ses caractéristiques physiques sont les suivantes: k = 1.5 W/m^{2}K, FS = 69 %, TI = 69 %.

5.2 Choix de la protection solaire

La protection solaire que nous avons décidé de combiner avec le vitrage est de type SS101 White (® Hélioscreen). Son coefficient de transmission lumineuse est relativement faible et vaut 12 %. Son coefficient de transmission solaire vaut 17 %, son coefficient de réflexion solaire vaut 63 % et son coefficient d'absorption solaire vaut 20 %.
Dans tous les calculs que nous présentons ici, des protections solaires sont placées sur les façades d'orientation sud, est et ouest. Les façades orientées au nord ne sont donc pas équipées de protections solaires.

5.3 Influence de la température de gestion d'une protection solaire extérieure ou intérieure sur les consommations.

Local orienté au sud

Prenons le cas d'un bâtiment présentant peu d'inertie, la configuration de la façade est C1 et le local analysé est orienté au sud. Les gains internes sont faibles.

Etudions les consommations en présence ou absence d'une protection solaire extérieure et en fonction de la température de consigne à partir de laquelle on accepte de mettre cette protection solaire en place. Notons que celle-ci sera abaissée uniquement si le rayonnement solaire arrivant sur la paroi contenant la fenêtre concernée est d'au moins 150 W/m^2.

La Figure 6.1 représente les consommations de chauffage, mois par mois, dans le cas où la température de gestion est de 21°C, 23°C et 25°C. Nous avons également indiqué sur le graphique la consommation de chauffage du même local, dans le cas où il n'y a pas de protection solaire.

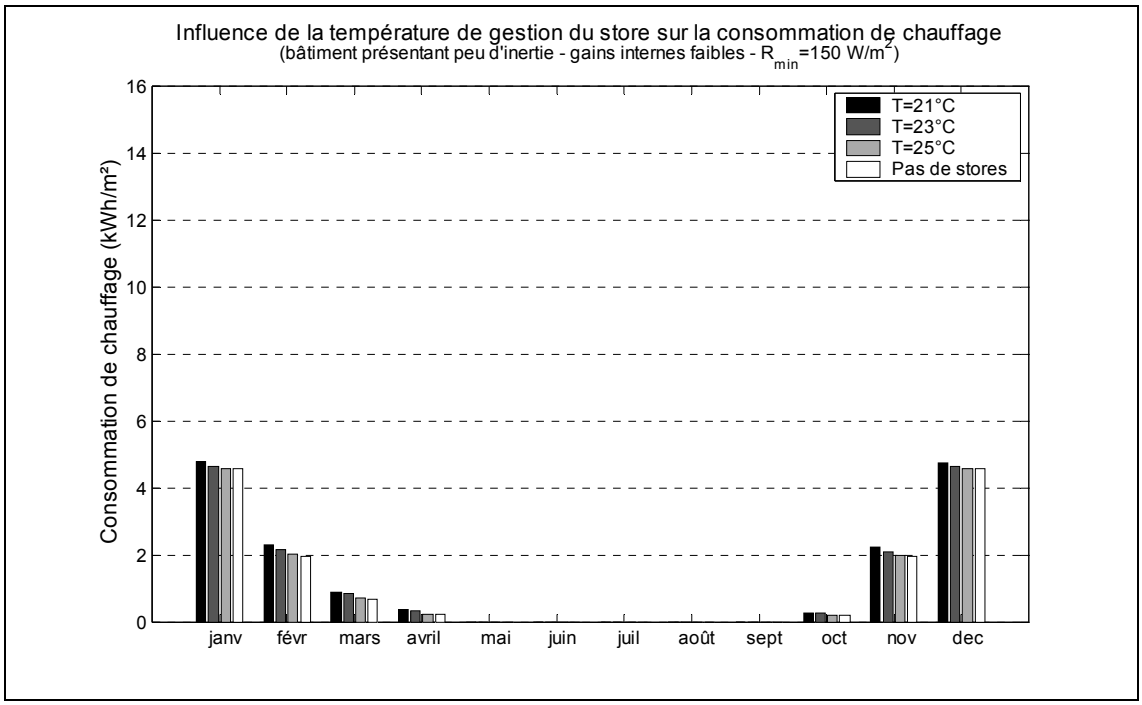


Figure 6.1: Consommation mensuelle de chauffage en fonction de la température de gestion du store

Nous observons qu'on chauffe toujours plus lorsqu'il y a une protection solaire que dans le cas contraire.
Plus la température de consigne du store est élevée, moins on consomme d'énergie de chauffage. Quel que soit le cas choisi, on ne chauffe jamais du mois de mai au mois de septembre inclus.
Le fait de placer une protection solaire ne prolonge donc pas la période de chauffe.
Si on analyse les consommations de refroidissement (Figure 6.2), on observe qu'il faut toujours refroidir plus lorsqu'il n'y a pas de protection solaire. La température de gestion du store n'a pratiquement pas ou a peu d'impact sur les consommations, durant les mois d'été. Cette influence est légèrement plus marquée entre le cas 25°C et les cas 21 et 23°C durant l'entre saison et l'hiver.

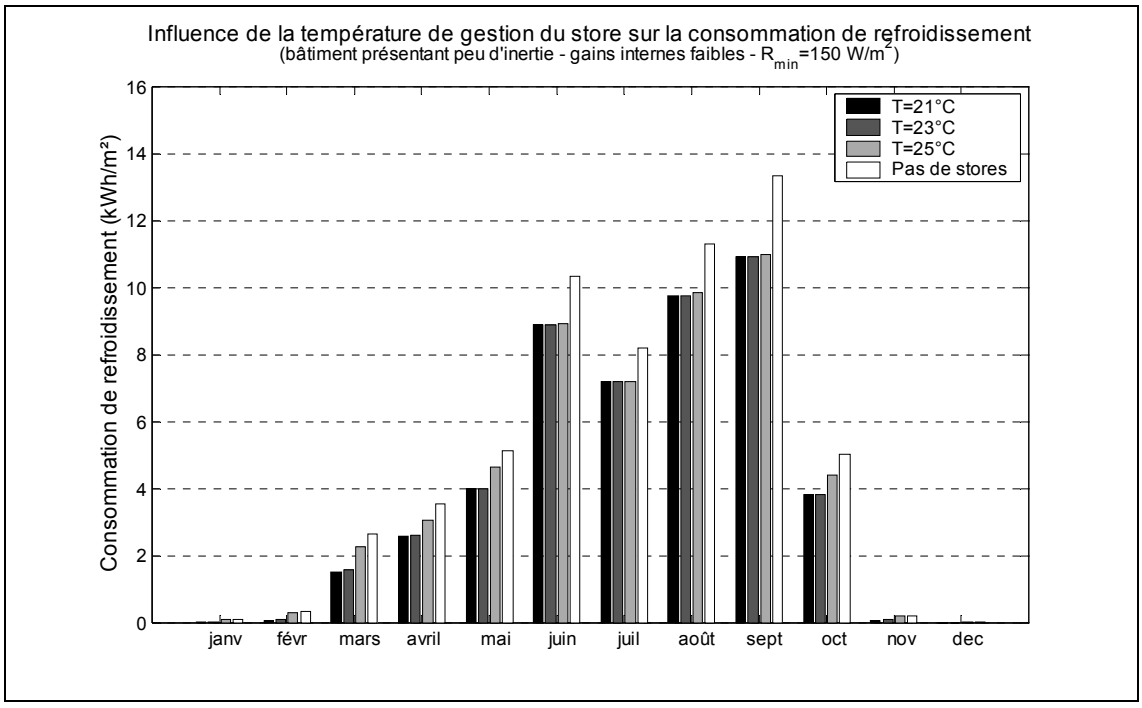


Figure 6.2 : Consommation mensuelle de refroidissement en fonction de la température de gestion du store

La Figure 6.3 donne les valeurs mensuelles de consommation d'éclairage artificiel pour les quatre différents cas étudiés. On remarque que la présence d'un système d'ombrage est négative en terme de consommation d'éclairage artificiel, surtout pendant les mois d'été durant lesquels la protection est souvent utilisée. L'influence de la température de consigne est plus ou moins marquée, suivant le mois considéré. Comme pour la consommation de froid, la différence est toujours plus marquée lorsqu'on modifie la température de consigne de 25°C à 23 °C que lorsqu'on passe de 23°C à 21°C.

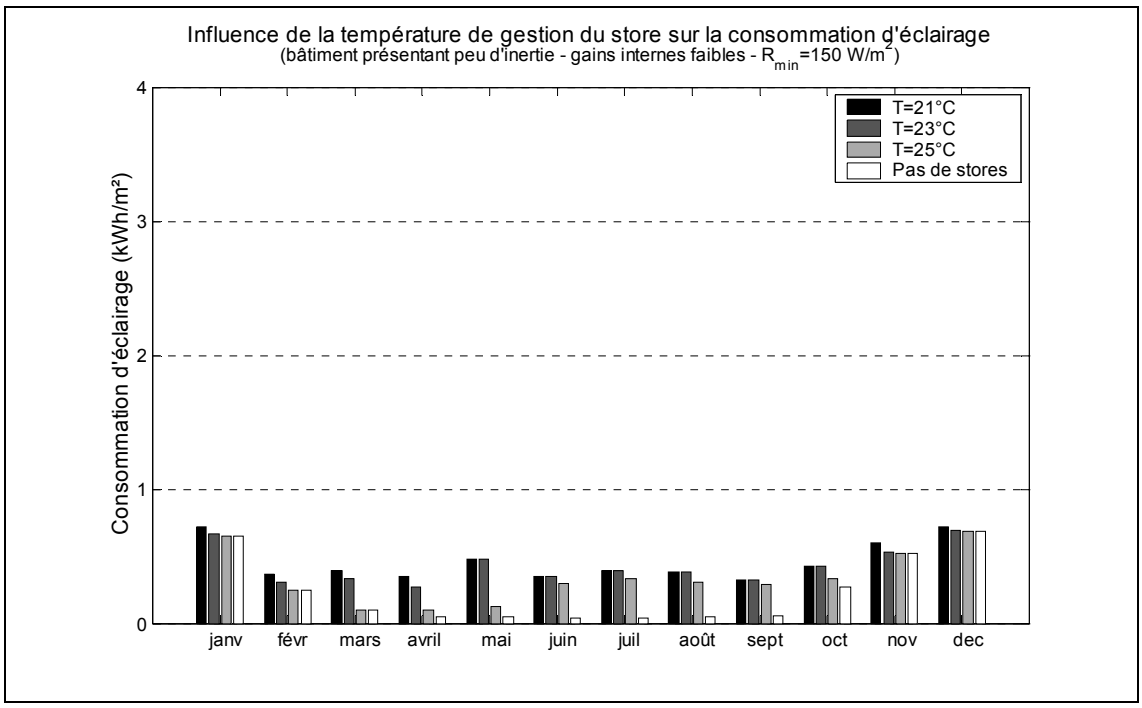


Figure 6.3 : Consommation mensuelle d'énergie d'éclairage en fonction de la température de gestion du store

Etudions maintenant le nombre mensuel d'heures d'utilisation de la protection solaire, pour les 4 cas considérés précédemment. Nous observons sur la Figure 6.4 que la température de gestion du store peut fortement influencer son nombre d'heures d'utilisation. Cependant, en été, la protection sera souvent en place, quelle que soit sa température de consigne.

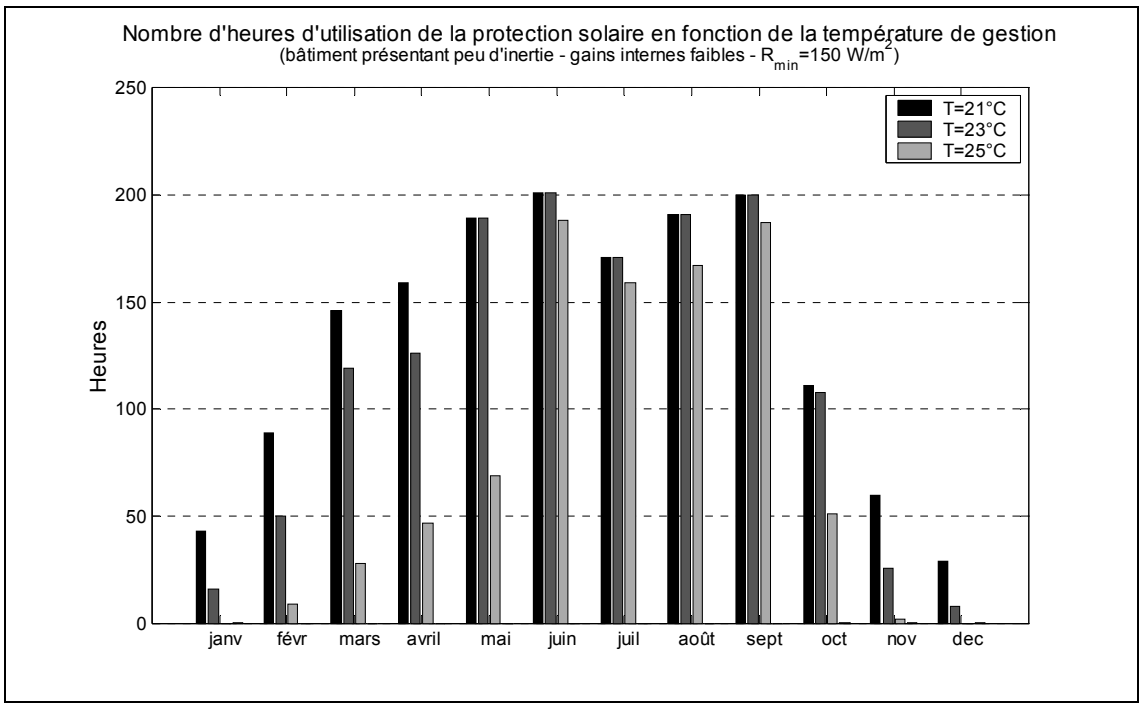


Figure 6.4 : Nombre mensuel d'heures d'utilisation de la protection solaire

Finalement, si on calcule la consommation d'énergie primaire provenant des consommations de chauffage et d'humidification, de refroidissement et de déshumidification, et d'éclairage, on obtient la Figure 6.5.

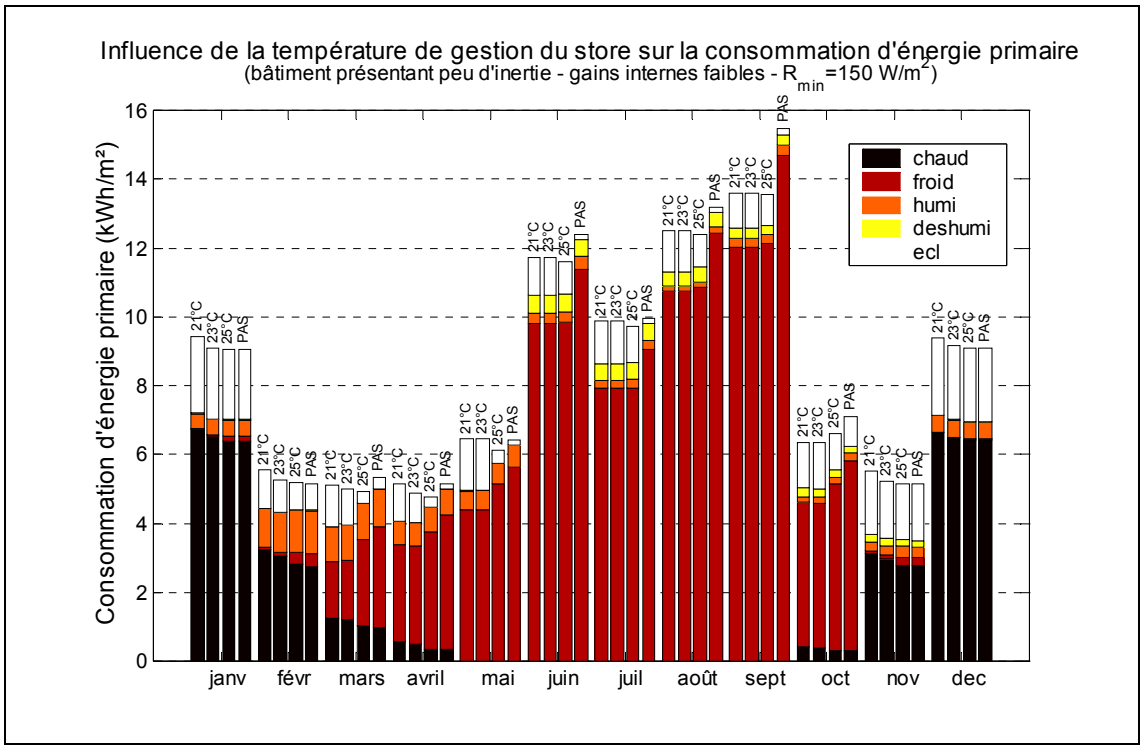


Figure 6.5 : Consommation mensuelle d'énergie primaire en fonction de la température de gestion du store

Nous observons que le fait de ne pas avoir de système d'ombrage du tout est défavorable durant les mois d'été et en entre saison. Par contre, en hiver, il se peut que l'on consomme un peu moins lorsqu'on n'a pas de système d'ombrage.
Si nous observons la consommation annuelle d'énergie primaire pour les 4 cas étudiés, nous voyons que, bien que les différences ne soient pas flagrantes, on consomme plus lorsqu'on n'a pas de protection solaire que dans le cas contraire.

	T21	**T23**	**T25**	**Pas**
Consommation annuelle (kWh/m²)	101	99	98	104

Tableau 6.1 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du type de gestion du store, orientation sud

Il est intéressant de comparer ces 4 solutions avec celle d'un bâtiment équipé de protections solaires intérieures comme cela devrait impérativement être le cas pour tout bâtiment équipé du vitrage climaplus® eko plus, afin de limiter au minimum les problèmes d'éblouissement.

La Figure 6.6 reprend les résultats présentés à la Figure 6.5 en y ajoutant le cas d'une protection solaire intérieure, gérée à partir d'une température de consigne de 21°C.
A partir de maintenant, nous continuerons de calculer la consommation obtenue lorsque aucune protection solaire n'est mise en place mais cette valeur sera inscrite en grisé dans le tableau, afin de rappeler au lecteur que le cas n'est pas applicable dans la réalité.

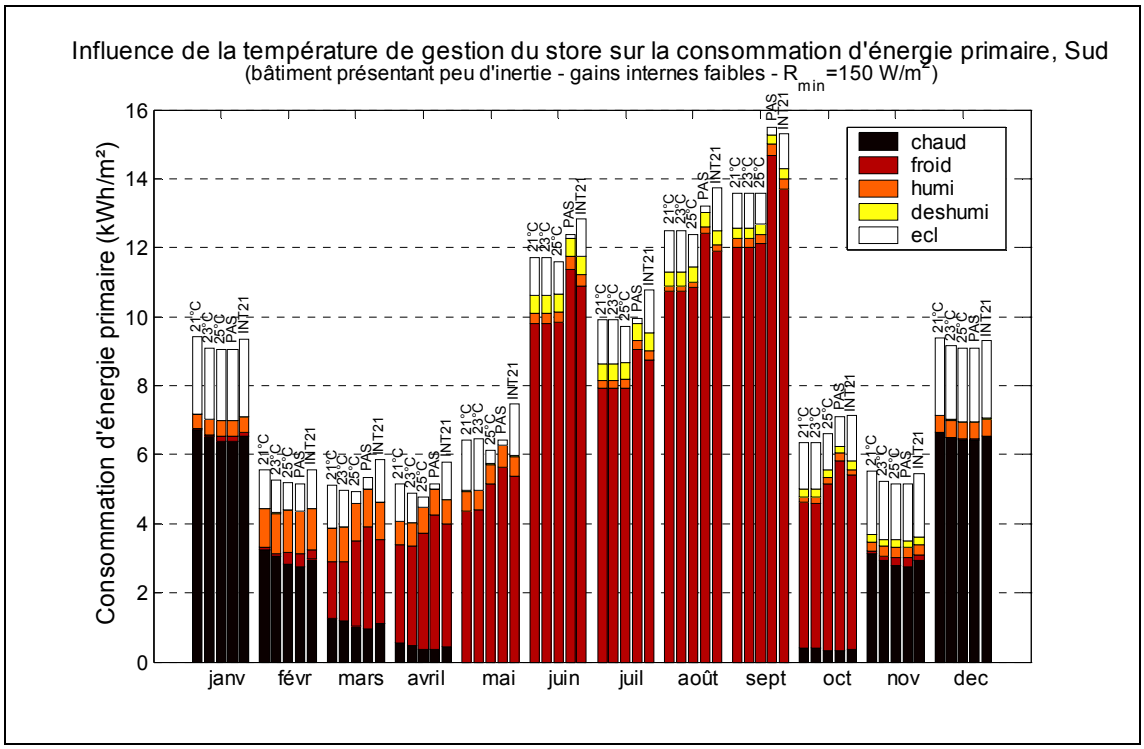


Figure 6.6 : Consommation totale mensuelle d'énergie primaire pour un local orienté au Sud

Nous observons qu'en été, on consomme plus d'énergie lorsqu'on a un store intérieur que lorsqu'on a un store extérieur. Par contre pour les mois novembre à février, on consomme un peu plus d'énergie lorsqu'on a un store extérieur que lorsqu'on a un store intérieur, pour la même température de consigne. En ce qui concerne la température de gestion du store, on voit qu'on a intérêt à la choisir assez élevée (25°C) pour l'entre saison (mars et octobre) mais plus faible pour l'été (21°C).
La consommation annuelle d'énergie primaire lorsque le store est placé à l'intérieur est de 109 kWh/m², ce qui est environ 10% supérieur à la consommation obtenue lorsqu'on a une protection solaire extérieure.

Nous remarquons également sur la Figure 6.6 que l'on consomme toujours plus lorsqu'on a une protection intérieure que lorsque aucune protection n'est mise en place (sauf pour le mois de septembre).

Local orienté à l'Est

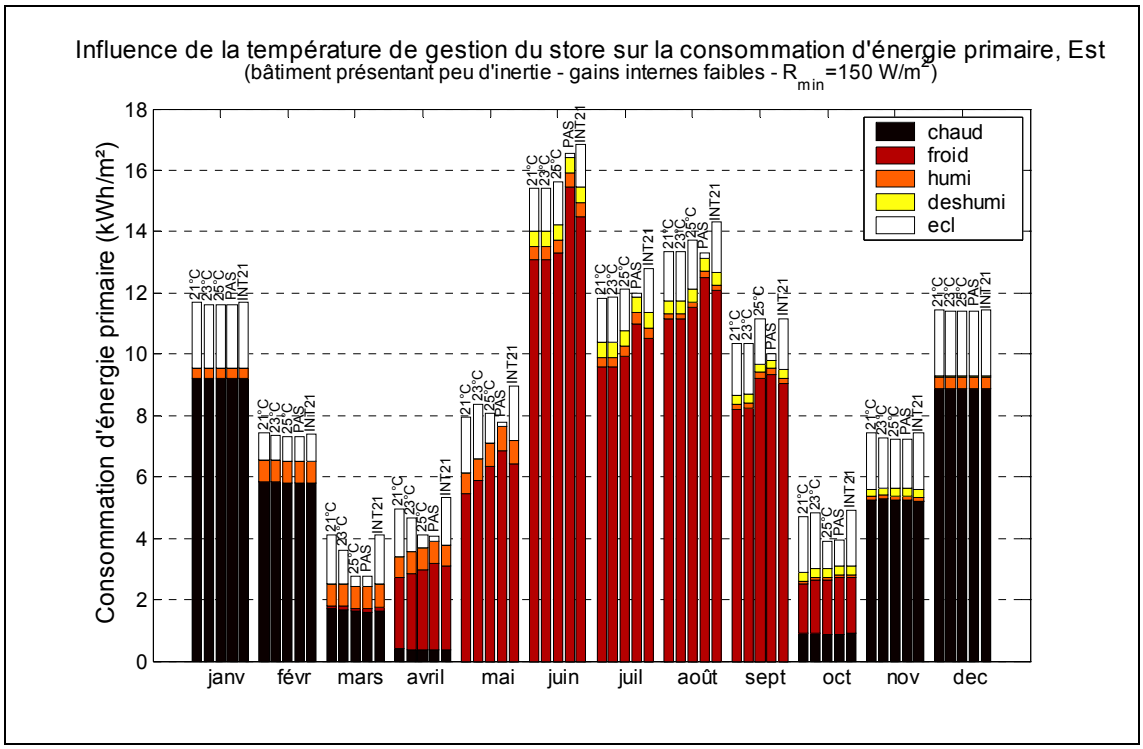


Figure 6.7 : Consommation totale mensuelle d'énergie primaire pour un local orienté à l'Est

Pour un local orienté à l'est, nous observons que, pour les mois d'hiver, les différences de consommation sont vraiment minimes, qu'à l'entre saison, on a intérêt à avoir une protection solaire extérieure gérée à partir d'une température de consigne élevée (25°C) alors qu'en plein été, la meilleure solution est la protection solaire extérieure avec une température de consigne de 21°C.

	T21	**T23**	**T25**	**int T21**	**Pas**
Consommation annuelle (kWh/m²)	111	110	109	116	108

Tableau 6.2 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du type de gestion du store, orientation est

Nous observons que sur l'année entière, c'est la solution du store intérieur qui est la moins intéressante. Il très important de se rappeler ici que la solution de ne pas placer de store n'est pas applicable dans ce cas-ci compte tenu du facteur de transmission lumineuse du vitrage choisi et des problèmes d'inconfort visuel qui en résulteraient. La consommation obtenue lorsqu'on n'a pas de protection solaire est juste donnée à titre d'information.
Nous observons que, sur l'année, il n'y a pas de grande différence entre les consommations obtenues pour les différentes températures de consigne.

Local orienté à l'Ouest

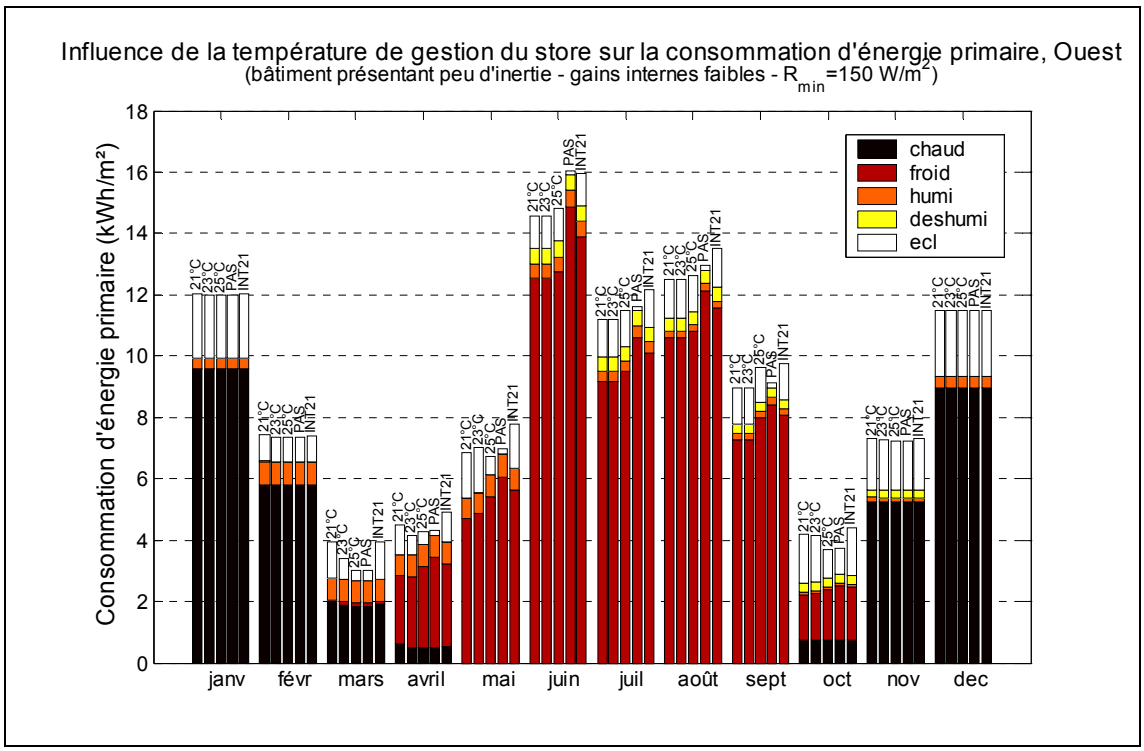


Figure 6.8 : Consommation totale mensuelle d'énergie primaire pour un local orienté à l'Ouest

Pour un local orienté à l'Ouest, le tableau des consommations annuelles est le suivant :

	T21	T23	T25	int T21	Pas
Consommation annuelle (kWh/m²)	101	99	98	109	103

Tableau 6.3 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du type de gestion du store, orientation ouest

Nous observons dans le Tableau 6.3 que les températures de consigne n'influencent pas beaucoup les consommations. Nous observons également que la solution de placer une protection intérieure induit toujours la plus haute consommation d'énergie primaire.

Conclusion

Même s'il semble parfois plus intéressant au niveau des consommations globales de ne pas placer de protection solaire du tout, nous rappelons que cette solution n'est pas acceptable en terme de confort visuel. Il faut donc comparer les résultats obtenus pour les différentes températures de consigne pour une protection extérieure ou intérieure.
Nous pouvons alors conclure que la solution de gestion idéale pourrait se composer d'une combinaison des solutions des gestions étudiées ci-dessus, en fonction de la saison à laquelle on se trouve.
En hiver, nous remarquons que quelle que soit l'orientation, les différences de consommation entre les différents cas sont assez faibles. Il est donc envisageable de choisir entre une protection solaire intérieure ou extérieure. La température de gestion de cette protection solaire devrait être relativement élevée (dans les alentours de 25°C).
Pour les mois de mi-saison, la meilleure solution reste celle de la protection solaire extérieure avec une température de consigne élevée, comme en hiver.
Par contre, pour les mois d'été, il est intéressant de garder toujours cette protection solaire extérieure mais de diminuer la température de consigne à partir de laquelle on met le store en place.

En conclusion, si on doit choisir entre un type de protection solaire ou l'autre, il faut impérativement placer une protection solaire extérieure. Par contre, si on peut se permettre de placer une protection solaire intérieure et une protection solaire extérieure, il est intéressant d'utiliser la première pendant les mois d'hiver, lorsqu'on souffre de problèmes d'éblouissement. Celle-ci permettra encore à une certaine partie du spectre solaire de pénétrer dans le bâtiment et de participer ainsi à son chauffage.
Pour les mois d'entre saison et d'été, il faut alors faire usage de la protection solaire extérieure en modifiant éventuellement la température de consigne à partir de laquelle celle-ci est mise en place. Cette température de consigne sera plus élevée au printemps et en automne qu'en été.

Notons que les différences de consommation d'énergie primaire entre le cas où on n'a pas d'ombrage et le cas où on a un ombrage extérieur sont relativement faibles. Il est essentiel que le lecteur soit bien conscient du fait que cette petite différence ne peut pas être retenue comme une généralité : nous n'avons testé qu'un cas particulier, pour un système vitrage + ombrage particulier. Ce système n'est certainement pas optimisé pour le cas traité ici et il est certain que des différences de consommation plus importantes apparaîtraient si on cherchait à optimiser la combinaison vitrage + ombrage, dans le cas du local étudié dans ce chapitre.
Nous voulons rappeler au lecteur que le but du travail présenté ici n'était pas d'optimiser la combinaison vitrage + ombrage pour tous les cas abordés dans l'outil informatique mais bien de donner une première piste quand aux paramètres importants lors du choix d'un système d'ombrage et de montrer qu'on pouvait facilement atteindre de meilleurs résultats en combinant un ombrage à un vitrage particulier plutôt qu'en cherchant à répondre à toutes les exigences de consommation et de confort au moyen du vitrage seul.

5.4 Evolution du nombre d'heures de surchauffe en présence d'un protection solaire extérieure ou intérieure

Lorsqu'on n'a pas de système de refroidissement, il est clair que la présence de protections solaires sera toujours bénéfique au niveau du nombre d'heures de surchauffe. Il est également certain que les protections solaires extérieures seront toujours plus efficaces que les protections intérieures dans la lutte contre les surchauffes.
Quand le bâtiment n'est pas équipé de système de conditionnement d'air, la mise en place d'une protection solaire extérieure peut garantir le confort thermique alors que le vitrage seul n'y parvient pas. Dans certains cas, c'est même la seule solution car aucun des vitrages testés ne permet de limiter les surchauffes de manière à satisfaire au critère établi du nombre d'heures de surchauffe à ne pas dépasser.

5.5 Influence de la valeur du rayonnement solaire minimal de consigne sur les consommations

La température de consigne induisant la plus faible consommation totale d'énergie primaire étant de 25°C, nous avons décidé de garder cette valeur pour réaliser les calculs présentés dans ce paragraphe.
Nous allons étudier, pour les différentes orientations, quelle est la valeur du rayonnement solaire de consigne la plus intéressante.
Nous calculerons donc, pour les mêmes hypothèses qu'au point 5.3, les consommations obtenues lorsque la valeur minimum de rayonnement à partir de laquelle la protection solaire est mise en place est de 100 W/m^2, 150 W/m^2 et 250 W/m^2, pour les orientations sud, est et ouest.

Local orienté au sud

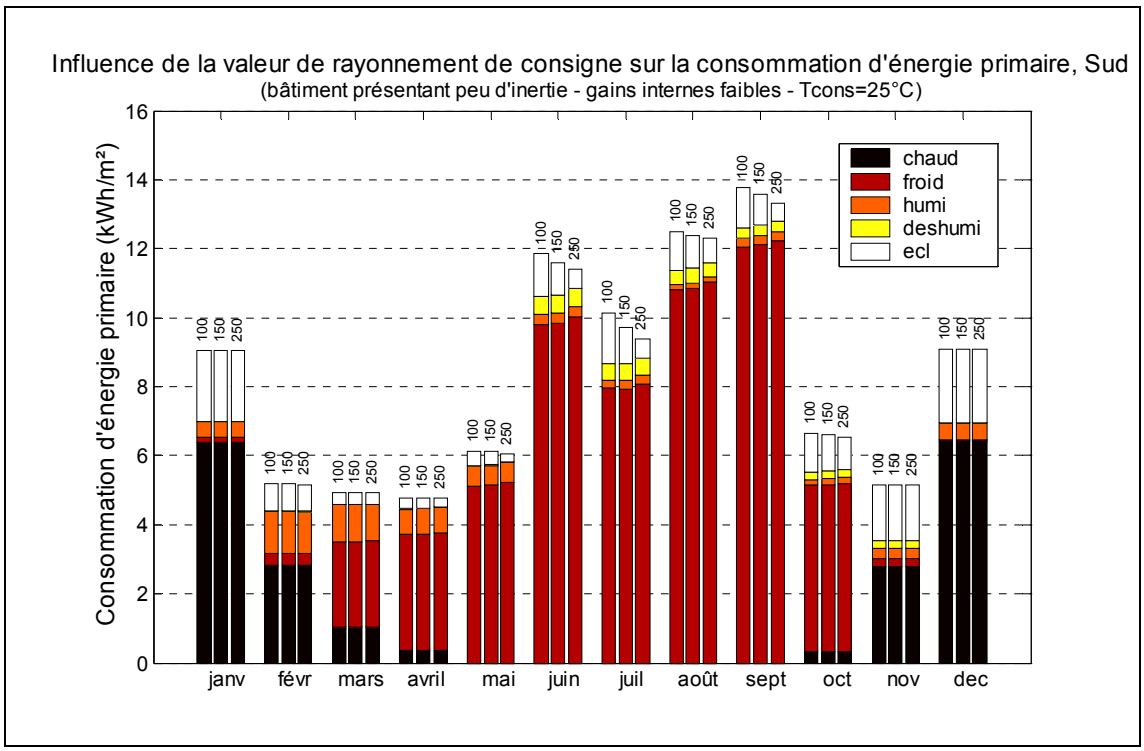


Figure 6.9 : Consommation totale mensuelle d'énergie primaire pour un local orienté au sud, en fonction de la valeur de consigne du rayonnement

	R100	**R150**	**R250**
Consommation annuelle (kWh/m²)	99	98	97

Tableau 6.4 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du rayonnement minimal, orientation sud

Local orienté à l'Est

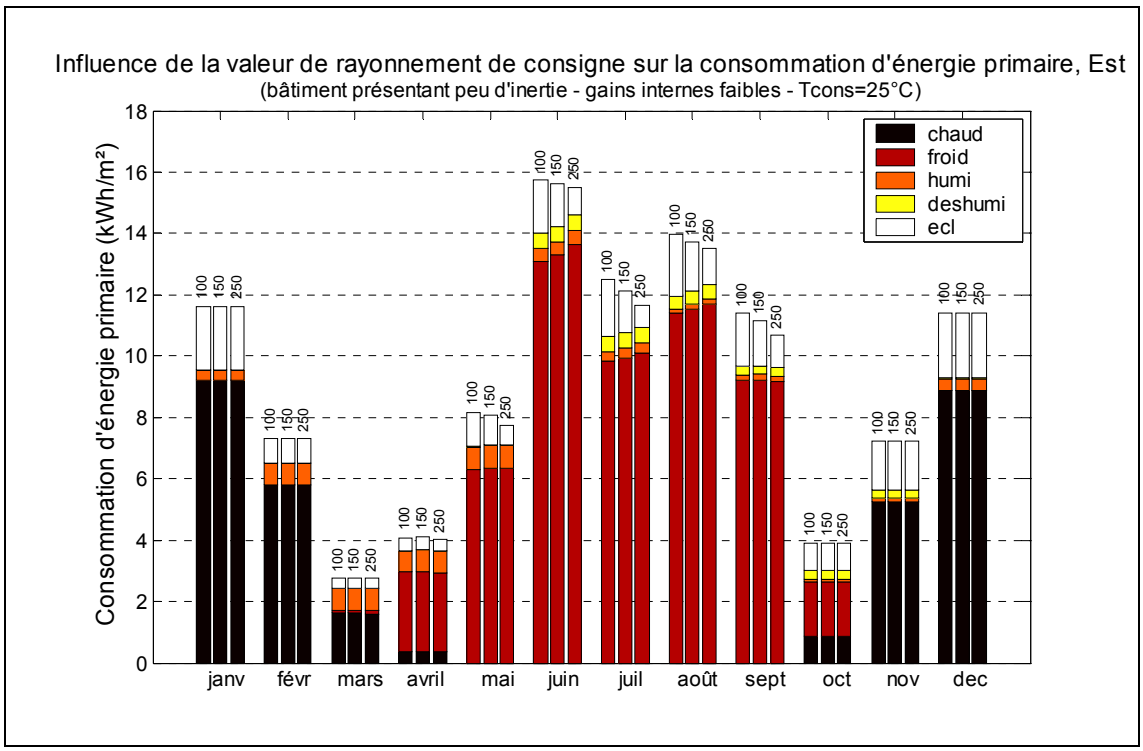


Figure 6.10 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du rayonnement minimal, orientation est

	R100	R150	R250
Consommation annuelle (kWh/m^2)	110	109	107

Tableau 6.5 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du rayonnement minimal, orientation est

Local orienté à l'Ouest

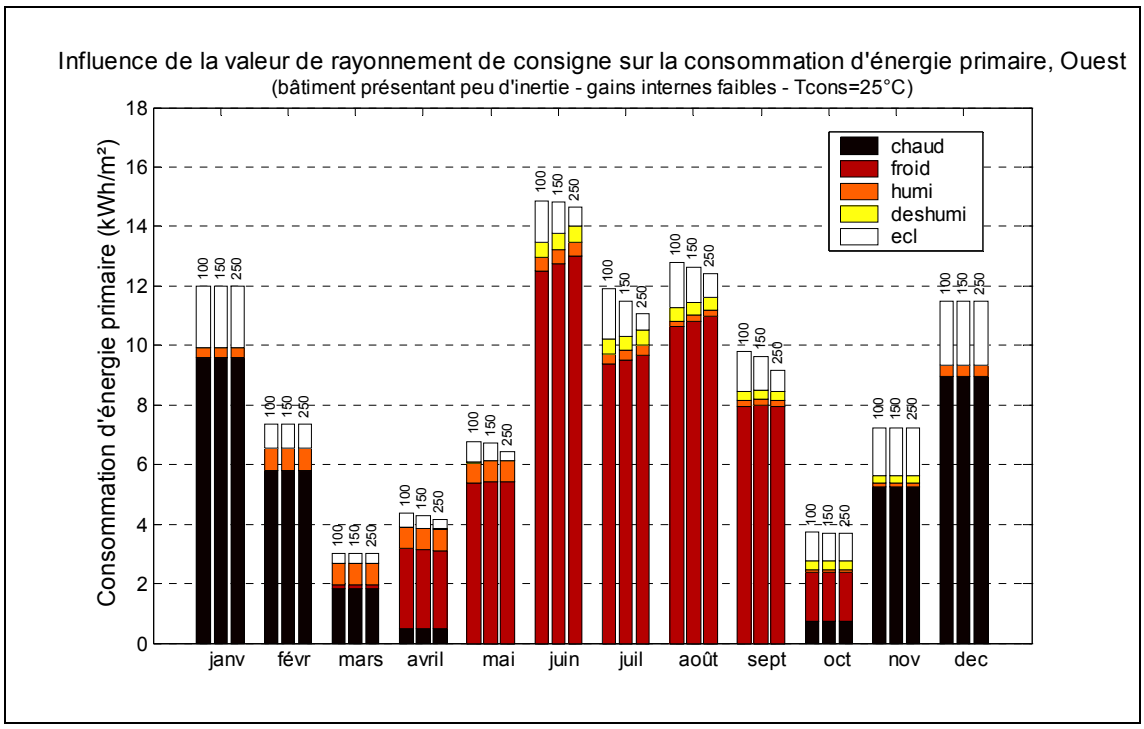


Figure 6.11 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du rayonnement minimal, orientation ouest

	R100	R150	R250
Consommation annuelle (kWh/m²)	105	104	103

Tableau 6.6 : Consommation annuelle d'énergie primaire en fonction du rayonnement minimal, orientation ouest

Observations

Quelle que soit l'orientation considérée, on ne constate pas ou peu de différence de consommation pour les mois d'octobre à avril. Par contre, pour les autres mois de l'année, c'est la valeur de consigne de 250 W/m² qui induit le moins de consommation d'énergie.
On remarque donc qu'on a toujours intérêt à baisser la protection solaire le plus tard possible. Cela provient du fait qu'il vaut mieux augmenter les demandes d'énergie de refroidissement en diminuant les demandes d'énergie de chauffage et d'éclairage que le contraire. En effet, comme nous l'avons déjà constaté, les facteurs de conversion en énergie primaire sont beaucoup plus défavorables en terme d'éclairage et de chauffage qu'en terme de refroidissement.
Une fois de plus, nous sommes limités par les aspects de confort visuel, difficiles à chiffrer.
Il semble que la solution idéale serait d'avoir une protection solaire ayant un coefficient de transmission lumineuse permettant d'atteindre toujours le confort visuel et de ne descendre celle-ci qu'en cas d'inconfort visuel.
Cela permettrait donc de minimiser les pertes d'éclairage naturel par la mise en place de la protection solaire.
Ce mode de gestion devrait bien entendu être totalement différent lorsque le bâtiment n'est pas équipé d'un système de conditionnement d'air. Dans ce cas-là, ce sont les conditions de confort thermique et visuel qui devraient gérer totalement la position de la protection solaire. Les consommations d'éclairage artificiel supplémentaires qui résulteraient de la mise en place de la protection solaire ne pourraient alors pas être réduites.

6. Conclusion

Les calculs présentés ici n'ont pas la prétention d'être complets. En effet, il est fort probable qu'ils ne mettent pas en évidence tous les paramètres influençant l'efficacité d'un système vitrage + ombrage. Ils ne fournissent pas non plus une solution optimisée du mode de gestion de la protection solaire. Cependant, ils ont l'intérêt de donner, pour un système particulier et un cas particulier (configuration, gains internes, …), une première piste quant à l'influence de certains paramètres intervenant dans le mode de gestion de l'ombrage. Dans notre cas, nous avons étudié en particulier la température et le rayonnement de consigne de gestion de la protection solaire.

En ce qui concerne l'influence de la température de consigne sur l'efficacité du store, nous avons remarqué que l'idéal serait de modifier celle-ci en fonction de la saison considérée. Cette proposition est originale et ne correspond pas avec ce qui est réalisé dans la pratique. Il serait très intéressant de pouvoir approfondir la recherche de ce côté et de tester cette solution en pratique.
En ce qui concerne le rayonnement solaire à partir duquel la protection solaire peut être descendue, il semble par contre que le critère de 250 W/m^2 appliqué en pratique puisse se justifier, du moins dans le cas que nous avons étudié ici.
L'originalité du mode de gestion que nous proposons vient du fait que celui-ci différera selon que le bâtiment est équipé de conditionnement d'air ou pas.

Nos propositions n'ont pas l'ambition d'être universelles puisque notre étude s'est limitée à un cas particulier, pour trois orientations différentes. Elles montrent seulement qu'il reste beaucoup de travail à faire en ce qui concerne le choix et la gestion des protections solaires dans les immeubles de bureaux. Elles donnent également un premier aperçu quand à la complexité du problème.

La suite de travaux présentés ici est fort large et l'ambition ultime serait de pouvoir étudier tous les cas proposés par l'outil aussi bien en ce qui concerne le choix du système vitrage + ombrage que le mode de gestion de ce dernier. A partir des résultats de cette étude très large et demandant un très grand nombre de nouvelles simulations, certaines règles universelles émergeraient sans doutes, permettant d'établir des règles pratiques quant au choix du système vitrage + ombrage et de son mode de gestion.

Le travail proposé ici n'a pas été réalisé dans le cadre de cette thèse de doctorat mais sera abordé dans les mois qui suivent ce travail, dans le cadre du contrat DPOV, financé par la Région Wallonne.

7. Références

[Chr 1999] Christoffersen J., Stoffel J. "ADELINE 3.0 - SUPERLINK/RADLINK User's Manual", International Energy Agency: SHC - Task 21 and ECBCS - Annex 29 Daylight in Buildings, February 1999.

[Cli 1997] Architecture et Climat, “Choisir une protection solaire”, Ministère de la Région Wallonne, Jambe, Belgique, 1997.

[Dub 1997] Dubois M.C. "Solar shading and building energy use: a literature review, Part I", Department of Building Science, Lund University, Sweden, 1997.

[Dub 1998] Dubois M.C. "Awnings and solar-protective glazing for efficient energy-use in cold climates", Proceedings of the Renewable Energy Technologies in Cold Climates ’98 conference, 4-6 May, Montreal, Canada, p.380-385, 1998.

[Hel 1999] Helioscreen. "Protection solaire automatisée, Héliomatic", brochure de présentation, 1999.

[Lit 1985] Littlefair P. J. "The luminous efficacy of daylight: a review", Lighting Research and Technology Vol. 17 N°4, p.162-181, 1985.

CHAPITRE 7. Présentation de l'outil

Après une définition générale des caractéristiques que devrait avoir un outil tel que celui que nous avons développé, nous présentons les différentes fenêtres et possibilités offertes par celui-ci.
Nous décrivons ensuite quelle est l'utilisation actuelle de cet outil et comment celui-ci pourrait être étendu.

1. Caractéristiques de l'outil **174**
1.1 Exigence auxquelles l'outil doit répondre 174
1.2 Particularités de notre outil 174

2. Présentation des fenêtres **175**
2.1 Ecran d'accueil 175
2.2 Ecran des données 175
2.3 Ecran des résultats 177
2.4 Caractéristiques des vitrages 179
2.5 Calcul des coûts 181

3. Utilisation de l'outil **183**

4. Références **184**

1. Caractéristiques de l'outil

1.1 Exigence auxquelles l'outil doit répondre

L'outil devait se présenter sous forme informatique, être convivial et facile à apprendre, rapide et présentant une certaine souplesse d'utilisation.
Dans son travail de doctorat, Bernard Paule [Pau 1999] synthétise de manière très claire les principales caractéristiques nécessaires à un outil d'aide à la décision en éclairage naturel afin qu'il soit compris, accepté et utilisé par les architectes. Nous avons adapté ces caractéristiques à notre outil de choix du vitrage.

Phase d'avant-projet
L'outil doit être adapté à une utilisation de tous les jours et se concentrer sur la phase d'avant-projet. En effet, c'est par son utilisation à cet instant que l'architecte va pouvoir, non seulement choisir le vitrage qui sera le plus intéressant dans son cas mais encore modifier certains paramètres qui ont un impact important sur le choix du vitrage et les aspects de confort visuel et thermique.

Simplicité d'utilisation
Pas d'apprentissage, pas de mode d'emploi. Les contraintes économiques actuelles sont telles que très peu de bureaux d'architectes peuvent s'offrir le luxe de former une personne sur une question si précise.

Rapidité
L'architecte doit pouvoir tester en direct les différentes variantes afin de pouvoir comparer immédiatement la validité de ses choix. Cette rapidité est cruciale dans la mesure où elle conditionne totalement l'appropriation de l'outil par son utilisateur. Si le temps passé à obtenir des réponses concrètes s'étend, l'architecte aura tendance à considérer que le problème doit être sous-traité à un spécialiste, ce qui ne sera fait que très rarement, vu le coût et les délais supplémentaires.

Familiarité
Les notions manipulées doivent être familières à l'architecte (données graphiques et/ou linguistiques). La possibilité d'utiliser cet outil, dès la phase de l'avant-projet, impose de réduire au minimum le formalisme dans la description du problème.

Intelligibilité
Les résultats doivent être exprimés sous forme compréhensible. On privilégiera les graphiques plutôt que les tableaux de chiffres, etc.

Optimisation
L'outil doit réagir aux actions de l'utilisateur et initier un processus d'optimisation du projet.

1.2 Particularités de notre outil

Des retombées significatives sont attendues tant au niveau des économies d'énergie qu'en ce qui concerne le confort visuel et thermique. Cet outil devrait dès lors s'avérer d'un grand intérêt pour les tâches d'enseignement et d'éducation.
Afin de répondre au mieux à ces caractéristiques, nous avons décidé de programmer en Visual Basic car ce langage permet une représentation visuelle sous forme de fenêtres, forme que les utilisateurs de PC sont habitués à utiliser.
L'outil ne demande pas d'apprentissage, son utilisation est instinctive et aucun manuel n'est nécessaire.
Le nombre de calculs réalisés lors de l'utilisation de l'outil est restreint et permet ainsi un affichage des résultats quasi instantané.
L'outil présente une grande souplesse, c'est à dire qu'à chaque instant, il est possible de faire marche arrière, de visualiser ou de modifier les données choisies.

Comme nous l'avons déjà dit, l'outil ne réalise pas de calcul de thermique ou d'éclairage mais sert d'interface entre l'utilisateur et la base de données qui a été élaborée à partir des résultats des calculs de simulations.

2. Présentation des fenêtres

2.1 Ecran d'accueil

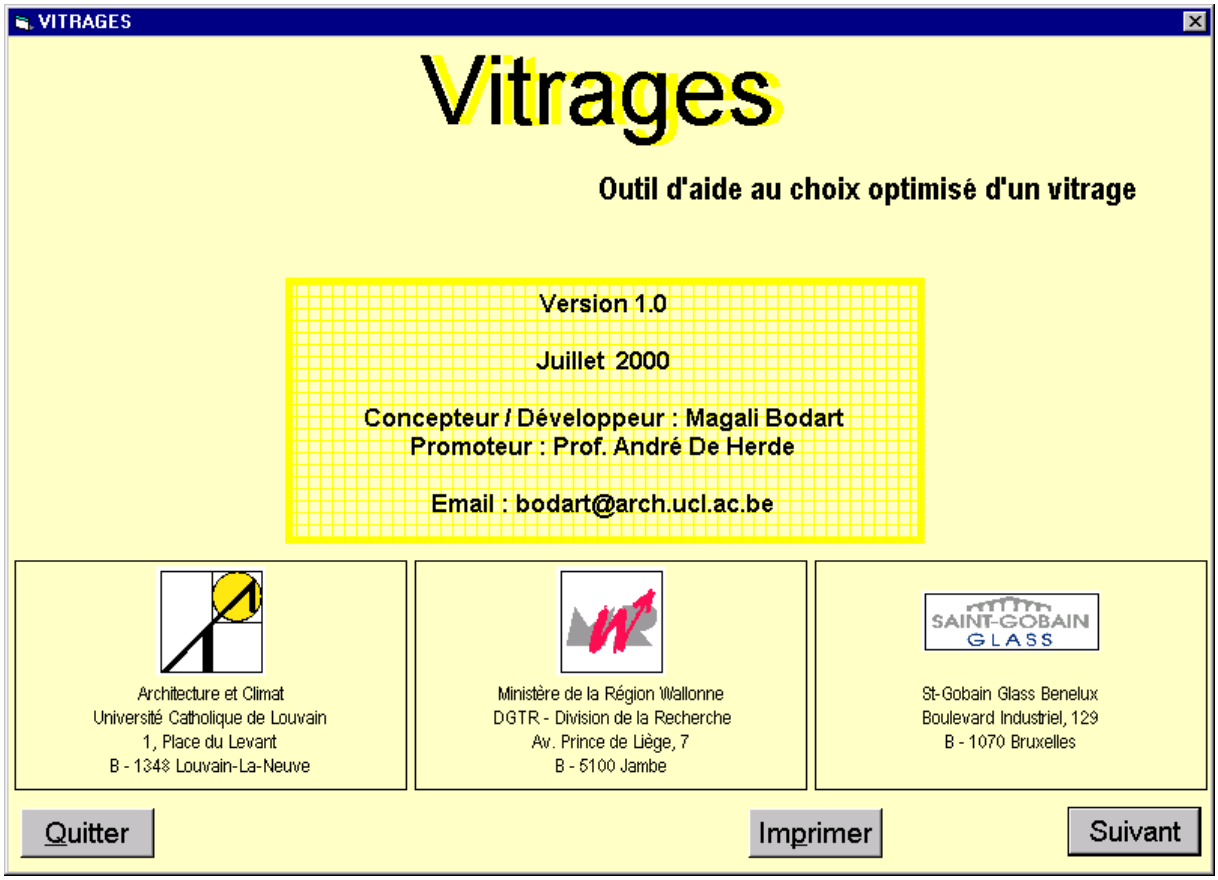


Figure 7.1: Ecran d'accueil

La fenêtre d'accueil présente simplement les différents partenaires qui sont intervenus au cours du projet, ainsi que la version de l'outil qui est lancée.

Pour avancer dans l'outil, il suffit simplement de cliquer sur le bouton "Suivant".

2.2 Ecran des données

La fenêtre présentant les différentes données à introduire se présente sous forme de deux onglets.
Le premier onglet se rapporte aux données relatives au local modélisé (Figure 7.2) : configuration de la façade, type de bâtiment (avec ou sans inertie), type de stratégie (avec ou sans système de refroidissement et avec ou sans ventilation nocturne), orientation du local, combinaison des coefficients de réflexion des parois, caractérisation des gains internes.
L'utilisateur du programme choisit les données relatives à son cas en cliquant soit sur la configuration, l'orientation et la photométrie choisies ou, pour les stratégies et les gains internes, sur le bouton d'option situé à côté de l'option considérée.

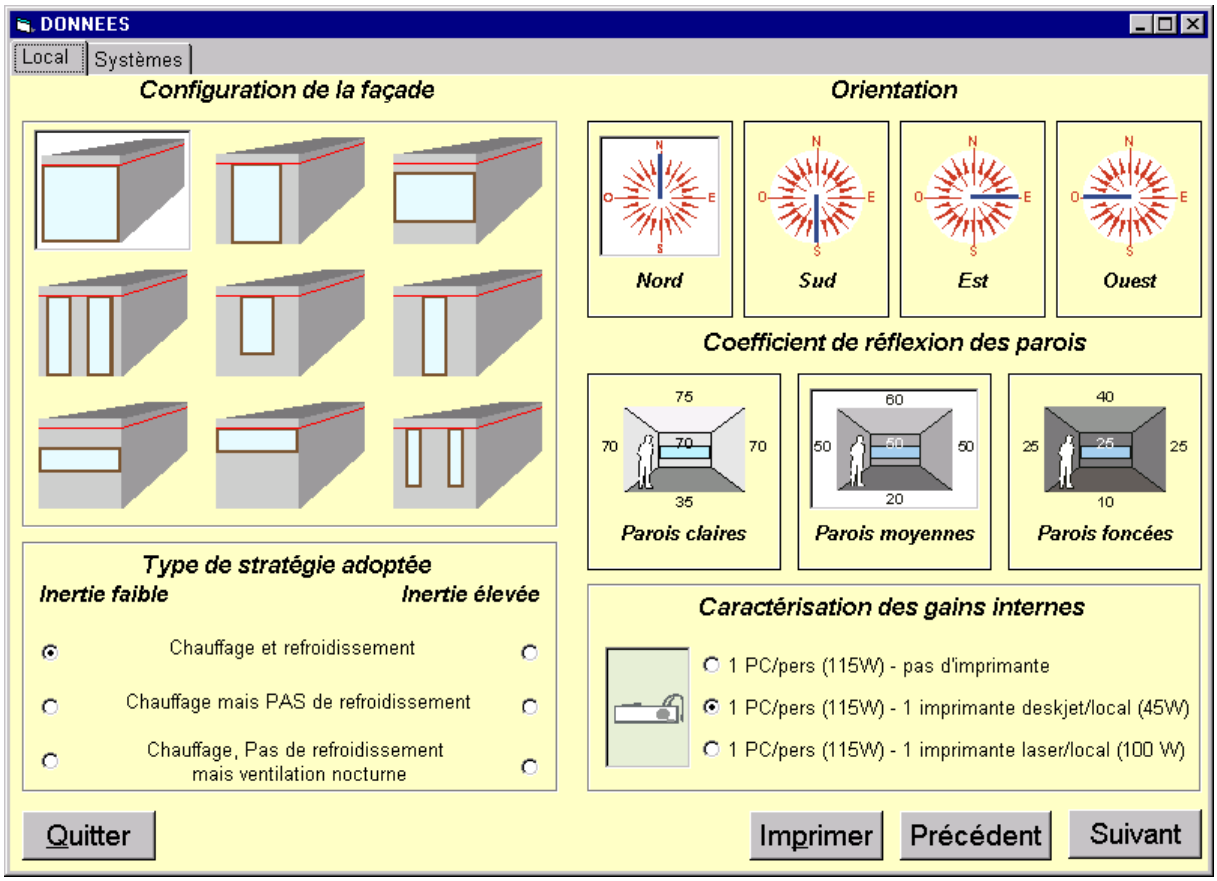


Figure 7.2: Ecran des données, premier onglet ; Local

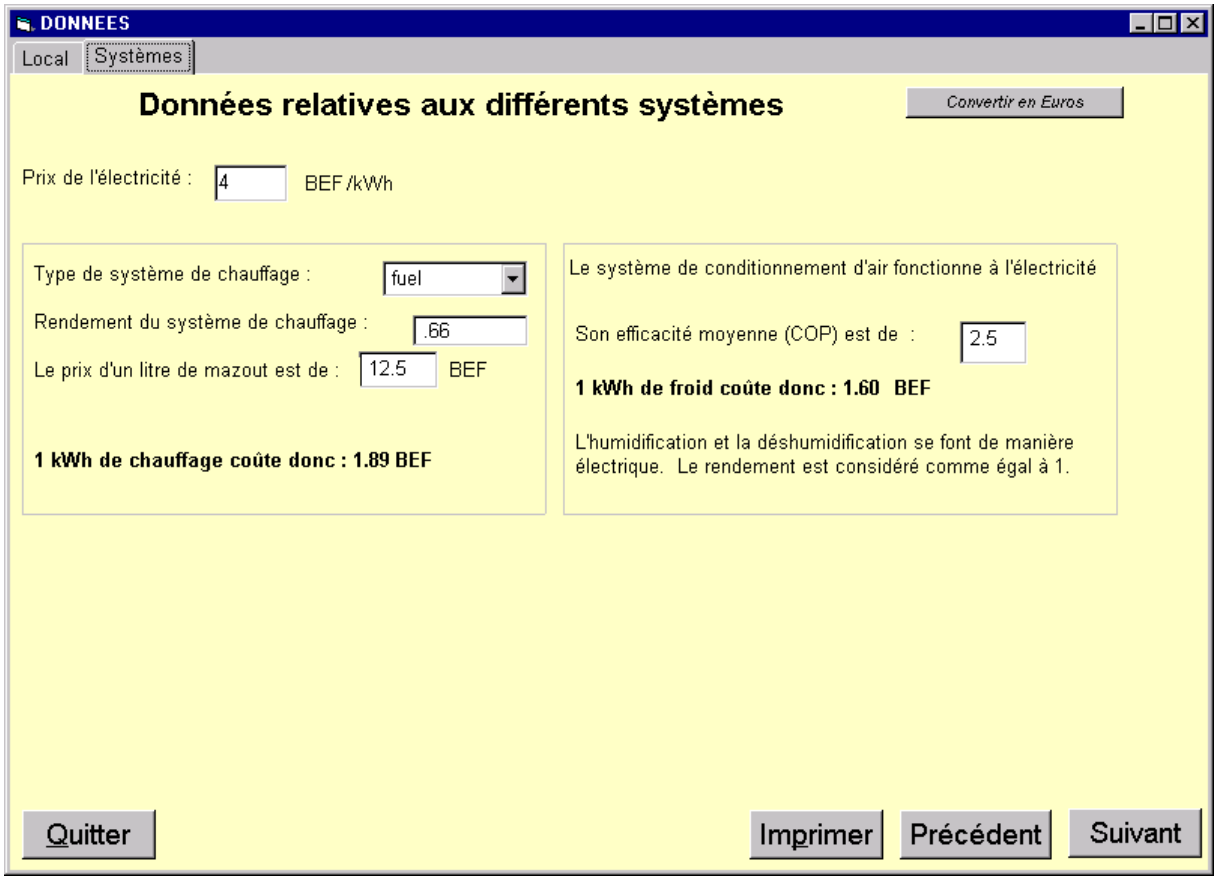


Figure 7.3: Ecran des données, second onglet ; Systèmes

Le second onglet se rapporte aux systèmes installés dans le bâtiment (Figure 7.3).
Premièrement, l'utilisateur peut choisir de travailler soit en francs belges, soit en Euros, en cliquant sur le bouton "convertir en francs belges" ou "convertir en Euros", selon la monnaie dans laquelle il se trouve.
Ensuite, il introduit le prix actuel du kilowattheure électrique. Le programme propose toujours une valeur par défaut.
L'utilisateur choisit ensuite quel type d'énergie il compte utiliser pour se chauffer (fuel, gaz ou électricité).
S'il choisit le gaz ou le fuel, l'utilisateur doit modifier le prix d'un kilowattheure de l'énergie choisie s'il n'utilise pas la valeur proposée par défaut. Le programme lui propose également une valeur de rendement du système de chauffage qu'il est libre de modifier à sa guise.
A partir du coût de l'énergie choisie et du rendement du système de chauffage, le programme donne à l'utilisateur le prix d'un kilowattheure de chauffage.

Le système de refroidissement fonctionne à l'électricité. L'utilisateur du logiciel doit introduire la valeur du COP, s'il décide de ne pas utiliser la valeur par défaut de 2.5.

Le système d'humidification et de déshumidification fonctionne à l'électricité et son rendement est considéré comme égal à 1.

2.3 Ecran des résultats

Une fois toutes ces données introduites, l'utilisateur accède au premier écran des résultats en cliquant simplement sur le bouton "Suivant". Quelques secondes suffisent au programme pour afficher les résultats.

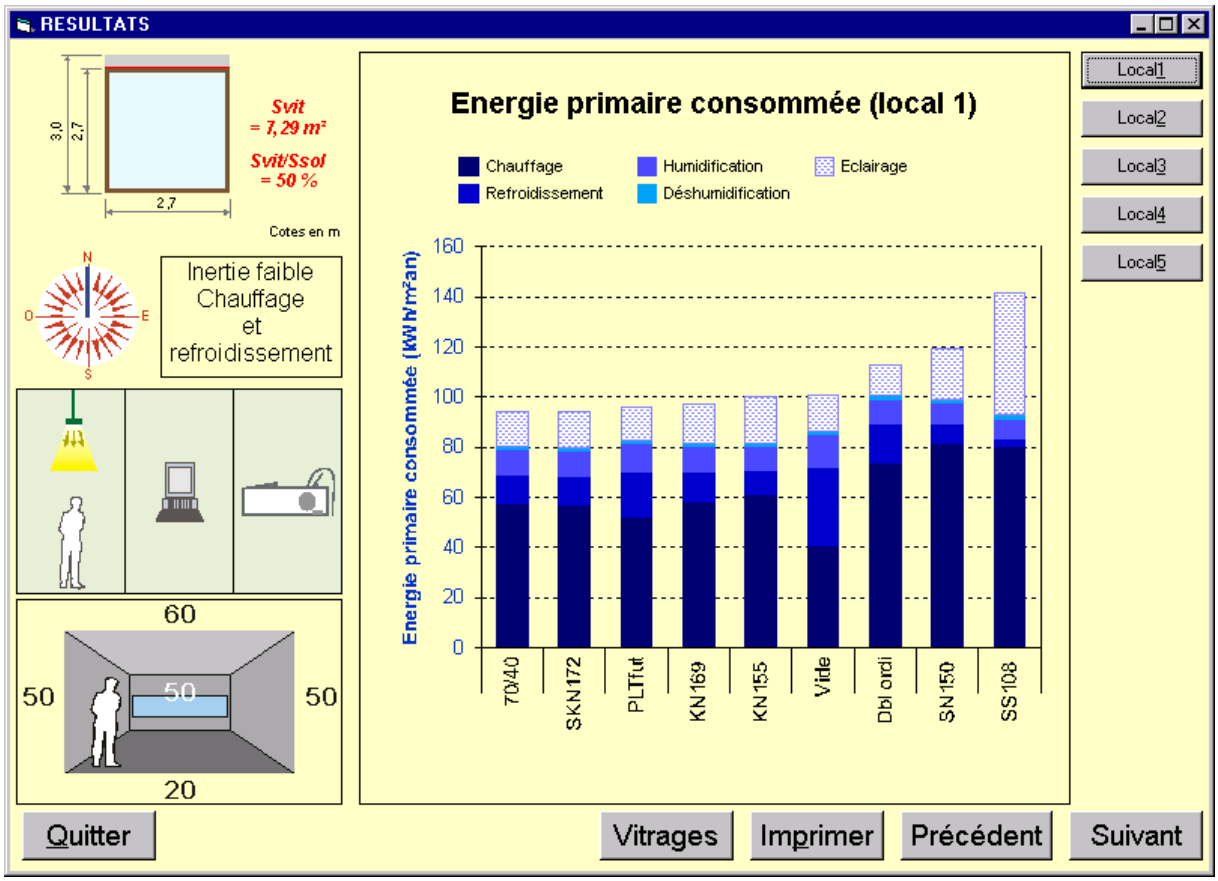


Figure 7.4: Ecran des résultats (stratégies 1 et 2)

Selon la stratégie choisie, le programme affiche alors les consommations annuelles rapportées au m^2 de sol, pour les différents vitrages testés. Cet affichage est donné sous forme d'histogrammes (pour les stratégies 1 et 2 - Figure 7.4) ou sous forme d'histogrammes pour les consommations combinés avec des courbes pour les heures de surchauffe (pour les stratégies 3, 4, 5 et 6 - Figure 7.5).

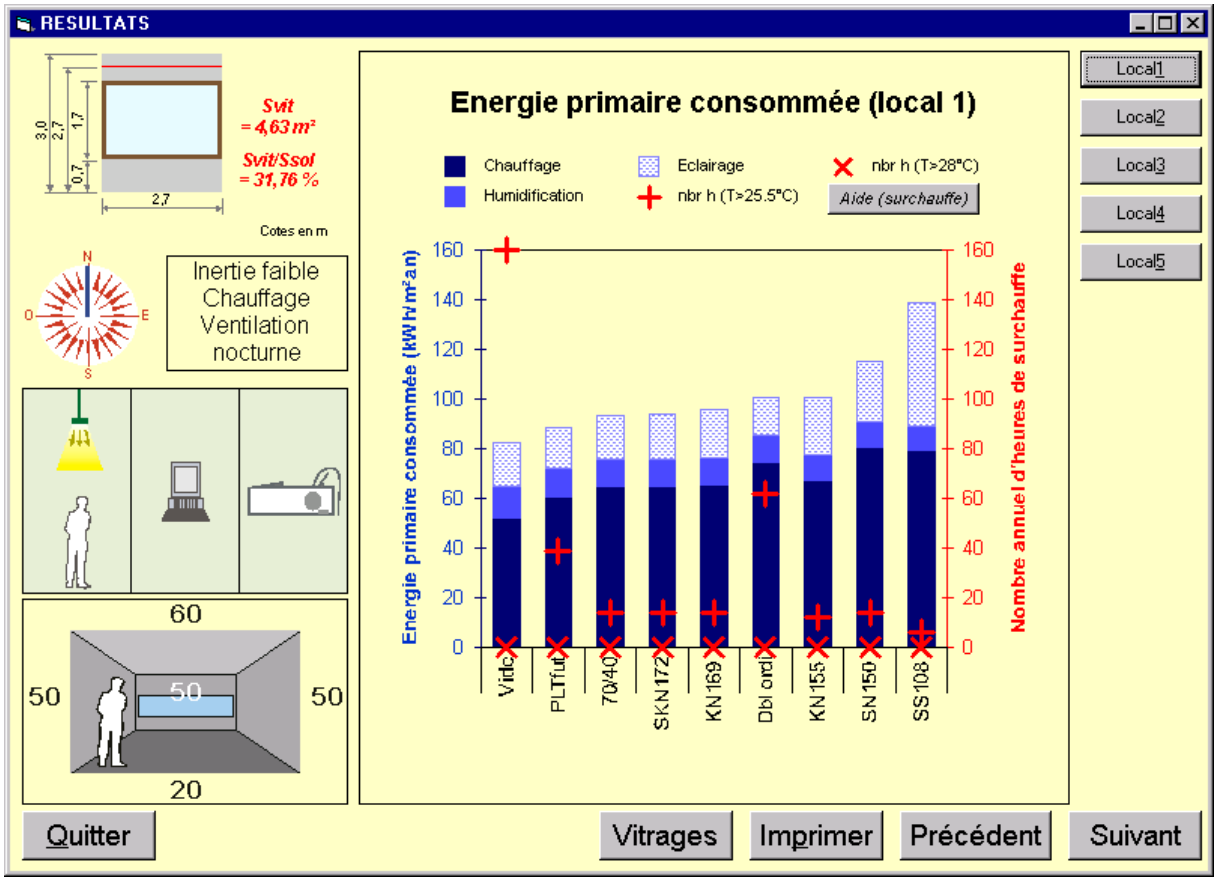


Figure 7.5: Ecran des résultats (stratégies 3, 4, 5 et 6)

Les hypothèses concernant le local sont rappelées à gauche du graphique. L'utilisateur peut ainsi imprimer cet écran et retrouver toutes les informations correspondant au choix du local considéré. Les vitrages sont classés dans l'ordre croissant de consommation totale.

L'utilisateur peut changer de local pour étudier celui qui correspond le mieux à son cas en cliquant sur le bouton situé à droite du graphique et correspondant au local choisit.

Dans le cas des stratégies 3, 4, 5 et 6, le bouton "Aide (surchauffe)" explique comment interpréter les résultats des nombres d'heures de surchauffe.
En effet, la norme belge ne donne aucune indication concernant le nombre d'heures de surchauffe acceptables dans un local de bureaux. Nous nous basons donc sur la norme hollandaise qui va nous permettre de déterminer si le confort est atteint dans le local, sans système de climatisation.
Le nombre d'heures annuel maximal pendant lesquelles la température intérieure des locaux de bureaux dépasse 25,5°C est de 100 (voir signe + sur le graphique).
Le nombre d'heures annuel maximal pendant lesquelles la température intérieure des locaux de bureaux dépasse 28°C est de 20 (voir signe x sur le graphique).
Si ces deux conditions ne sont pas respectées simultanément, les conditions de confort thermique d'été ne sont pas respectées. Le vitrage correspondant n'est donc pas acceptable.
Note : les sigles + et x tracés sur la ligne correspondant à la valeur 160 h sont relatifs à des valeurs supérieures à 160 heures.

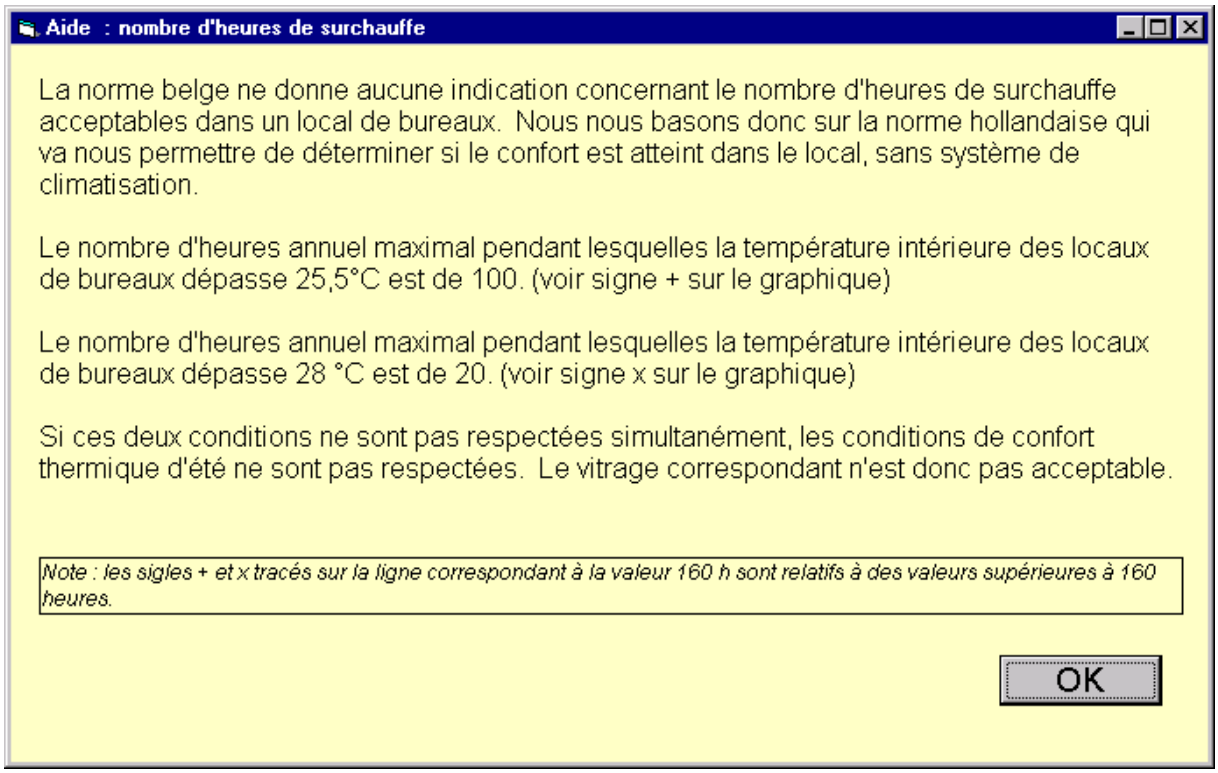


Figure 7.6 : Ecran d'aide pour le nombre d'heures de surchauffe acceptées

2.4 Caractéristiques des vitrages

Le bouton "Vitrages" permet à l'utilisateur d'avoir accès aux données relatives aux vitrages (caractéristiques physiques et coûts) (Figure 7.7). Si l'utilisateur désire une représentation graphique des facteurs solaires et lumineux correspondant à un vitrage particulier, il lui suffit de choisir ce vitrage dans les boutons d'option. Les figures de gauche seront automatiquement modifiées. L'utilisateur peut également modifier le coût des différents vitrages et accéder à un écran théorique définissant ce que sont les facteurs énergétique et lumineux d'un vitrage en cliquant sur le bouton "Théorie"(Figure 7.8).

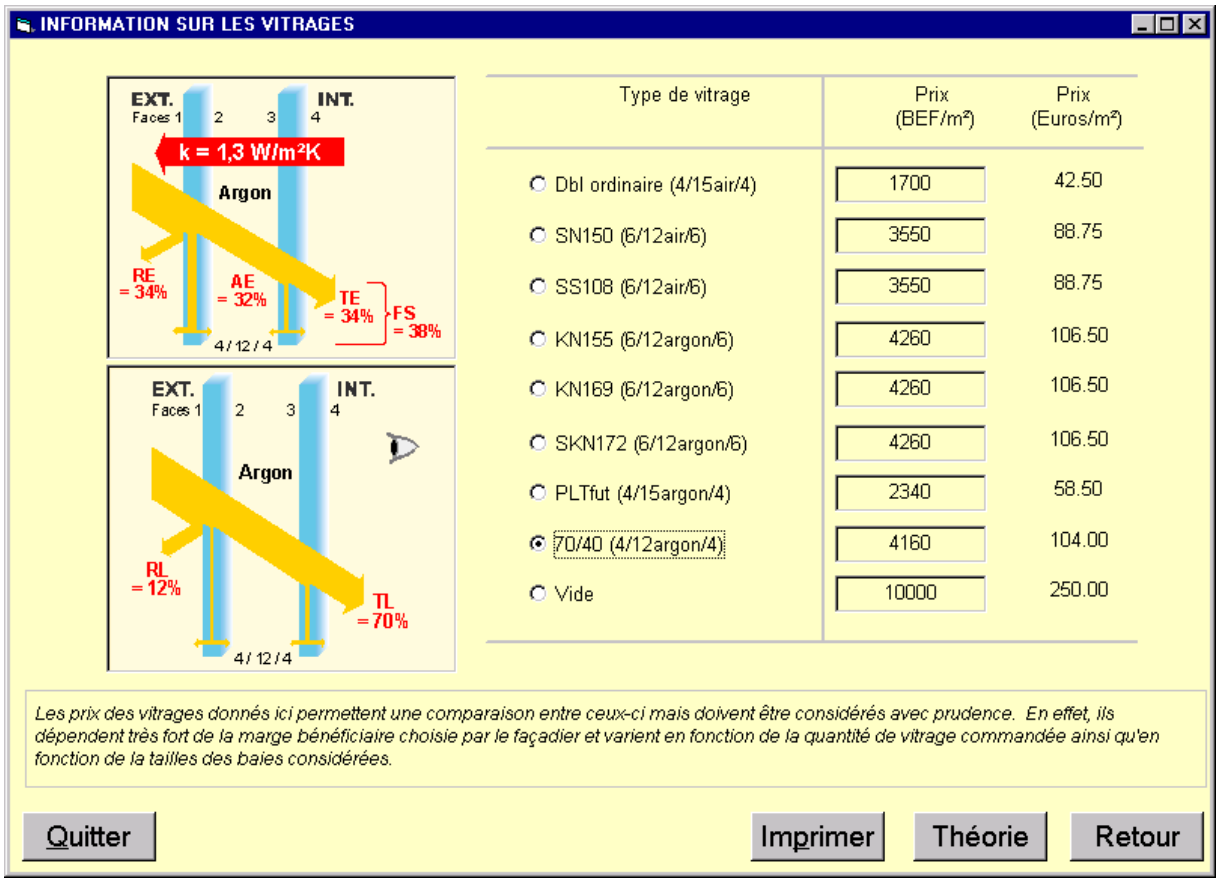


Figure 7.7 : Ecran de visualisation des caractéristiques des vitrages

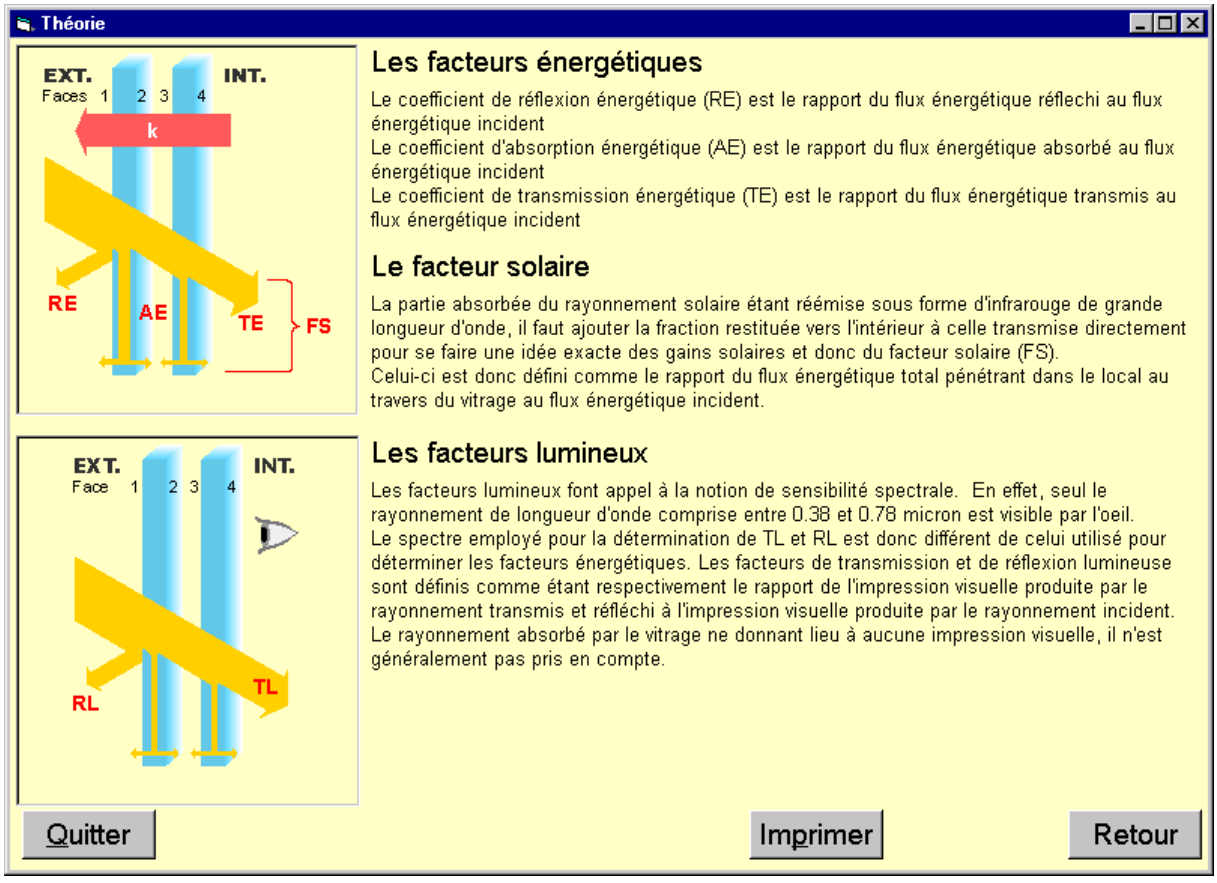


Figure 7.8: Ecran de définition des facteurs énergétiques et lumineux d'un vitrage

2.5 Calcul des coûts

La page de résultats des calculs des coûts se compose de trois onglets :
Le premier onglet (Figure 7.9) donne, dans l'ordre croissant, les coûts des consommations annuelles en francs ou en euros, par m^2 de surface au sol, pour les 9 vitrages étudiés.

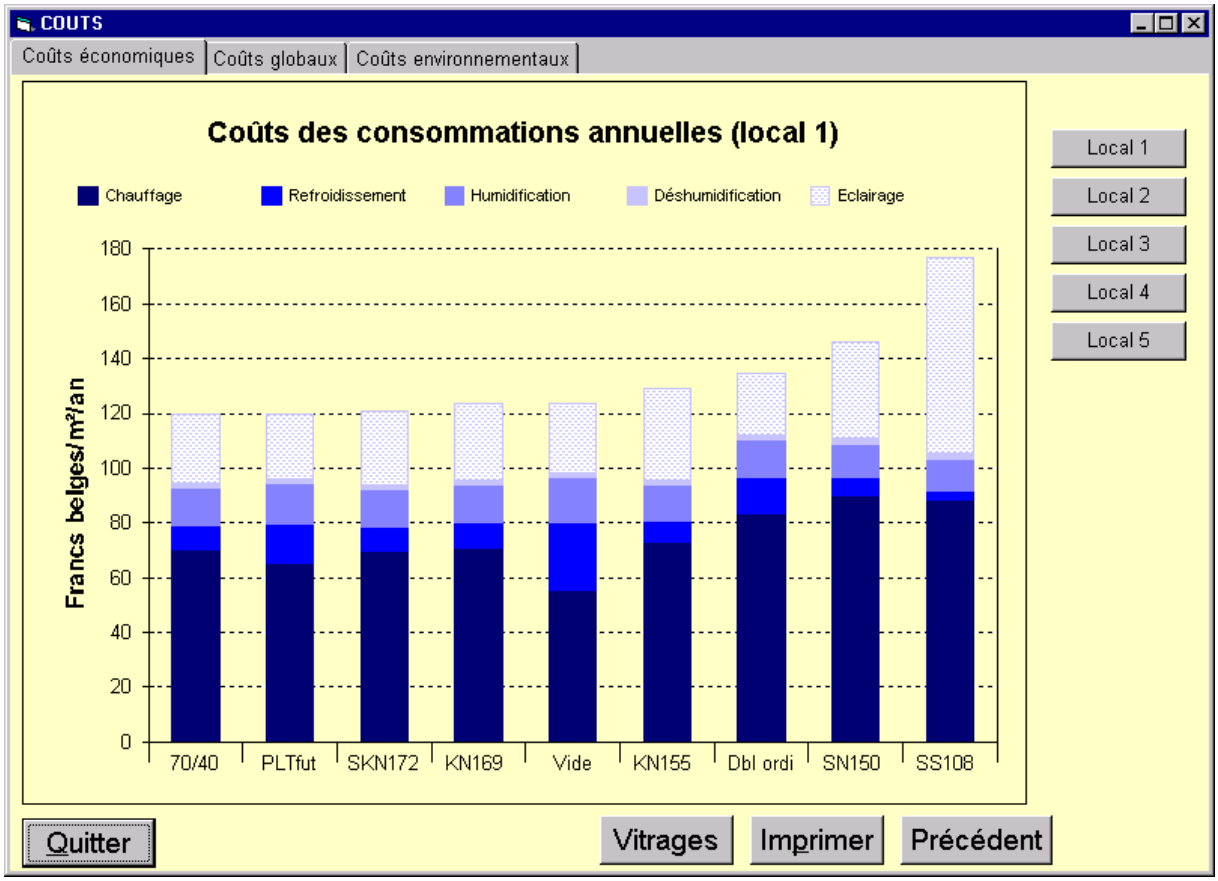


Figure 7.9: Ecran des coûts, premier onglet; coût des consommations annuelles

Le second onglet (Figure 7.10) donne le calcul du coût global relatif à chaque vitrage.
Ce coût global englobe le coût d'achat du vitrage, qui correspond à l'ordonnée du point tracé à "0 ans", auquel on ajoute, année après année, le coût des consommations annuelles.
Ce coût global est calculé par m^2 de surface au sol.
Cet écran est très intéressant pour la comparaison des vitrages entre eux. En effet, l'utilisateur du programme peut, s'il le souhaite, modifier l'échelle du graphique en faisant varier les valeurs du minimum et du maximum. Il peut également choisir quels vitrages il veut afficher et modifier ainsi la lisibilité du graphique.

Le troisième onglet (Figure 7.11) présente graphiquement les résultats des calculs des écobilans des différents vitrages. Le programme donne les valeurs des productions annuelles de CO_2, NO_x et SO_2 relatives à la production ainsi qu'à l'utilisation des différents vitrages.
L'utilisateur a accès aux données propres aux calculs des écobilans en cliquant sur le bouton "Données" (Figure 7.12). Notons que les données correspondant au vitrage 70/40 et au vitrage sous vide ne nous ont pas été communiquées et ont donc été fixée par défaut à 0.

A tout moment du programme, l'utilisateur peut revenir en arrière et modifier éventuellement ses données en cliquant sur le bouton "Précédent".

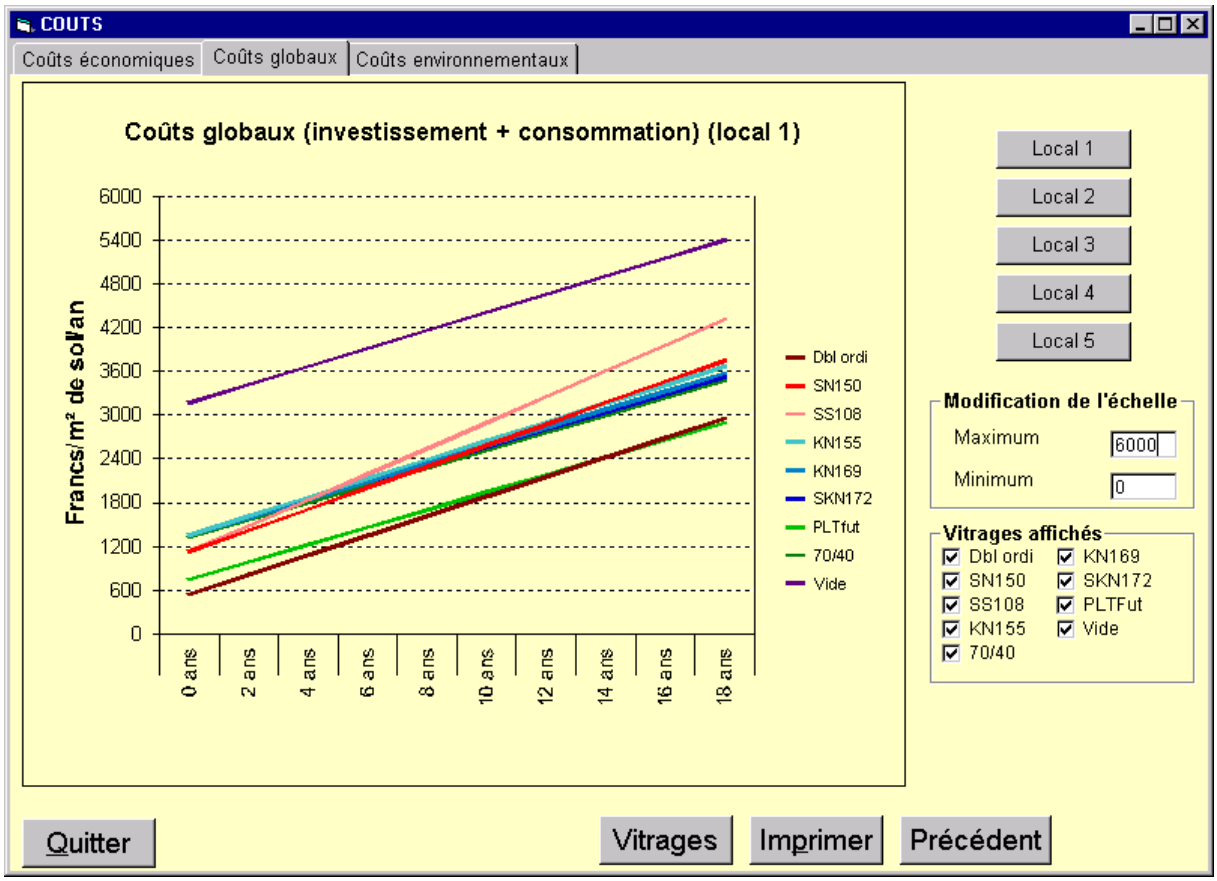


Figure 7.10: Ecran des coûts, second onglet; coût globaux

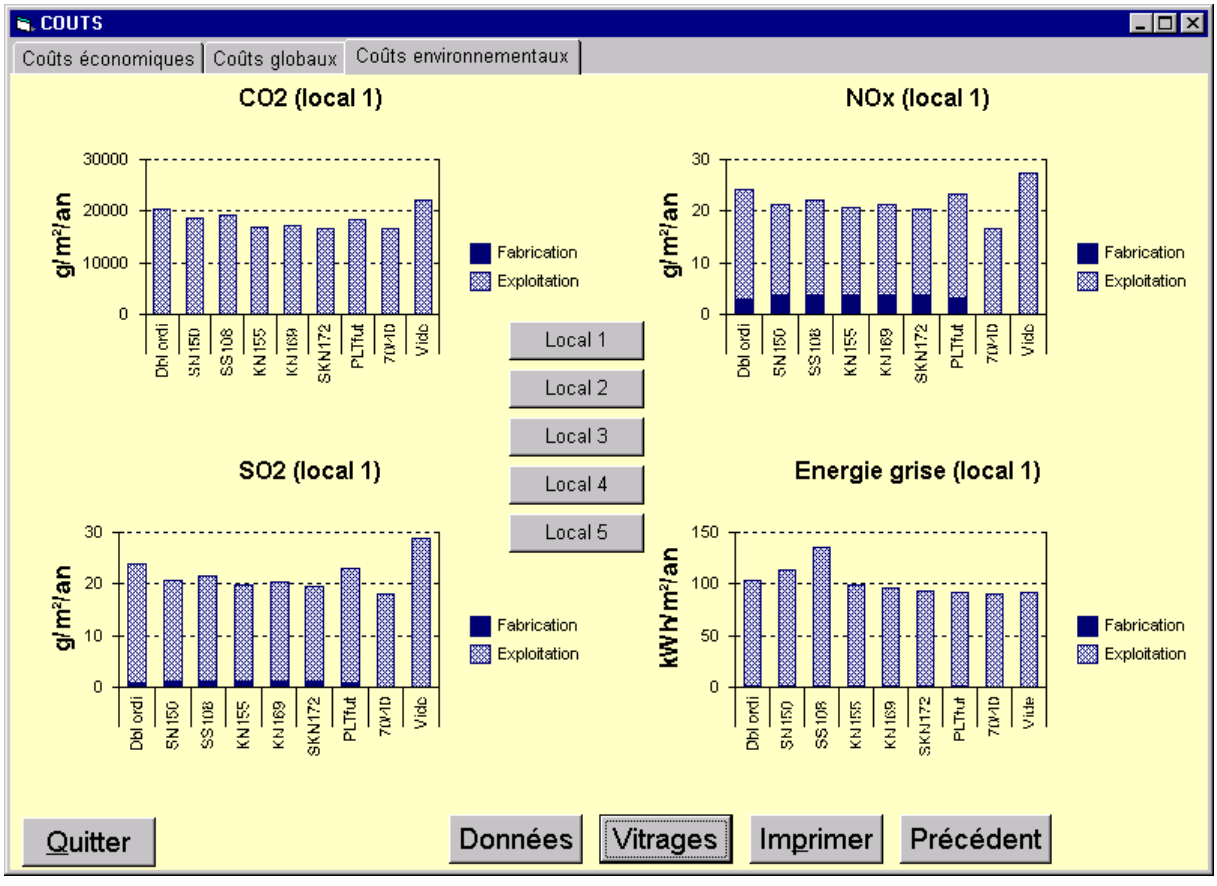


Figure 7.11: Ecran des coûts, troisième onglet; coûts environnementaux

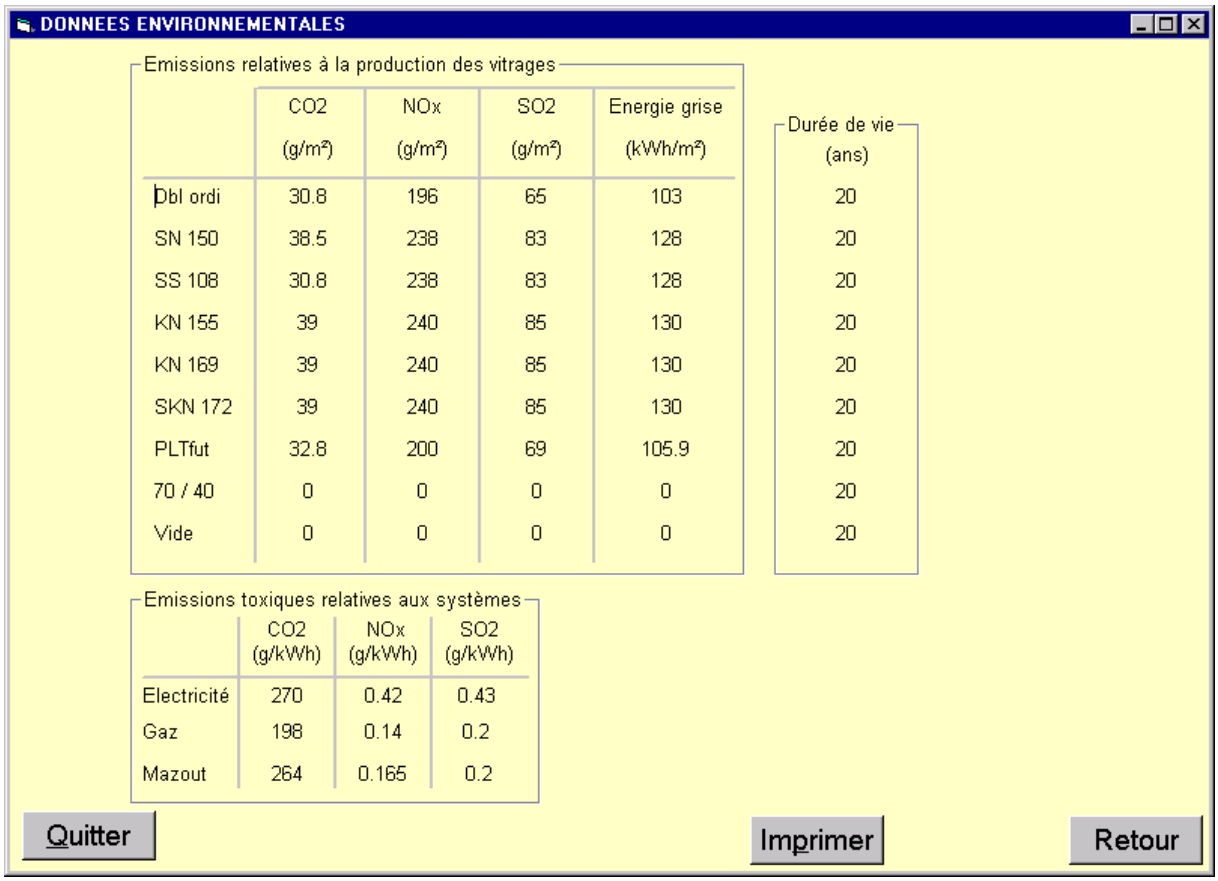


Figure 7.12: Ecran de données environnementales

3. Utilisation de l'outil

Actuellement, l'outil est utilisé par les vendeurs "grands chantiers" de chez St-Gobain. Ceux-ci s'en servent non seulement pour argumenter leurs propositions par rapport aux vitrages plus performants mais aussi pour leur propre formation. Le rôle didactique de l'outil prend donc ici tout son sens. L'outil pourrait également être utilisé afin de déterminer des arguments commerciaux généraux en faveur des vitrages plus performants.

Dans le futur, en fonction des remarques des personnes utilisant actuellement l'outil, il est envisageable d'améliorer sa présentation mais aussi de le traduire en néerlandais. Si la firme St-Gobain décide de l'exploiter en dehors de la Belgique, pour un climat radicalement différent de celui de la Belgique, il faudrait refaire des simulations en modifiant les données climatiques. Bien sur, l'établissement d'une nouvelle base de donnée relative à un autre climat pourrait prendre un peu de temps car les simulations sont à refaire mais la méthodologie développée dans le cadre de ce travail de doctorat reste entièrement applicable. Les fichiers et les programmes d'automatisation des calculs développés dans le cadre de ce travail sont tout à fait réutilisables et la durée de ce travail supplémentaire dépendrait principalement de la durée des nouvelles études paramétriques, de l'analyse des résultats de celles-ci et des calculs de simulation. Notons que cette durée diminue au cours du temps puisque les ordinateurs sont de plus en plus rapides et puissants.
La même démarche devrait être appliquée s'il est demandé d'introduire un nouveau vitrage dans l'outil.

4. Références

[Pau 1999] Paule B., "Application de la logique floue à l'aide à la décision en éclairage naturel", Thèse n°1916 présentée au département d'architecture de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 1999.

Conclusion générale

L'aboutissement de ce travail de doctorat est le développement d'un outil permettant à son utilisateur de choisir les vitrages d'un immeuble de bureaux en fonction d'autres critères que ceux qui étaient utilisés traditionnellement, c'est à dire l'apparence esthétique du vitrage et le prix d'achat de celui-ci. La prise en compte de critères de consommations d'énergie primaire, de coûts économiques intégrés et de coûts environnementaux permet maintenant aux décideurs de choisir un vitrage en tenant compte de nouveaux aspects qu'il est impératif de considérer dans le contexte planétaire actuel.

Le but premier de ce travail était de mettre au service des décideurs une expertise trop souvent confinée au sein des équipes de recherches. Cela répondait à une demande formulée aussi bien par les bureaux d'études et les architectes que par les firmes de construction de vitrages elles-mêmes, que ce soit pour leurs départements de recherche et développement ou pour leurs départements de marketing. En effet, les départements de recherche et développement sont toujours à l'écoute de nouvelles demandes qui pourraient résulter de l'analyse des résultats de simulations alors que les départements de marketing tirent comme avantage de l'utilisation de l'outil le fait de pouvoir justifier et argumenter l'utilisation d'un type de vitrage par rapport à un autre en terme de critères divers, correspondant à la demande ou à la sensibilité du maître de l'ouvrage.
Cet objectif peut être considéré comme atteint puisque actuellement l'outil est utilisé en phase de test par une partie des vendeurs de la firme St-Gobain. Un aspect qui n'avait peut-être pas été envisagé au départ mais qui a émergé tout naturellement des discussions avec ces personnes est également l'aspect pédagogique de l'outil. En effet, les vendeurs eux-mêmes peuvent, par l'utilisation de l'outil, répondre à des questions qu'ils se posaient concernant divers aspects relatifs au choix du vitrage et se forger leur expérience personnelle dans le domaine abordé par l'outil.

Le travail fourni pour aboutir à cet outil est basé sur l'élaboration d'une méthodologie qui est présentée au chapitre 1.
Même si cette méthodologie a été appliquée pour les immeubles de bureaux en Belgique, sa force est qu'elle peut être facilement étendue pour d'autres types de bâtiment et également d'autres pays et donc d'autres climats. Il est certain que si l'idée était d'étendre l'outil à d'autres bâtiments ou d'autres pays, il ne suffirait pas de reproduire les mêmes simulations que celles réalisées pour cet outil, en modifiant le fichier météo, mais qu'il faudrait plutôt reprendre la même démarche que celle décrite dans ce rapport de thèse, sans négliger les études paramétriques et l'adaptation des hypothèses de calcul au contexte choisi.
En effet, il se pourrait par exemple que certains paramètres n'ayant peu ou pas d'influence sur le choix du vitrage en pays tempéré puissent avoir un impact beaucoup plus important en pays chaud. De même, les bâtiments traditionnellement construits dans ce type de climat ont certainement des caractéristiques fort différentes de celles du même type de bâtiment en Belgique.
La méthodologie a donc abouti dans notre cas à un immeuble de bureau type, décrit dans le second chapitre de ce rapport. Certaines caractéristiques ont été fixées pour tous les calculs, d'autres peuvent varier. C'est cette variation qui induit le grand nombre de cas testés en final.

Dans le troisième chapitre de ce rapport, nous abordons tous les aspects concernant la lumière et les calculs d'éclairage.
Un travail bibliographique met l'accent sur le fait que les aspects de confort visuel sont encore assez mal connus actuellement et explique pourquoi nous avons donc dû réduire cet aspect en nous limitant à l'étude d'une valeur d'éclairement atteint sur le plan de travail.

Les principales conclusions à retenir de l'étude des consommations d'éclairage peuvent être divisées en deux parties.

Premièrement, si nous observons uniquement les consommations d'éclairage artificiel, nous concluons que :

- Les facteurs ayant un impact marqué sur la quantité et la répartition de l'éclairage naturel et donc sur les consommations d'éclairage artificiel sont la configuration de la façade, l'orientation de l'ouverture ainsi que la largeur du local considéré.
- Les coefficients de réflexion des parois intérieures influencent également les consommations d'éclairage artificiel, mais dans une moindre mesure.

Quantitativement, les économies d'énergie d'éclairage réalisables par le dimming de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel varieraient entre 50% et 80%, pour un vitrage ayant un coefficient de transmission lumineuse de l'ordre de 60%.
Rappelons les réserves que nous avons émises quant à la précision quantitative des résultats résultant du manque de validation du programme Superlink.

Deuxièmement, si nous étudions l'influence de la prise en compte de la disponibilité de l'éclairage naturel sur les consommations totales du bâtiment, nous concluons que :

- L'éclairage artificiel peut prendre une part très importante des consommations totales d'un immeuble de bureau. Nos calculs nous donnent des valeurs de l'ordre de 40 à 50%, pour les hypothèses choisies, c'est-à-dire sans tenir compte des consommations électriques bureautiques ni des pompes et appareils auxiliaires du système HVAC.
- Les diminutions des charges d'éclairage par la prise en compte de l'éclairage naturel sur les consommations totales du bâtiment peuvent atteindre 40%, d'après les résultats de simulations.

Le travail décrit dans le troisième chapitre fait l'objet d'un article intitulé « Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting » qui sera publié prochainement dans la revue 'Energy and Buildings' [Bod 2002].

Après une introduction sur les aspects de confort thermique, les chapitres 4 et 5 nous donnent une série d'informations sur le choix du vitrage et l'influence de divers paramètres sur les consommations.
Nous apprenons que le choix du vitrage doit se faire en fonction de l'orientation de la façade concernée. Cette différentiation sera plus ou moins marquée selon la stratégie mise en place et est plus critique lorsqu'il n'existe pas de système de refroidissement. Nous affirmons donc que si le concepteur du bâtiment envisage une démarche de conception de son bâtiment répondant aux critères de développement durable, il doit aller jusqu'au bout de sa démarche en différentiant les vitrages en fonction des orientations des locaux concernés.
Rappelons cependant que si cette différentiation n'est pas réalisable, il conviendra au concepteur de réaliser un compromis. Ce compromis pourra être trouvé en utilisant l'outil de choix du vitrage et en étudiant le groupe de vitrages les plus performants plutôt que le vitrage le plus performant, pour chaque orientation.

Le nombre de paramètres influençant le choix du vitrage d'un immeuble de bureaux en Belgique est important. Parmi ceux-ci, en plus de l'orientation, nous avons relevé : la configuration de la façade, la valeur des gains internes, les coefficients de réflexion des parois intérieures du local, l'inertie thermique du bâtiment, le type de stratégie mise en place, le type de source d'énergie de chauffage et de refroidissement ainsi que leur rendement et leur facteur de conversion en énergie primaire et la prise en compte de l'éclairage naturel.

Les chapitres 4 et 5 font également l'objet d'une publication intitulée "Study of parameters and criteria influencing the choice of glazing in office buildings in Belgium" publiée dans les proceedings du congrès ASHRAE, Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII, Clearwater Beach, Florida, December 2-6, 2001, [Bod 2001]. Cette publication est disponible à l'ASHRAE.

Le chapitre 5 nous montre également un des avantages de l'outil informatique qui permet une mise à jour des critères évoluant dans le temps comme les aspects de rendement des systèmes ainsi que les facteurs de transformation en énergie primaire, ou comme les coûts des énergies ou des vitrages.

Nous apprenons que tous ces aspects ont une influence sur le choix du vitrage, en fonction du critère de choix du concepteur du bâtiment. La brève étude d'écobilan et d'énergie grise présentée au chapitre 5 nous permet de conclure, malgré une certaine incertitude quant aux données utilisées dans nos calculs, que les productions de polluants ainsi que la demande d'énergie grise relatives à la production des vitrages sont marginales par rapport aux polluants émis et à l'énergie grise nécessaire au cours de la vie du bâtiment. Lorsqu'on choisit un vitrage, il est donc essentiel de tout mettre en œuvre afin de limiter les consommations d'énergie d'exploitation du bâtiment dans lequel il sera placé.

Dans le chapitre 6 nous abordons la prise en compte des protections solaires. Ce point, qui n'a pas l'ambition de donner une piste quand au choix d'une combinaison vitrage + protection solaire dans tous les cas traités dans l'outil, nous semblait essentiel à aborder. En effet, nous sommes intimement convaincus que la meilleure solution au niveau des ouvertures reste actuellement soit le développement de vitrage actifs, mais qui pose encore pas mal de problèmes actuellement, dont notamment les aspects de tenue dans le temps et de coût, soit la mise en place d'un système combiné formé d'un vitrage et d'un ombrage mobile.
La bibliographie présentée dans ce chapitre montre bien qu'un grand nombre de questions restent encore à résoudre à ce sujet et que le choix d'un tel système est plus complexe que le choix d'un vitrage seul. Cette complexité provient principalement du fait que ce système sera actif, contrairement aux vitrages que nous avons abordés dans l'outil, et qu'au choix du type de vitrage et du type d'ombrage s'ajoute le problème du mode de gestion de ce dernier. Les premiers travaux sur les systèmes d'ombrages réalisés dans le chapitre 6 montrent que les systèmes de gestion des protections solaires utilisés actuellement en pratique ne sont pas optimisés. Les premières simulations donnent quelques pistes de gestion pour un cas particulier. Ces modes de gestion sont originaux et devraient être approfondis et validés par des campagnes de mesures ou des simulations plus étendues.

Le chapitre 7 constitue la dernière partie de ce rapport de doctorat et présente, sous forme de copies d'écrans commentées, l'outil de choix du vitrage, tel qu'il est actuellement utilisé par la firme St-Gobain.

Prospectives

Comme nous l'avons déjà dit, il existe plusieurs pistes quant à l'extension et la suite de ce travail de doctorat.
La première piste serait l'extension de l'outil à d'autres types de bâtiments et/ou d'autres climats. Nous en avons déjà parlé dans la première partie de cette conclusion.
Cette extension semblerait intéresser la firme St-Gobain dont les activités ne se limitent bien entendu pas à la Belgique.

La seconde piste est la suite du chapitre 6, c'est-à-dire la prise en compte des systèmes d'ombrage en combinaison avec des vitrages. Ces ombrages seraient soit intégrés dans une façade classique soit dans une façade double-peau. Un des intérêts de ce travail de doctorat est qu'il se prolonge par un contrat traitant des aspects de double-peau, ombrage et ventilation. Les commanditaires du contrat first, à la base de ce travail de doctorat ont donc été convaincus par les résultats de ce travail et on compris l'intérêt d'approfondir les aspects d'ombrage des immeubles de bureaux.

Une piste intéressante à approfondir se situe également au niveau de la validation du logiciel Superlink. Notre première idée quant à cette validation serait d'établir une campagne de mesures de consommations d'éclairage artificiel, liées à des mesures de disponibilité d'éclairage naturel. Ce travail paraît également fort intéressant et pourrait être intégré dans les futur travaux de la cellule éclairage de l'équipe 'Architecture et Climat'. Il serait alimenté par les contacts internationaux que nous avons déjà et que nous continuerons à développer dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie et plus particulièrement de la tâche 31 qui débute actuellement.

Une autre prospective serait la création d'un outil simplifié de choix du vitrage basé sur les résultats de nos simulations. Cet outil aurait comme avantage, par rapport à l'outil développé dans le cadre de cette thèse, de proposer des valeurs de paramètres continues et non discrètes comme c'est le cas actuellement. On pourrait par exemple, considérer des vitrages que nous n'avons pas pris en compte jusqu'à présent ou des largeurs de locaux différentes de celles que nous proposons dans l'outil. De même, les gains internes pourraient varier de manière continue dans l'intervalle considéré jusqu'à présent.
Ce nouvel outil serait basé sur une analyse statistique des résultats des simulations réalisées dans le cadre de ce travail de thèse.
Pour réaliser ce genre d'outil, nous devrions nous baser sur la méthode de planification expérimentale. La principale difficulté se trouve au niveau de la liaison éclairage-thermique, c'est-à-dire au niveau de l'évaluation des gains internes horaires. Une analyse précise nous permettrait sans doutes de calculer, à partir des résultats dont nous disposons actuellement, des valeurs de gains internes liées à l'utilisation d'autres vitrages.
Il faut cependant être conscient du fait que les seuls paramètres que nous pourrions faire varier de manière continue sont les paramètres pour lesquels on proposait déjà plusieurs valeurs. Il faudrait sans doutes également refaire de nouvelles simulations pour compléter les résultats obtenus jusqu'à présent et tirer des algorithmes à partir de ceux-ci.

Une des particularités de cette thèse de doctorat est le lien qui a été établi entre les travaux réalisés au sein d'une équipe de recherche et leur application dans une entreprise, c'est-à-dire par des personnes confrontées régulièrement aux aspects pratiques de la question du choix du vitrage.
Il nous semble que le contact établi peut être considéré comme un succès et qu'il faut continuer à développer cette spécificité de l'équipe de recherche 'Architecture et climat' qu'est la force qu'elle a de pouvoir transmettre une connaissance pointue aux personnes concernées par l'application de cette connaissance. Il nous semble donc essentiel de rester à l'écoute des développements des modes de communication (principalement informatiques actuellement) et de les intégrer dans nos travaux futurs.

Nous voyons donc que ce travail de doctorat nous a ouvert de larges perspectives de travail futur et que la difficulté ne sera pas de trouver des pistes de travail mais plutôt de choisir parmi celles-ci, celles qui semblent les plus intéressantes à développer et de les jalonner afin de continuer à répondre aux besoins d'un grand nombre de personnes concernées par les aspects de la physique du bâtiment et au-delà de ce point, par l'intégration des principes de développement durable dans le domaine du bâtiment.

Références

[Bod 2001] Bodart M., De Herde A. “Study of parameters and criteria influencing the choice of glazing in office buildings in Belgium”, Proceedings of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII, Clearwater Beach, Florida, December 2-7, 2001.

[Bod 2002] Bodart M., De Herde A. “Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting”, Energy and Buildings vol. 34, issue 5, p. 421-429, June 2002.

ANNEXE 1 : Choix du vitrage de référence

Choix du vitrage de référence

Orientation Sud (premier passage)

Nous n'avons ici qu'un seul graphique par cas puisque les deux méthodes placent un double vitrage ordinaire aux orientations nord, est et ouest.

Méthode 1 et Méthode 2

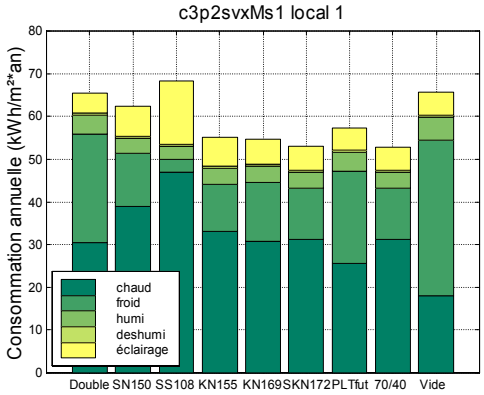


Figure 1

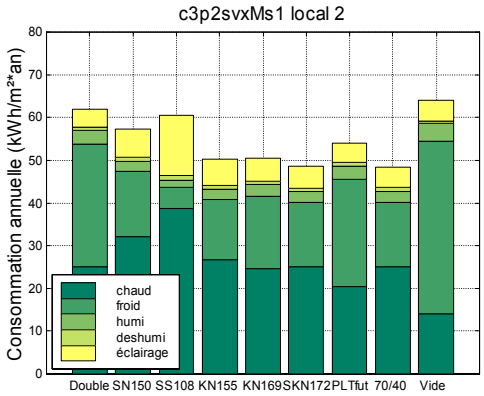


Figure 2

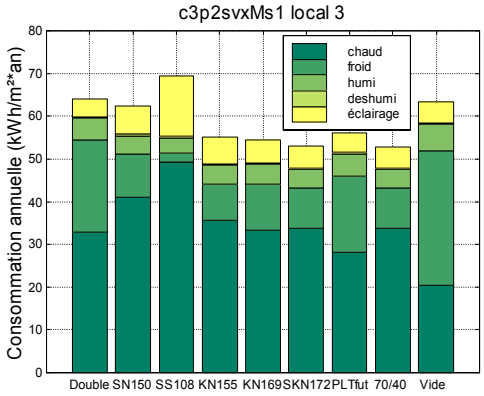


Figure 3

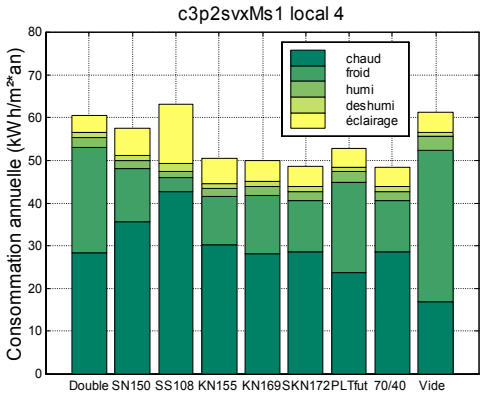


Figure 4

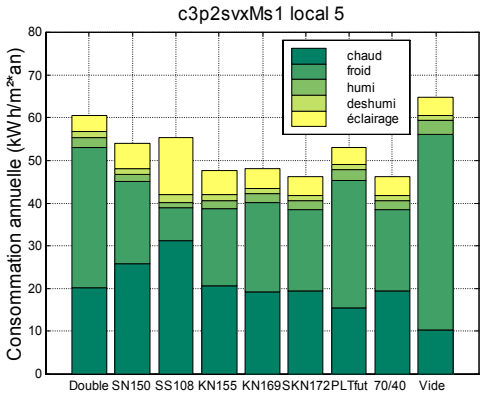


Figure 5

Orientation Nord

Méthode 1
Vitrages sud : 70/40
Vitrages est et ouest : double ordinaire

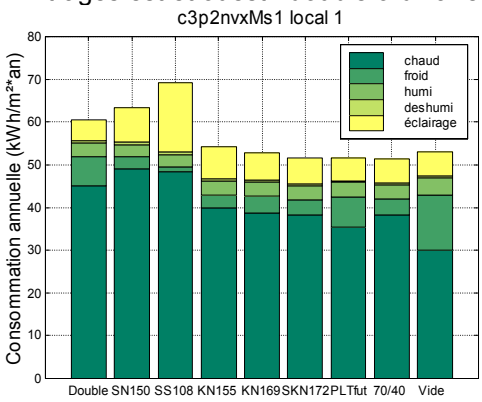


Figure 6

Méthode 2
Vitrages sud, est et ouest : double ordinaire

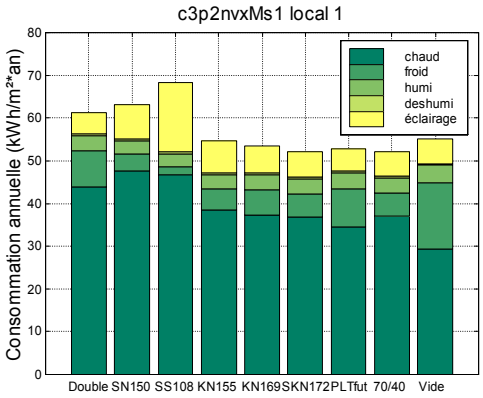


Figure 7

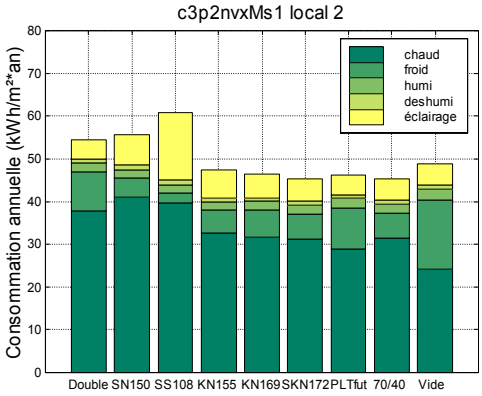


Figure 8

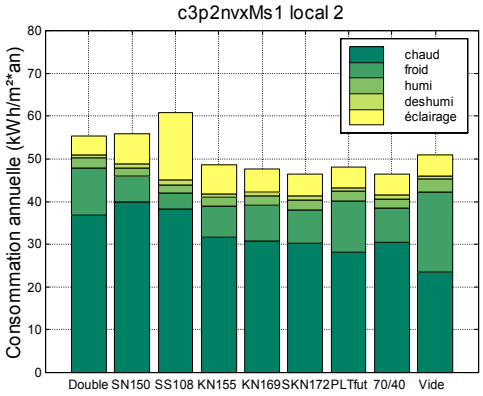


Figure 9

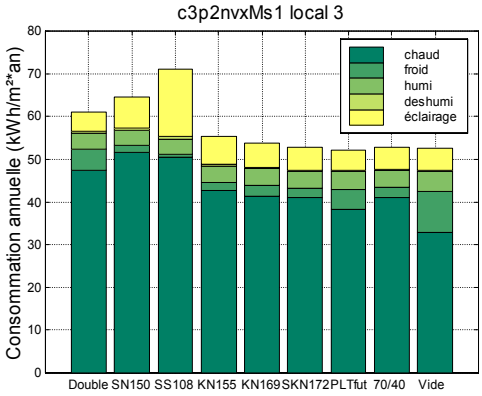


Figure 10

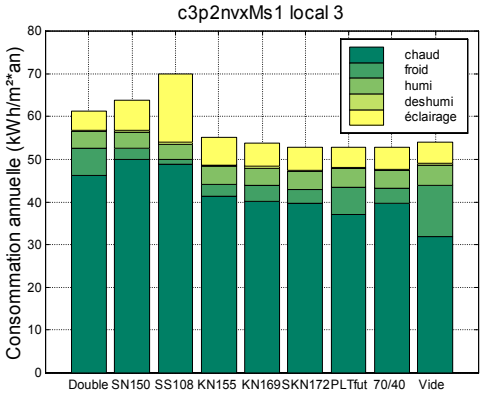


Figure 11

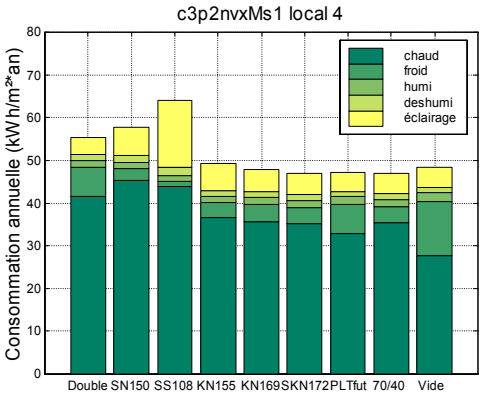


Figure 12

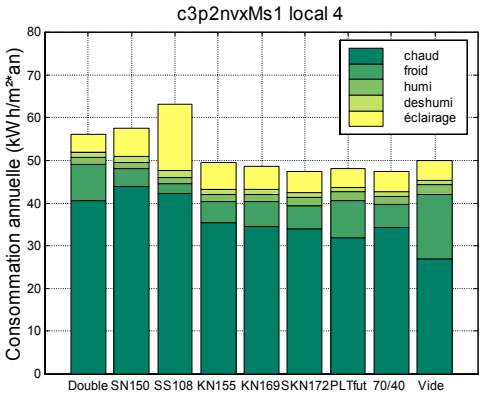


Figure 13

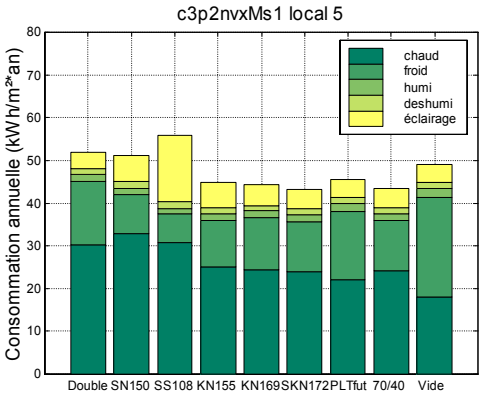


Figure 14

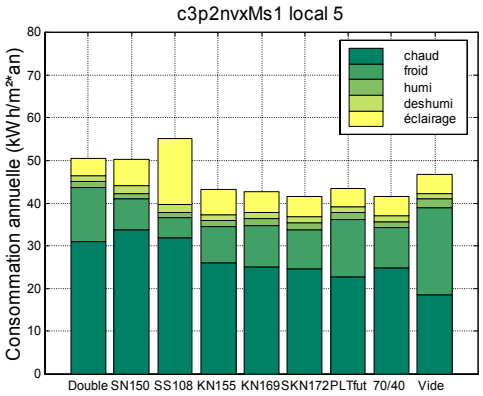


Figure 15

Orientation Est

Méthode 1
Vitrages nord et sud : 70/40
Vitrages ouest : double ordinaire

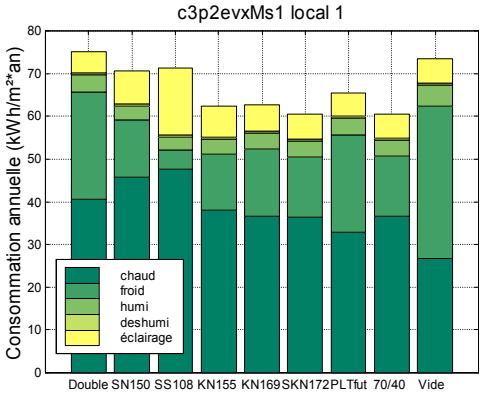


Figure 16

Méthode 2
Vitrages nord, sud et ouest : double ordinaire

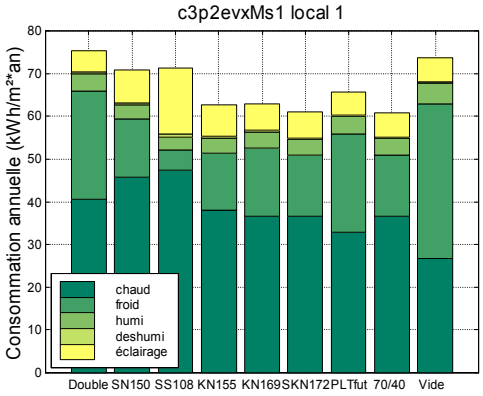


Figure 17

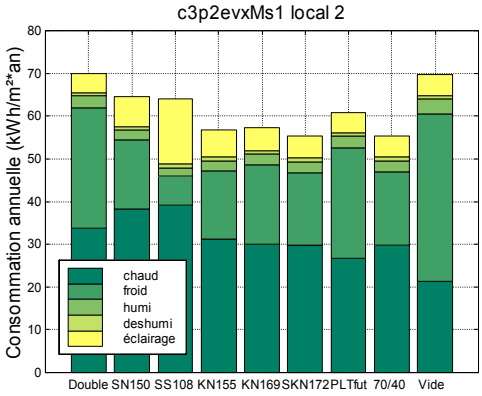


Figure 18

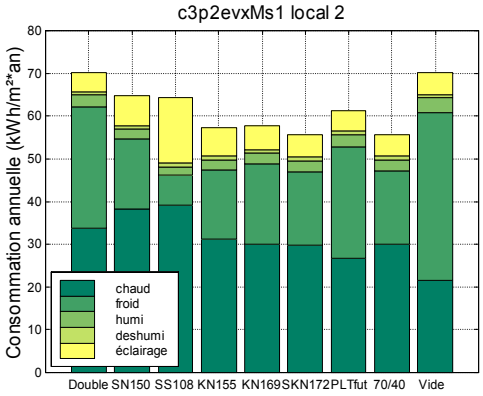


Figure 19

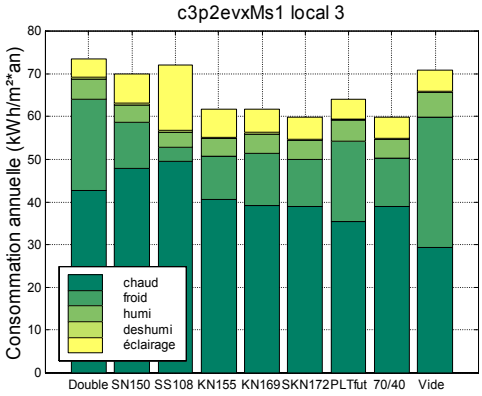


Figure 20

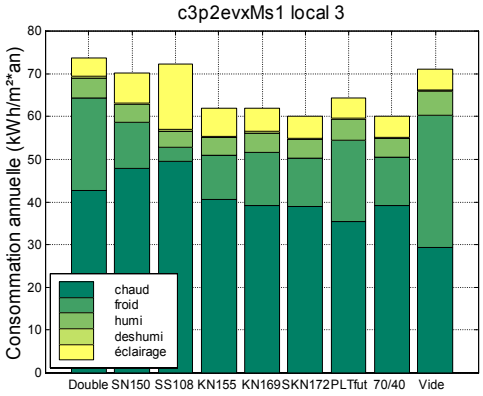


Figure 21

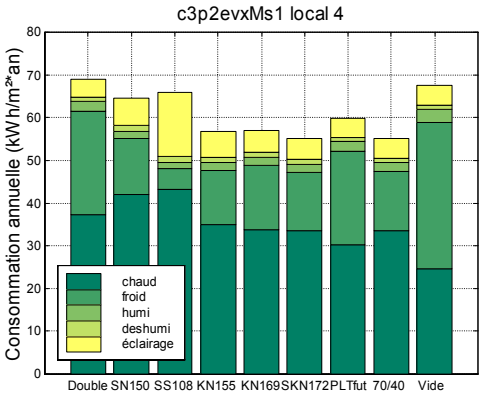


Figure 22

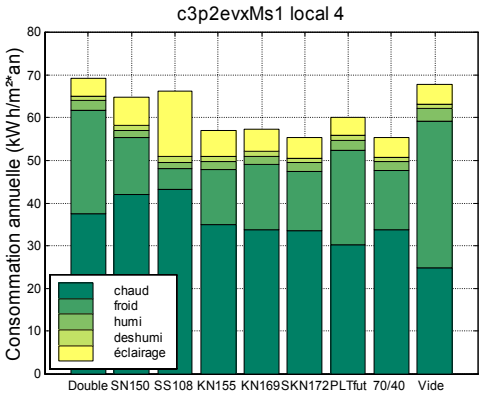


Figure 23

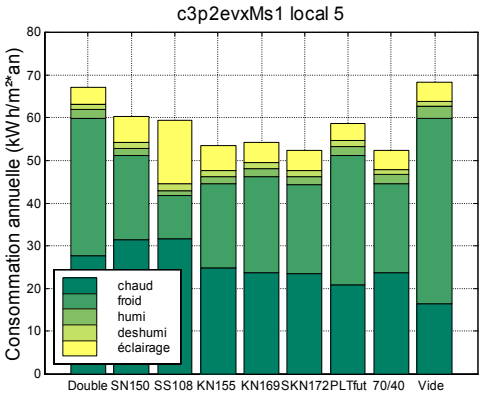


Figure 24

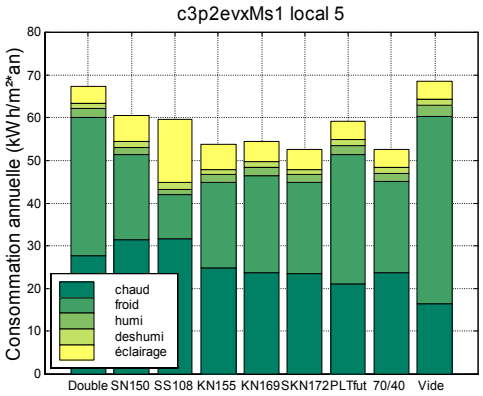


Figure 25

Orientation Ouest

Méthode 1
Vitrages nord, sud et est : 70/40

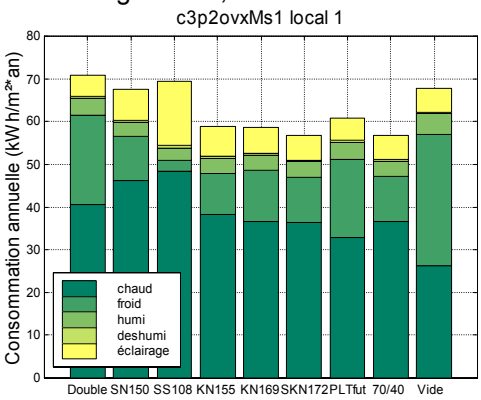


Figure 26

Méthode 2
Vitrages nord, sud et est : double ordinaire

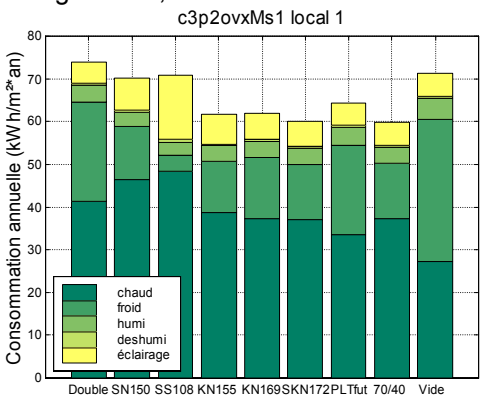


Figure 27

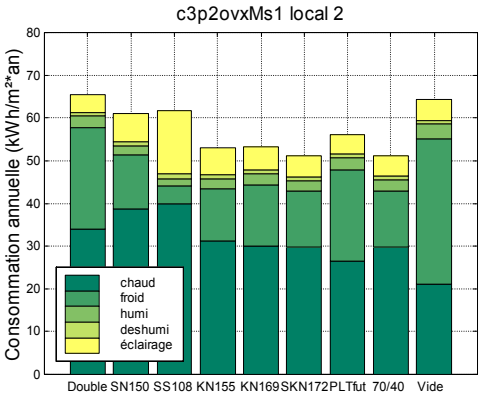


Figure 28

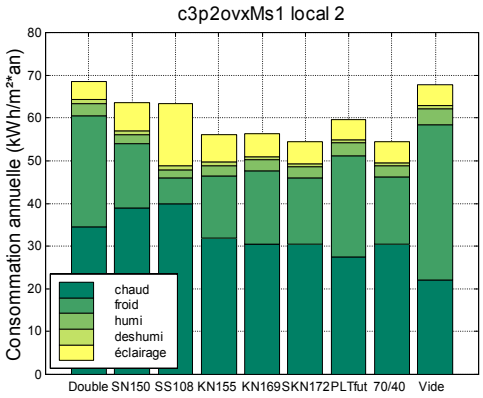


Figure 29

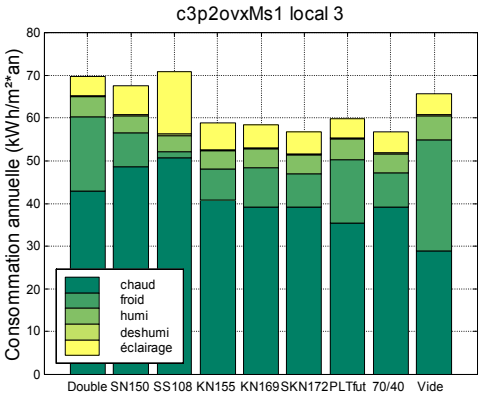


Figure 30

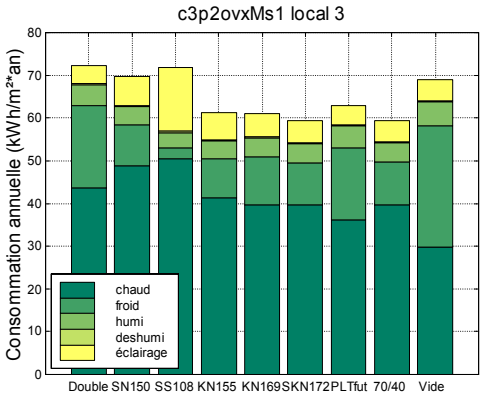


Figure 31

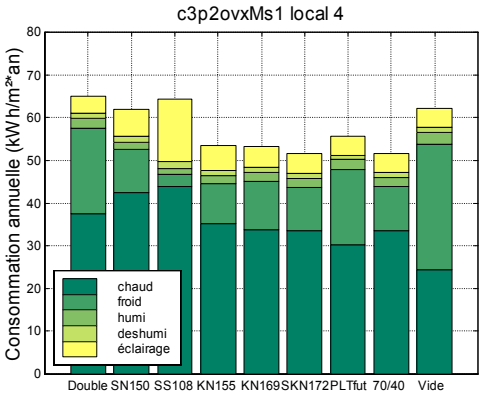


Figure 32

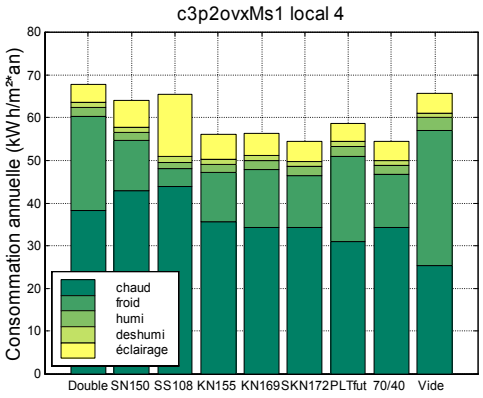


Figure 33

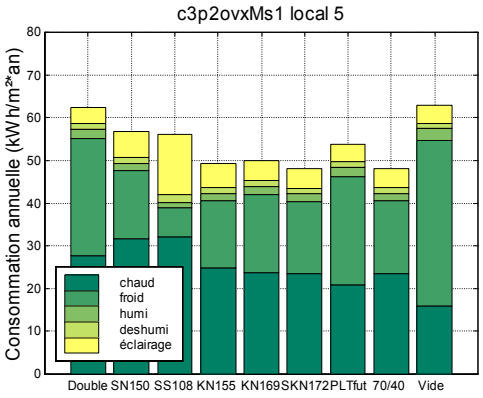


Figure 34

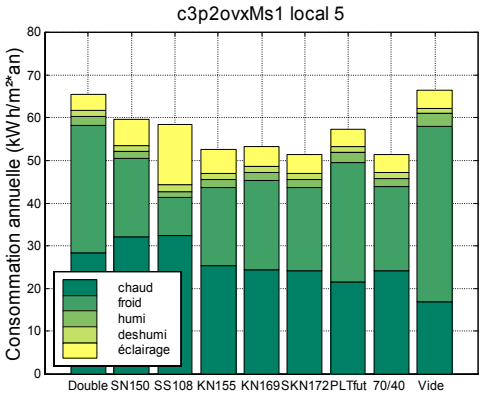


Figure 35

Orientation Sud (second passage)

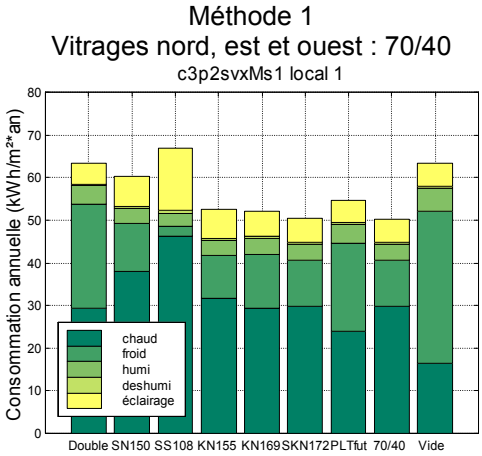


Figure 36

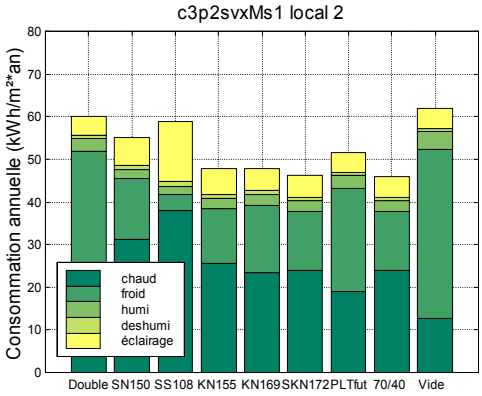


Figure 37

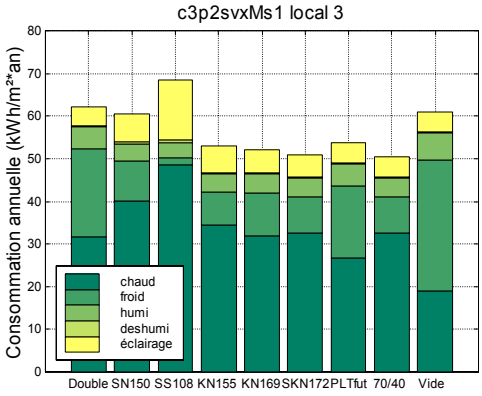


Figure 38

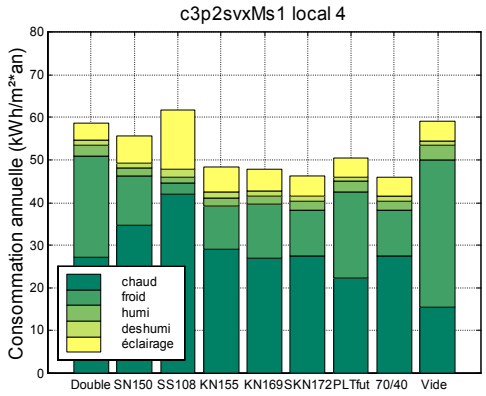


Figure 39

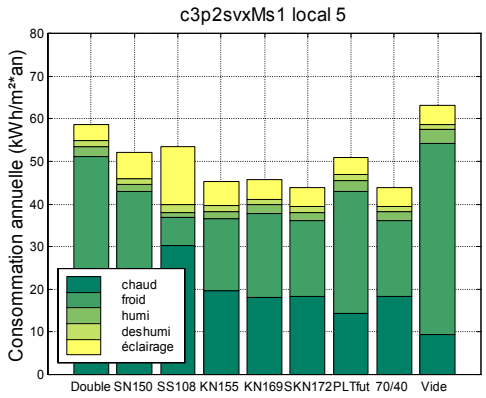
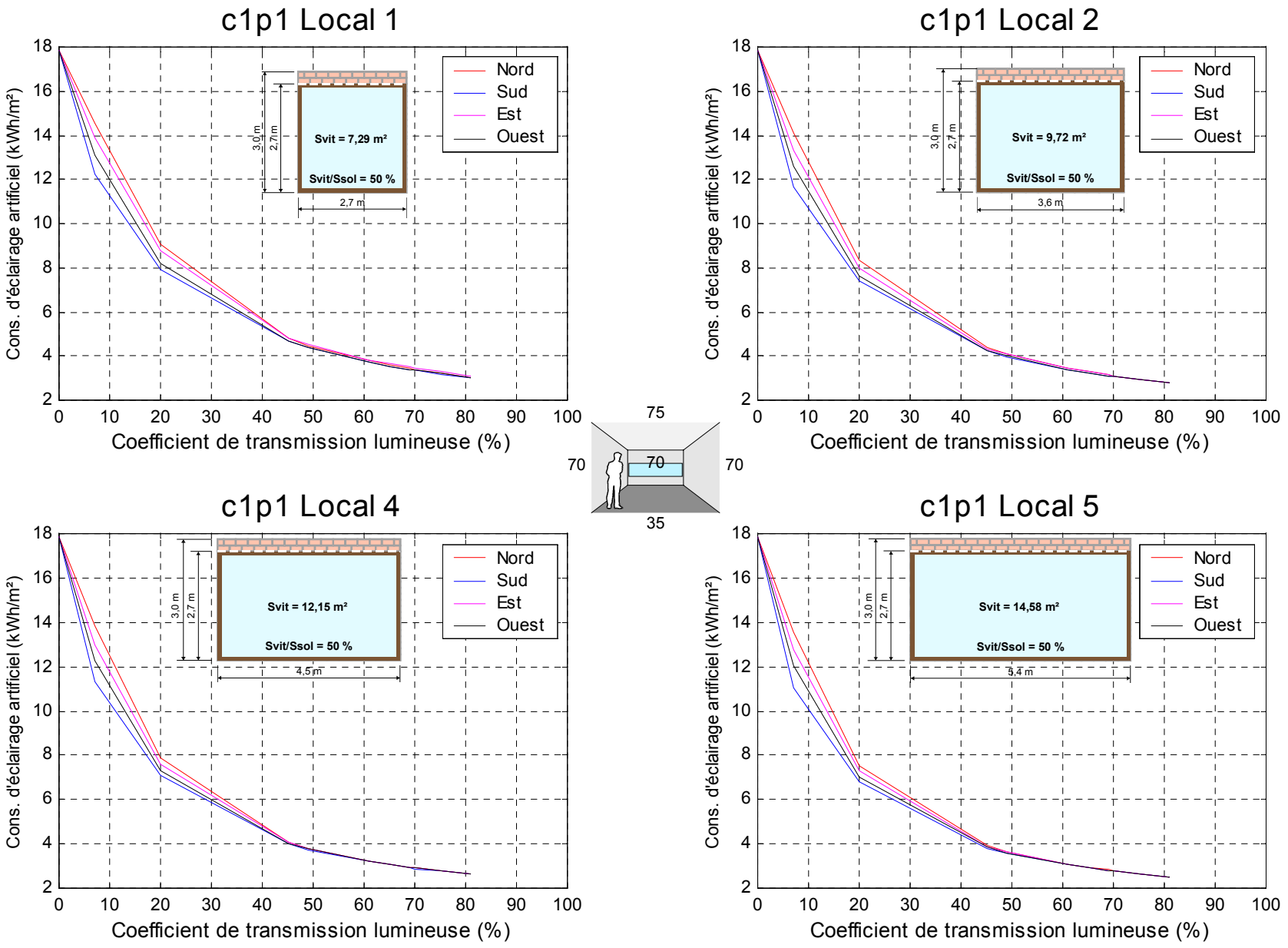
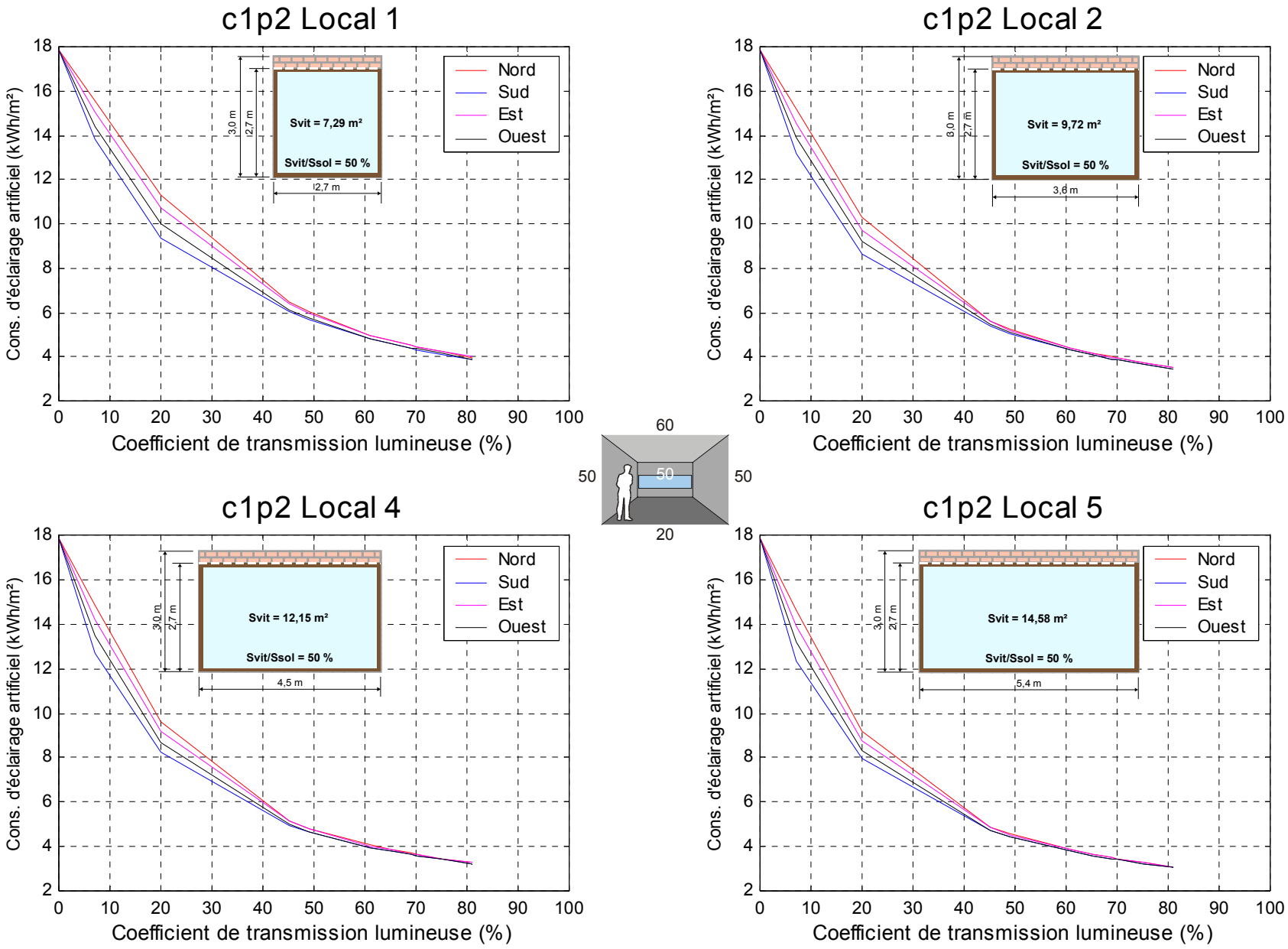
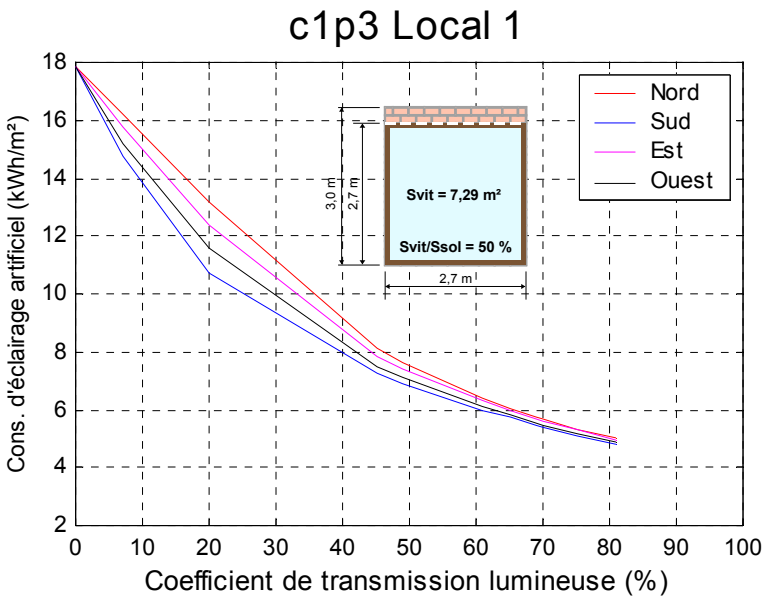


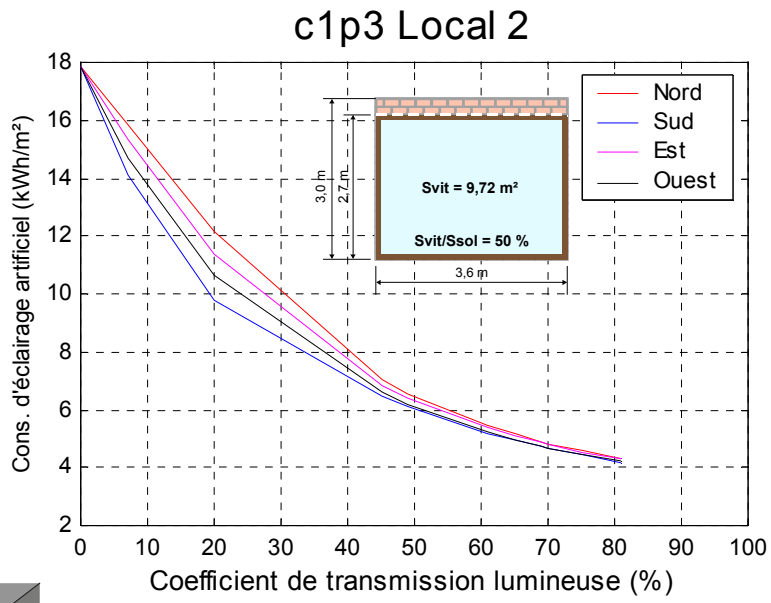
Figure 40

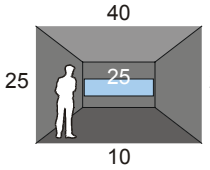
ANNEXE 2 : Résultats des calculs d'éclairage

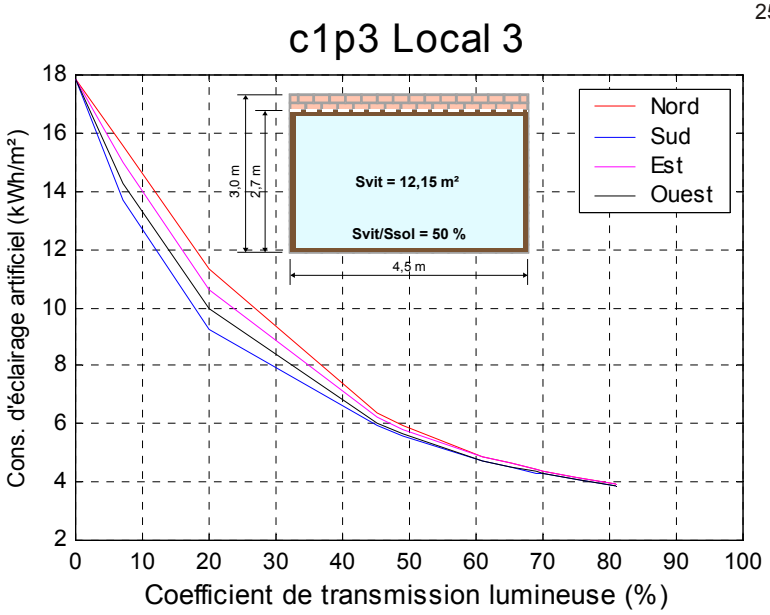

c1p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 7,29 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,0 m
2,7 m
2,7 m
c1p1 Local 2
Svit = 9,72 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,6 m
75
70
70
70
35
c1p1 Local 4
Svit = 12,15 m²
Svit/Ssol = 50 %
4,5 m
c1p1 Local 5
Svit = 14,58 m²
Svit/Ssol = 50 %
5,4 m

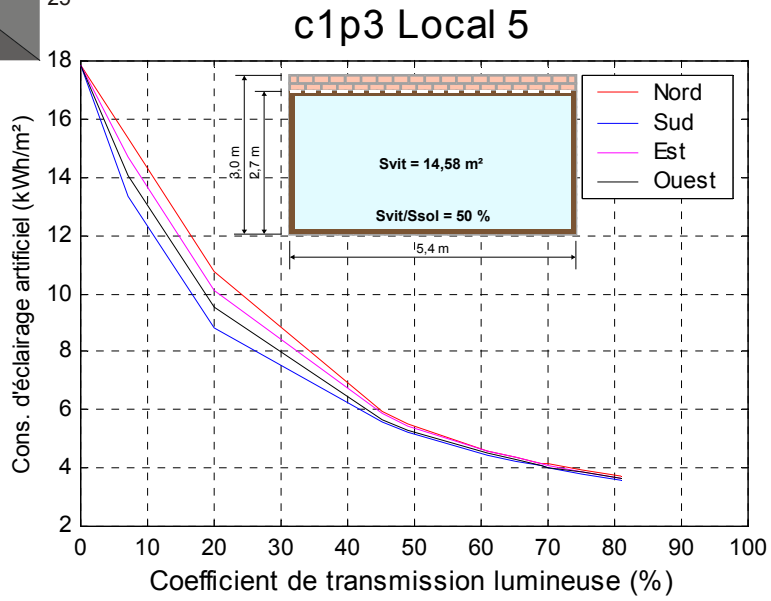

c1p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 7,29 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,0 m
2,7 m
2,7 m
c1p2 Local 2
Svit = 9,72 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,6 m
c1p2 Local 4
Svit = 12,15 m²
Svit/Ssol = 50 %
4,5 m
c1p2 Local 5
Svit = 14,58 m²
Svit/Ssol = 50 %
5,4 m
60
50
50
50
20

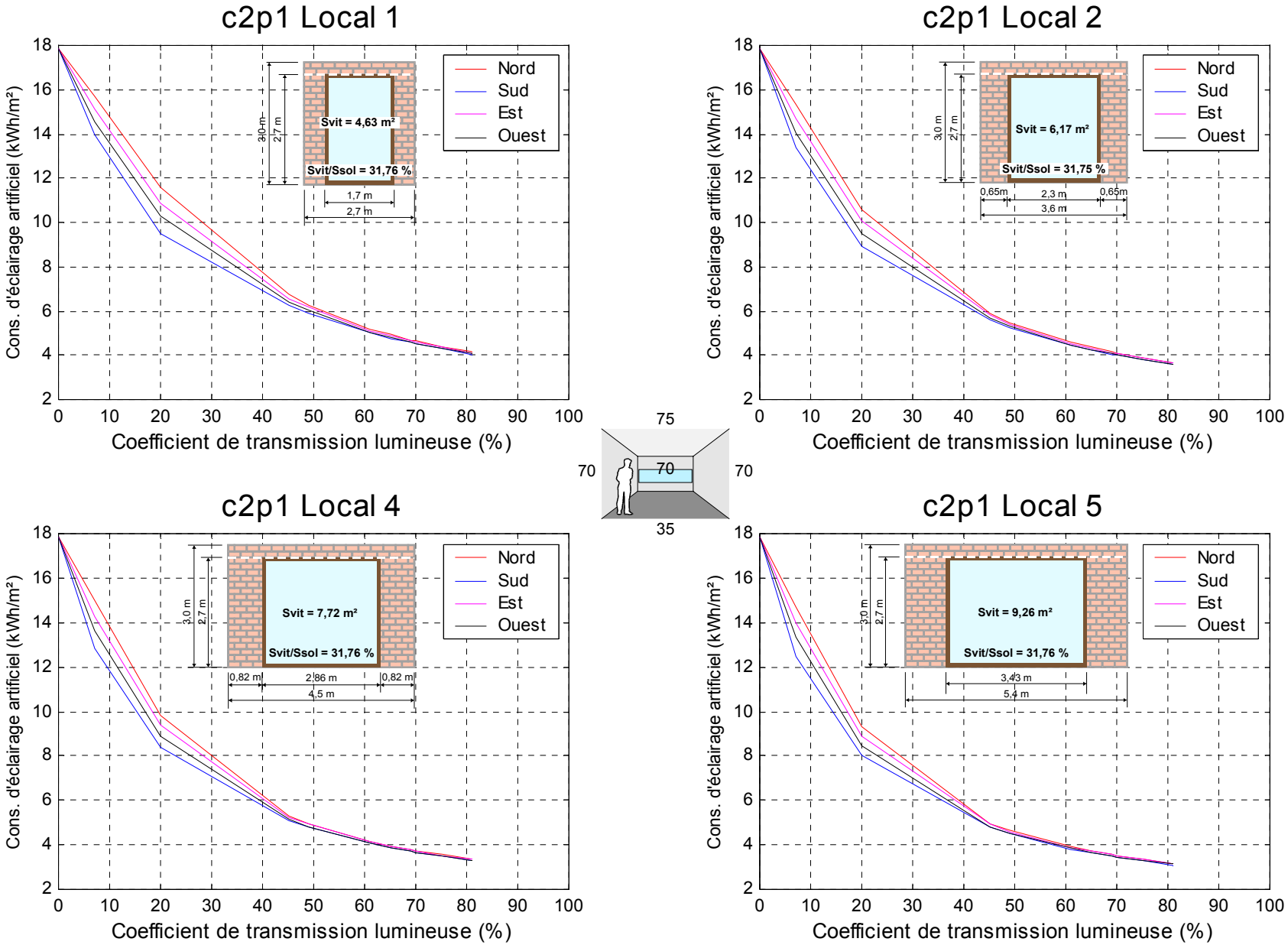

c1p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 7,29 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,0 m
2,7 m
2,7 m

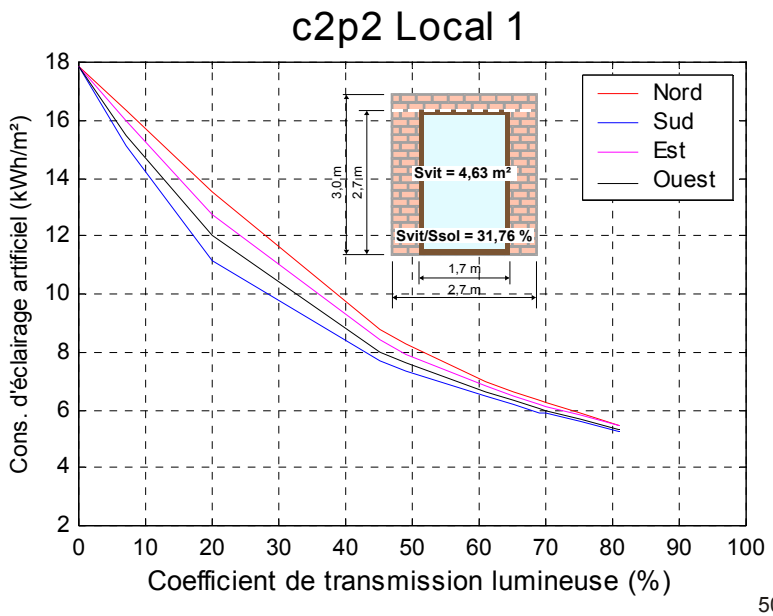

c1p3 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 9,72 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,0 m
2,7 m
3,6 m

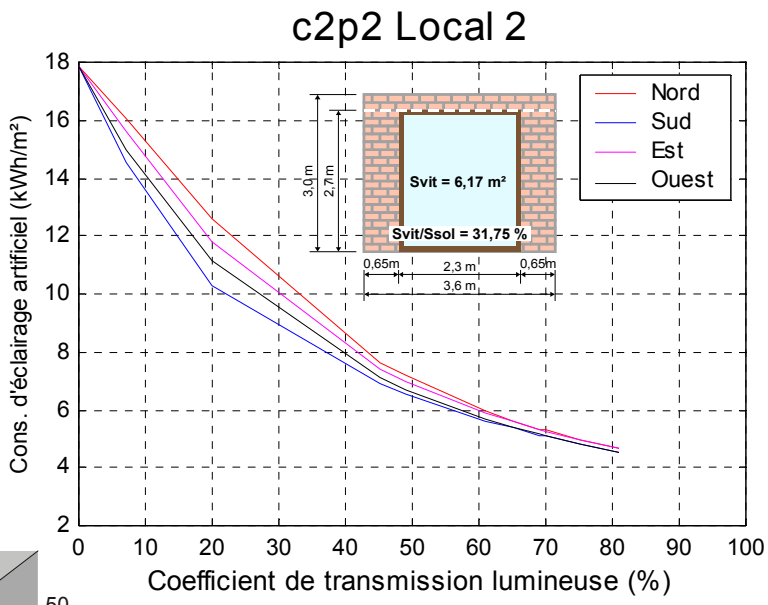

40
25
25
25
10

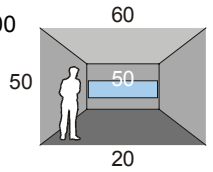

c1p3 Local 3
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 12,15 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,0 m
2,7 m
4,5 m

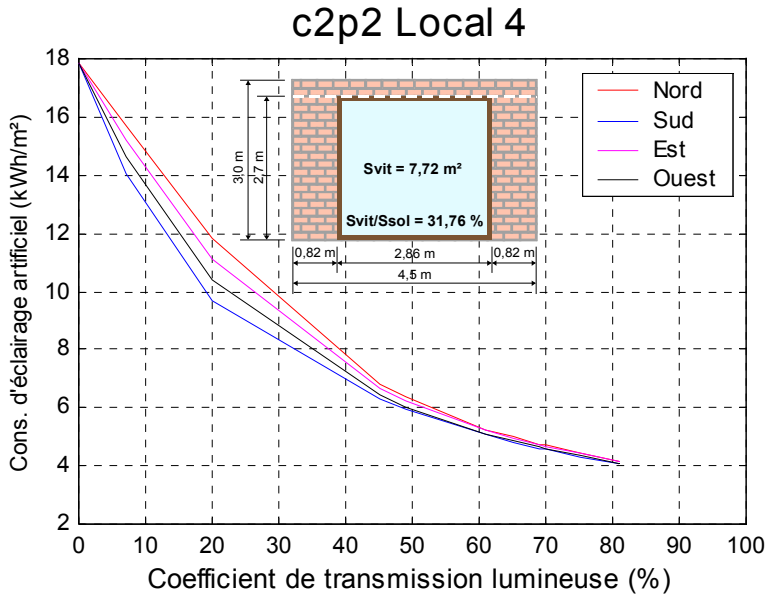

c1p3 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 14,58 m²
Svit/Ssol = 50 %
3,0 m
2,7 m
5,4 m

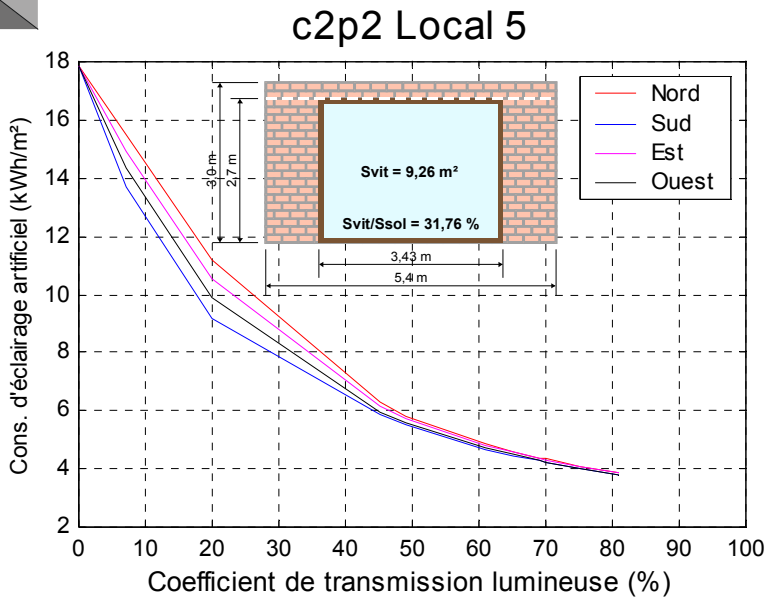

c2p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,7 m
2,7 m
c2p1 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
0,65m
2,3 m
0,65m
3,6 m
75
70
70
70
35
c2p1 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
0,82 m
2,86 m
0,82 m
4,5 m
c2p1 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,43 m
5,4 m

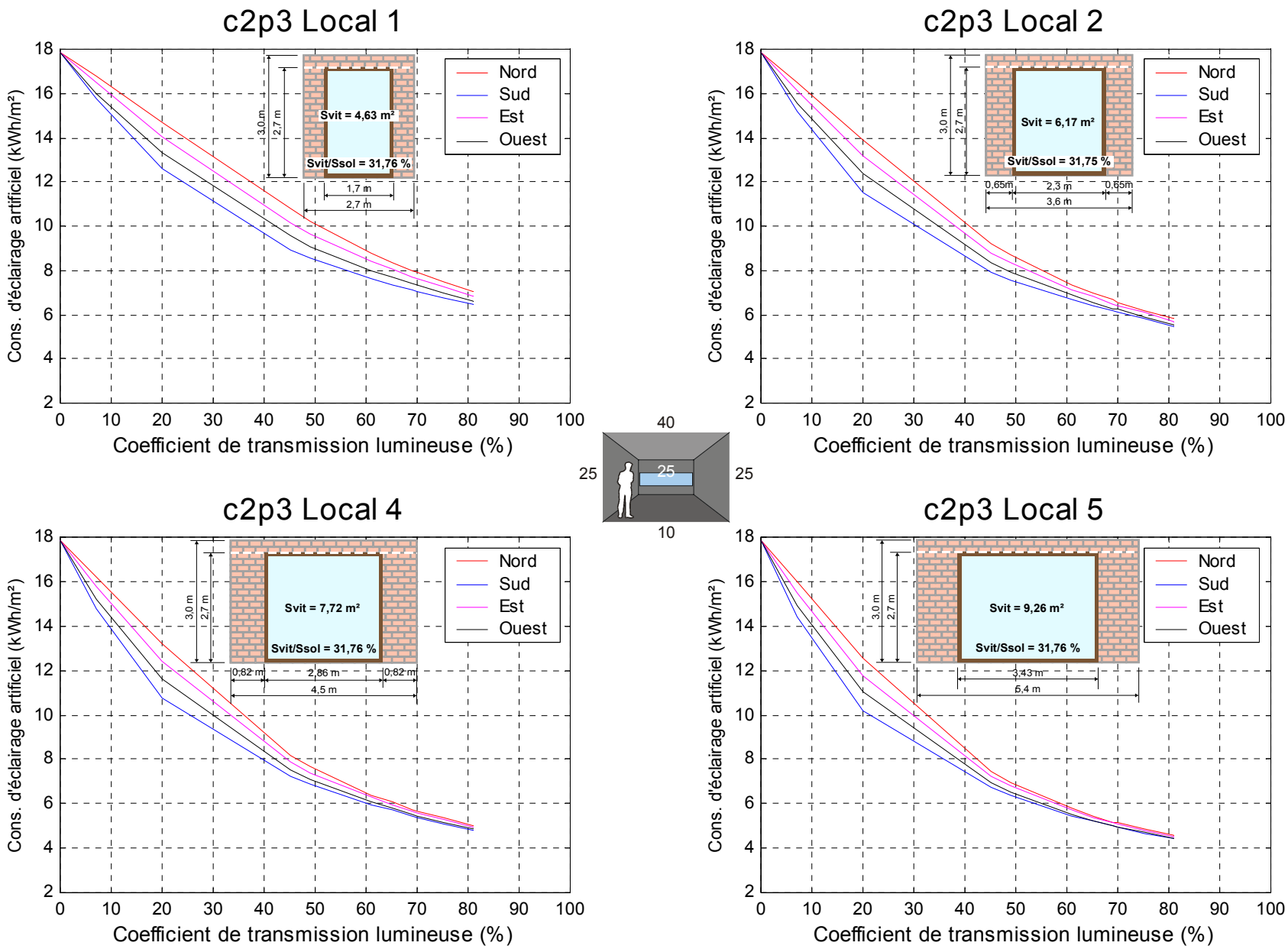

c2p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,7 m
2,7 m

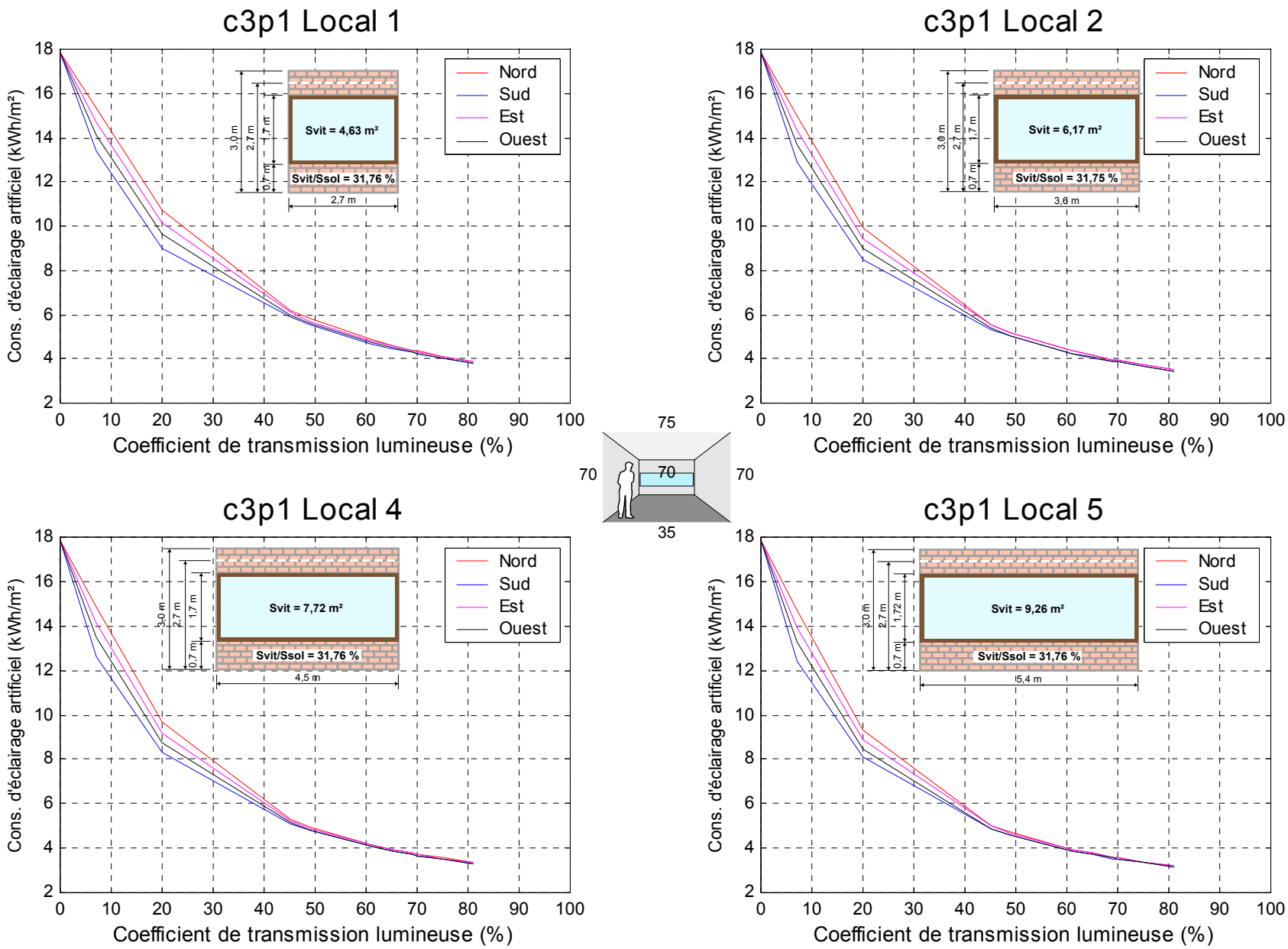

c2p2 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
3,0 m
2,7 m
0,65m
2,3 m
0,65m
3,6 m

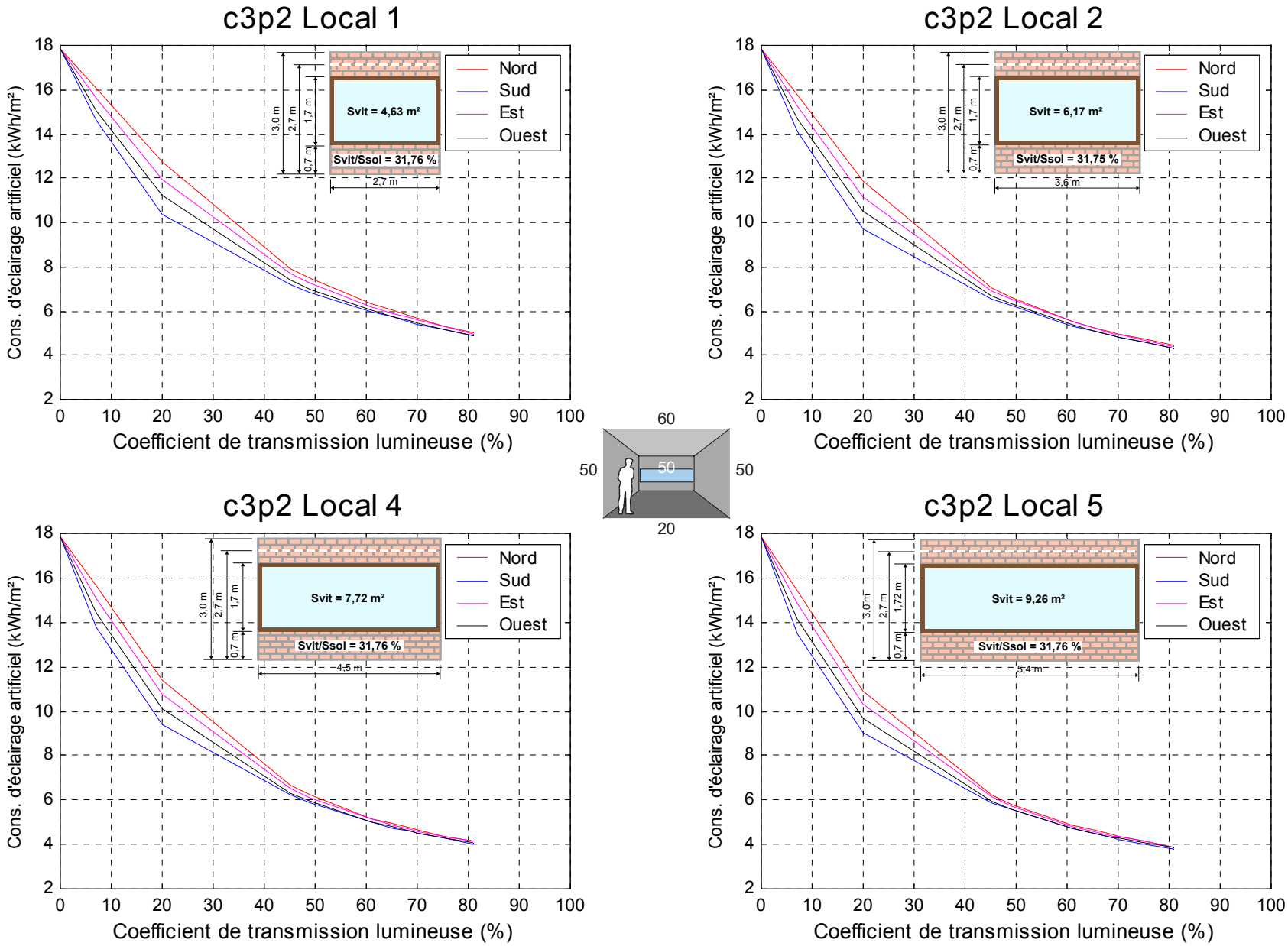

60
50
50
50
20

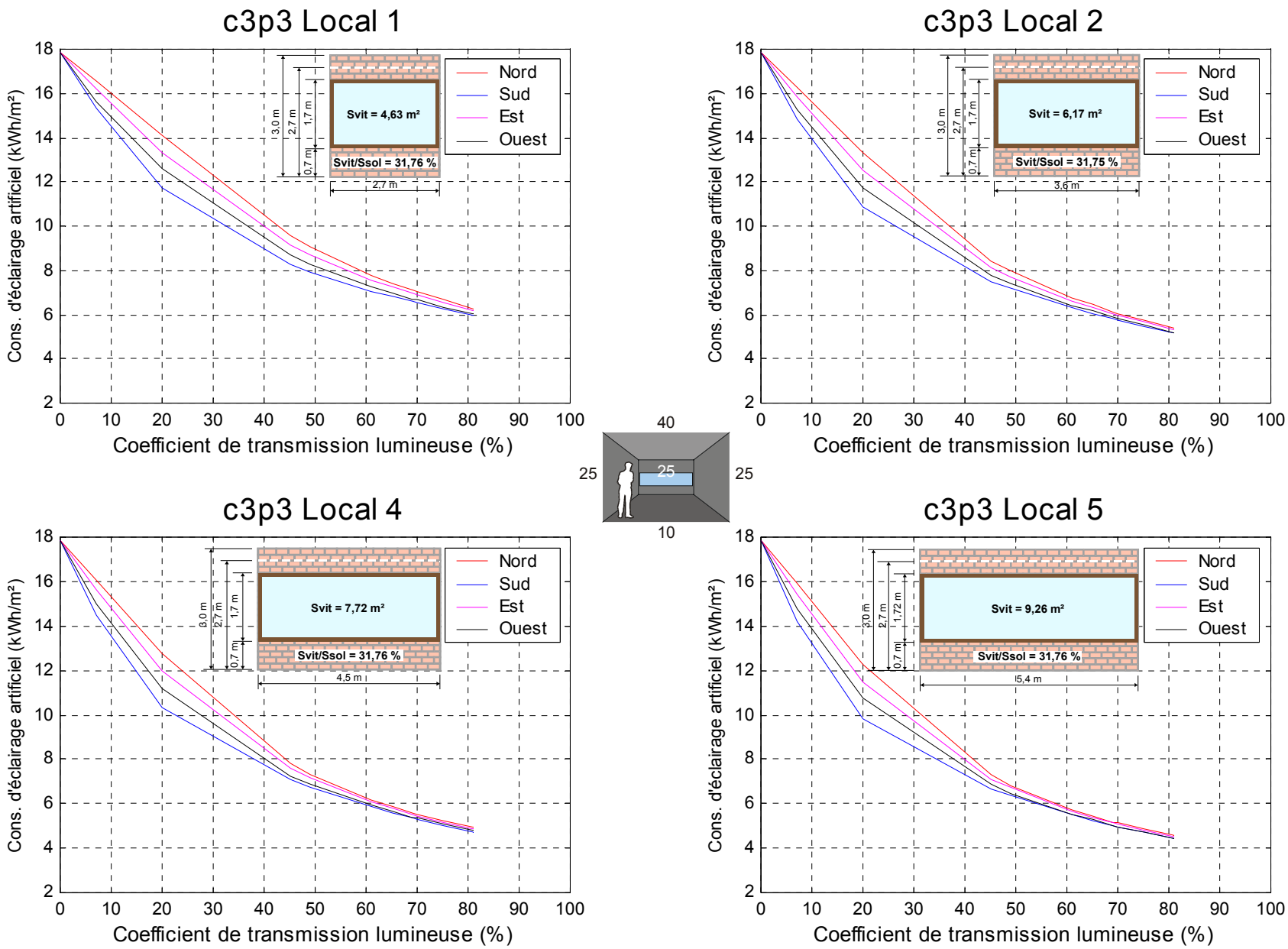

c2p2 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
0,82 m
2,86 m
0,82 m
4,5 m

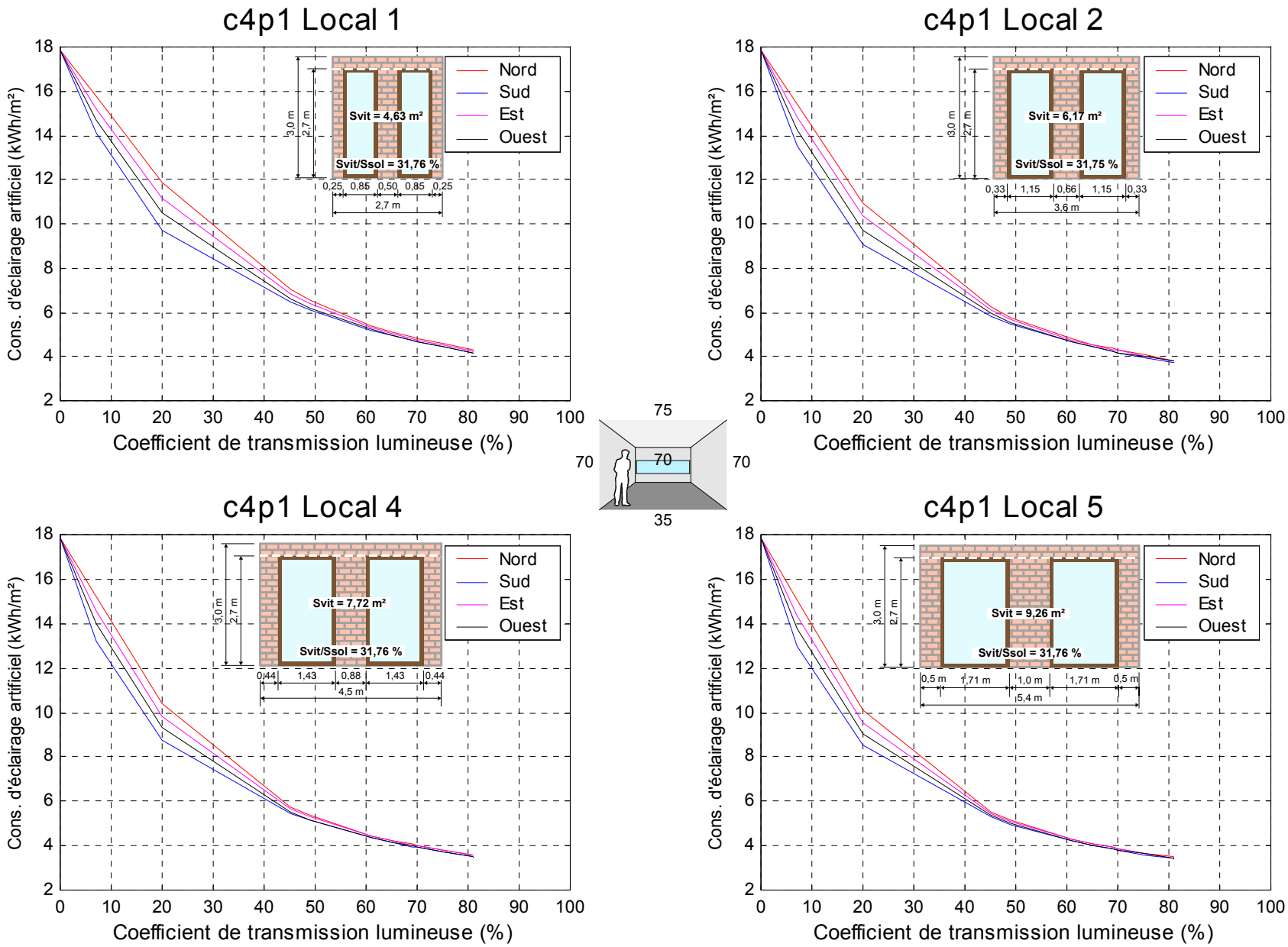

c2p2 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
3,43 m
5,4 m

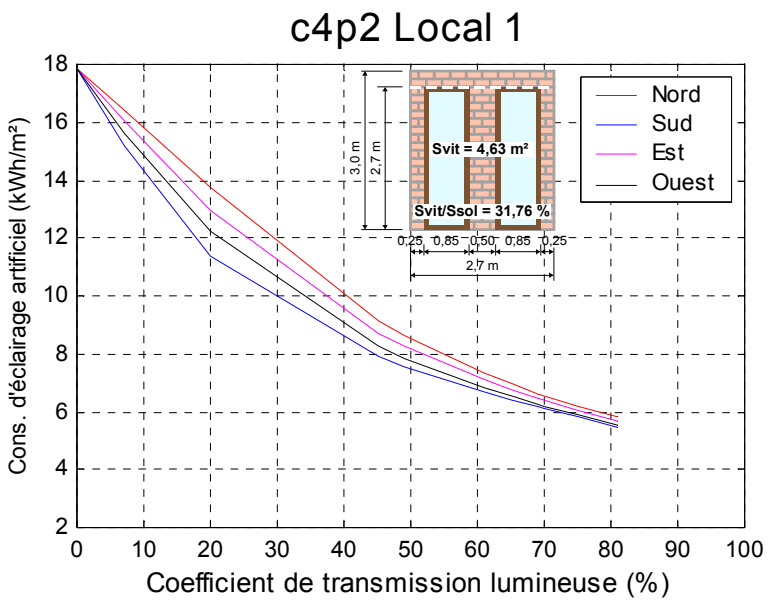

c2p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,7 m
2,7 m
c2p3 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
0,65m
2,3 m
0,65m
3,6 m
40
25
25
25
10
c2p3 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
0,82 m
2,86 m
0,82 m
4,5 m
c2p3 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,43 m
5,4 m

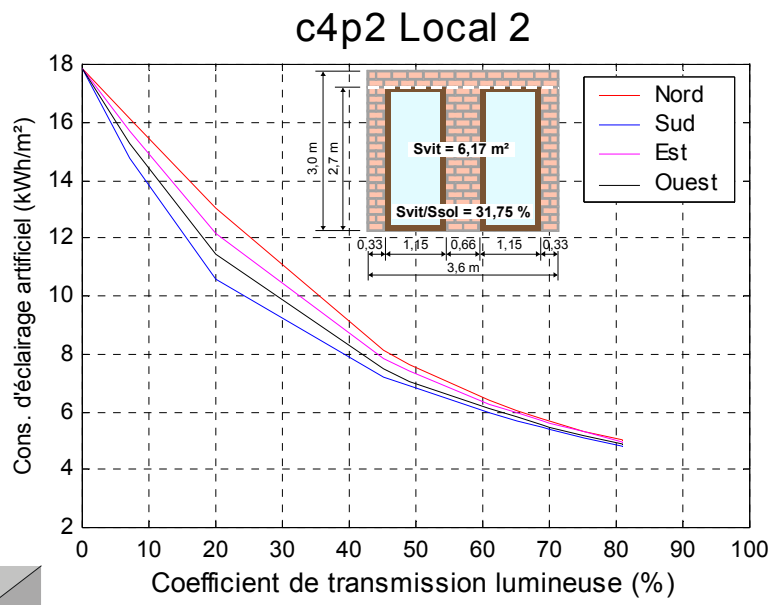

c3p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,7 m
0,7 m
2,7 m
c3p1 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
3,6 m
75
70
70
70
35
c3p1 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
4,5 m
c3p1 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
5,4 m
1,72 m

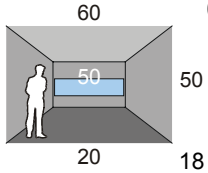

c3p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,7 m
0,7 m
2,7 m
c3p2 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
3,6 m
60
50
50
50
20
c3p2 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
4,5 m
c3p2 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
5,4 m
1,72 m

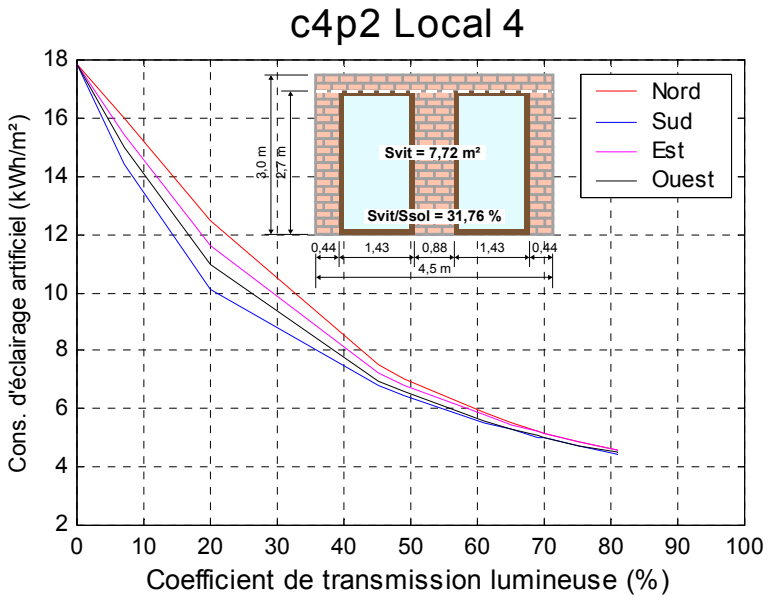

c3p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,7 m
0,7 m
2,7 m
c3p3 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
3,6 m
40
25
25
25
10
c3p3 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
4,5 m
c3p3 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
1,72 m
0,7 m
5,4 m

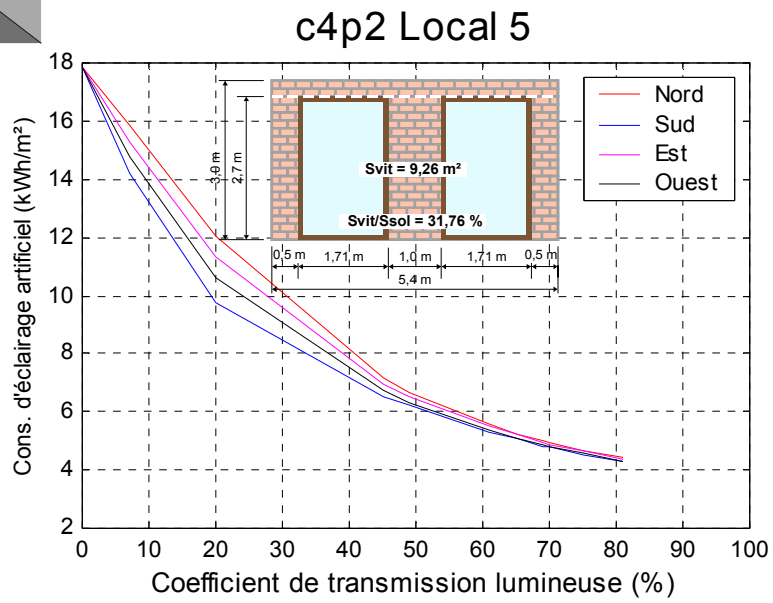

c4p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
0,25 0,85 0,50 0,85 0,25
2,7 m
c4p1 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
0,33 1,15 0,66 1,15 0,33
3,6 m
75
70
70
70
35
c4p1 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
0,44 1,43 0,88 1,43 0,44
4,5 m
c4p1 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
0,5 m 1,71 m 1,0 m 1,71 m 0,5 m
5,4 m

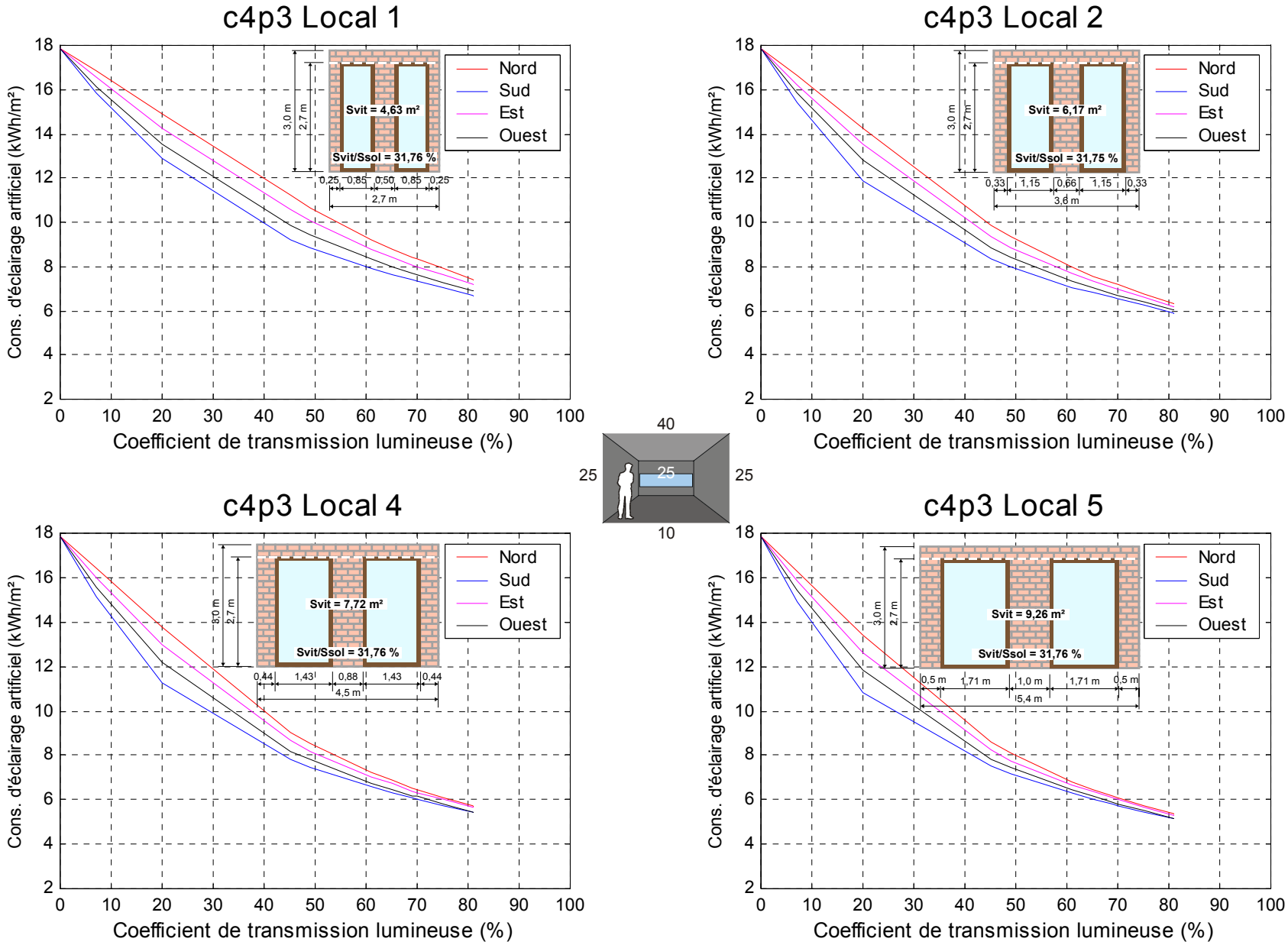

c4p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
0,25
0,85
0,50
0,85
0,25
2,7 m

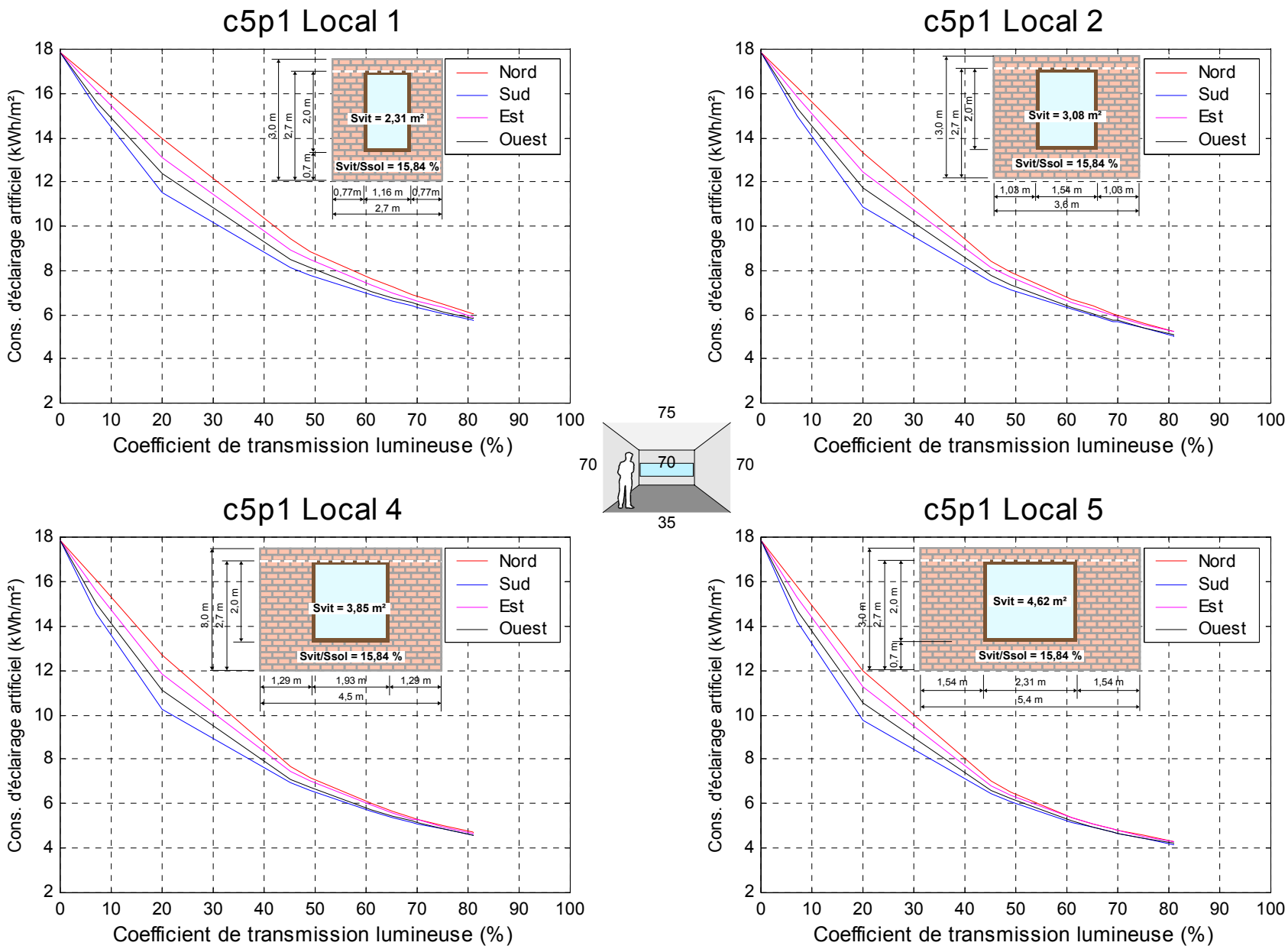

c4p2 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
3,0 m
2,7 m
0,33
1,15
0,66
1,15
0,33
3,6 m

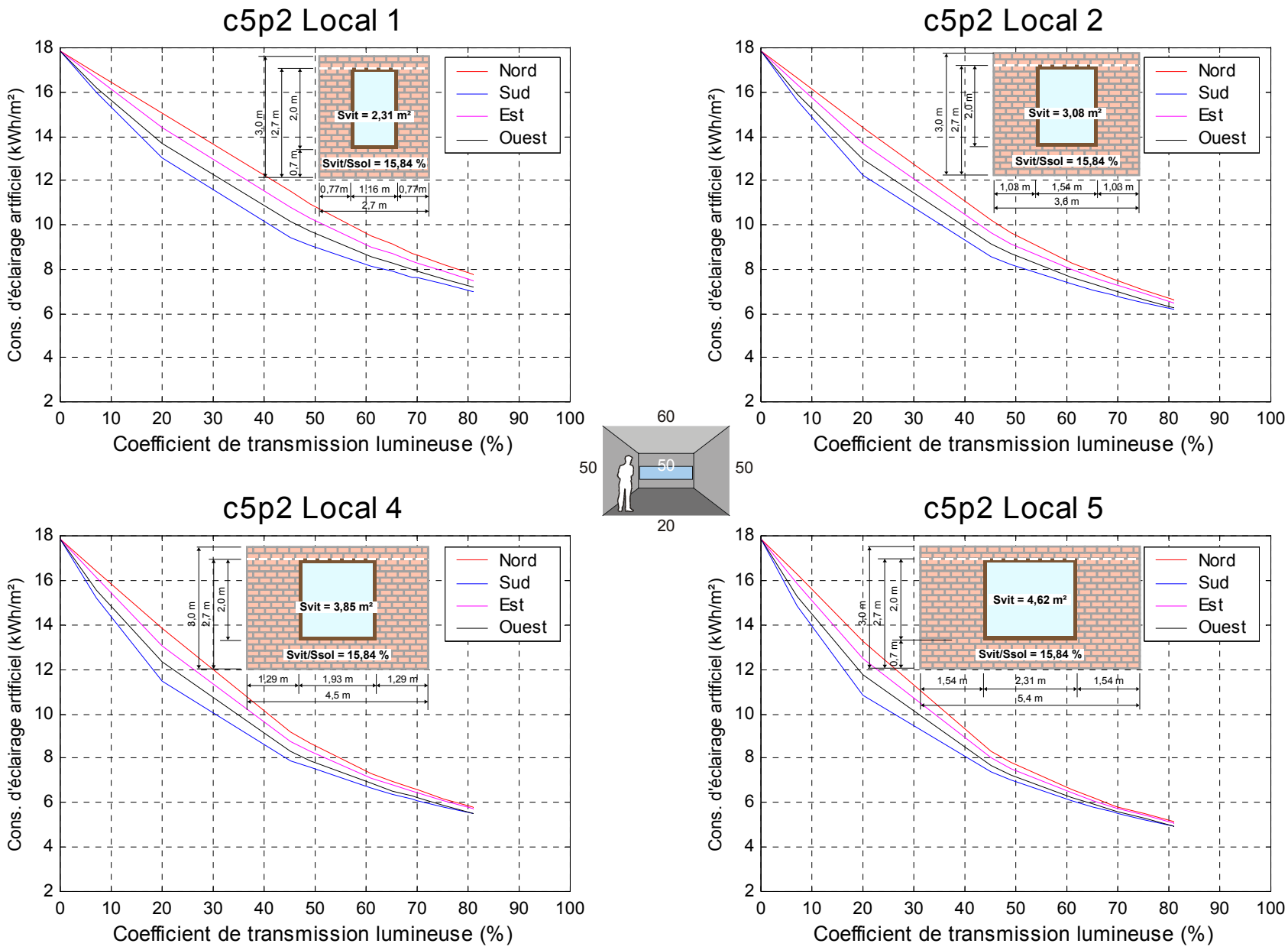

60
50
50
50
20

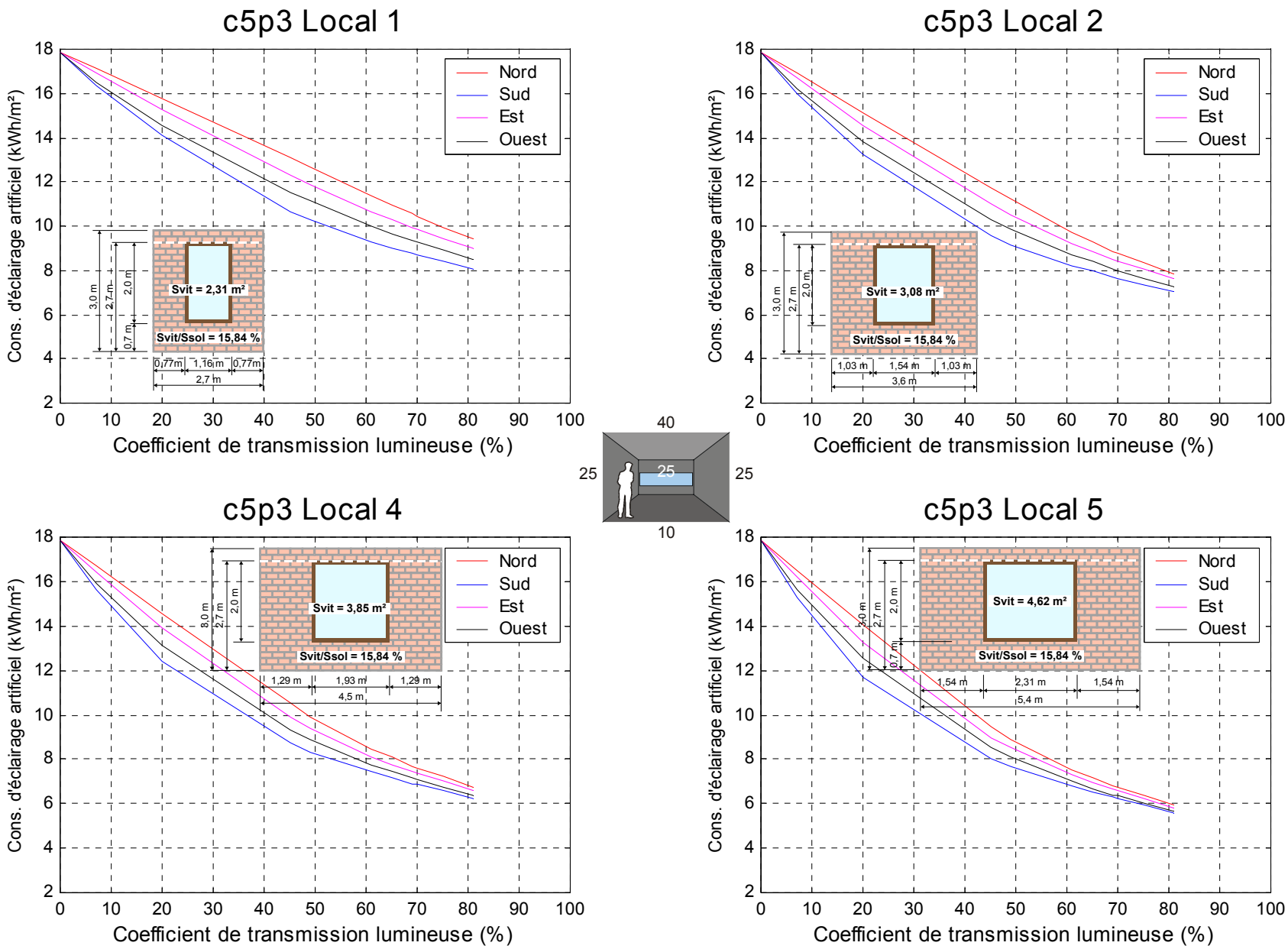

c4p2 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
0,44
1,43
0,88
1,43
0,44
4,5 m

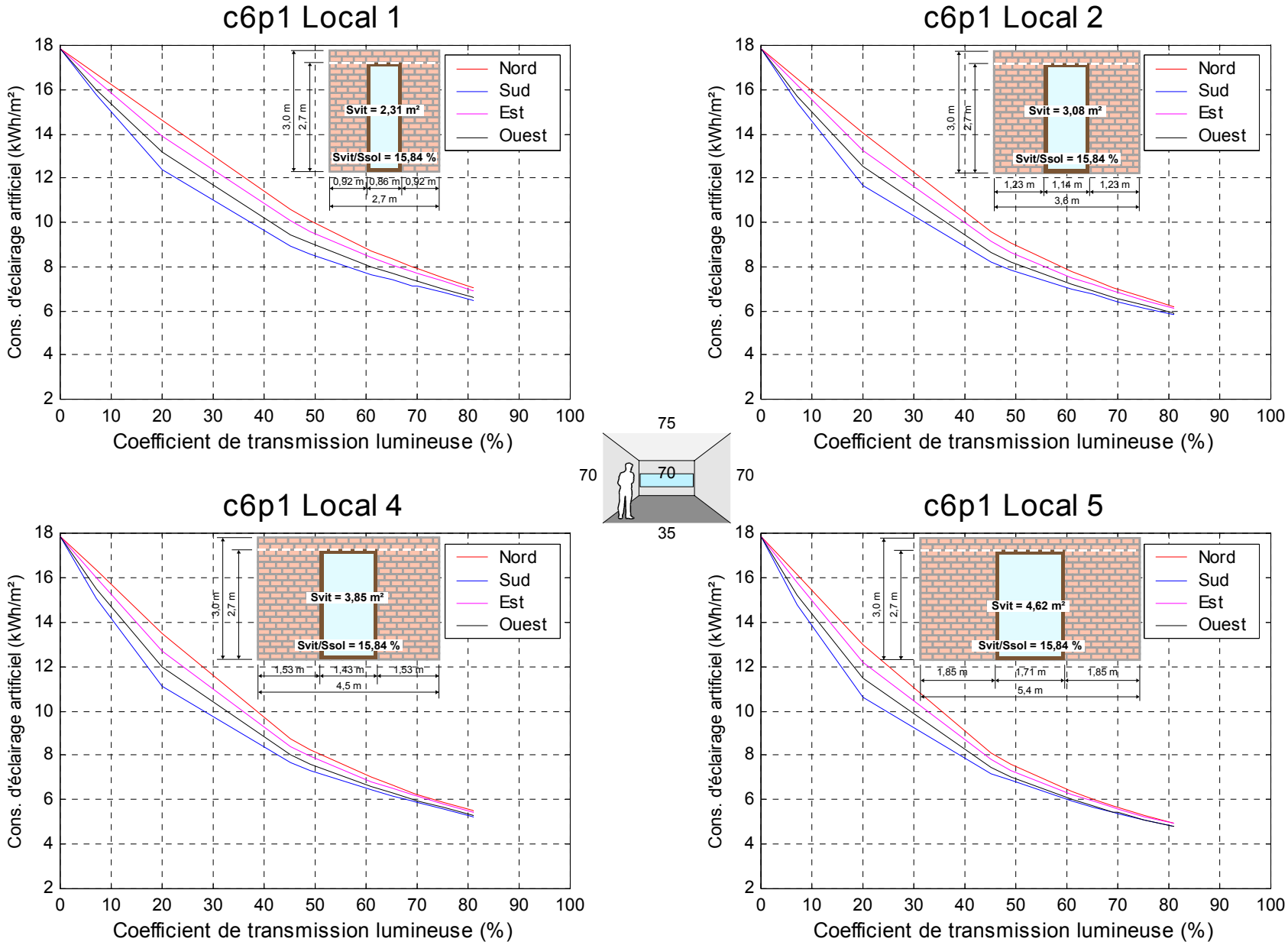

c4p2 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
0,5 m
1,71 m
1,0 m
1,71 m
0,5 m
5,4 m

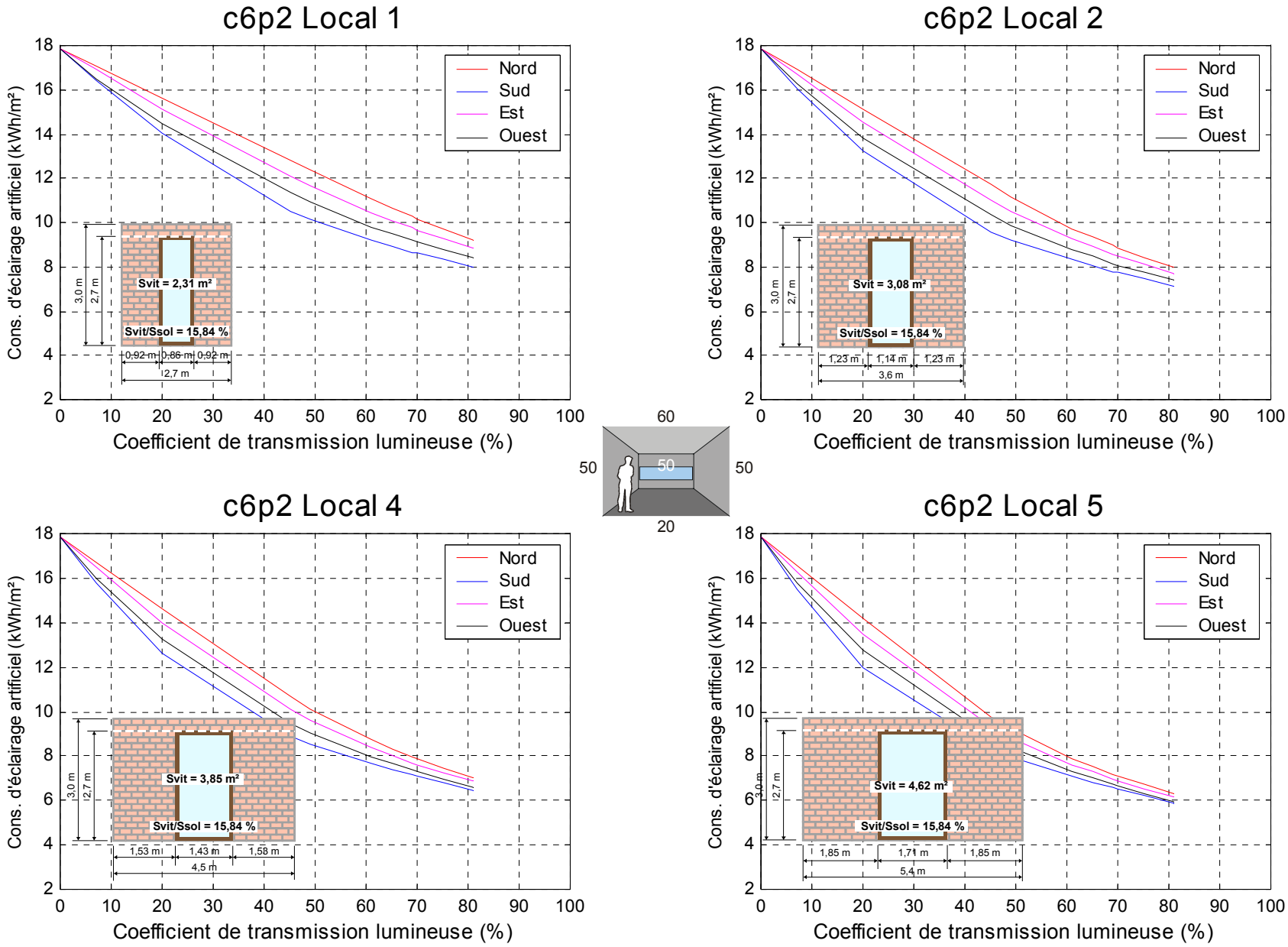

c4p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,63 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
3,0 m
2,7 m
0,25 0,85 0,50 0,85 0,25
2,7 m
c4p3 Local 2
Svit = 6,17 m²
Svit/Ssol = 31,75 %
0,33 1,15 0,66 1,15 0,33
3,6 m
40
25
25
25
10
c4p3 Local 4
Svit = 7,72 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
0,44 1,43 0,88 1,43 0,44
4,5 m
c4p3 Local 5
Svit = 9,26 m²
Svit/Ssol = 31,76 %
0,5 m 1,71 m 1,0 m 1,71 m 0,5 m
5,4 m

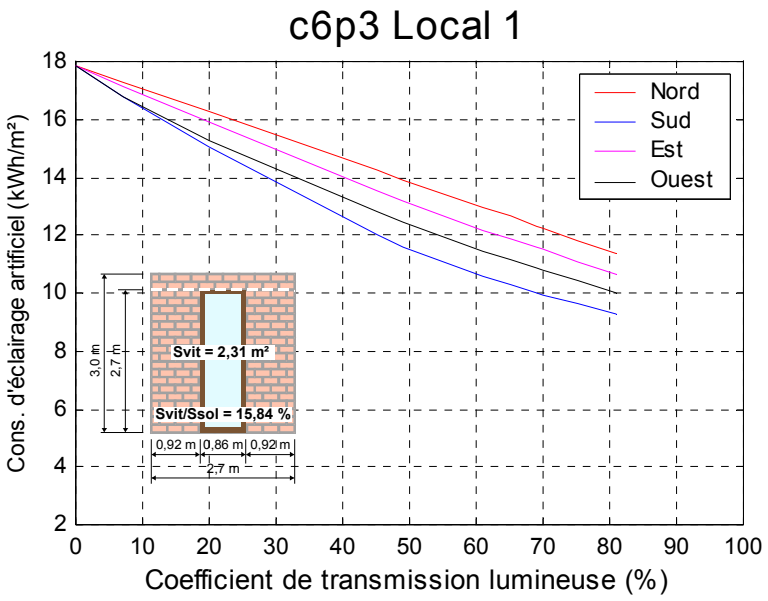

c5p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
2,0 m
0,7 m
0,77m
1,16 m
0,77m
2,7 m
c5p1 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,08 m
1,54 m
1,08 m
3,6 m
75
70
70
70
35
c5p1 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,29 m
1,93 m
1,29 m
4,5 m
c5p1 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,54 m
2,31 m
1,54 m
5,4 m

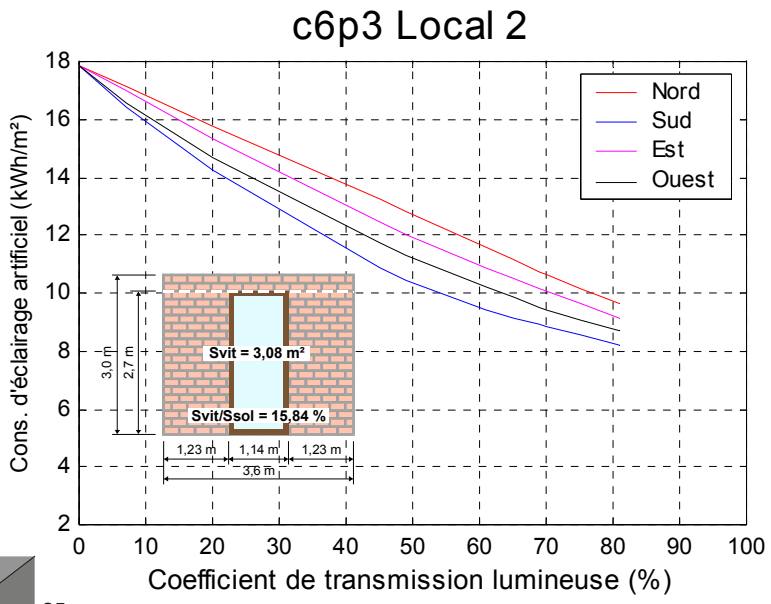

c5p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
2,0 m
0,7 m
0,77m
1,16 m
0,77m
2,7 m
c5p2 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,08 m
1,54 m
1,08 m
3,6 m
60
50
50
50
20
c5p2 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
8,0 m
1,29 m
1,93 m
1,29 m
4,5 m
c5p2 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,54 m
2,31 m
1,54 m
5,4 m

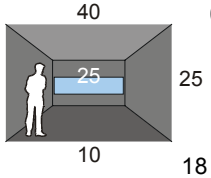

c5p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
2,0 m
0,7 m
0,77m
1,16 m
0,77m
2,7 m
c5p3 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,03 m
1,54 m
1,03 m
3,6 m
40
25
25
25
10
c5p3 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
8,0 m
1,29 m
1,93 m
1,29 m
4,5 m
c5p3 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,54 m
2,31 m
1,54 m
5,4 m

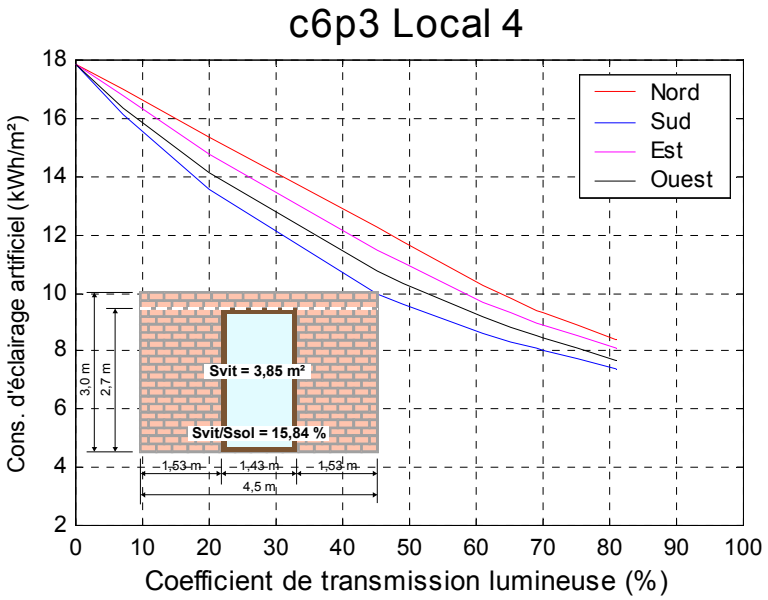

c6p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,92 m
0,86 m
0,92 m
2,7 m
c6p1 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,23 m
1,14 m
1,23 m
3,6 m
75
70
70
70
35
c6p1 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,53 m
1,43 m
1,53 m
4,5 m
c6p1 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,85 m
1,71 m
1,85 m
5,4 m

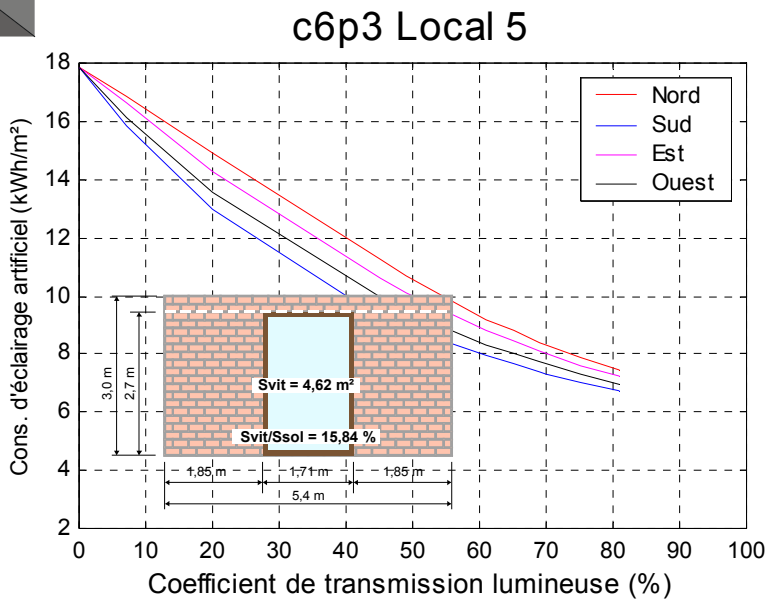

c6p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,92 m
0,86 m
0,92 m
2,7 m
c6p2 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,23 m
1,14 m
1,23 m
3,6 m
60
50
50
50
20
c6p2 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,53 m
1,43 m
1,58 m
4,5 m
c6p2 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,85 m
1,71 m
1,85 m
5,4 m

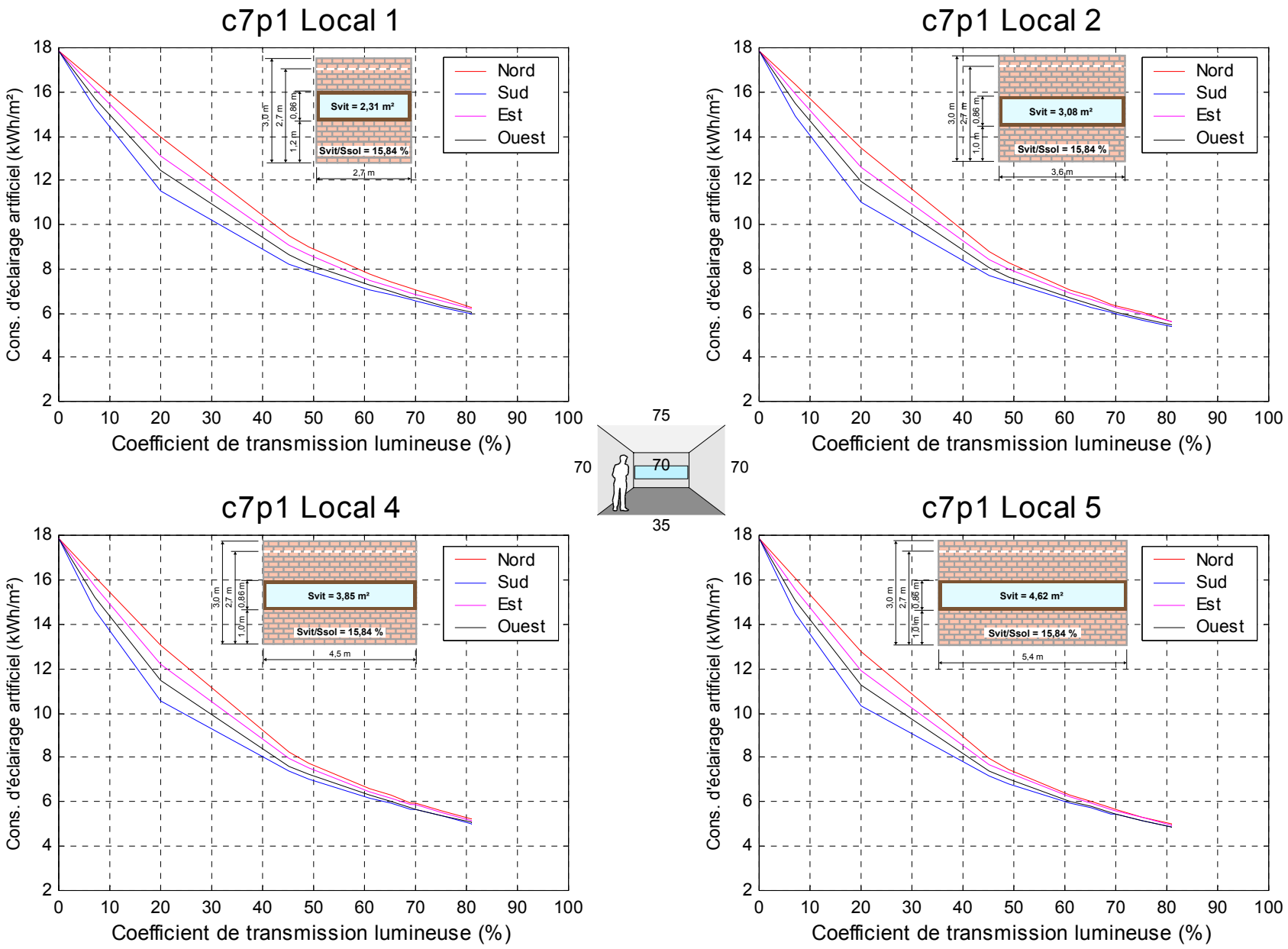

c6p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,92 m
0,86 m
0,92 m
2,7 m

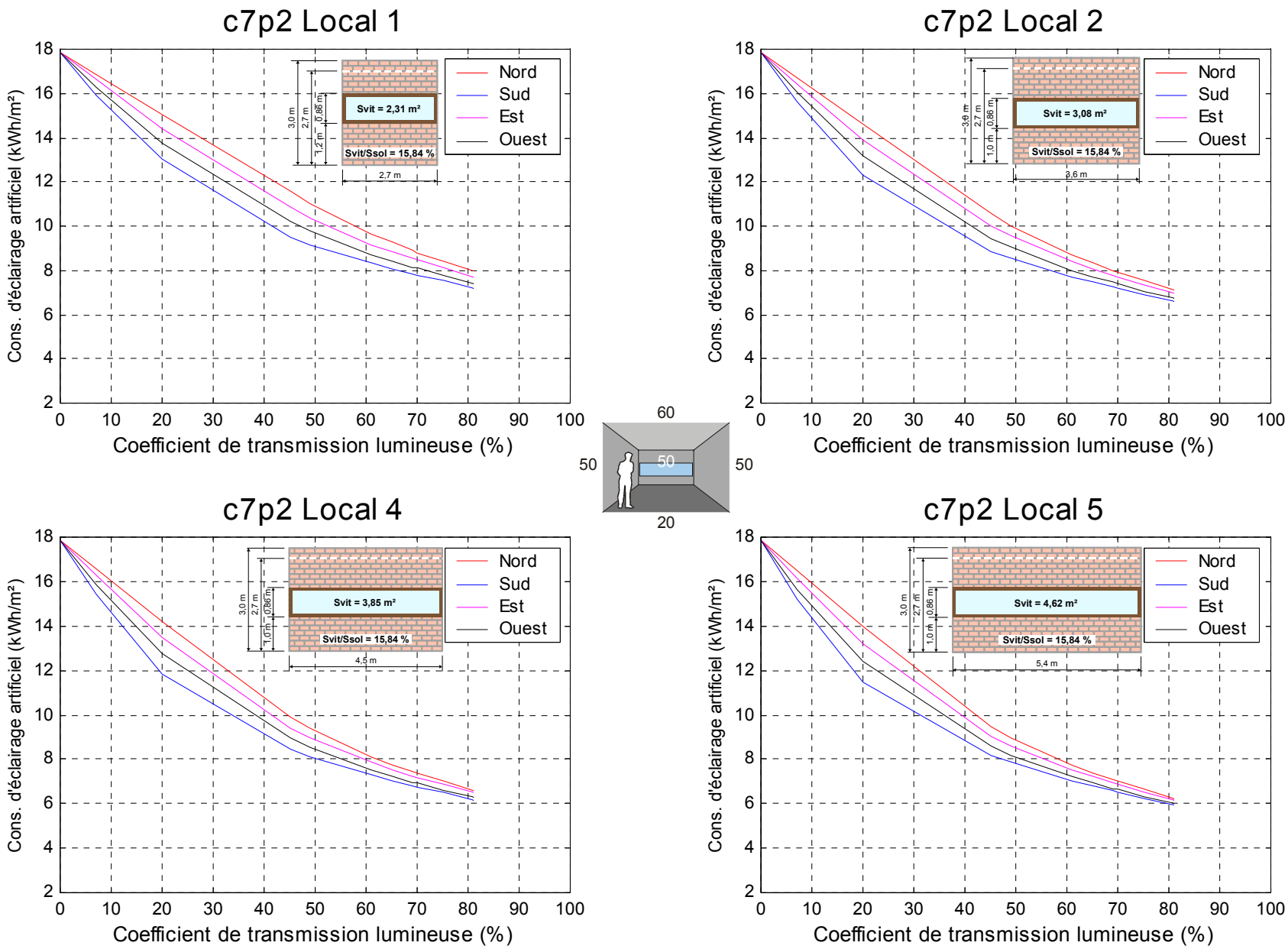

c6p3 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
1,23 m
1,14 m
1,23 m
3,6 m

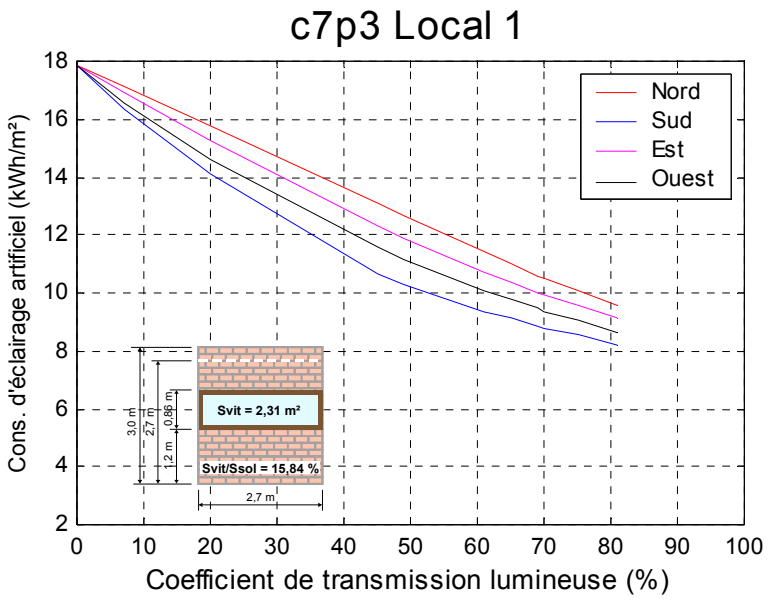

40
25
25
25
10

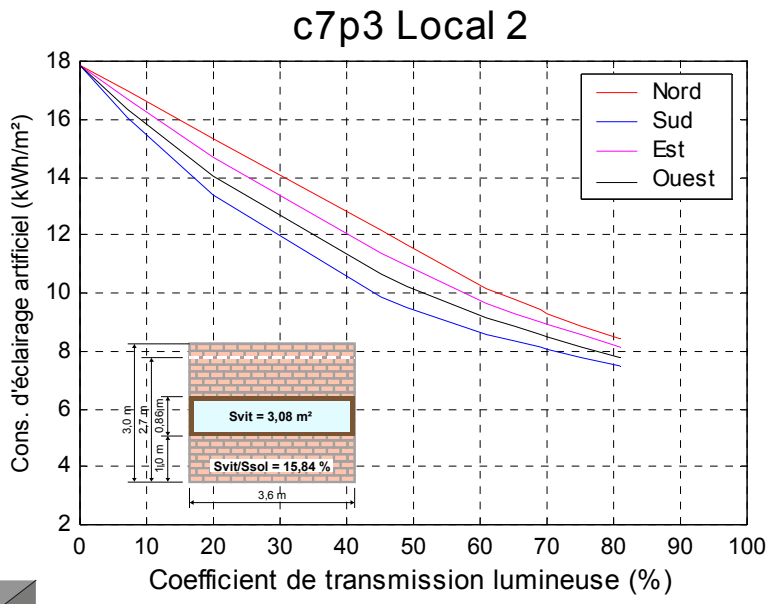

c6p3 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
1,53 m
1,43 m
1,53 m
4,5 m

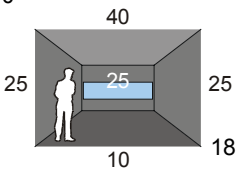

c6p3 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
1,85 m
1,71 m
1,85 m
5,4 m

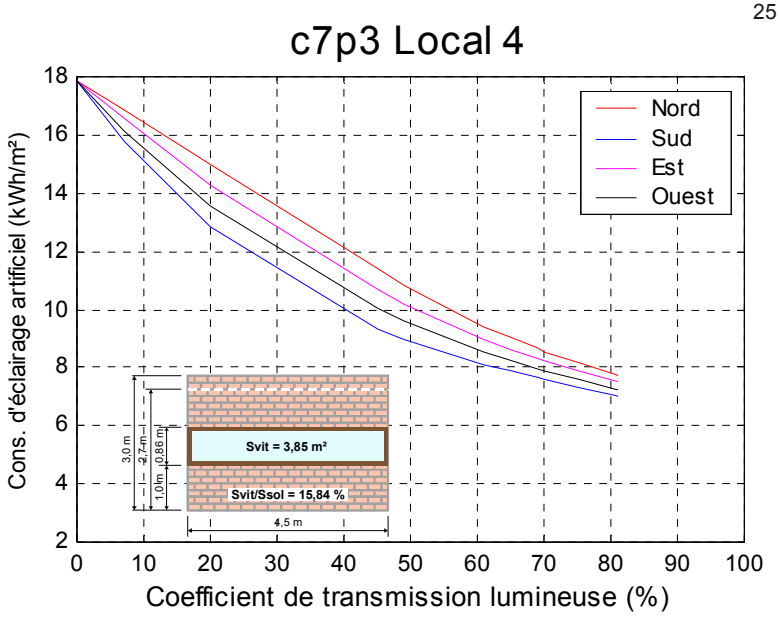

c7p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,2 m
2,7 m
c7p1 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,6 m
1,0 m
c7p1 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
4,5 m
1,0 m
c7p1 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
5,4 m
1,0 m
75
70
70
70
35

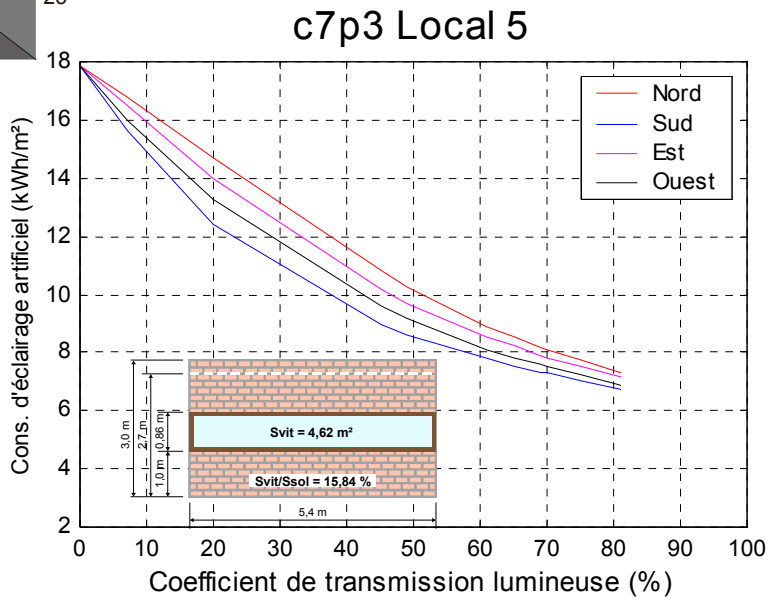

c7p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
c7p2 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
c7p2 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
c7p2 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
60
50
50
50
20

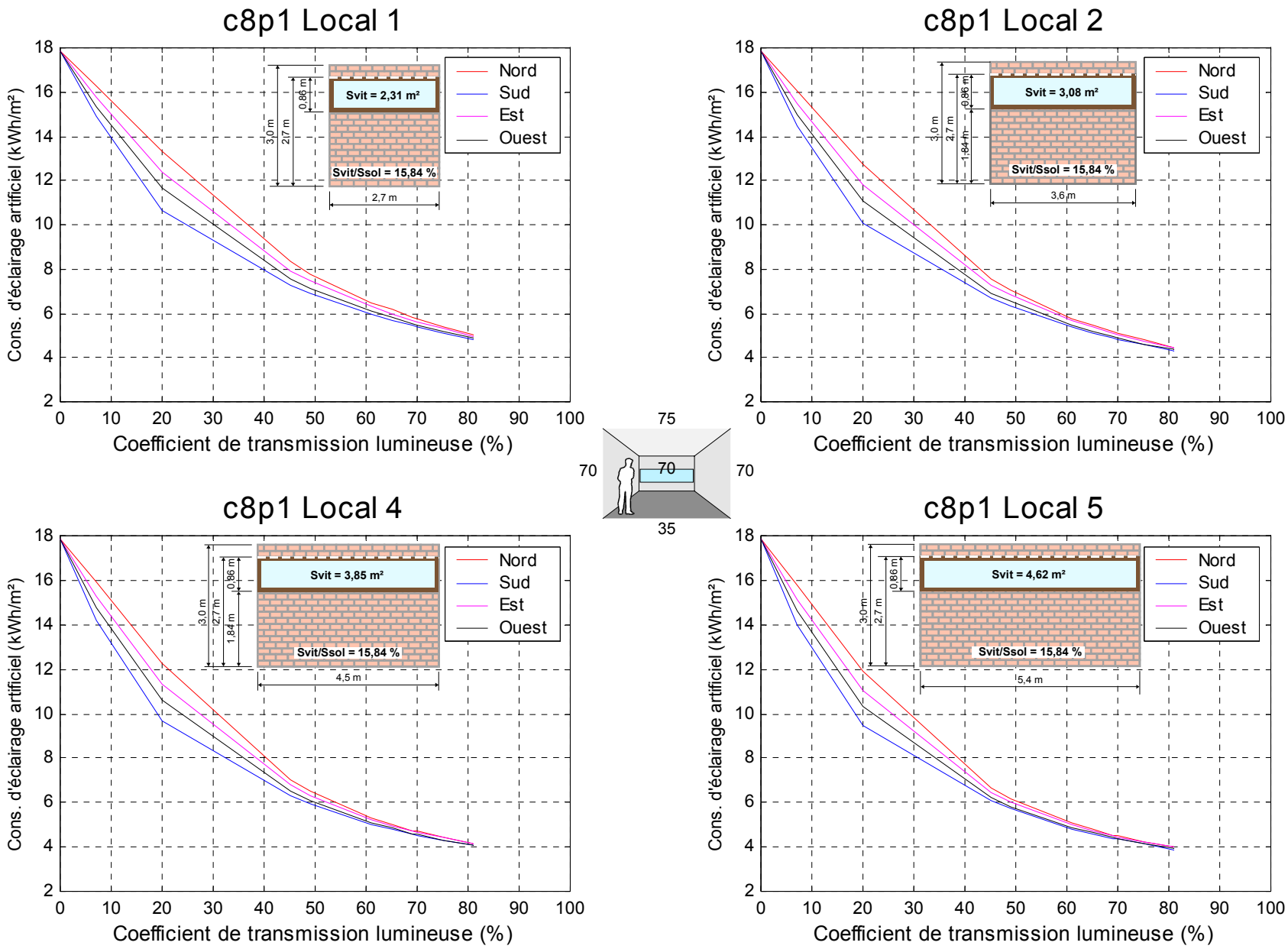

c7p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,2 m
2,7 m

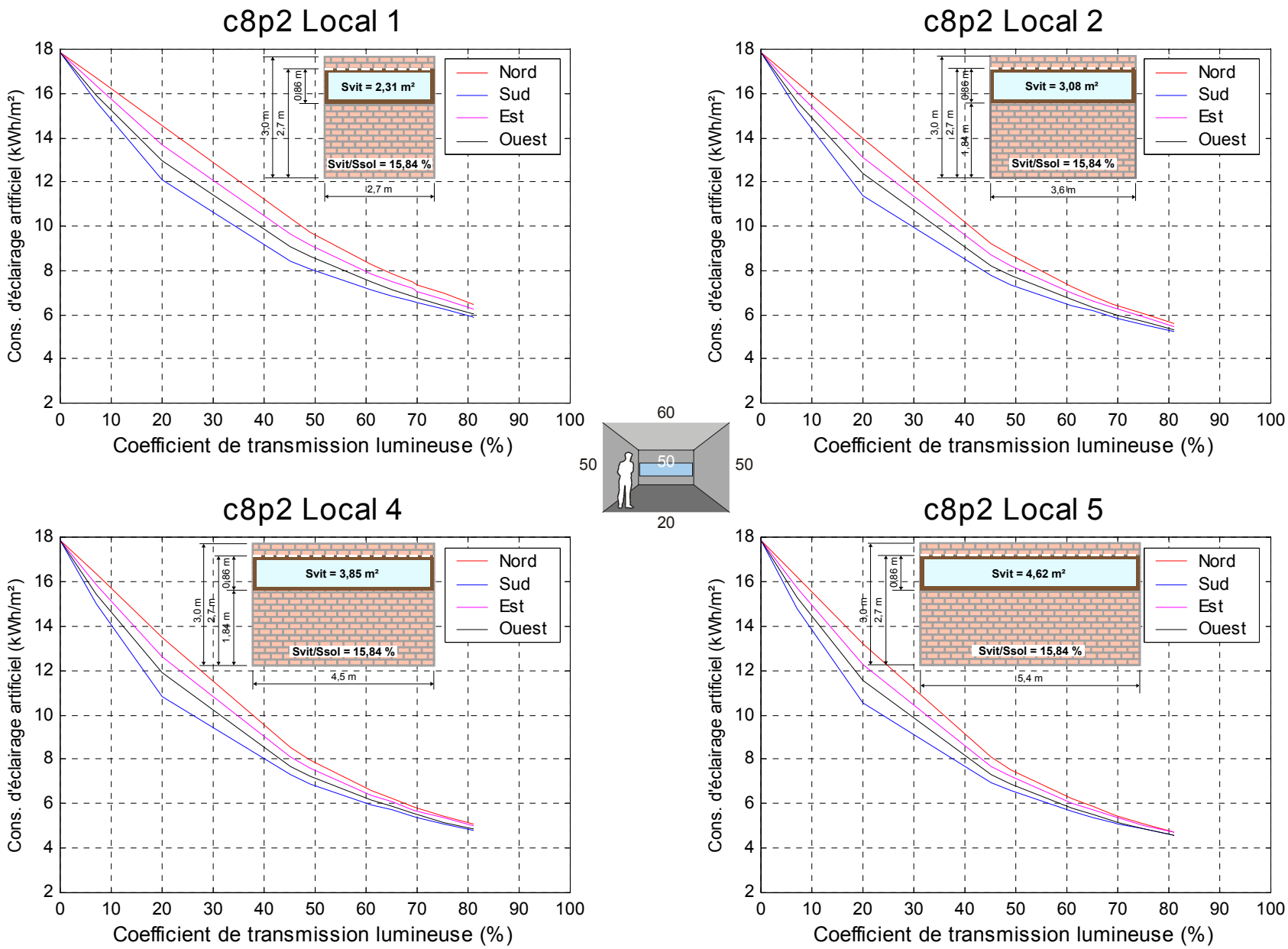

c7p3 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,0 m
3,6 m

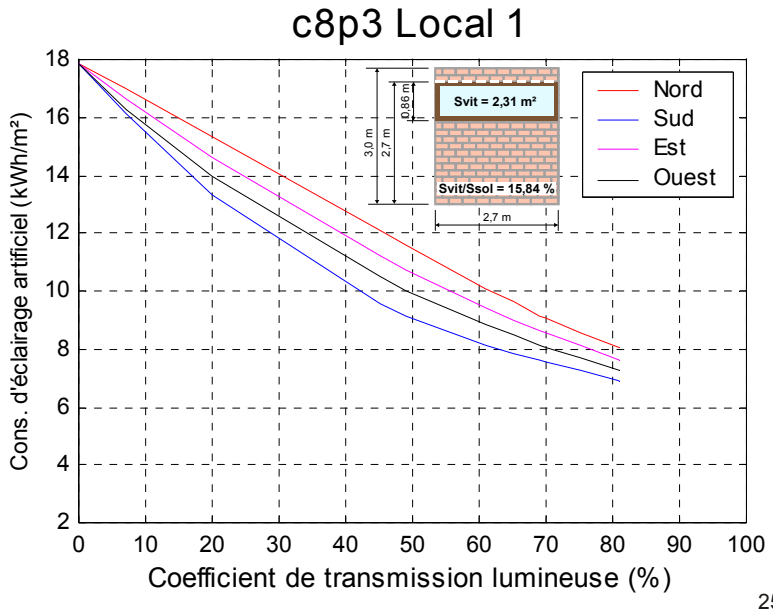

40
25
25
25
10

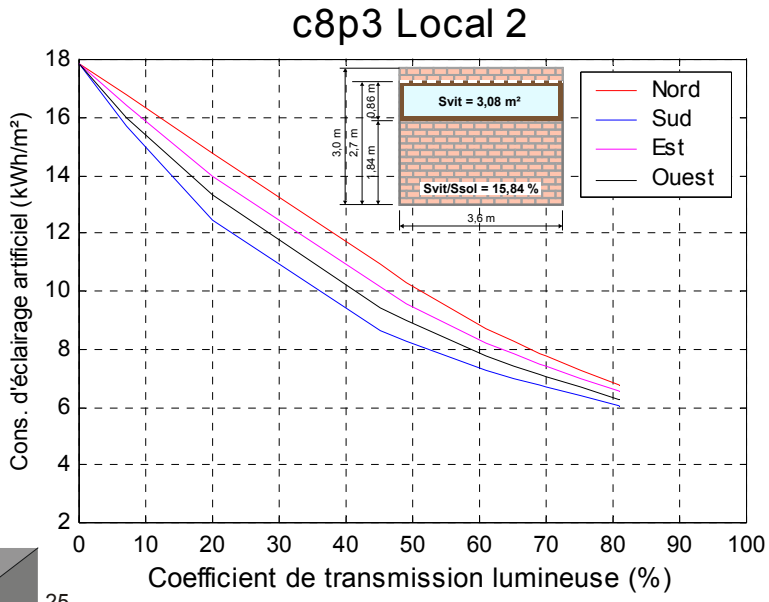

c7p3 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,0m
4,5 m

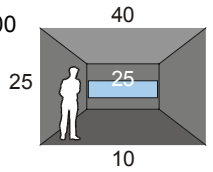

c7p3 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,0 m
5,4 m

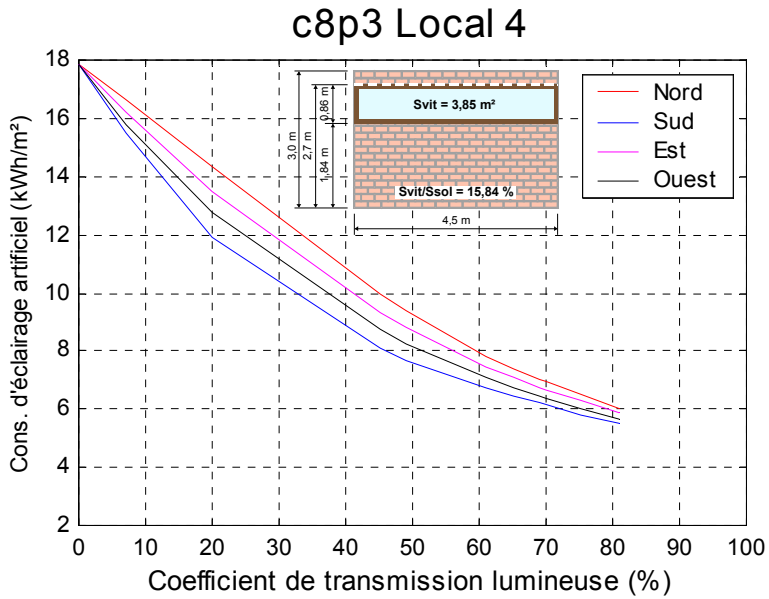

c8p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
2,7 m
c8p1 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
1,84 m
3,6 m
c8p1 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
4,5 m
c8p1 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
5,4 m
75
70
70
70
35

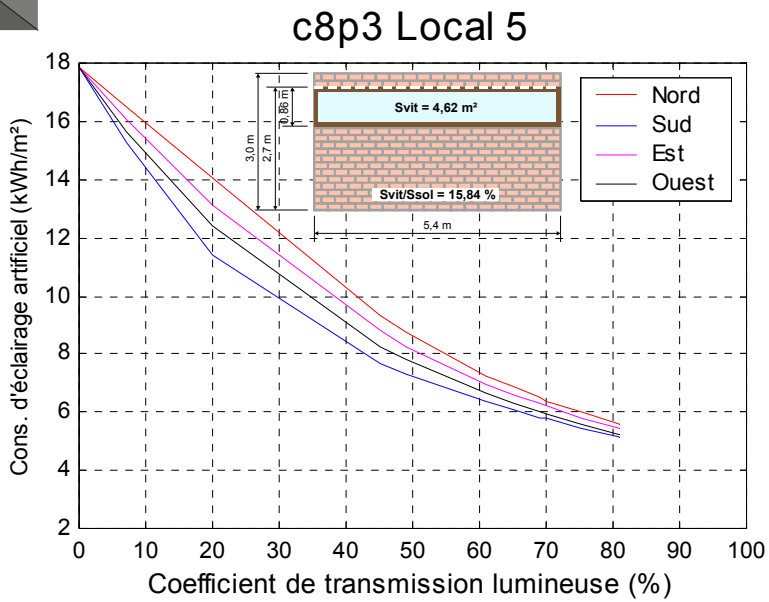

c8p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
2,7 m
c8p2 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
4,84 m
3,6 m
60
50
50
50
20
c8p2 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,84 m
4,5 m
c8p2 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
5,4 m

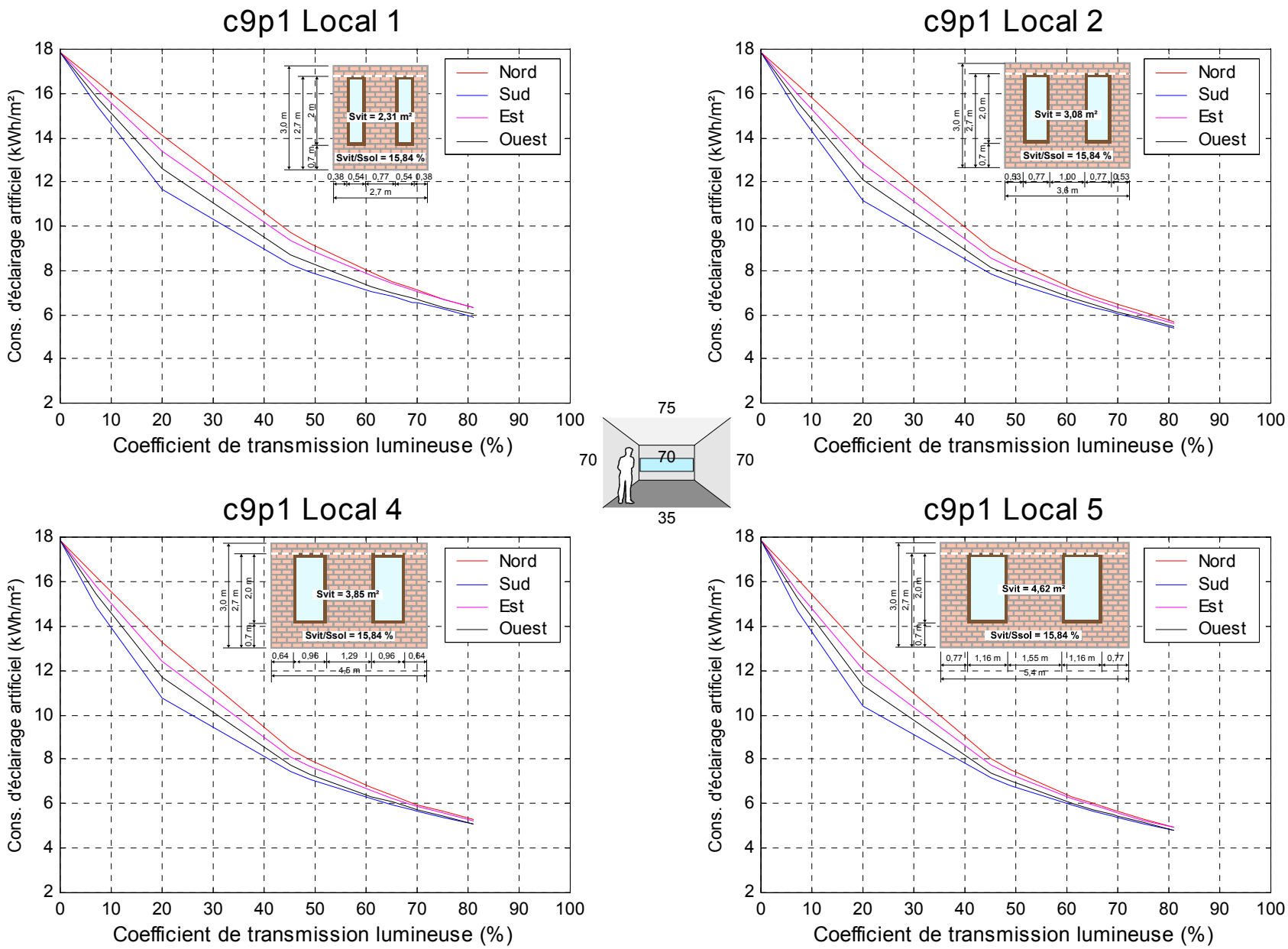

c8p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
2,7 m

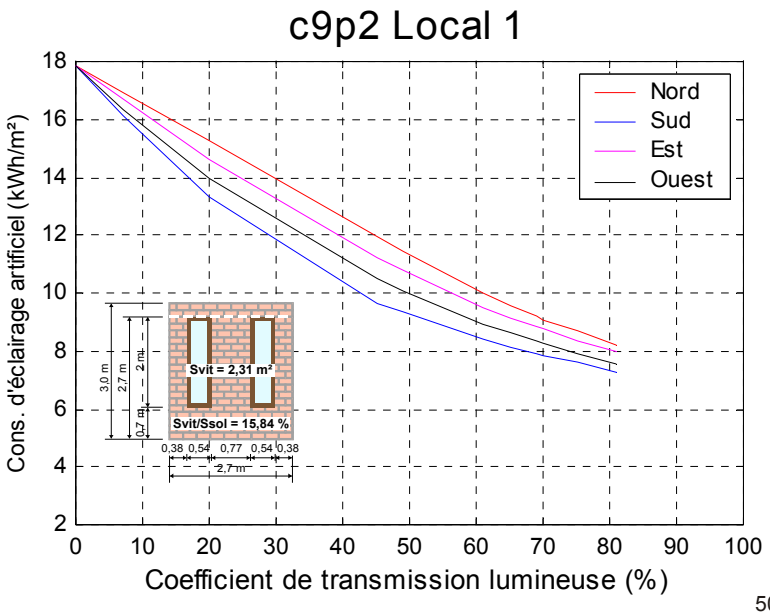

c8p3 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,84 m
3,6 m

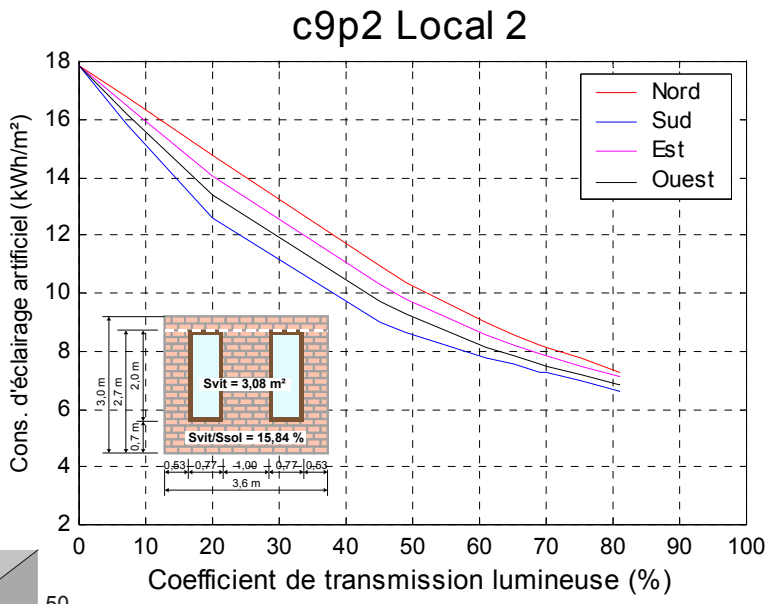

40
25
25
25
10

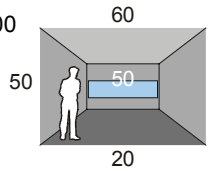

c8p3 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
1,84 m
4,5 m

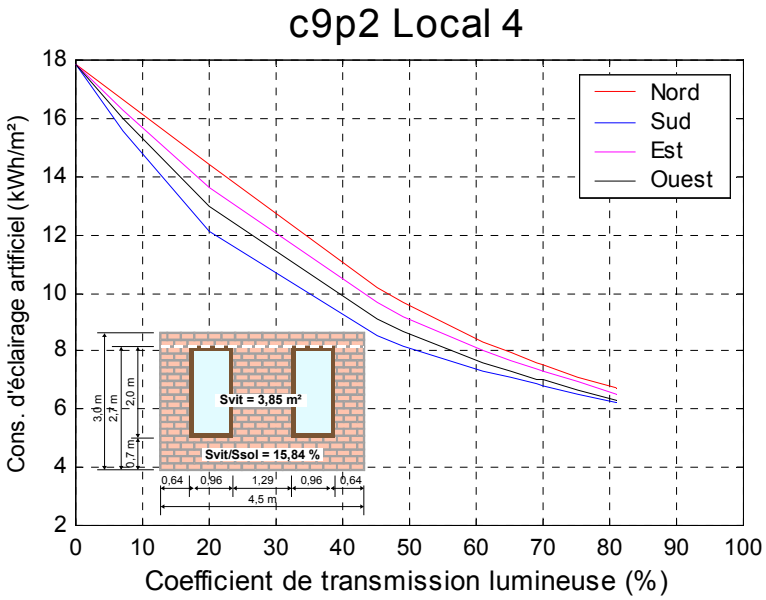

c8p3 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
3,0 m
2,7 m
0,86 m
5,4 m

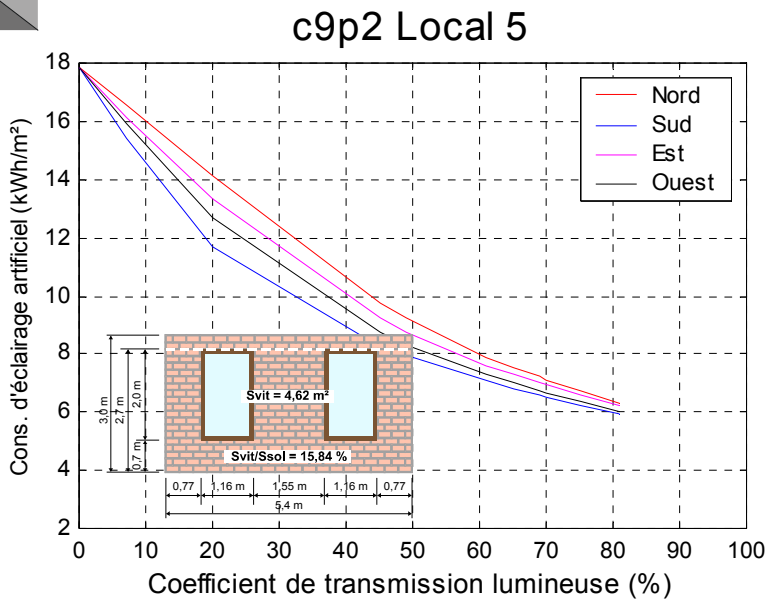

c9p1 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
c9p1 Local 2
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
c9p1 Local 4
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
c9p1 Local 5
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %
75
70
70
70
35

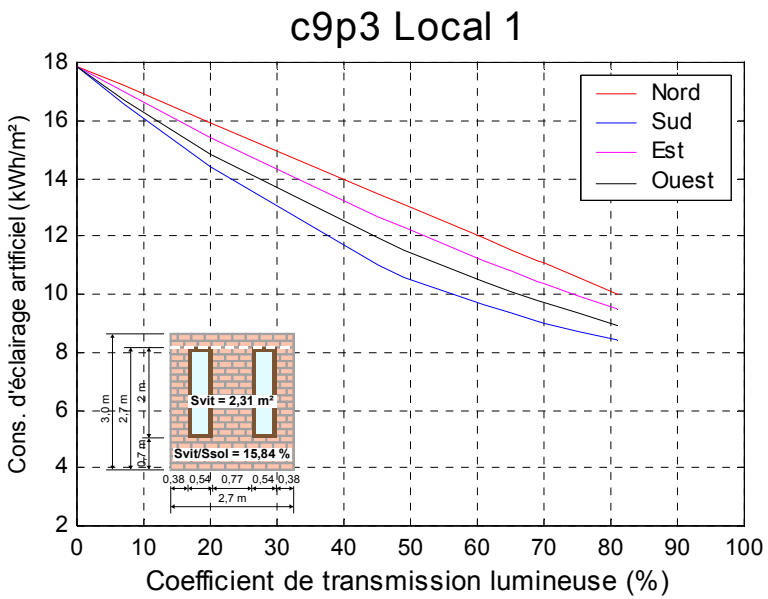

c9p2 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %

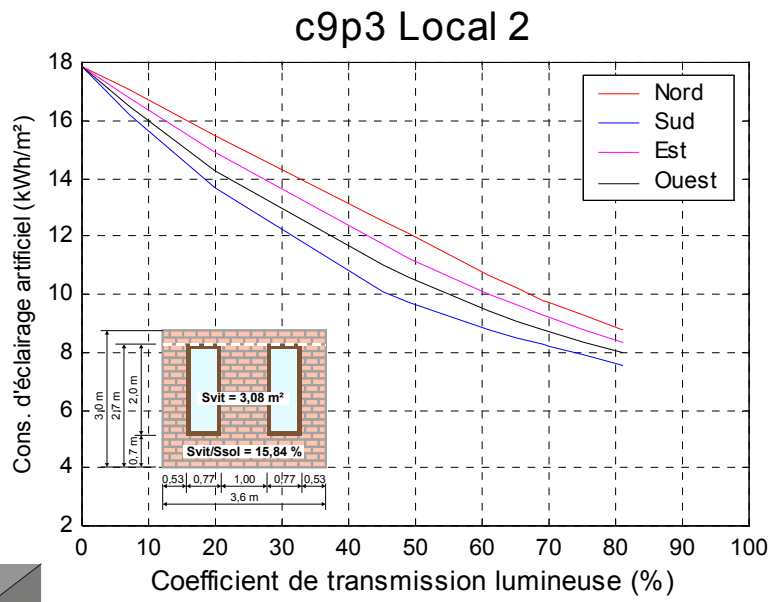

c9p2 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %

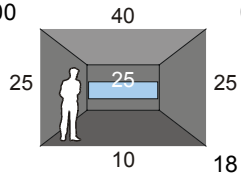

60
50
50
50
20

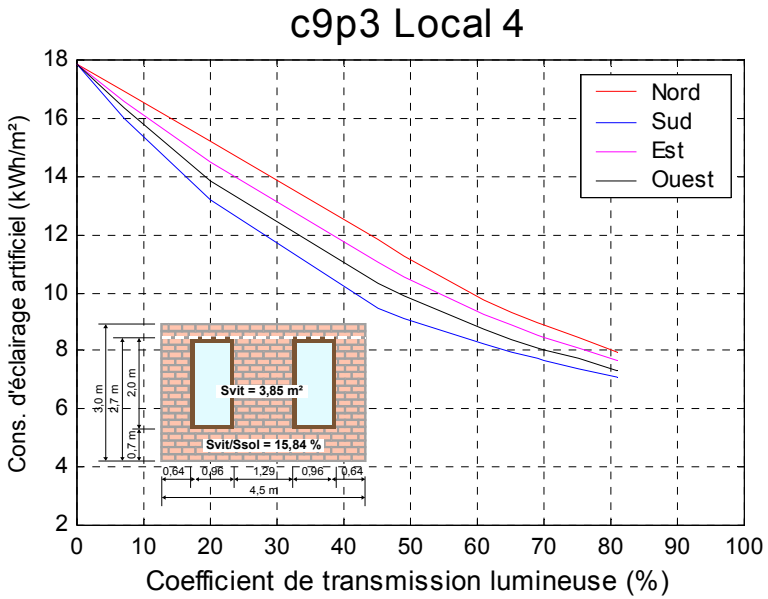

c9p2 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %

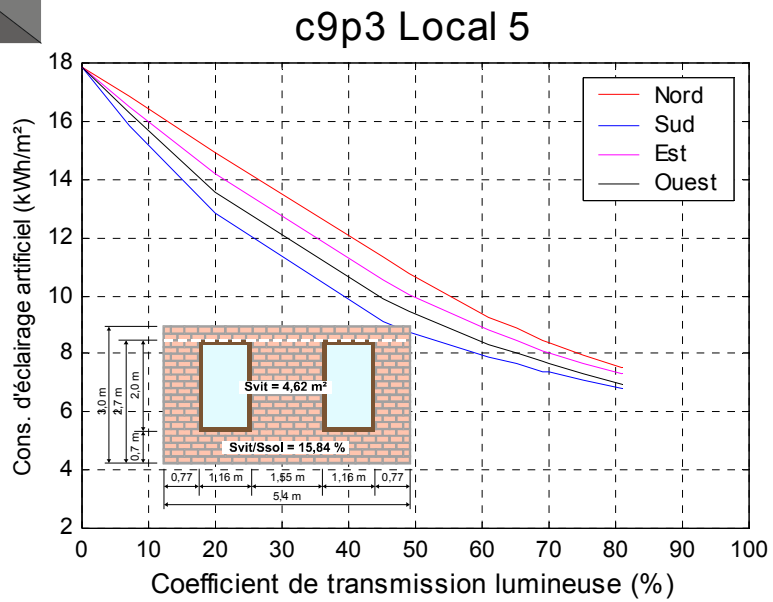

c9p2 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %


c9p3 Local 1
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 2,31 m²
Svit/Ssol = 15,84 %


c9p3 Local 2
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,08 m²
Svit/Ssol = 15,84 %

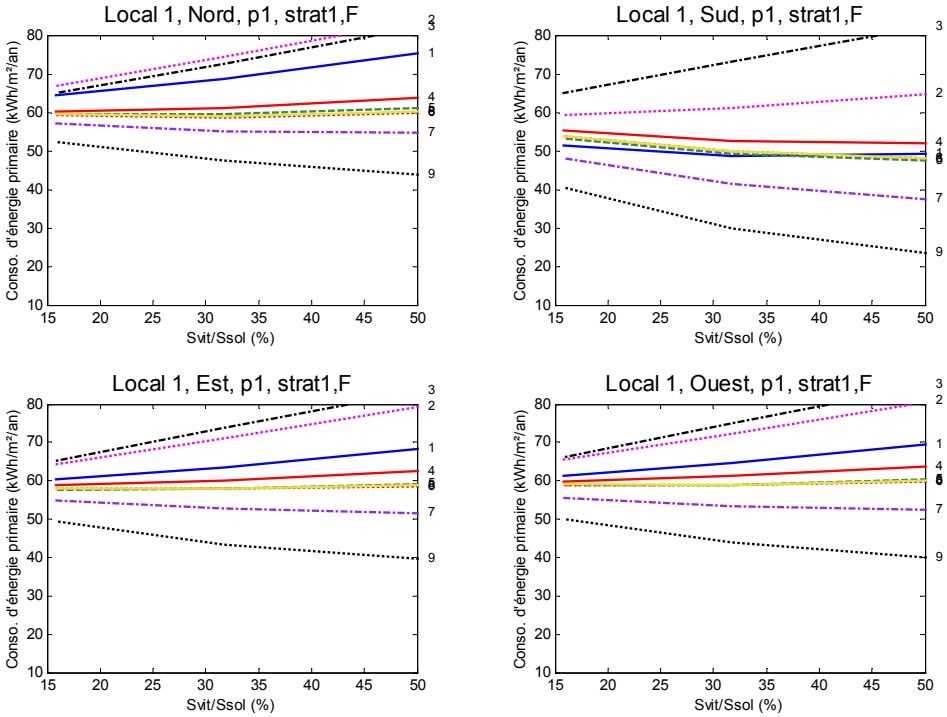

40
25
25
25
10


c9p3 Local 4
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 3,85 m²
Svit/Ssol = 15,84 %

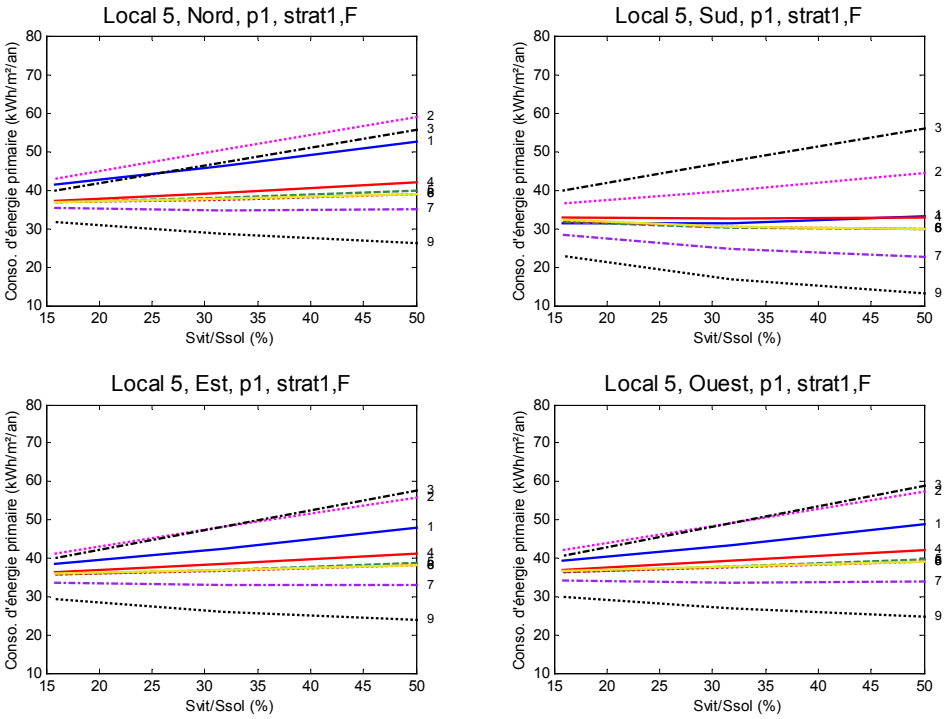

c9p3 Local 5
Cons. d'éclairage artificiel (kWh/m²)
Coefficient de transmission lumineuse (%)
Nord
Sud
Est
Ouest
Svit = 4,62 m²
Svit/Ssol = 15,84 %

ANNEXE 3 : Influence de différents paramètres sur les consommations

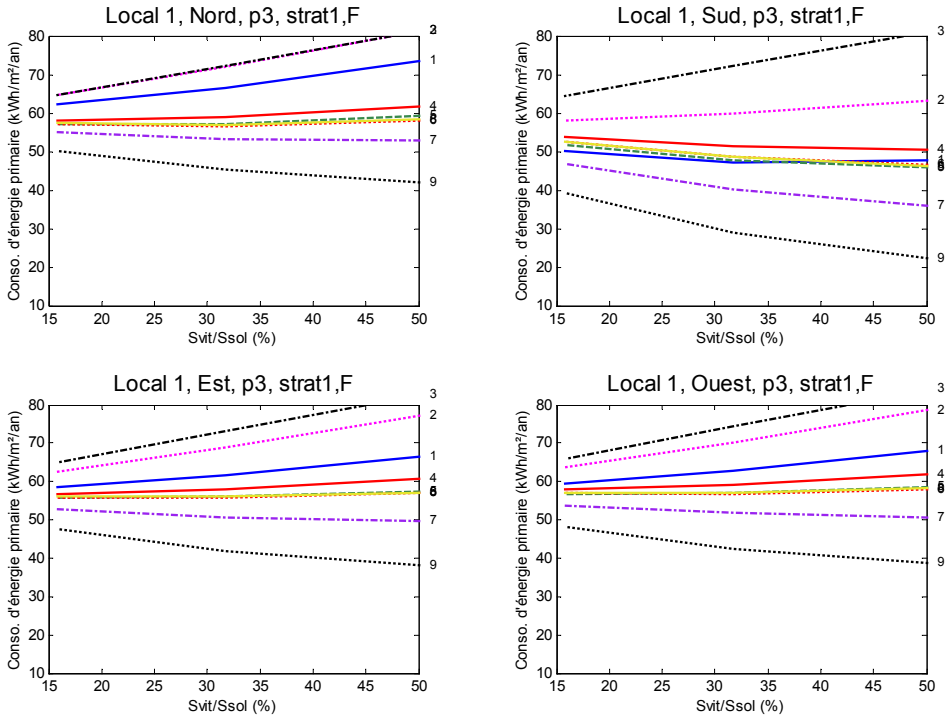
1. Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de chauffage



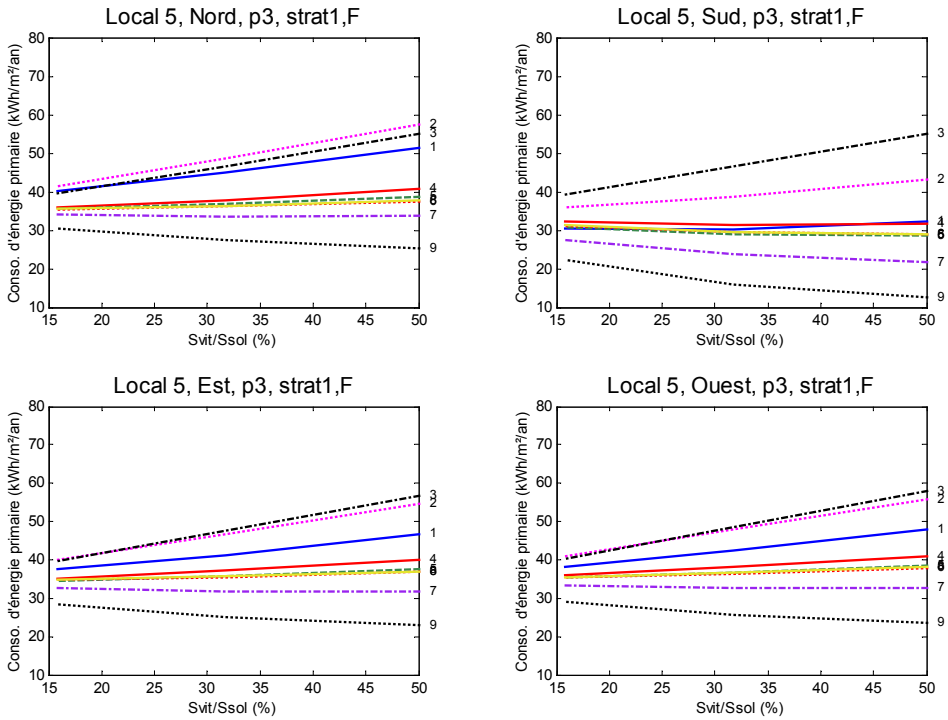
Graphique 1



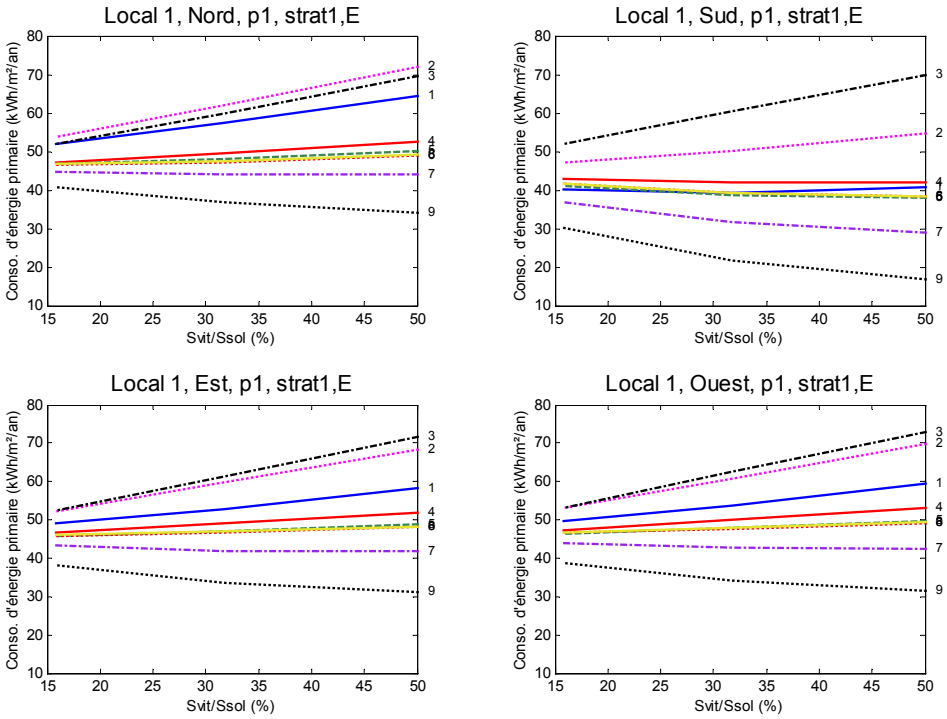
Graphique 2



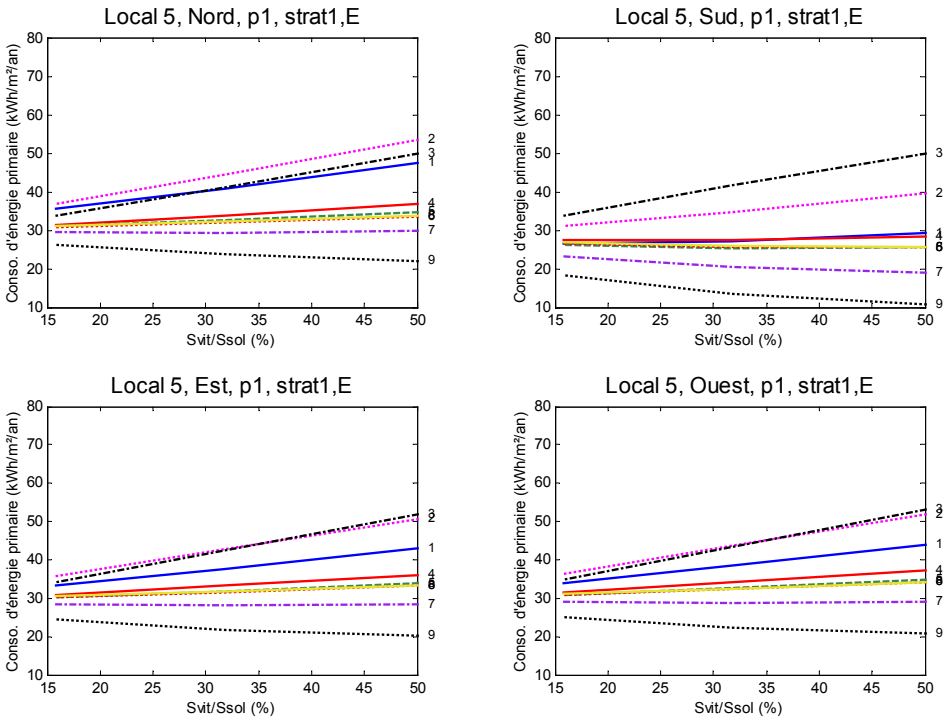
Graphique 3



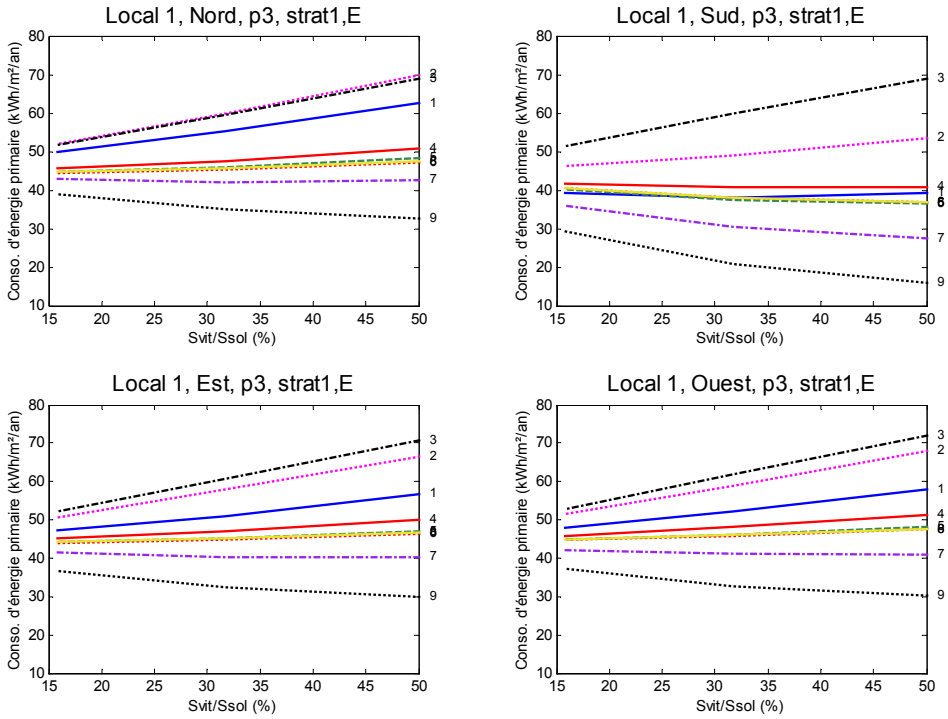
Graphique 4



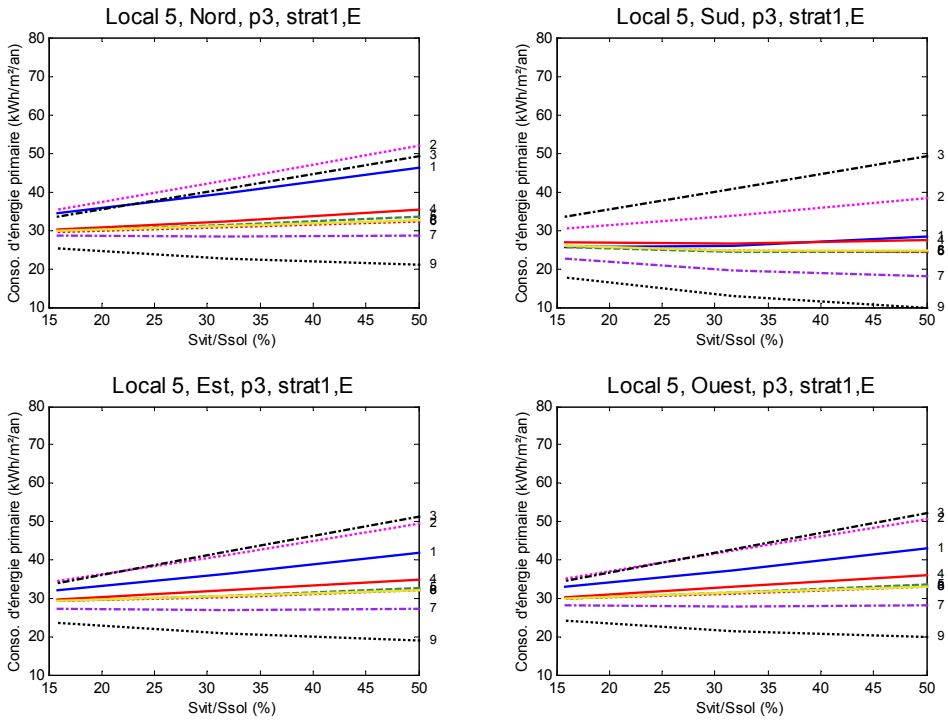
Graphique 5



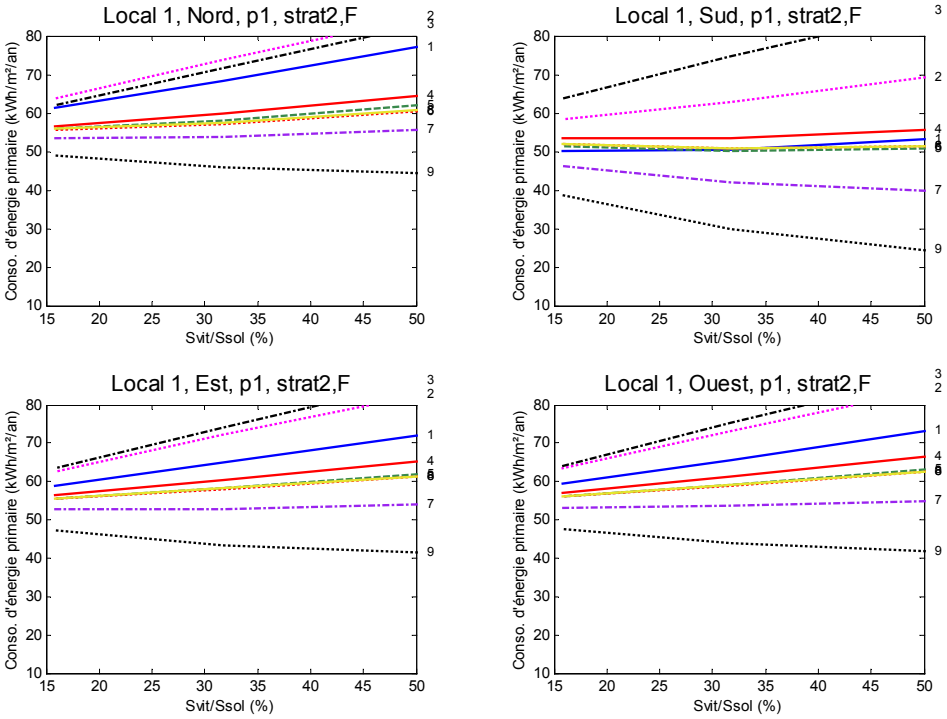
Graphique 6



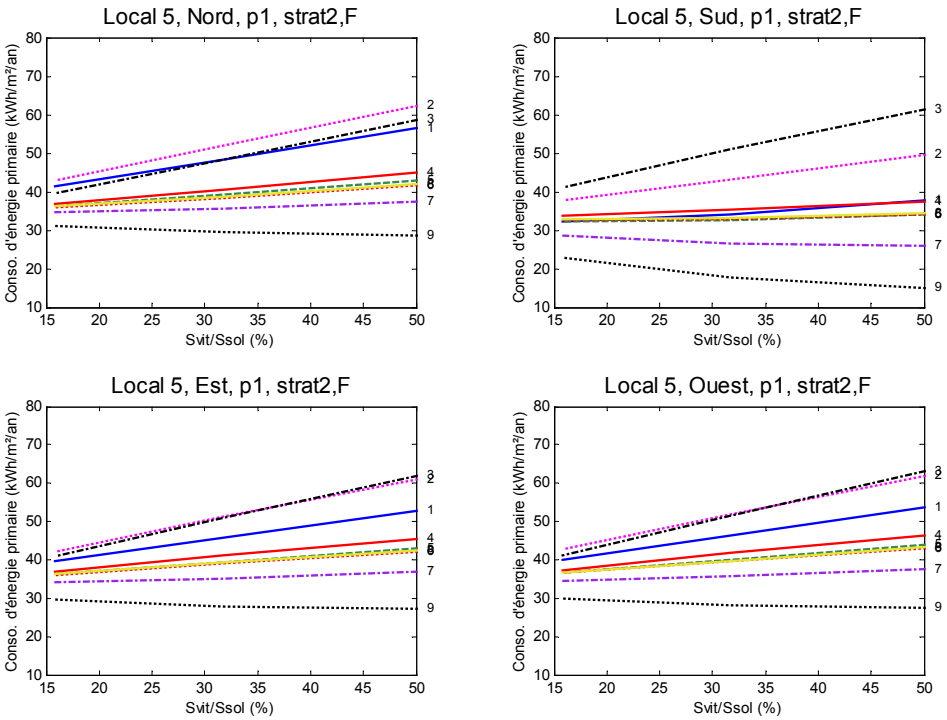
Graphique 7



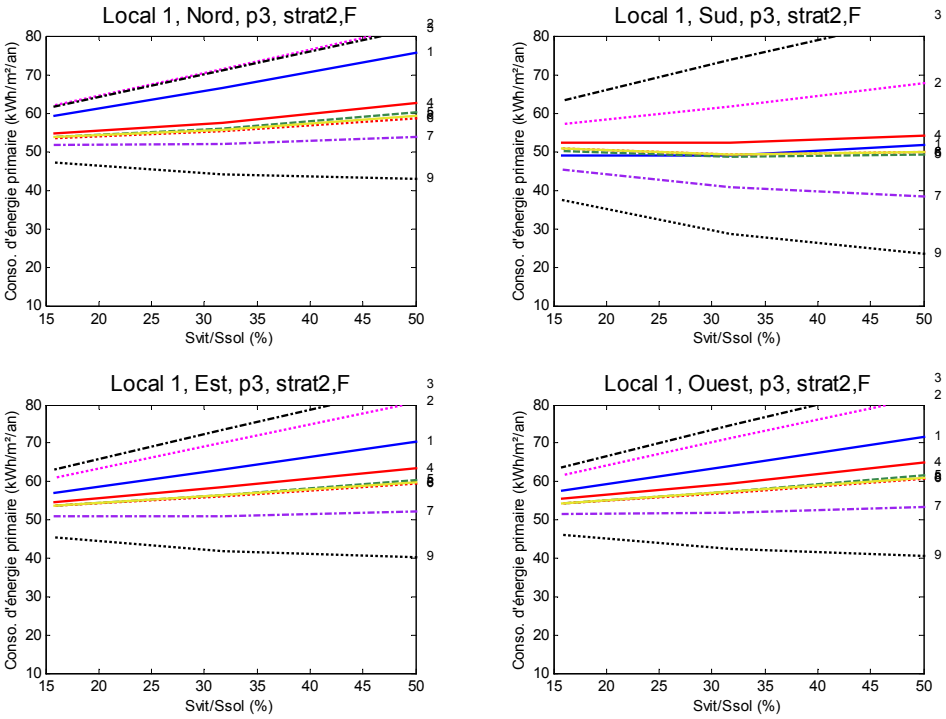
Graphique 8



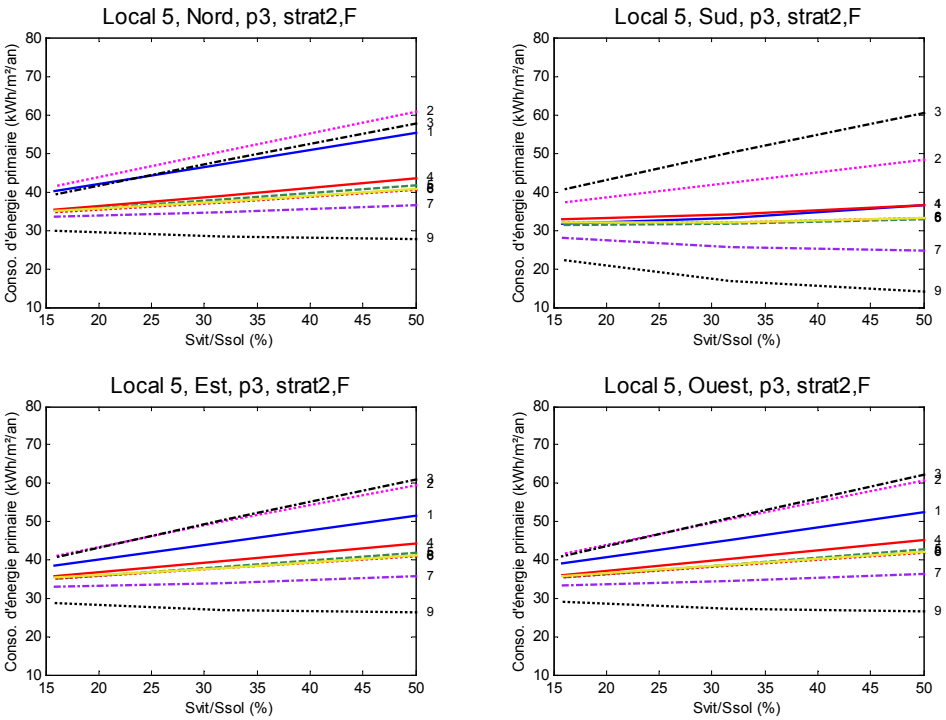
Graphique 9



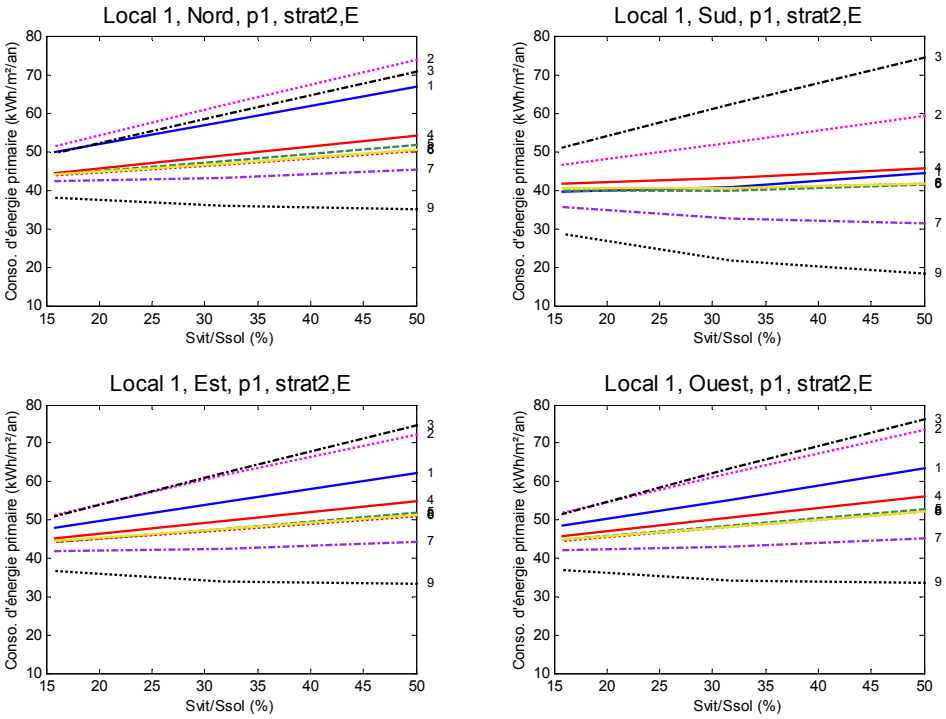
Graphique 10



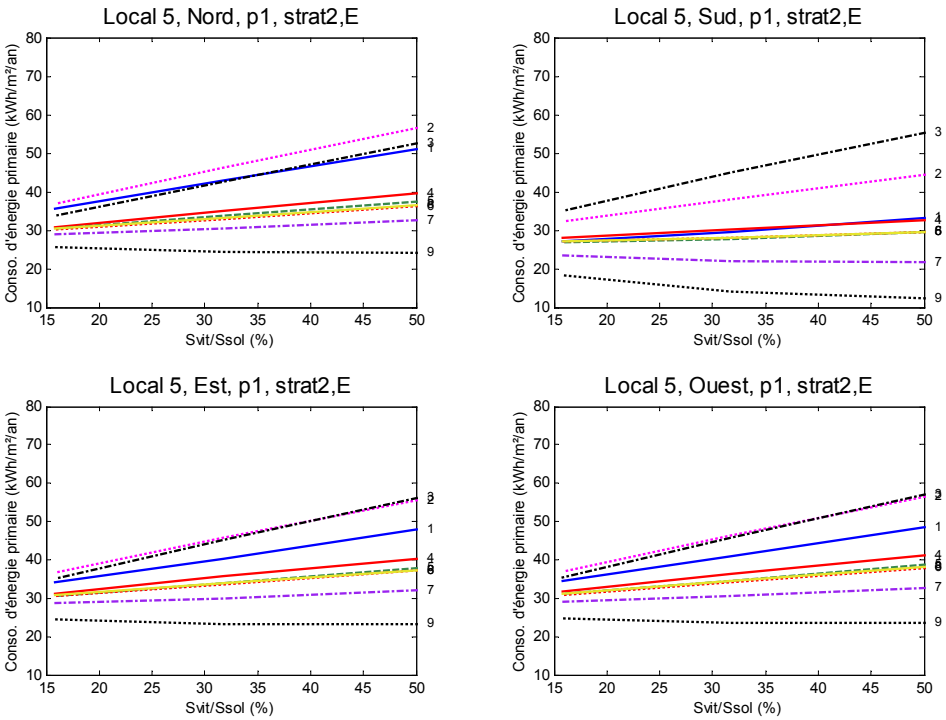
Graphique 11



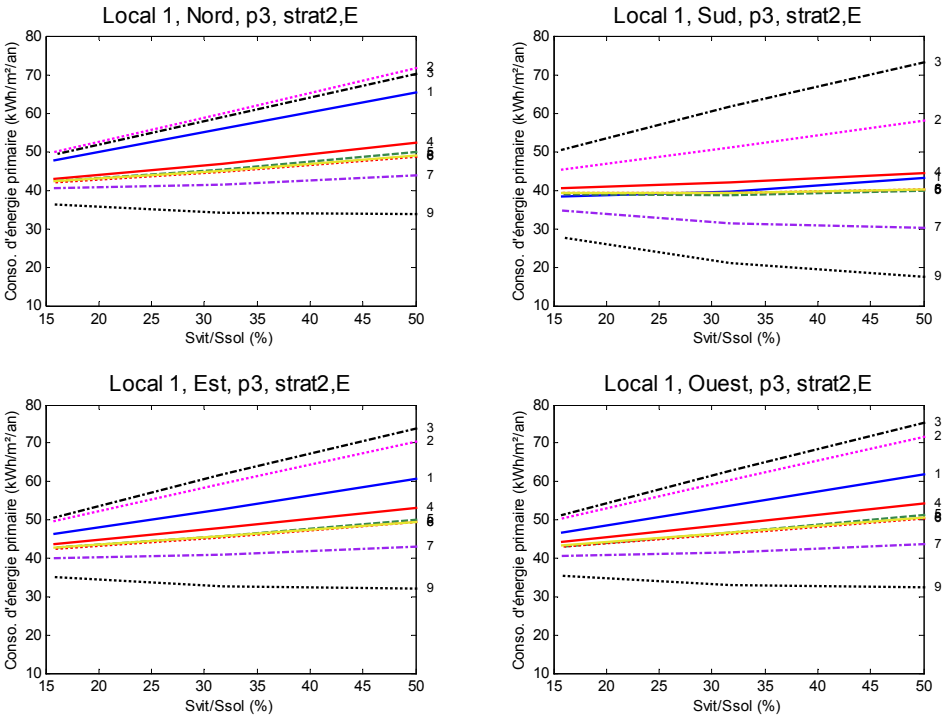
Graphique 12



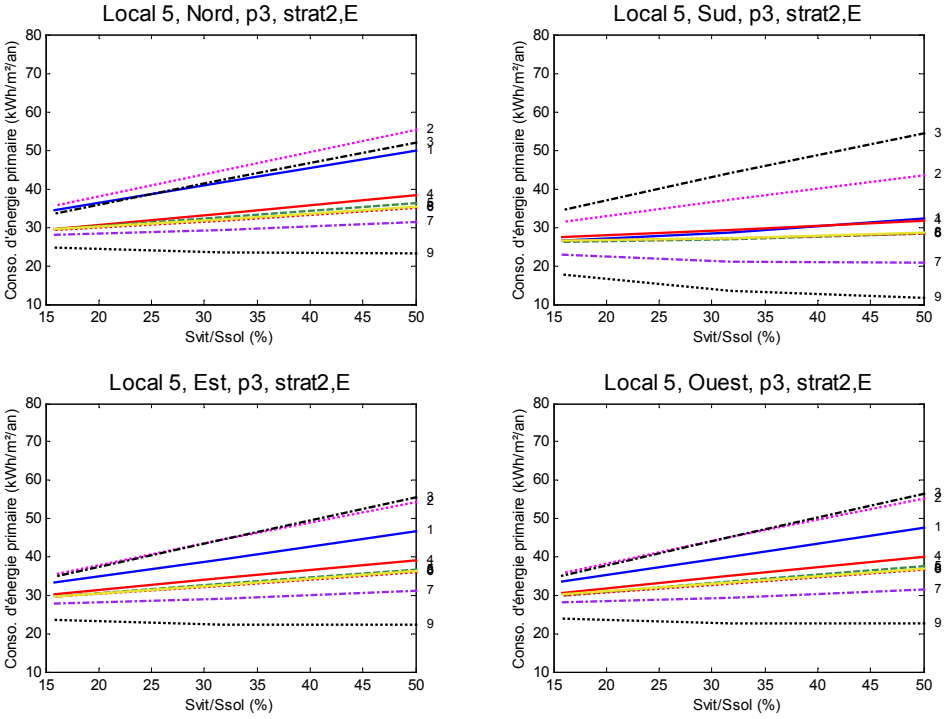
Graphique 13



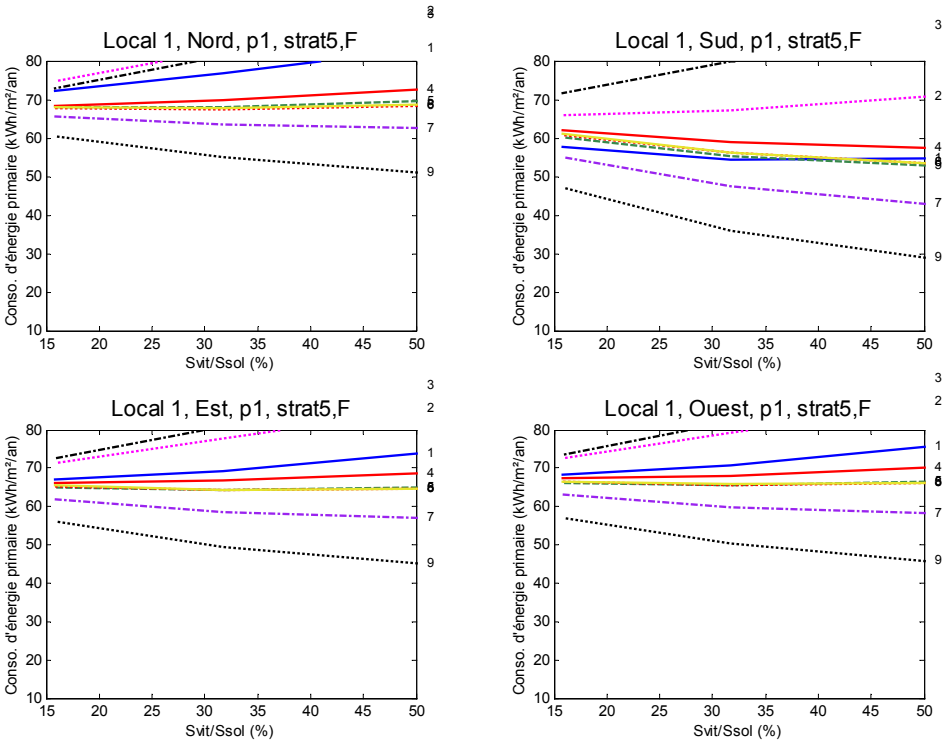
Graphique 14



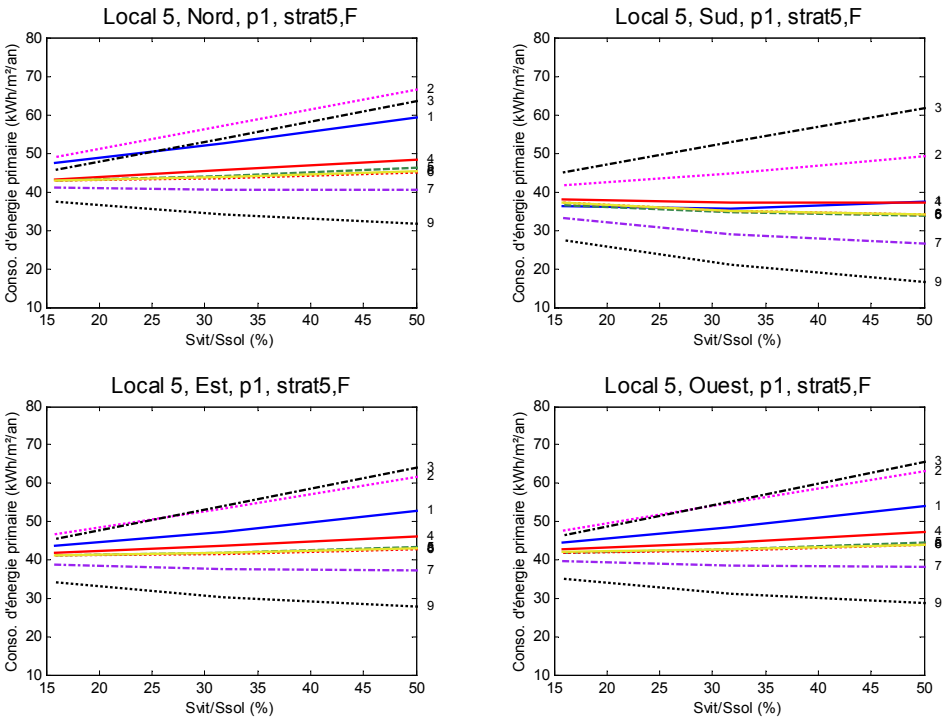
Graphique 15



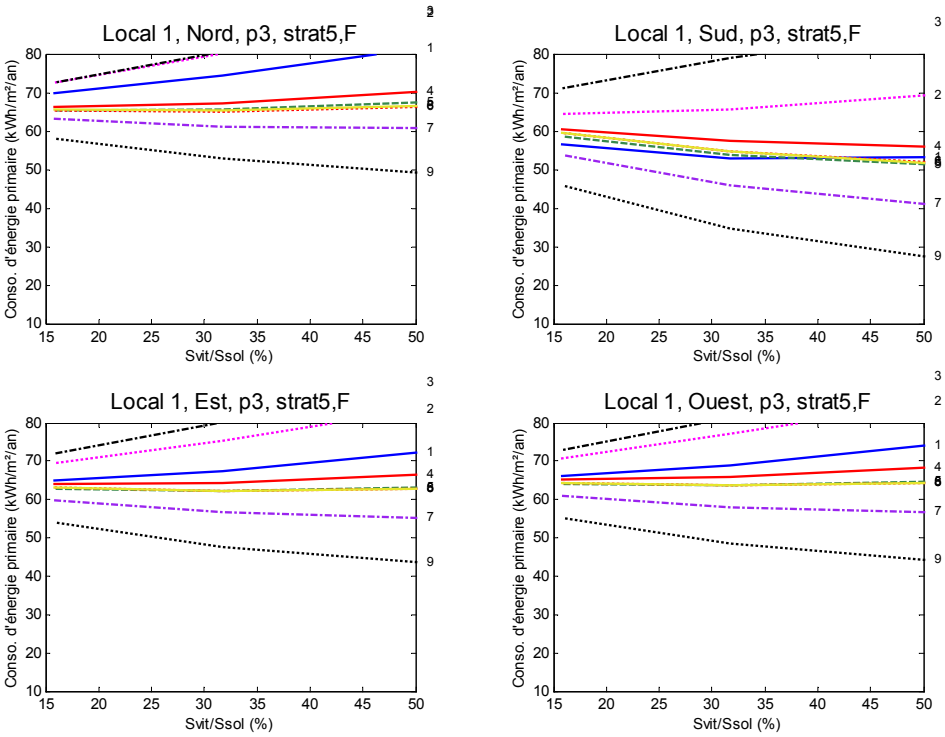
Graphique 16



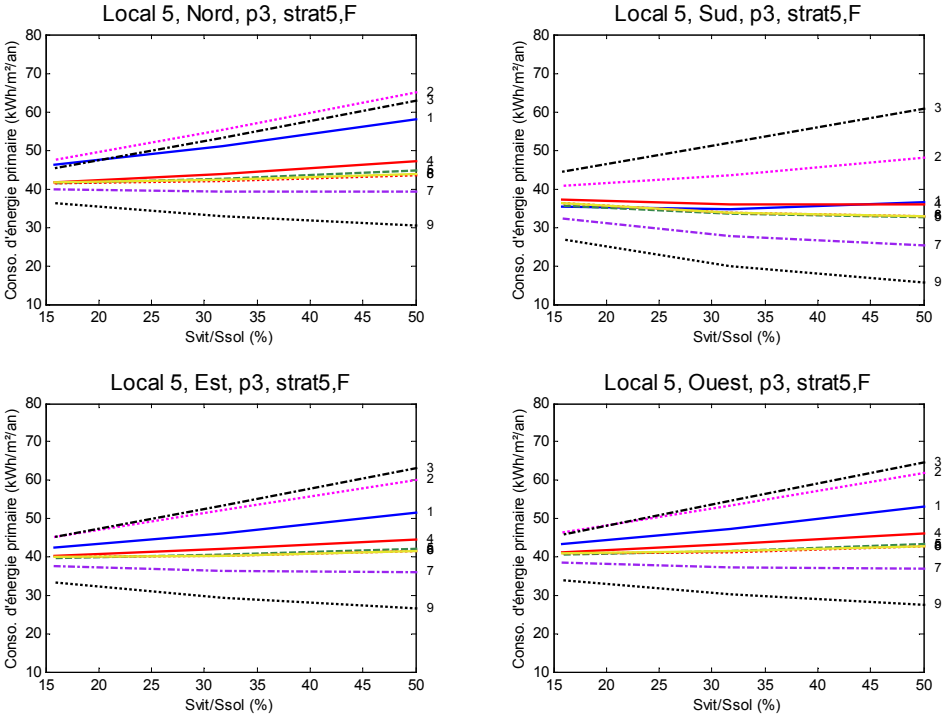
Graphique 17



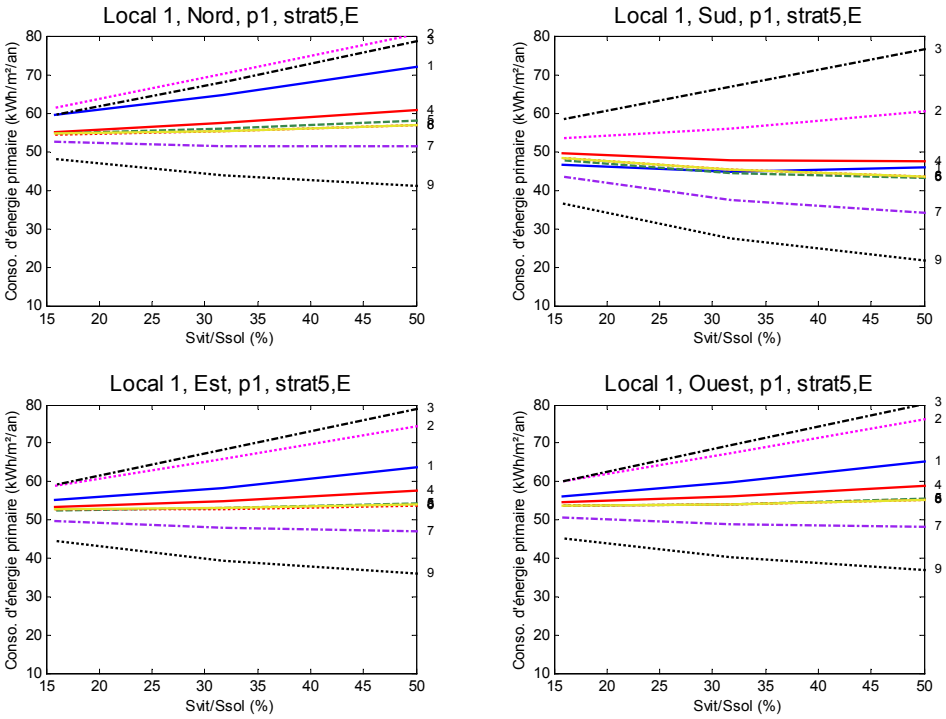
Graphique 18



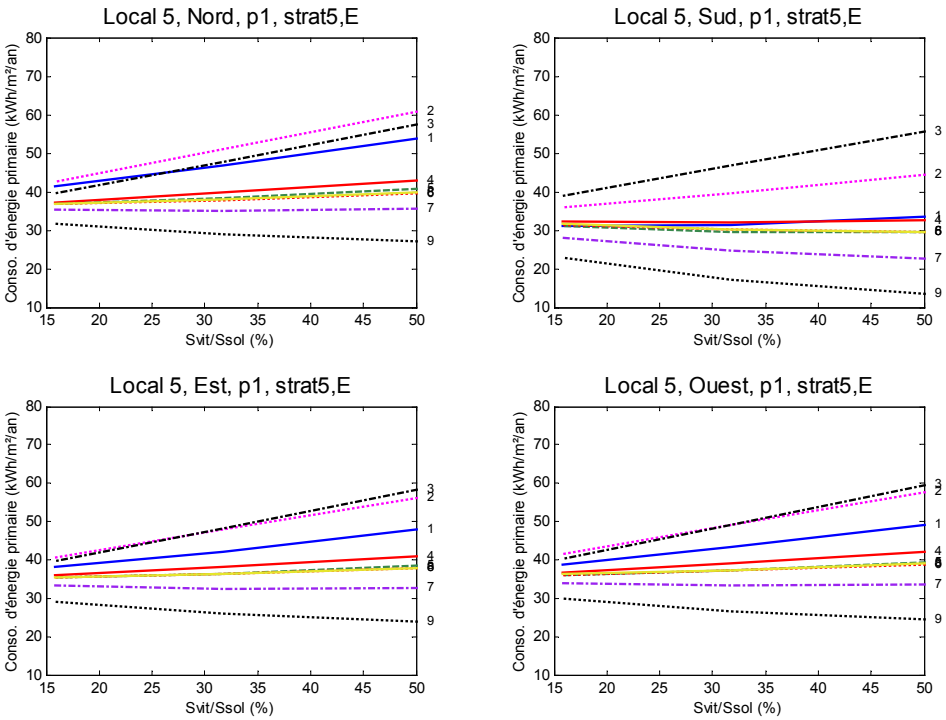
Graphique 19



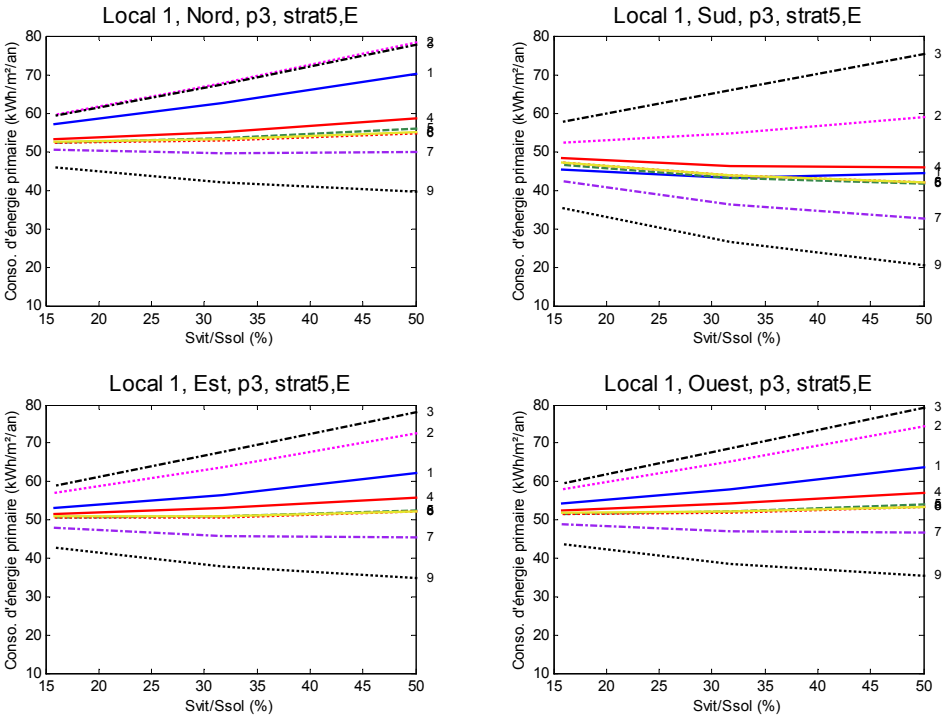
Graphique 20



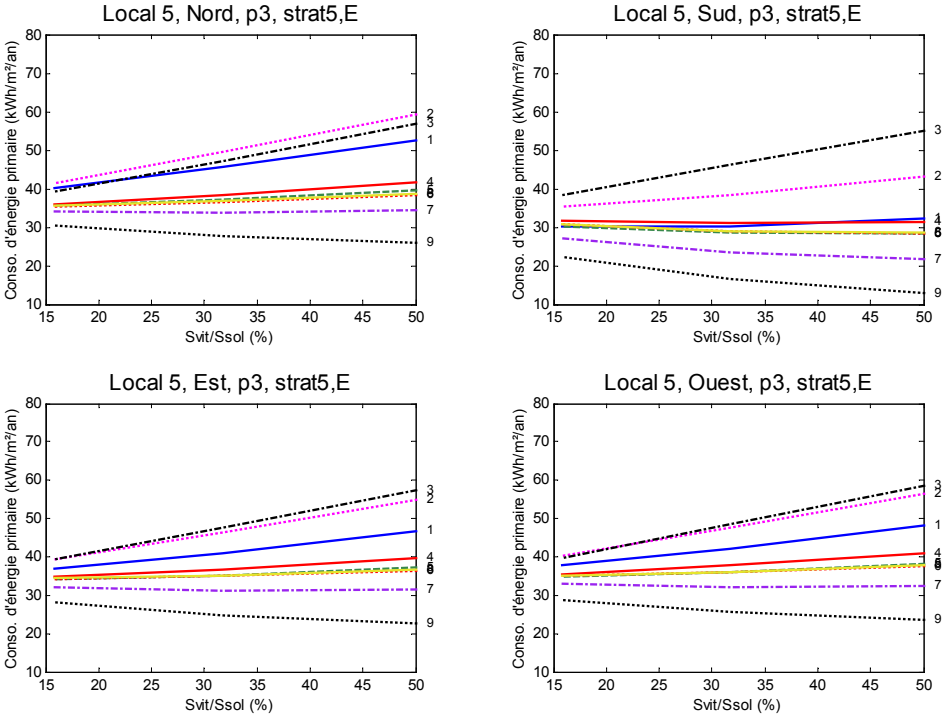
Graphique 21



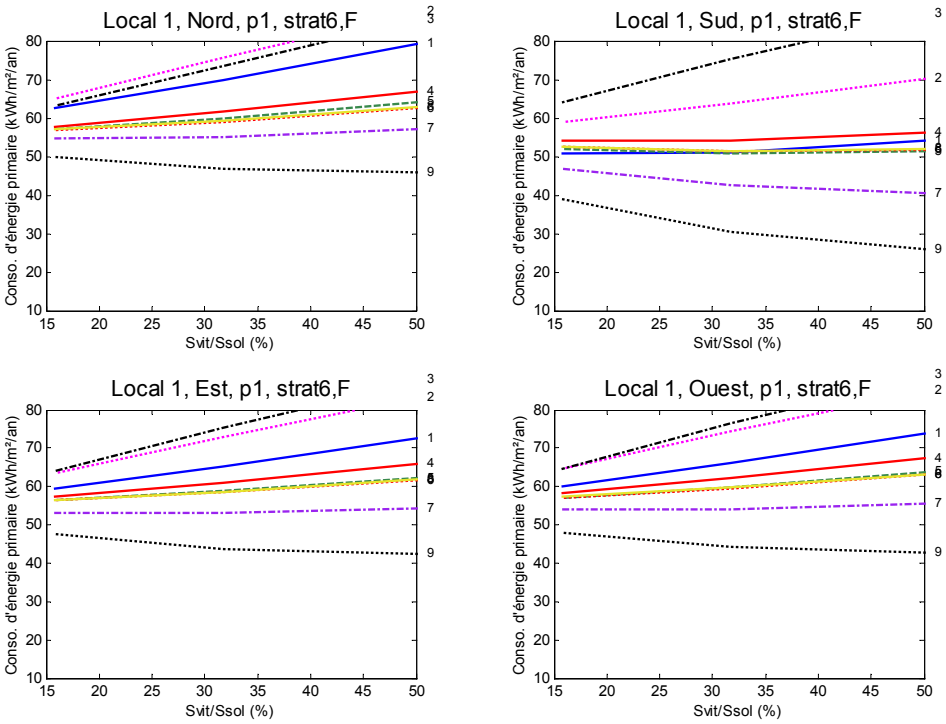
Graphique 22



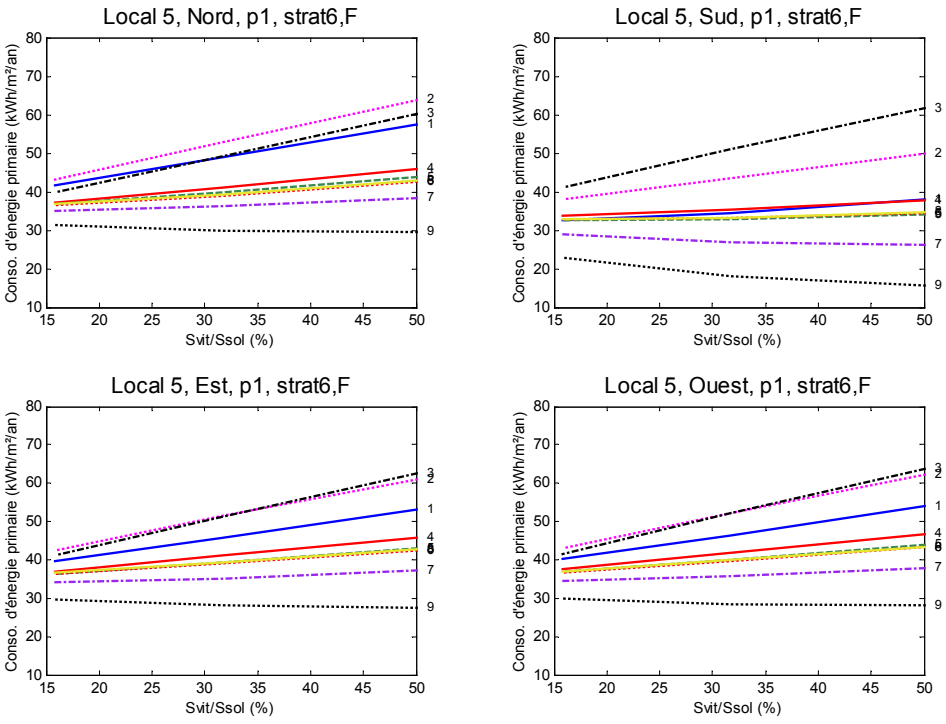
Graphique 23



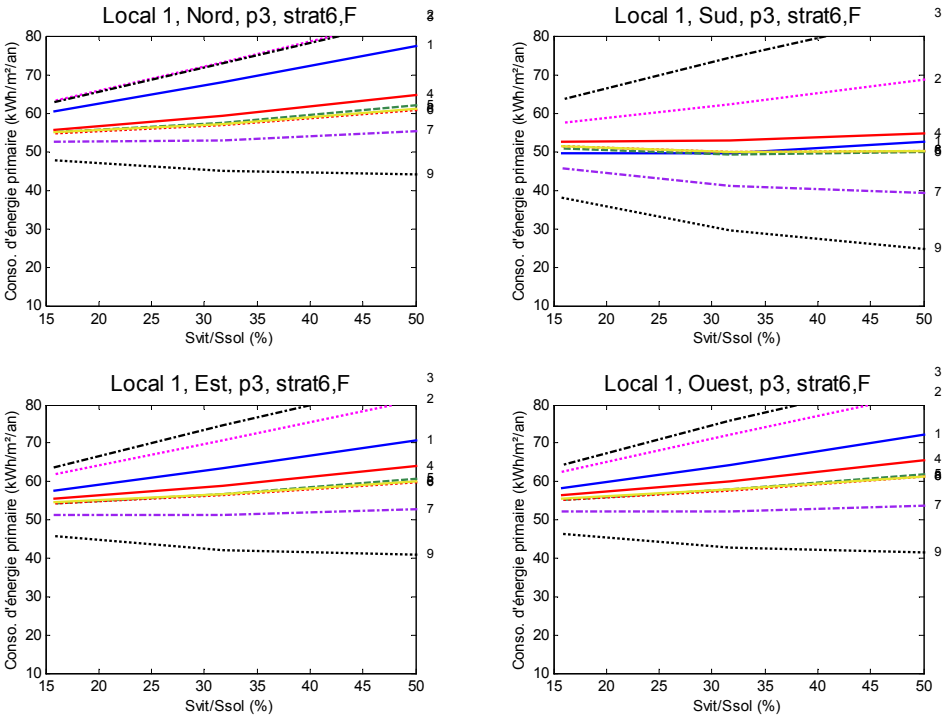
Graphique 24



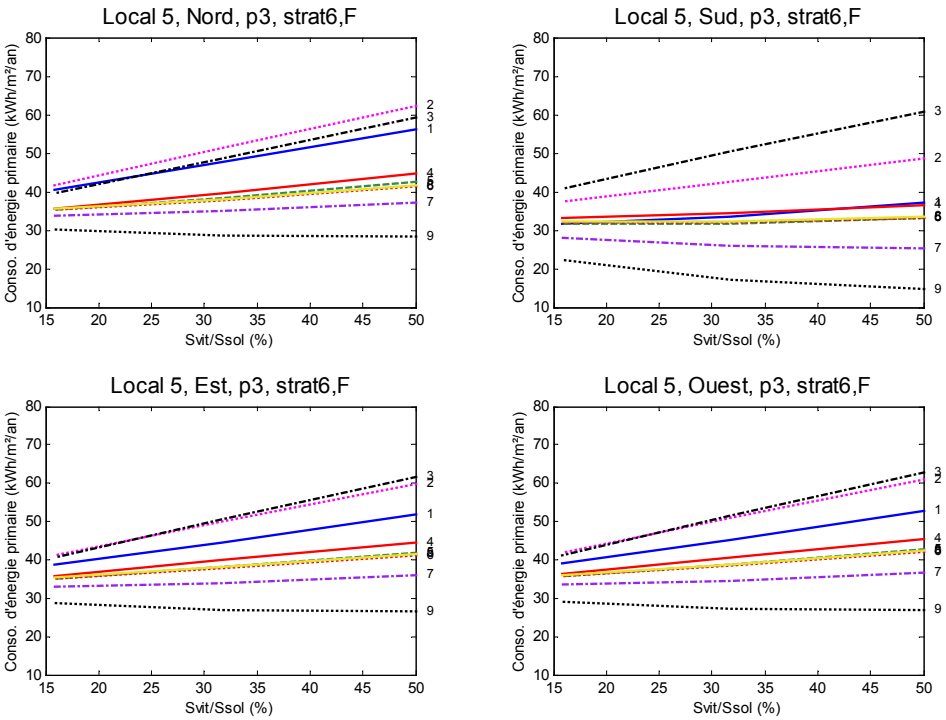
Graphique 25



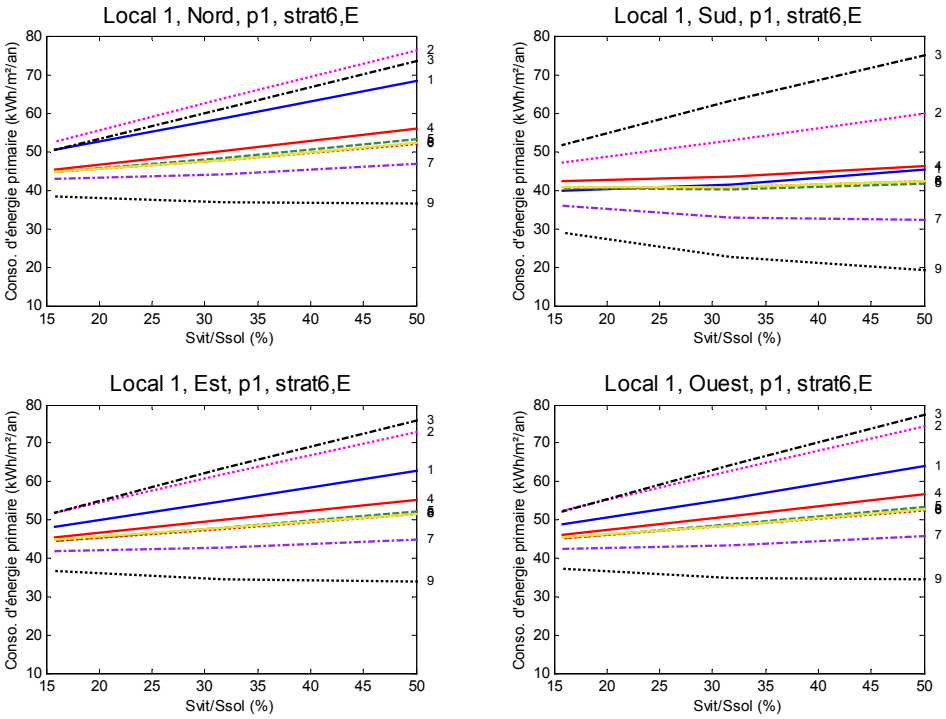
Graphique 26



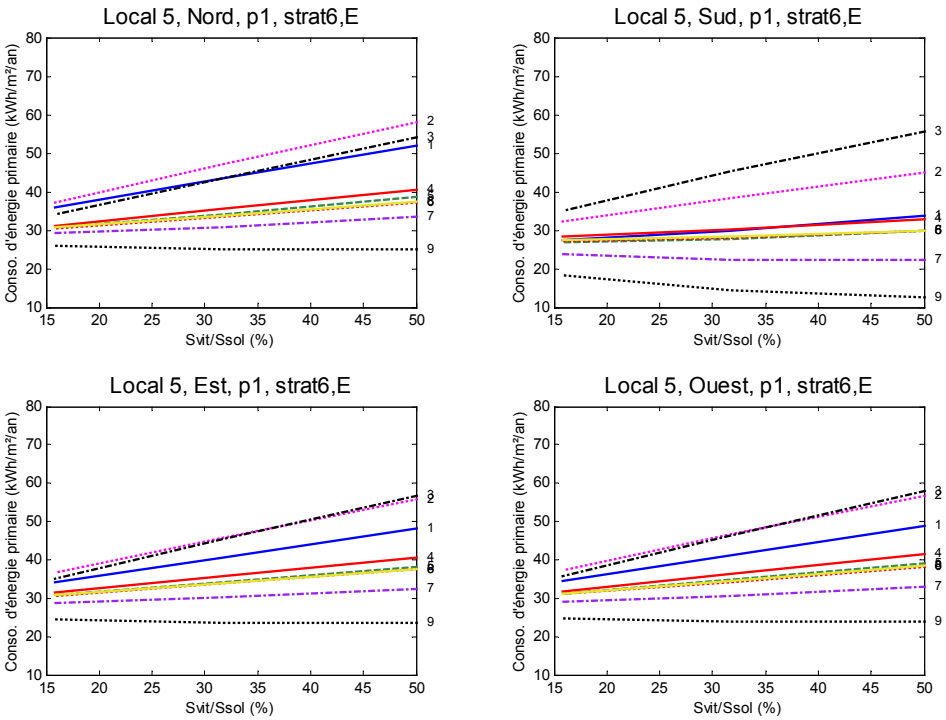
Graphique 27



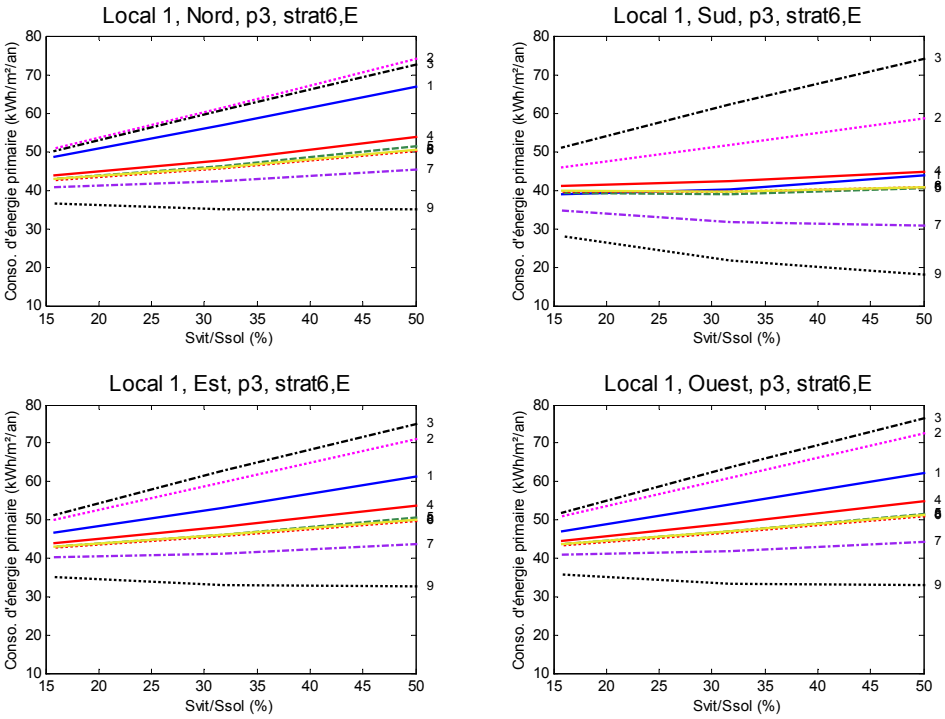
Graphique 28



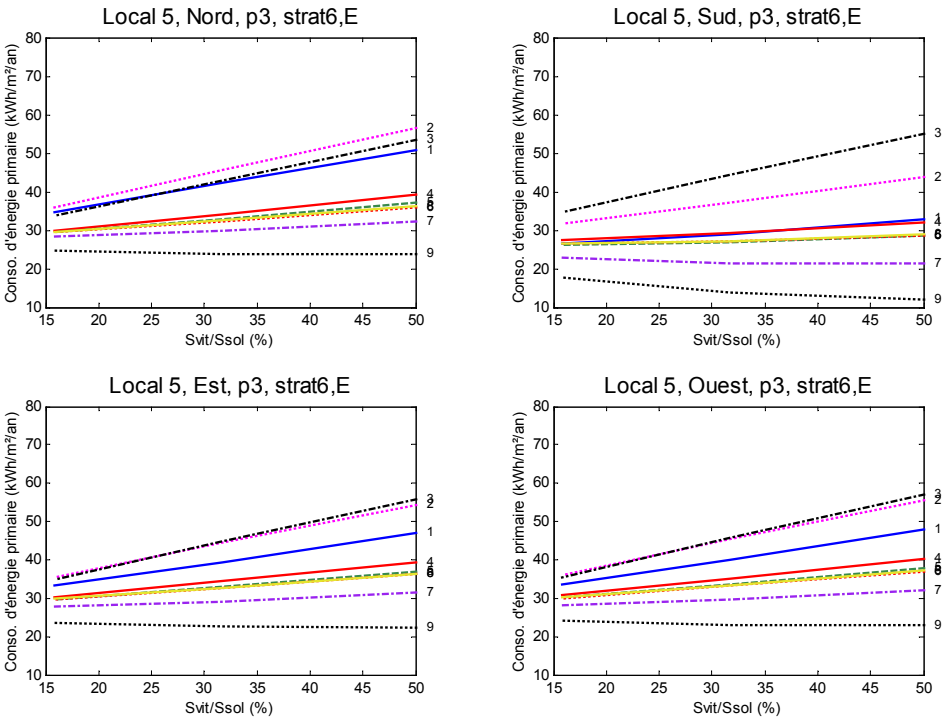
Graphique 29



Graphique 30

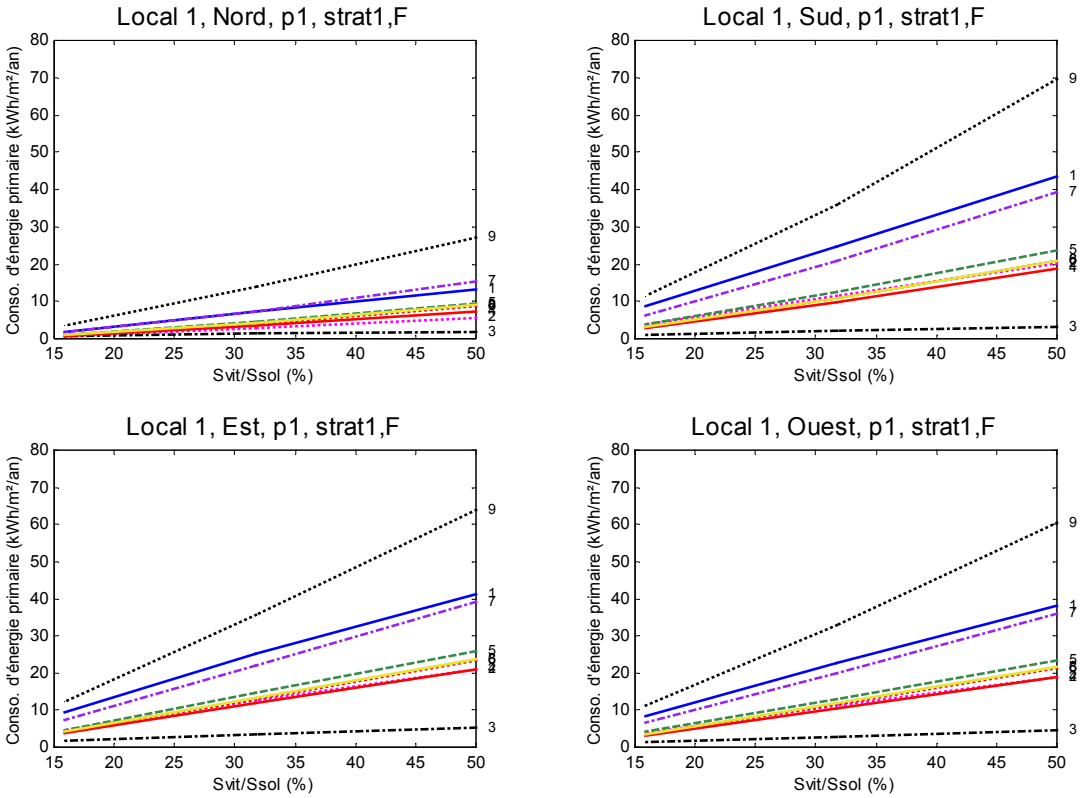


Graphique 31

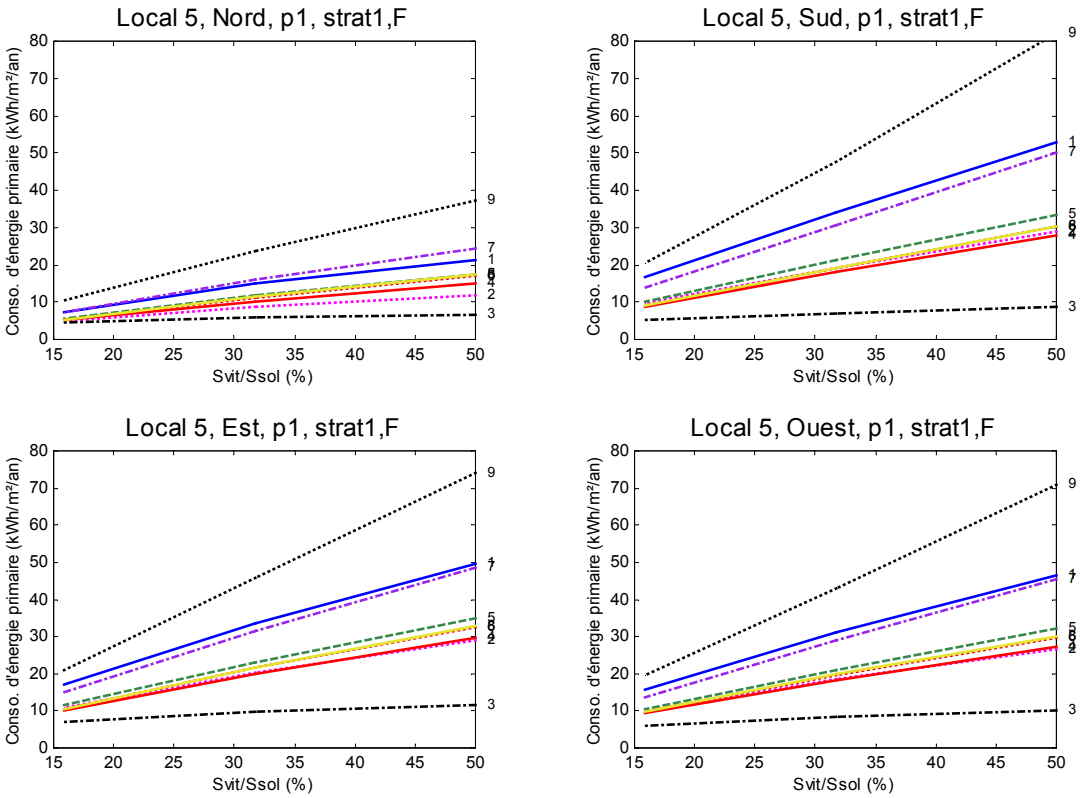


Graphique 32

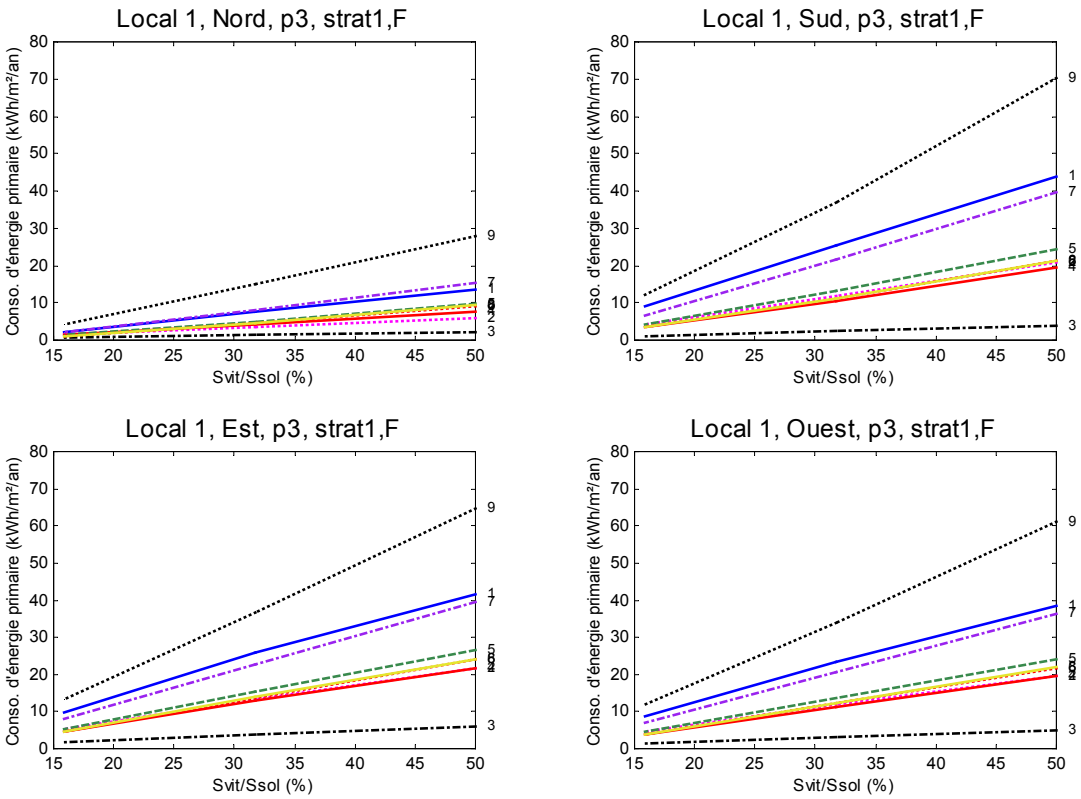
2. Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation de refroidissement



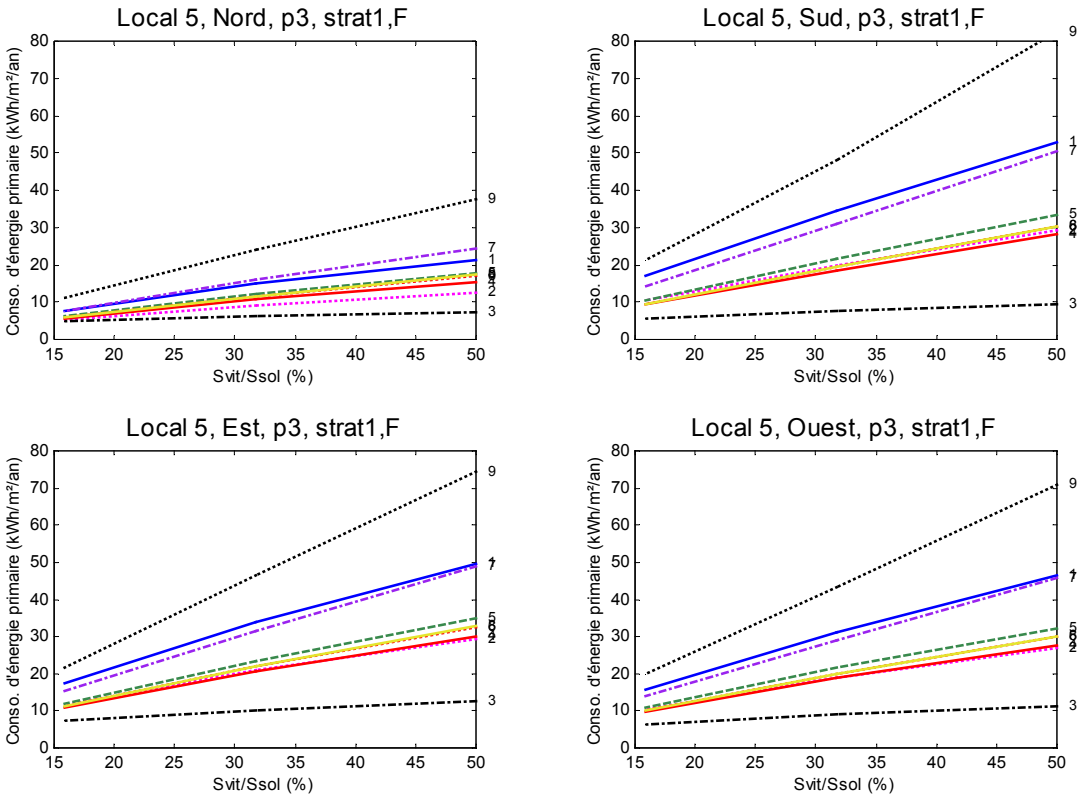
Graphique 33



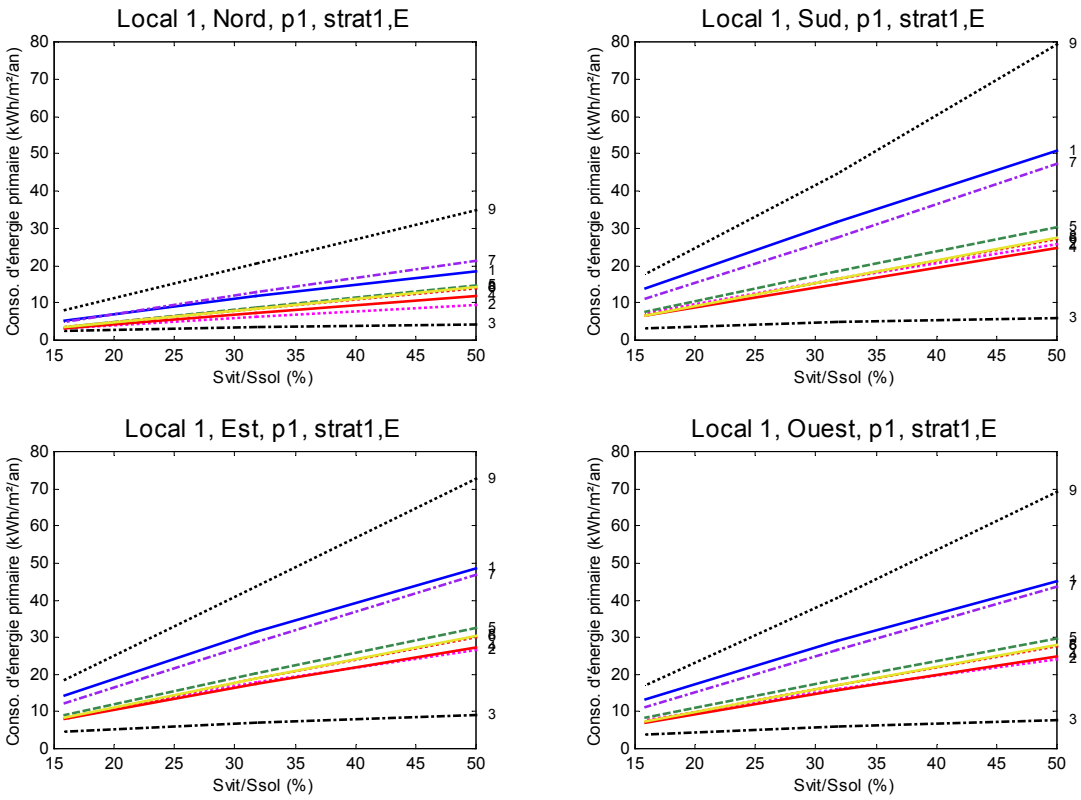
Graphique 34



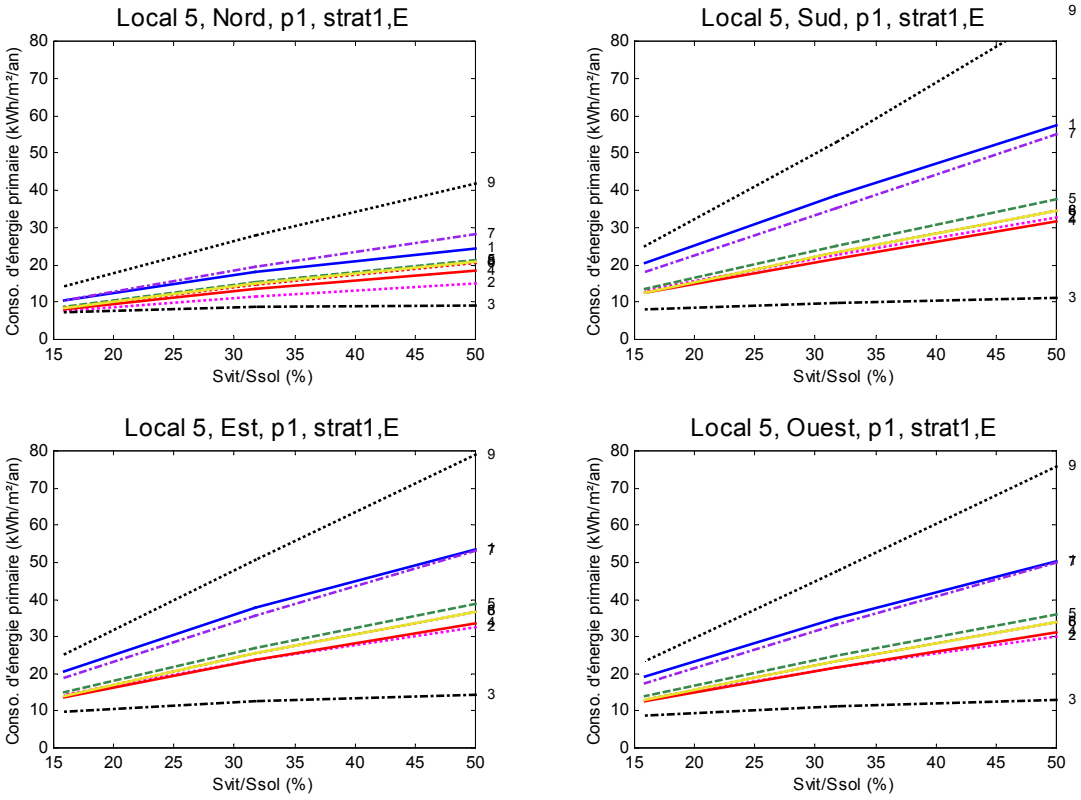
Graphique 35



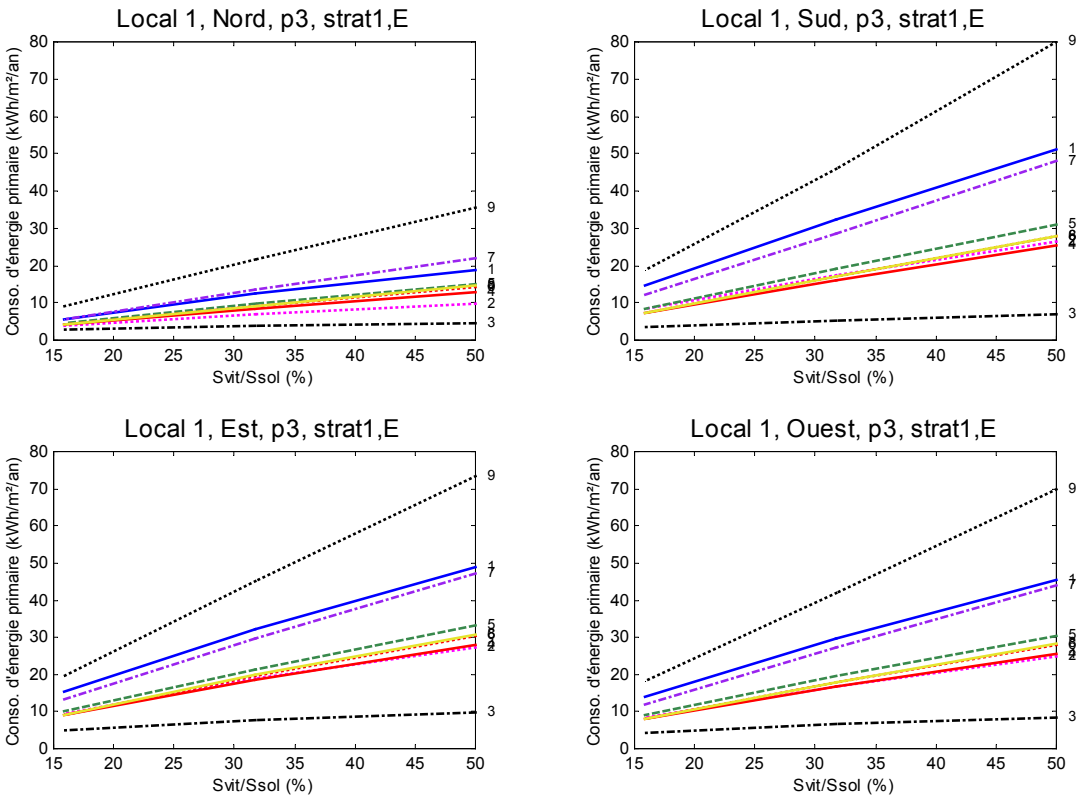
Graphique 36



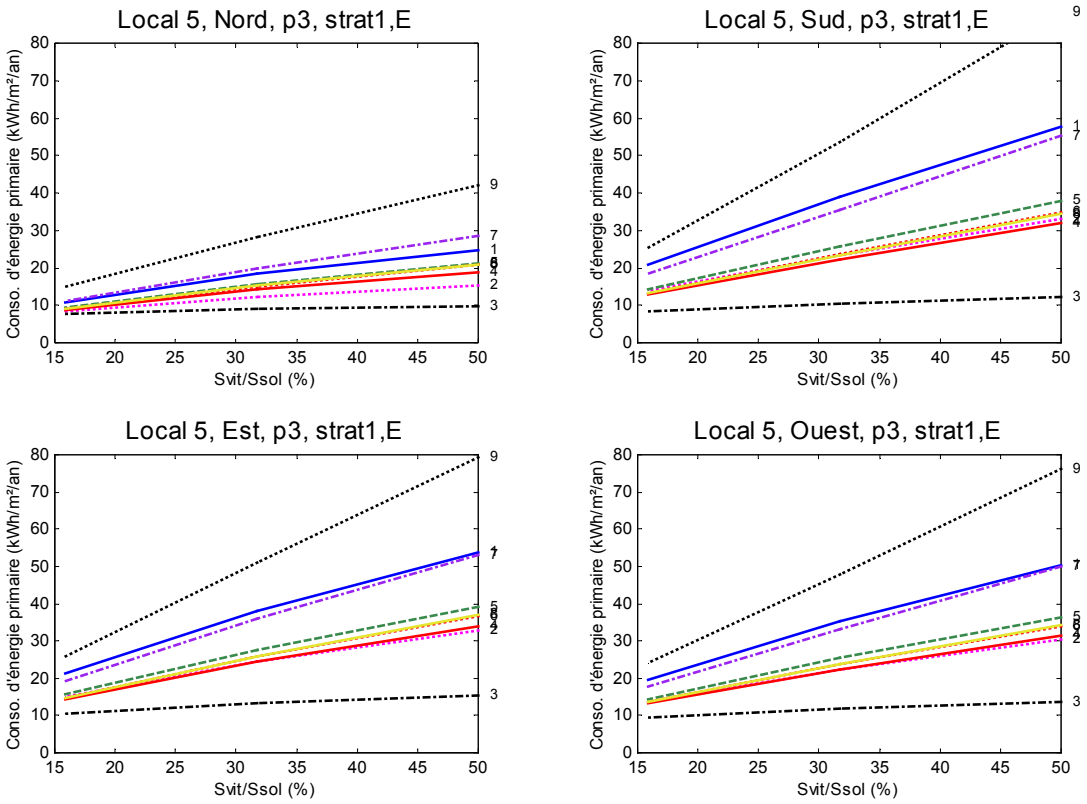
Graphique 37



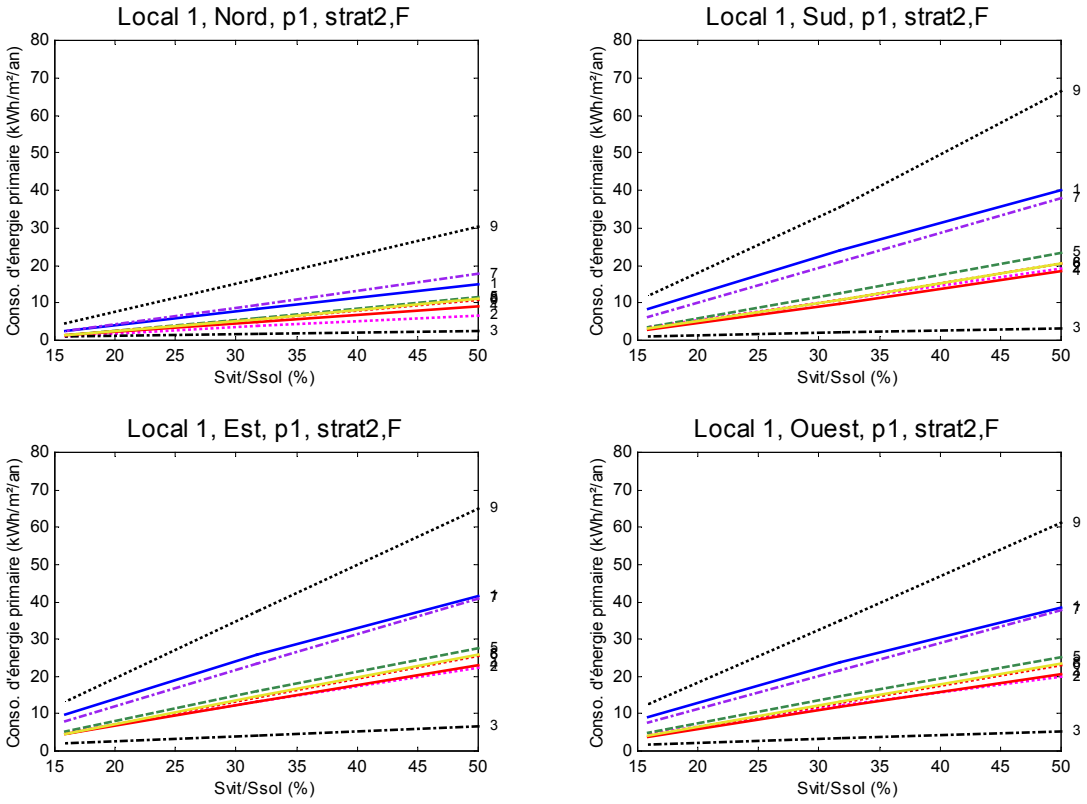
Graphique 38



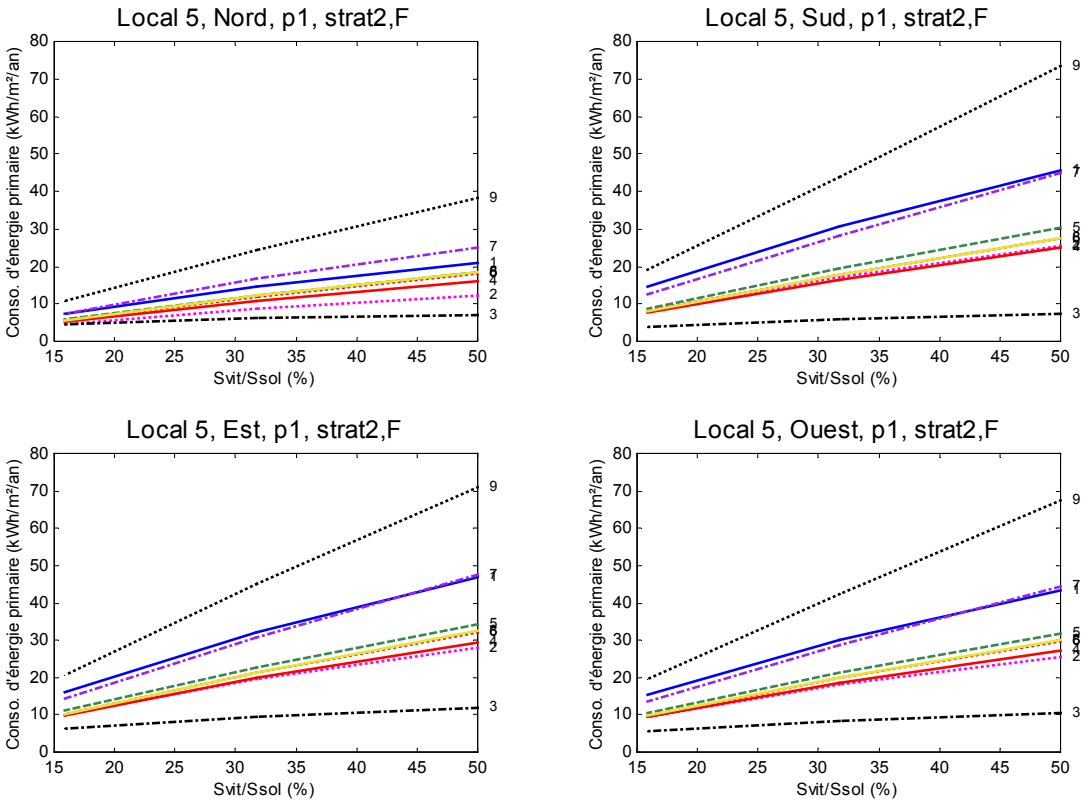
Graphique 39



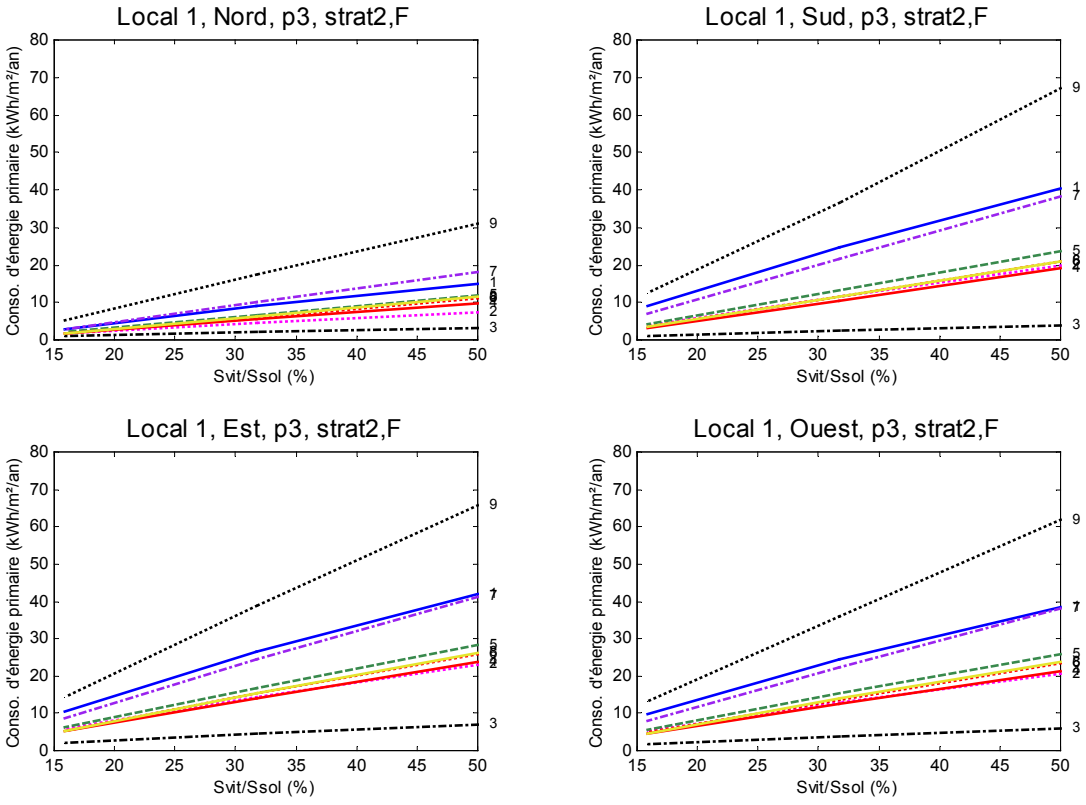
Graphique 40



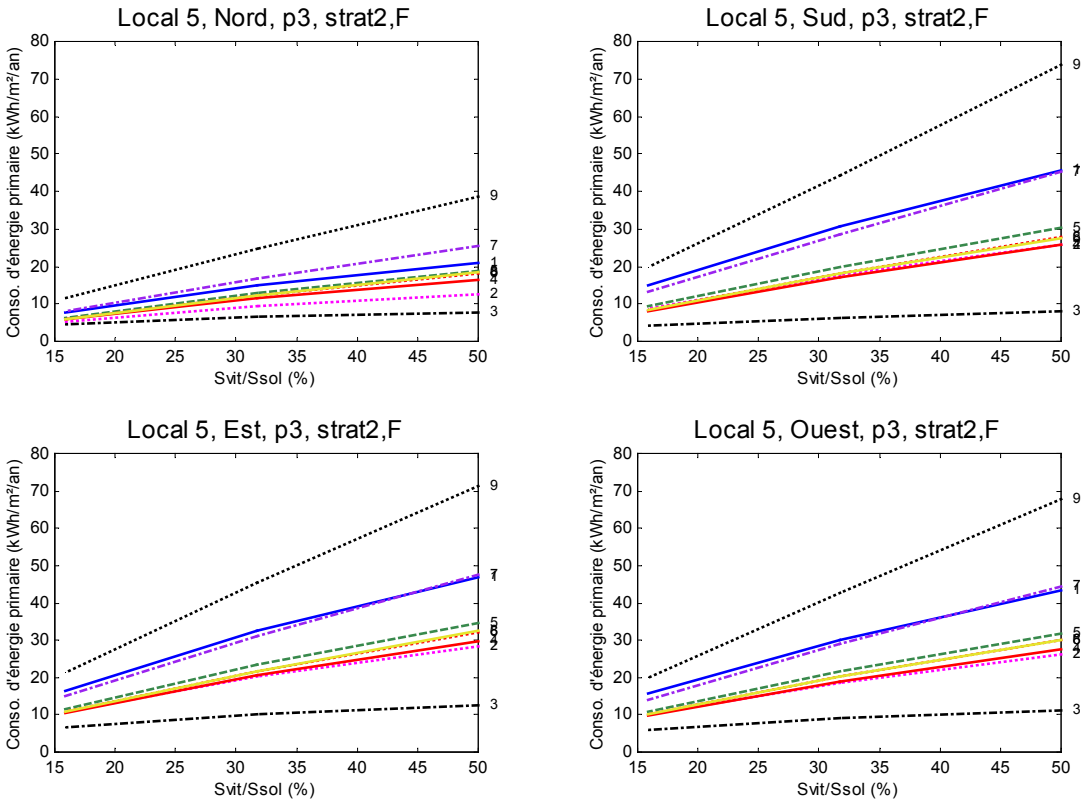
Graphique 41



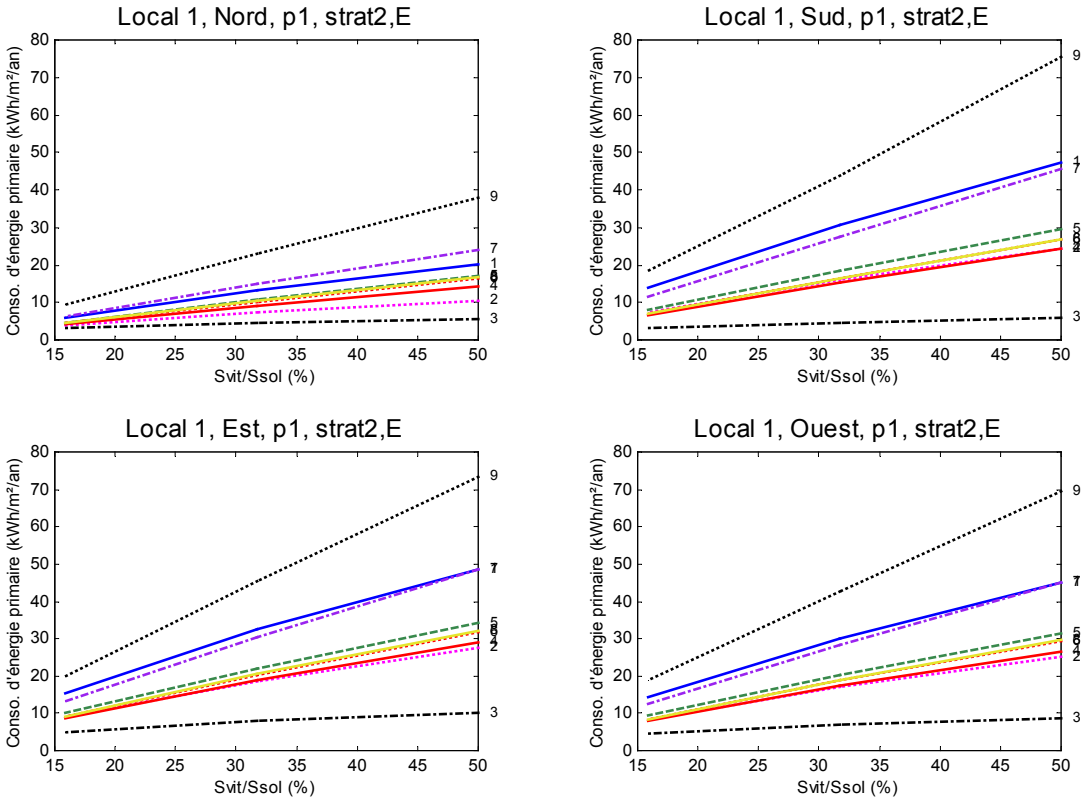
Graphique 42



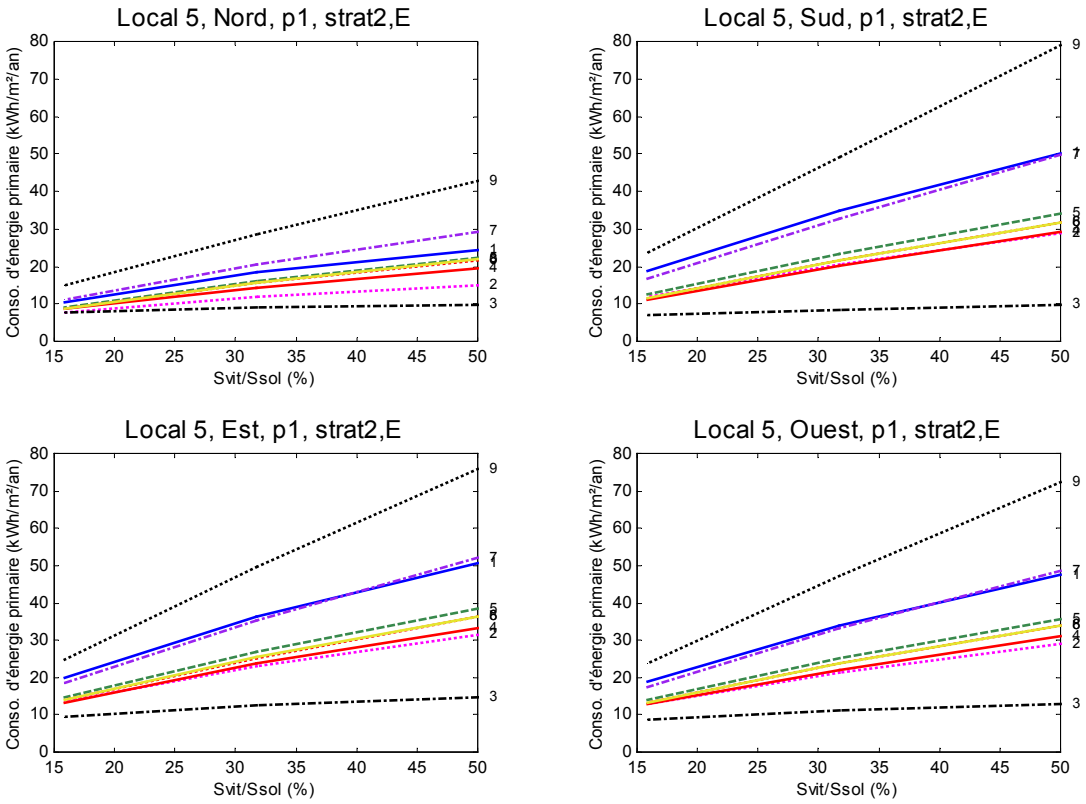
Graphique 43



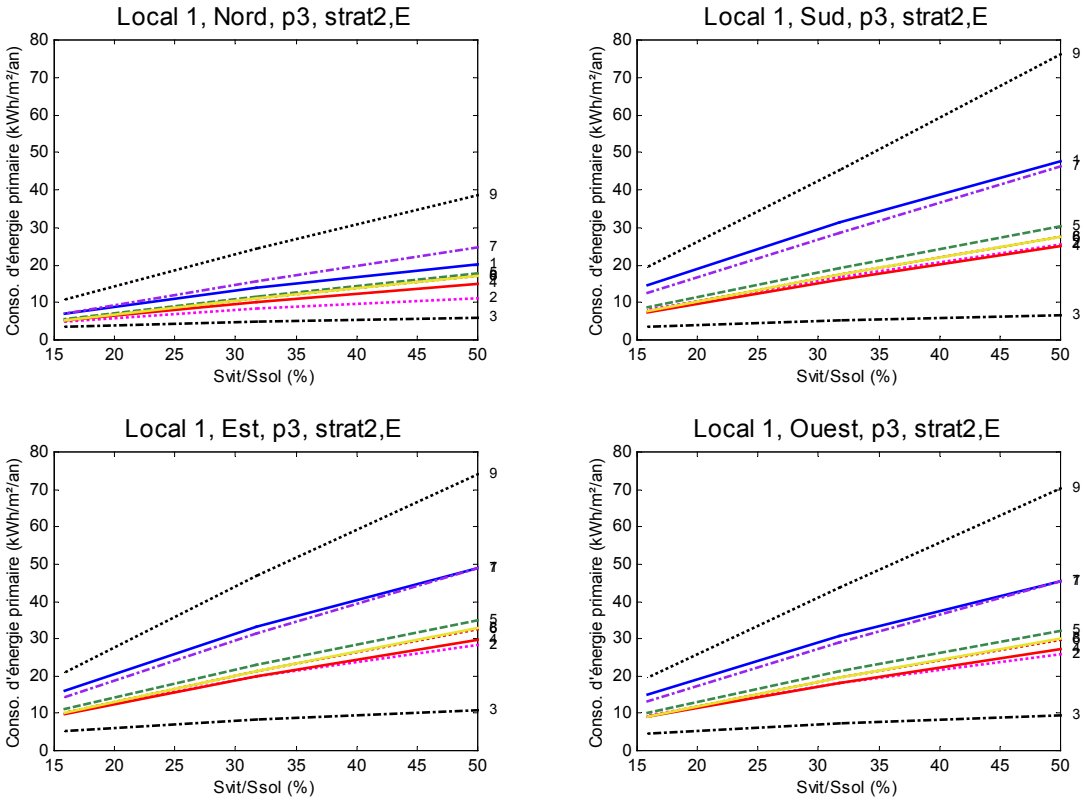
Graphique 44



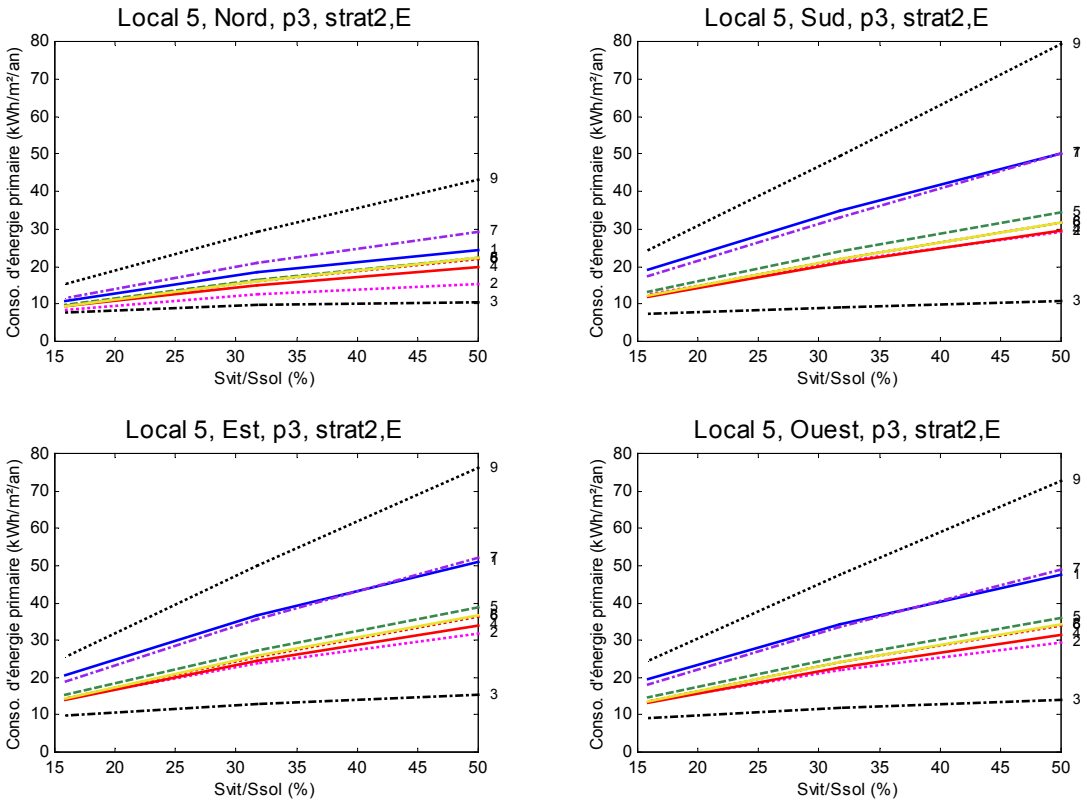
Graphique 45



Graphique 46

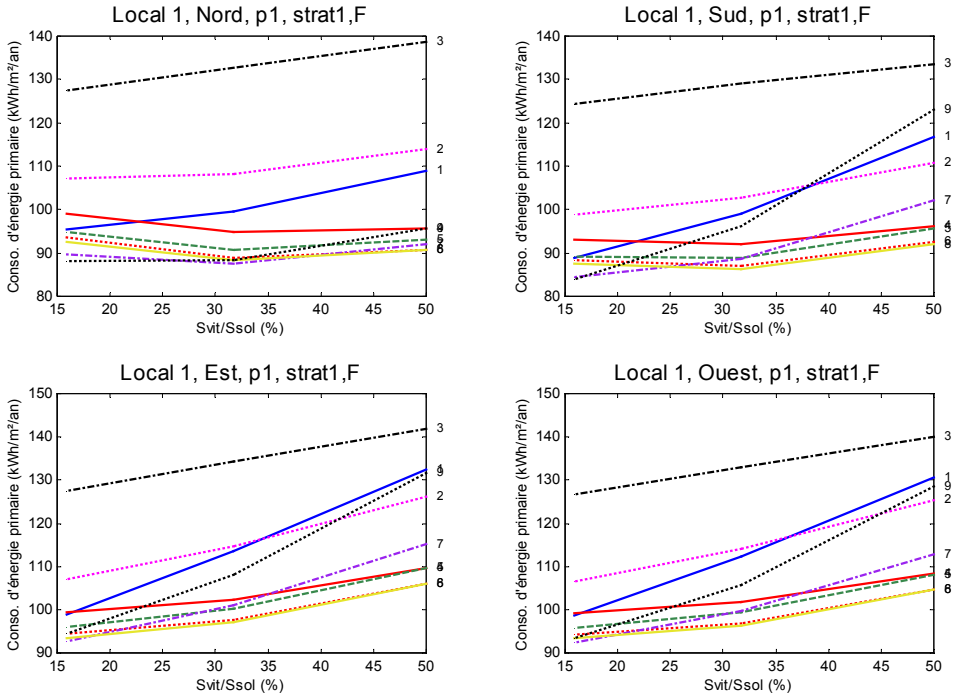


Graphique 47

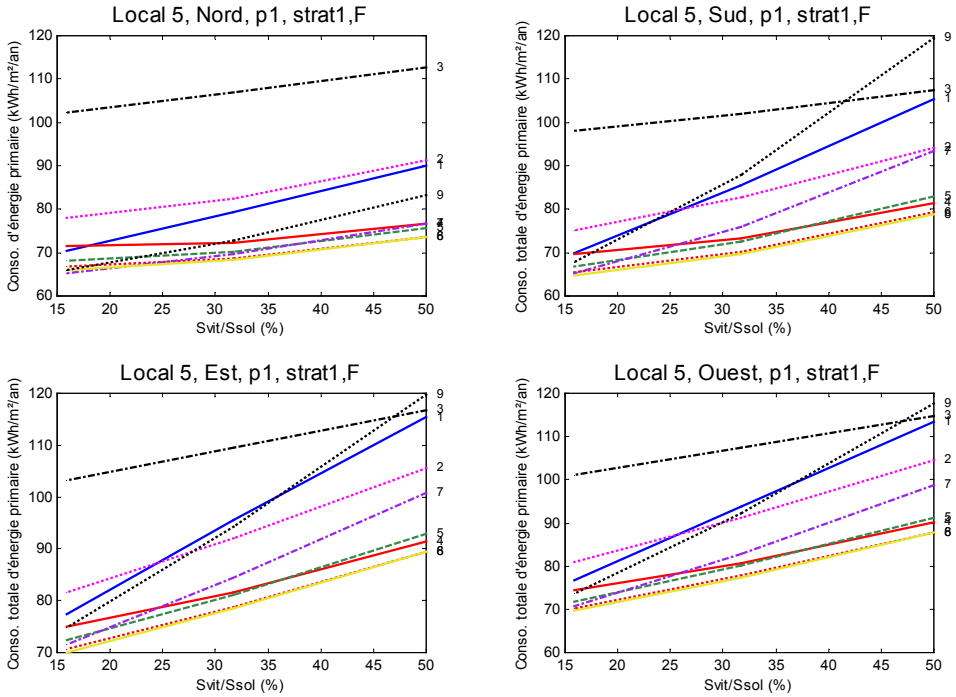


Graphique 48

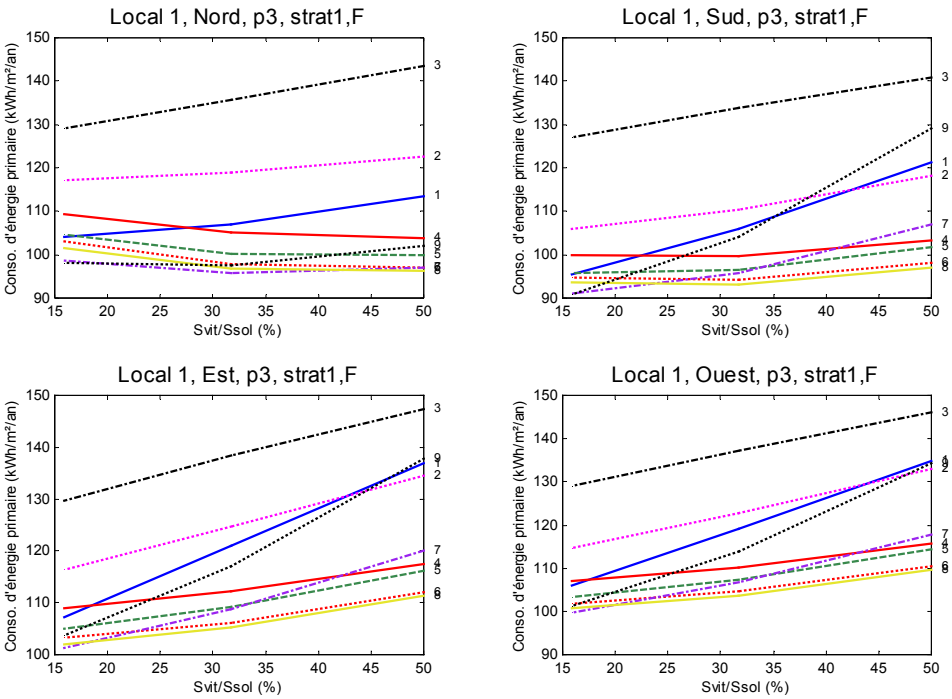
3. Influence de la taille de la surface vitrée sur la consommation totale d'énergie primaire



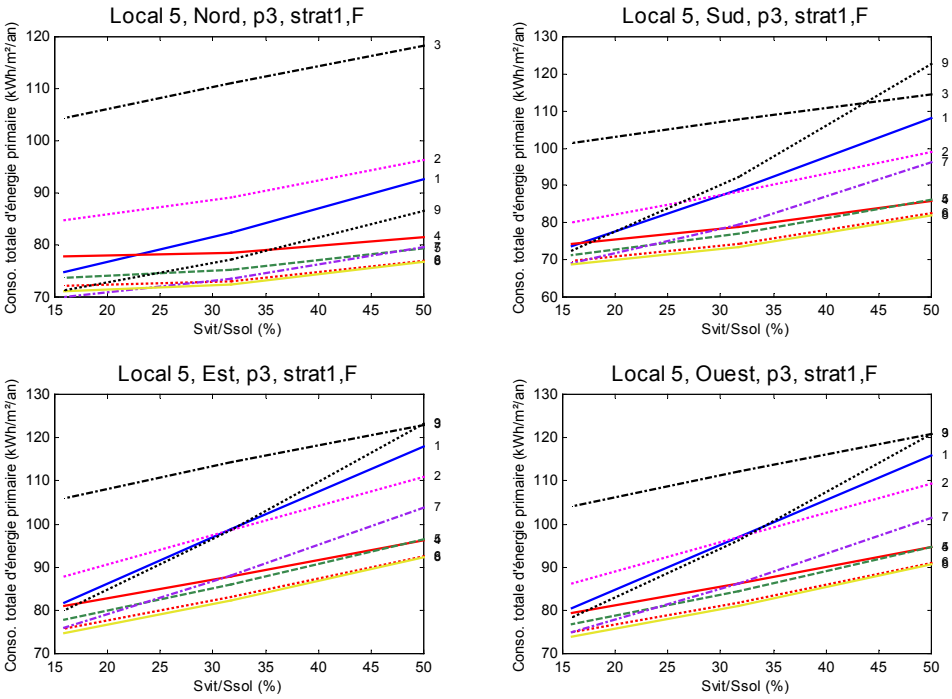
Graphique 49



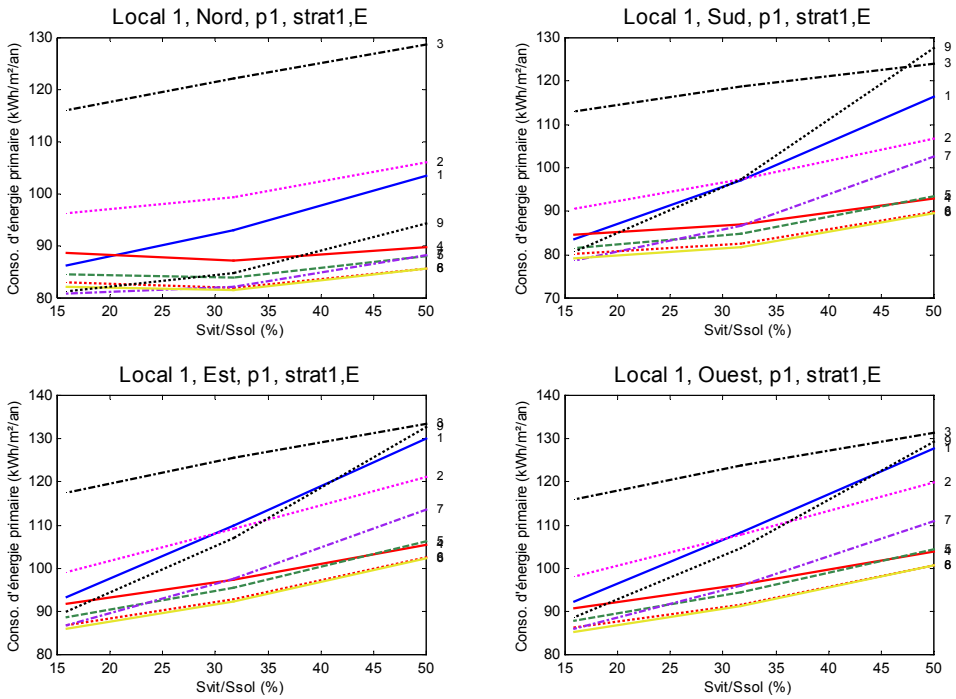
Graphique 50



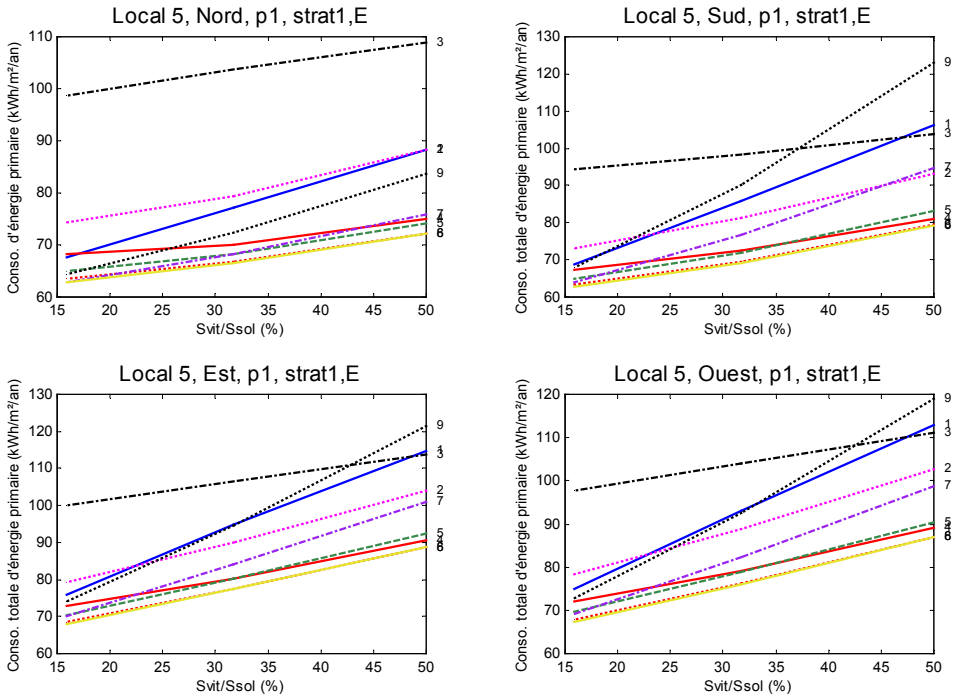
Graphique 51



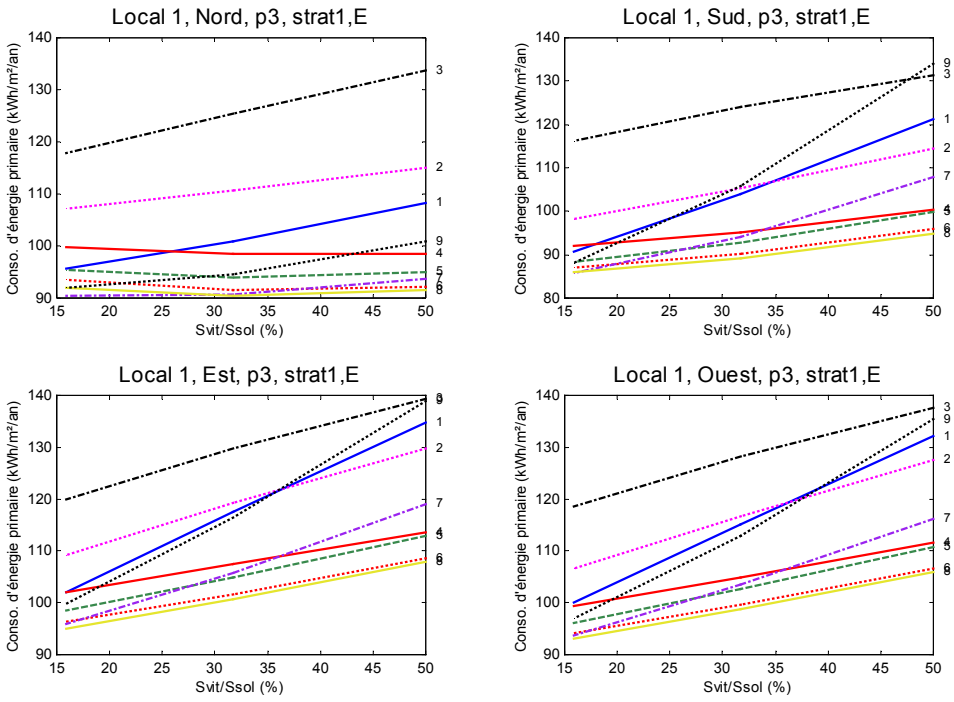
Graphique 52



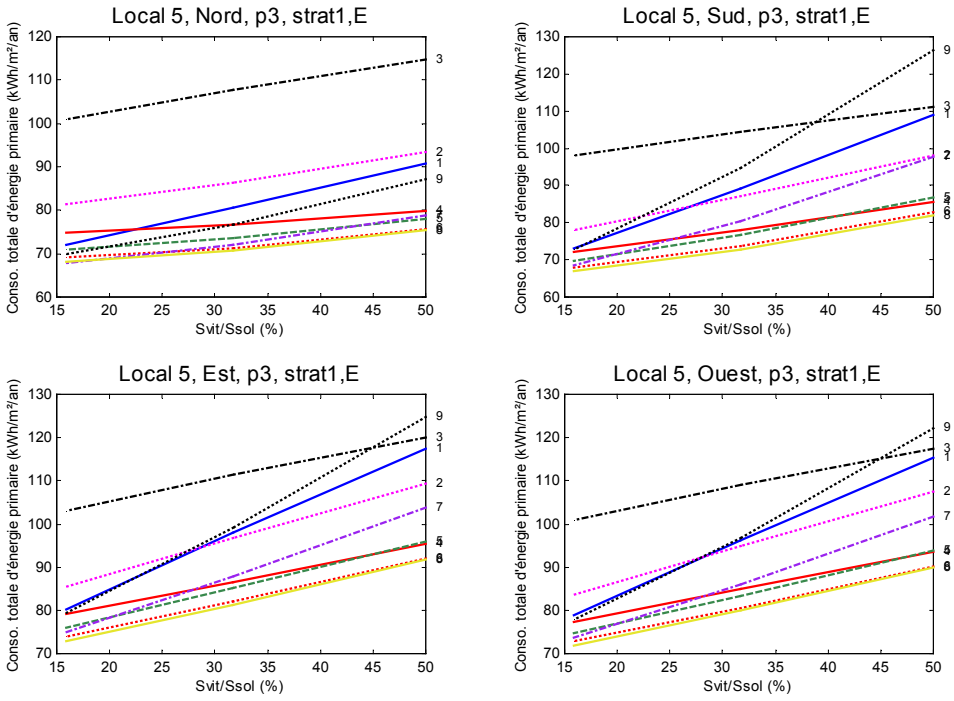
Graphique 53



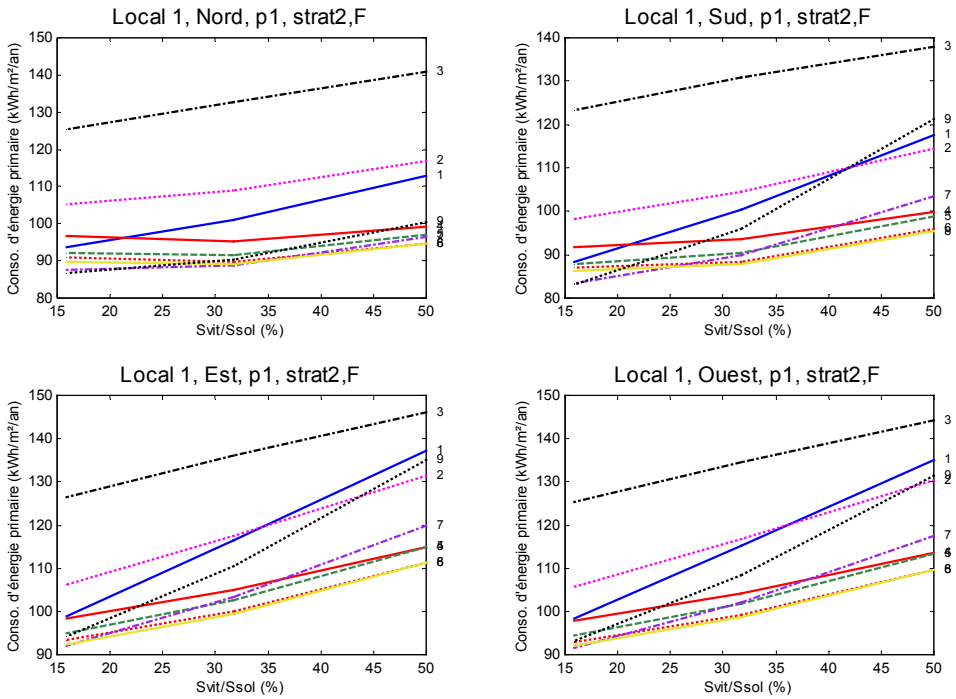
Graphique 54



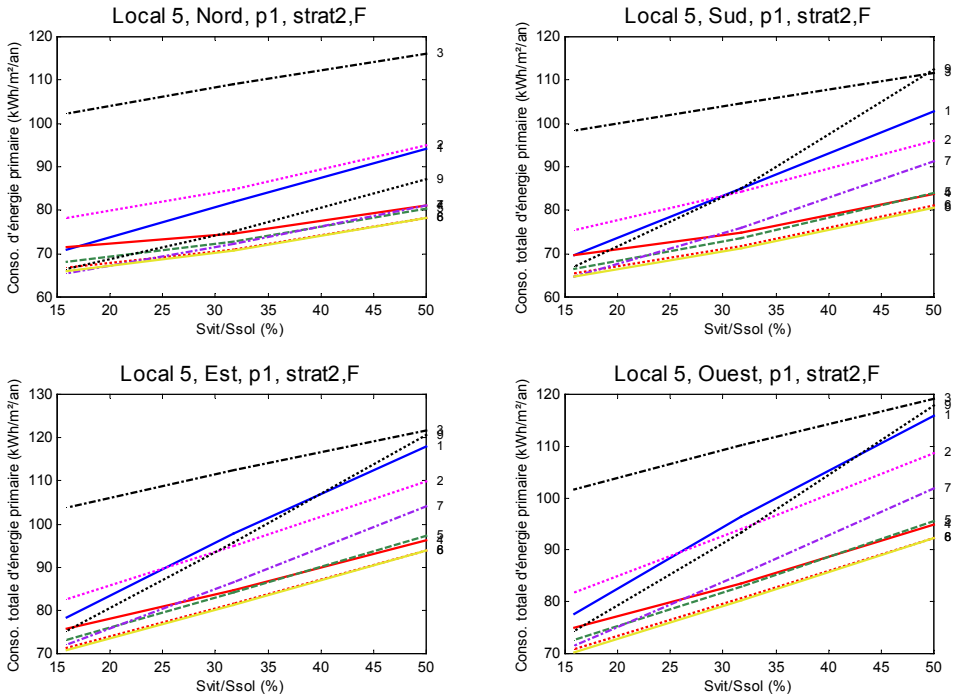
Graphique 55



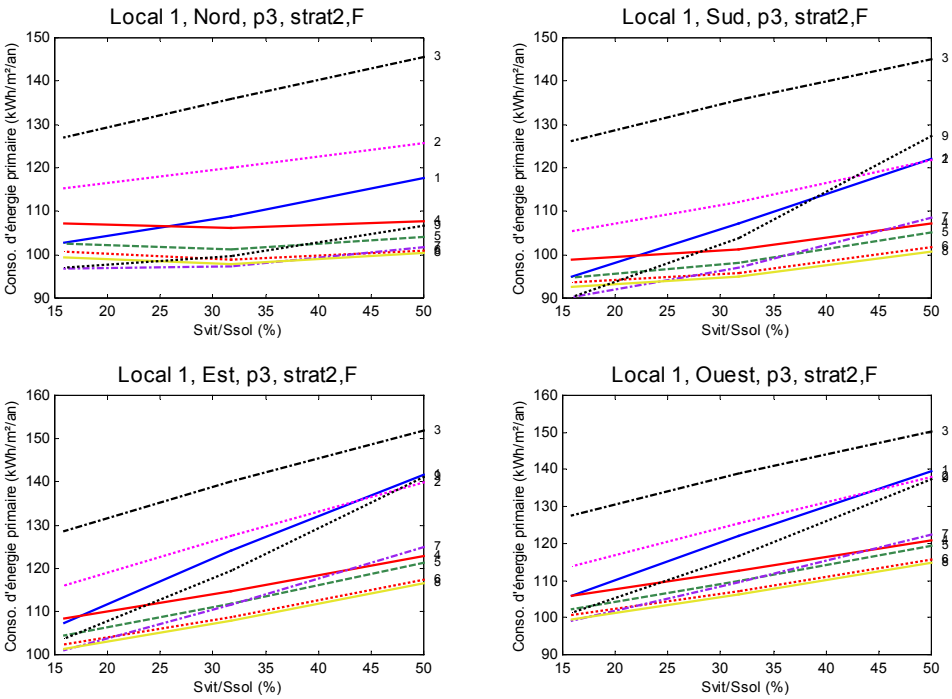
Graphique 56



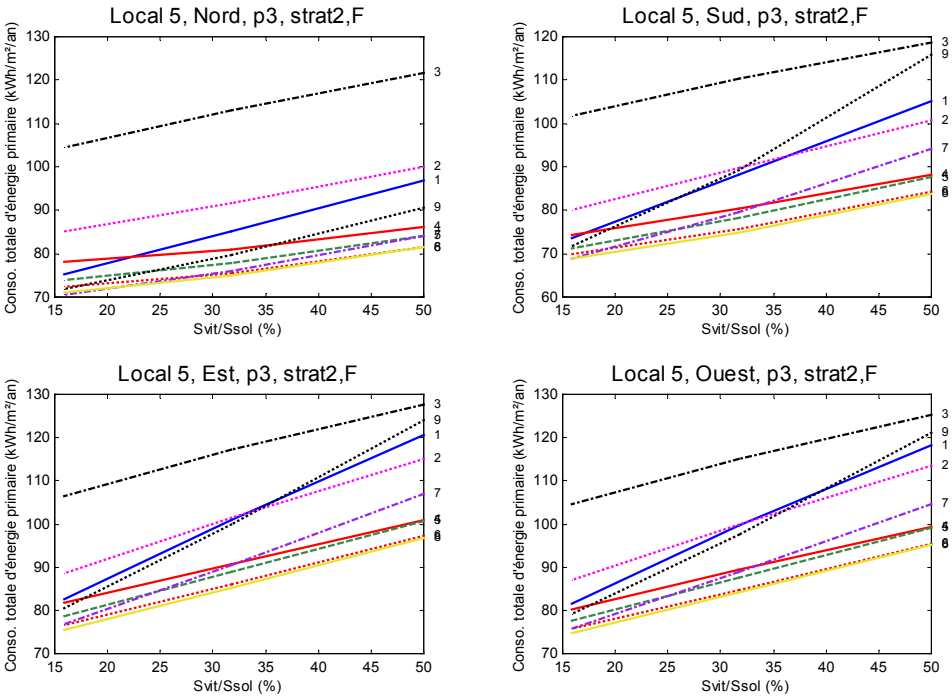
Graphique 57



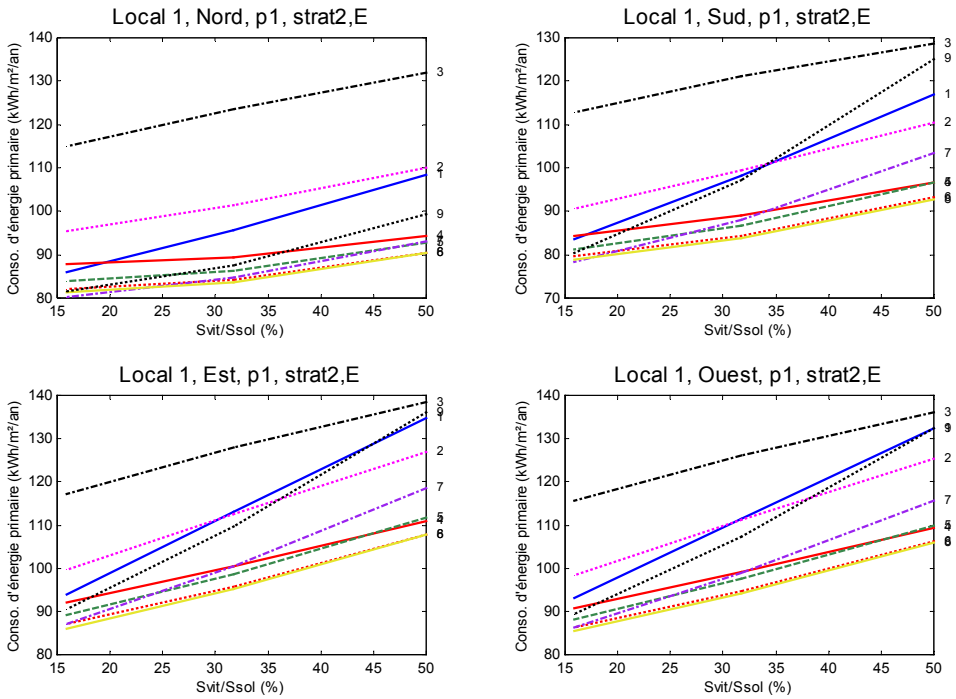
Graphique 58



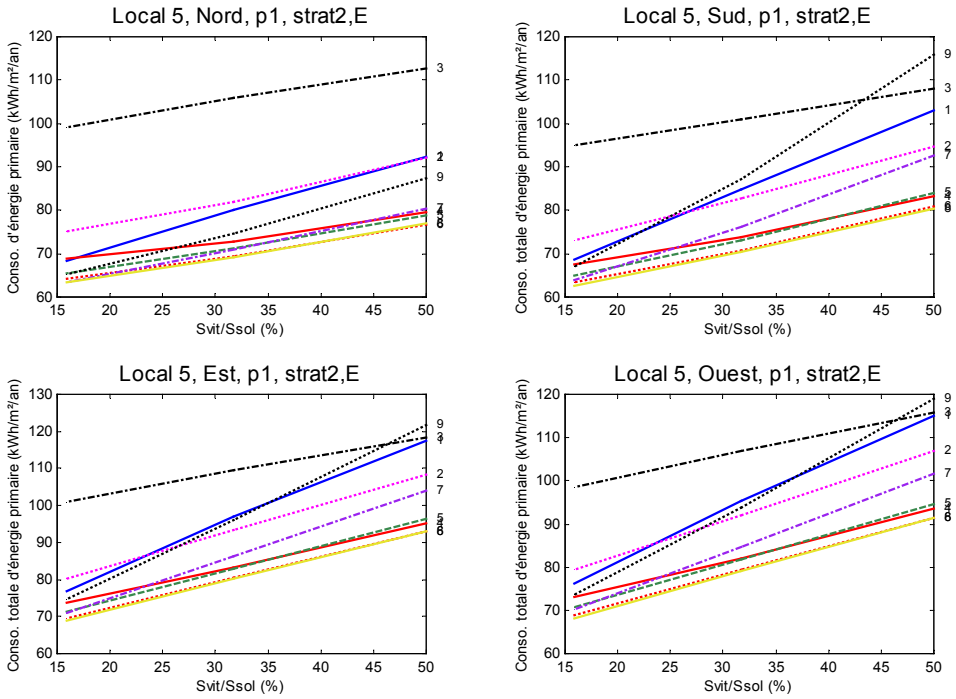
Graphique 59



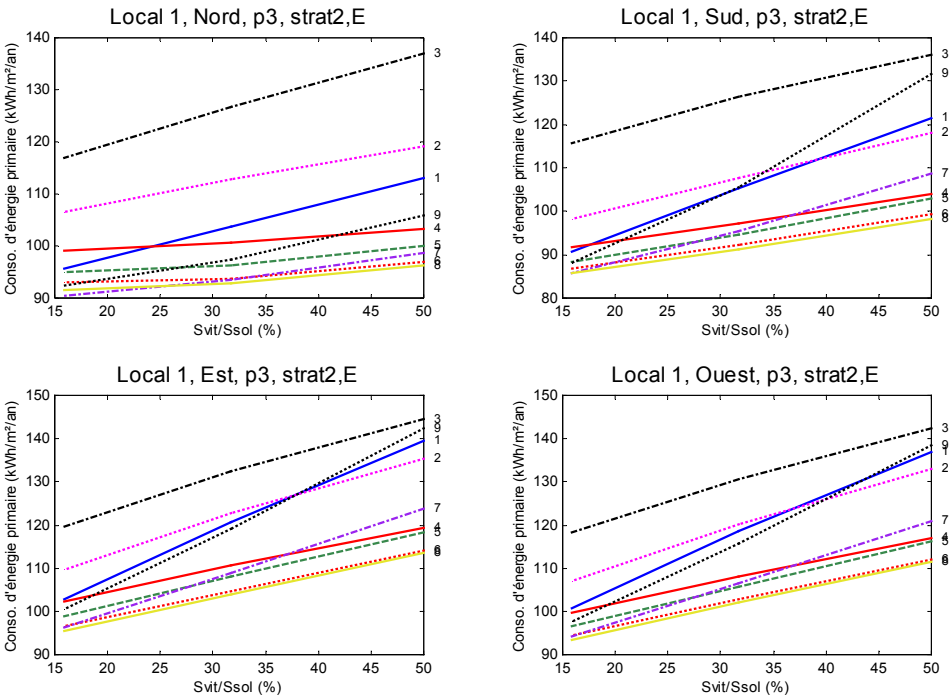
Graphique 60



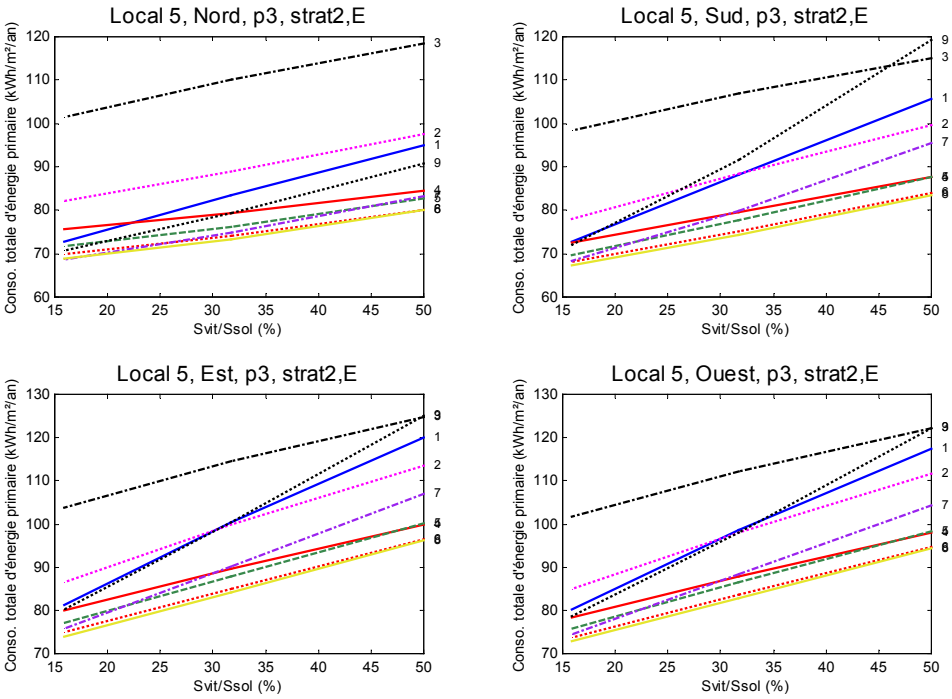
Graphique 61



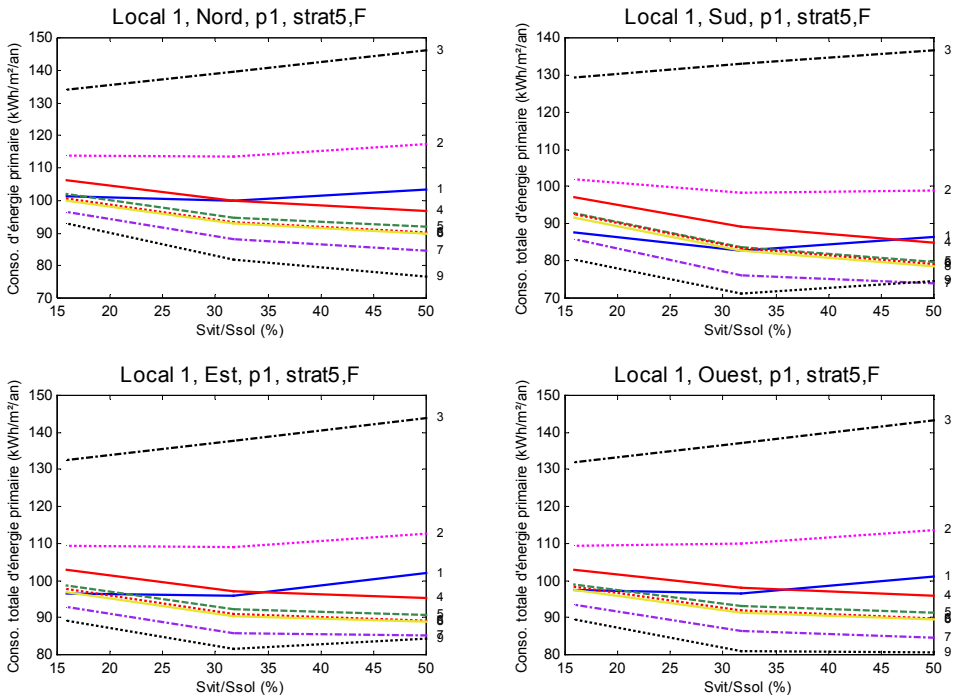
Graphique 62



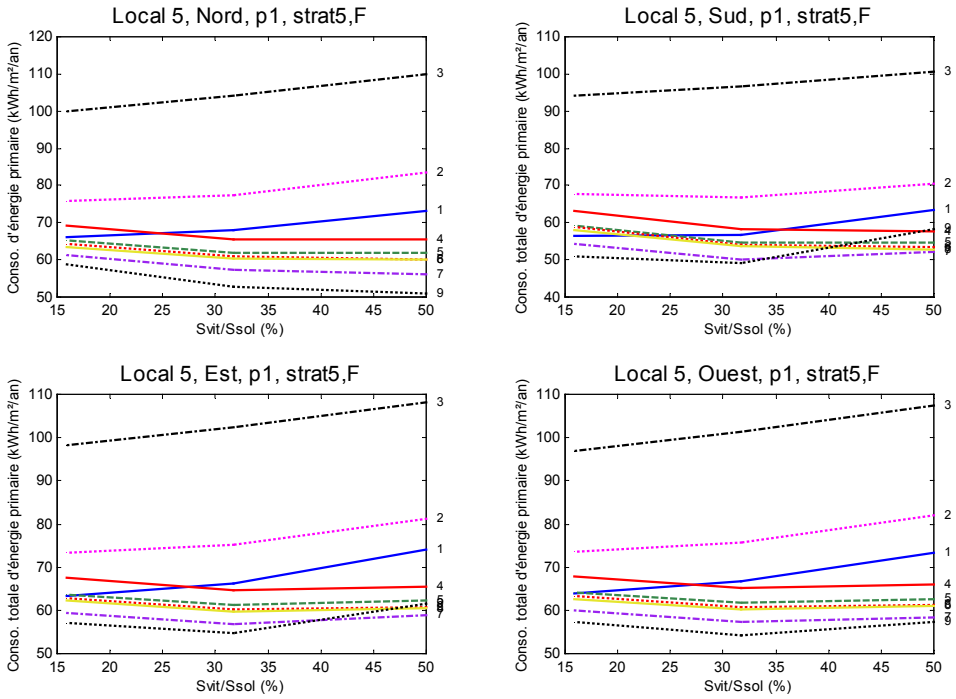
Graphique 63



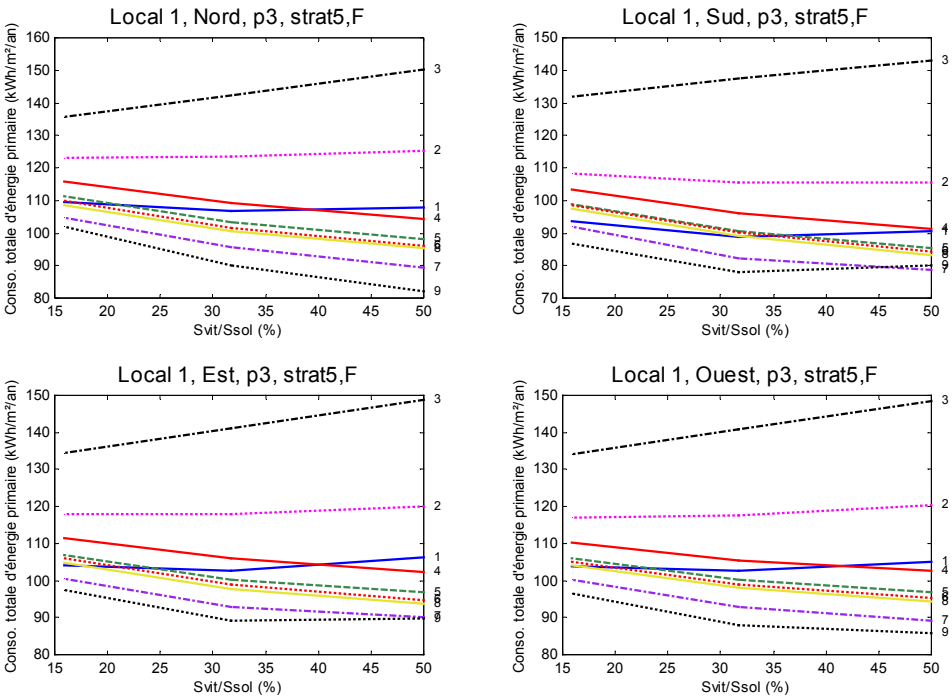
Graphique 64



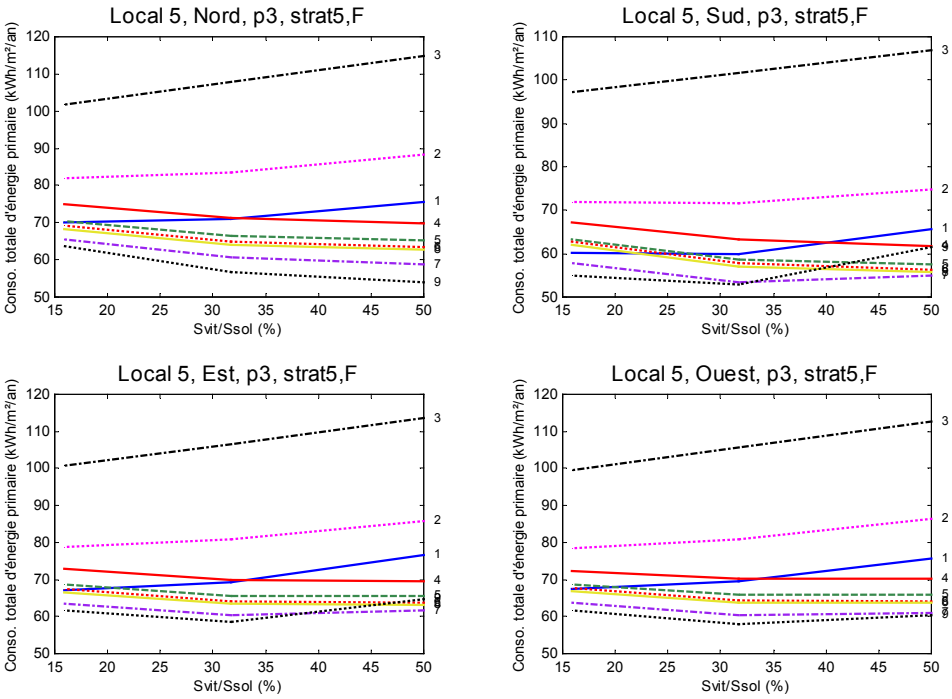
Graphique 65



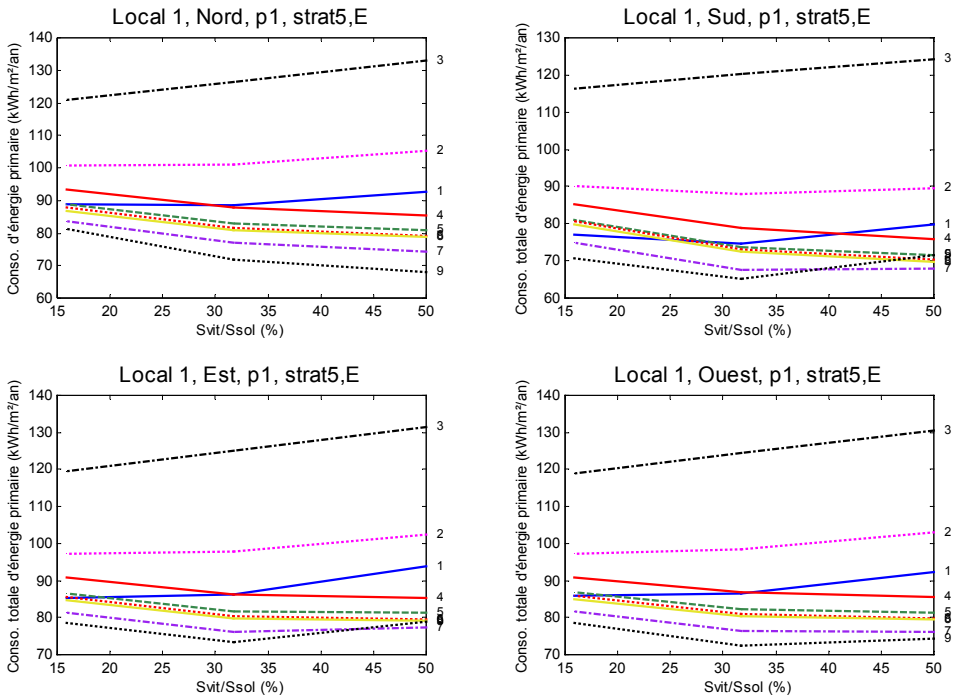
Graphique 66



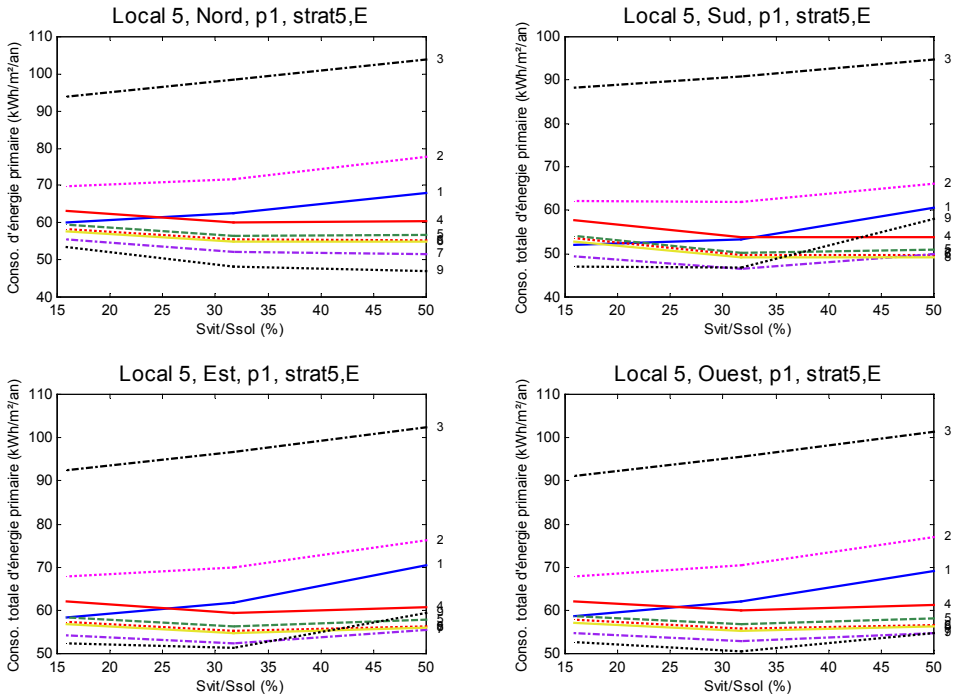
Graphique 67



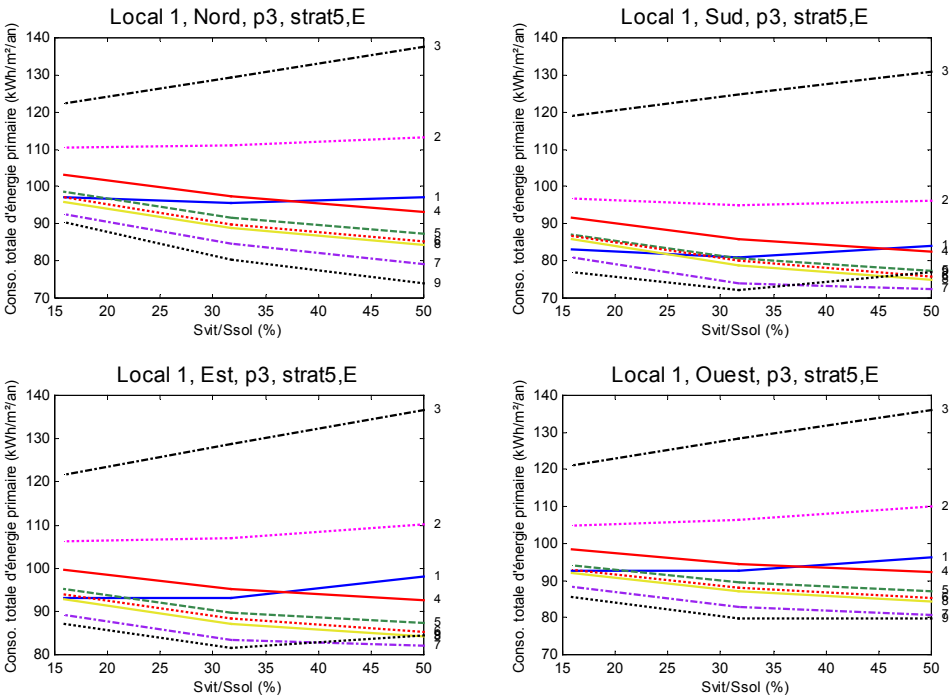
Graphique 68



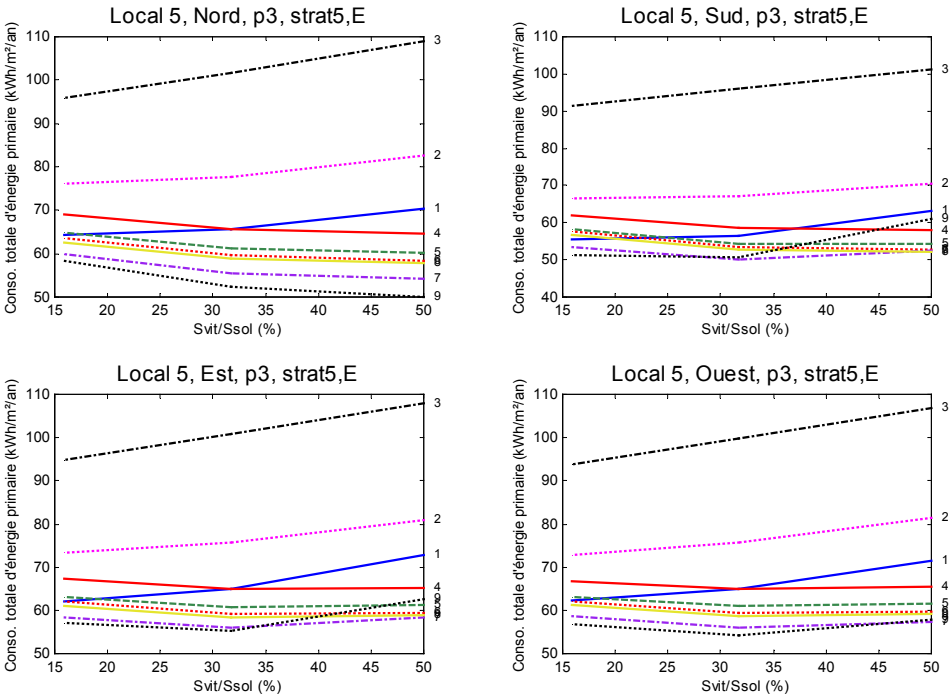
Graphique 69



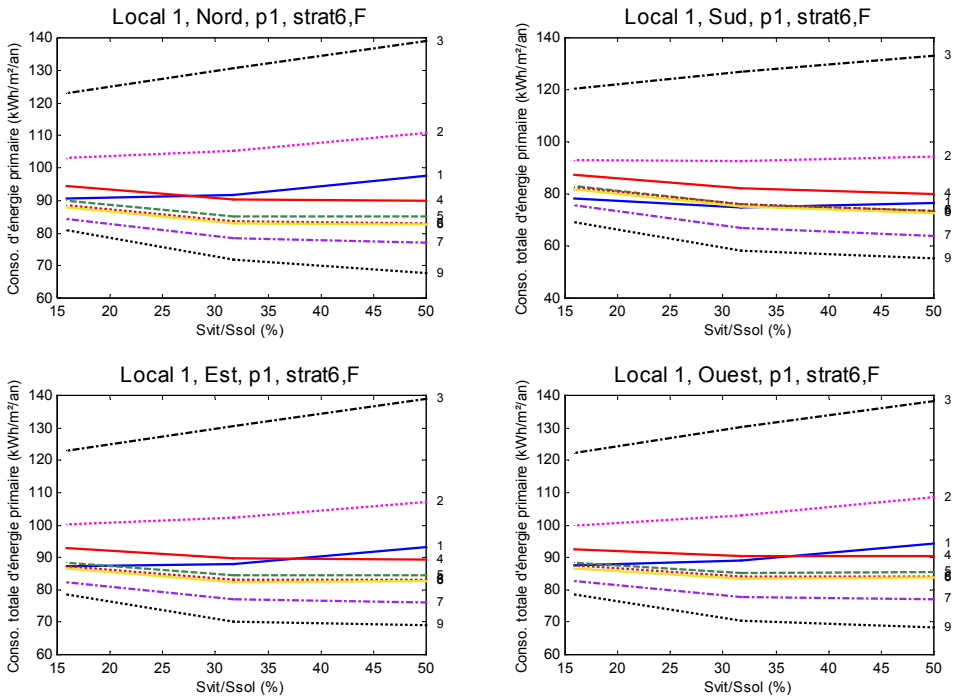
Graphique 70



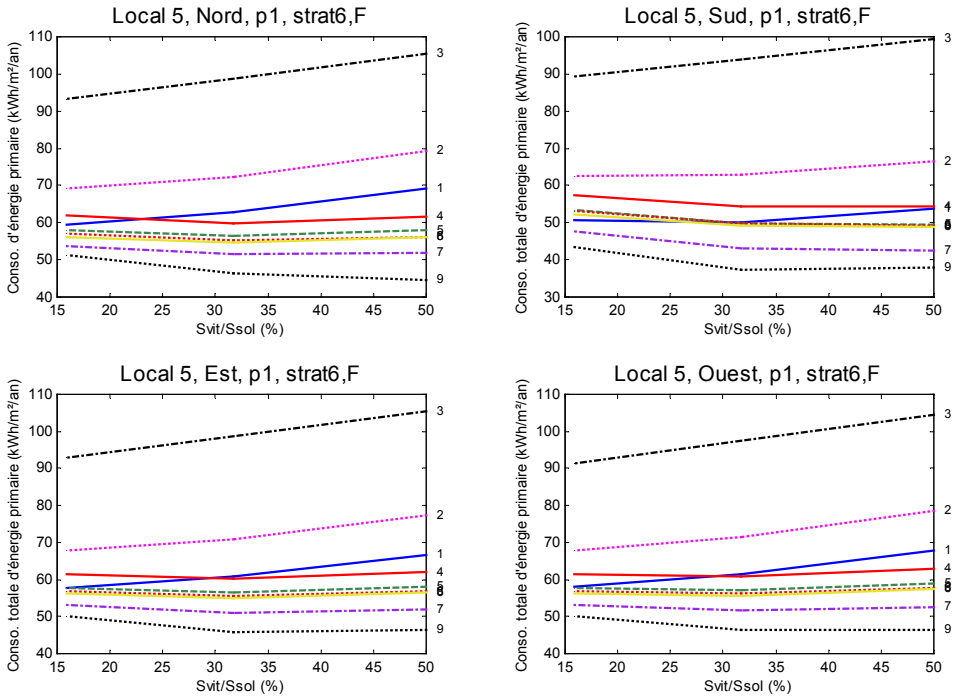
Graphique 71



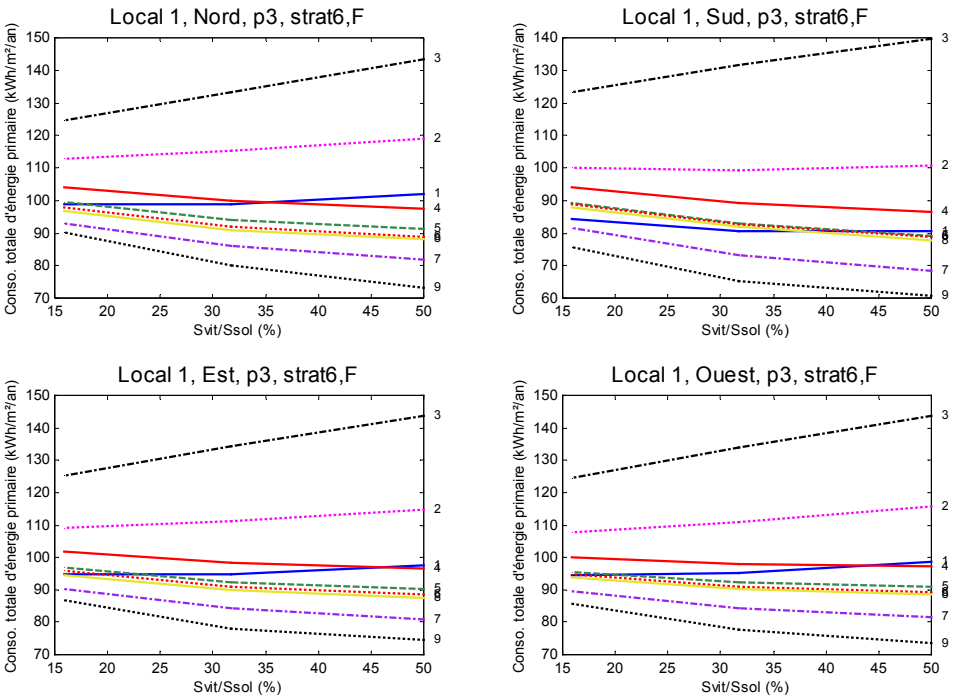
Graphique 72



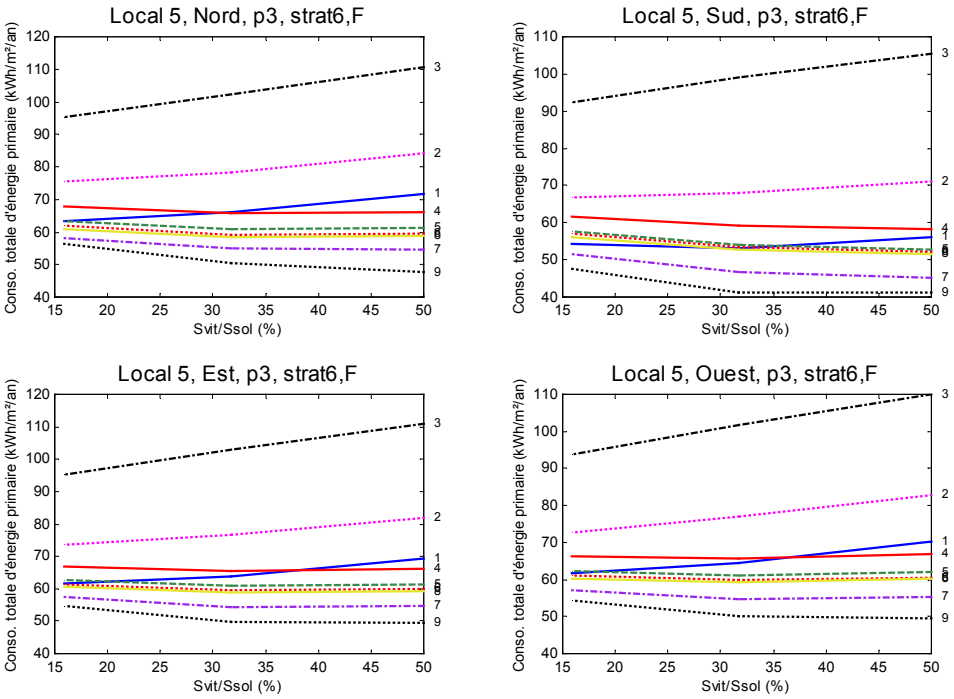
Graphique 73



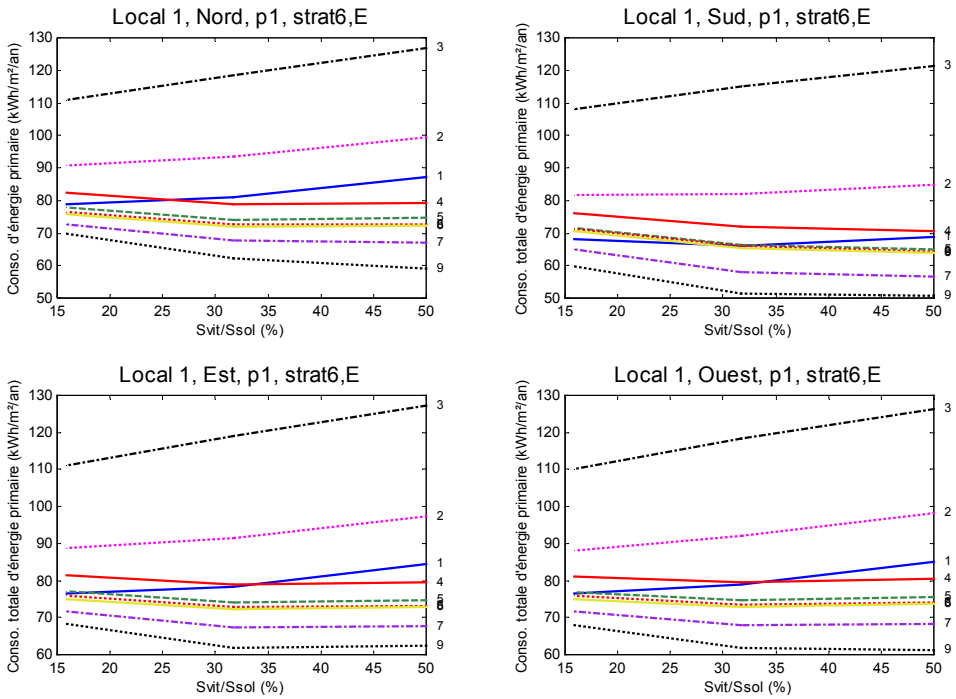
Graphique 74



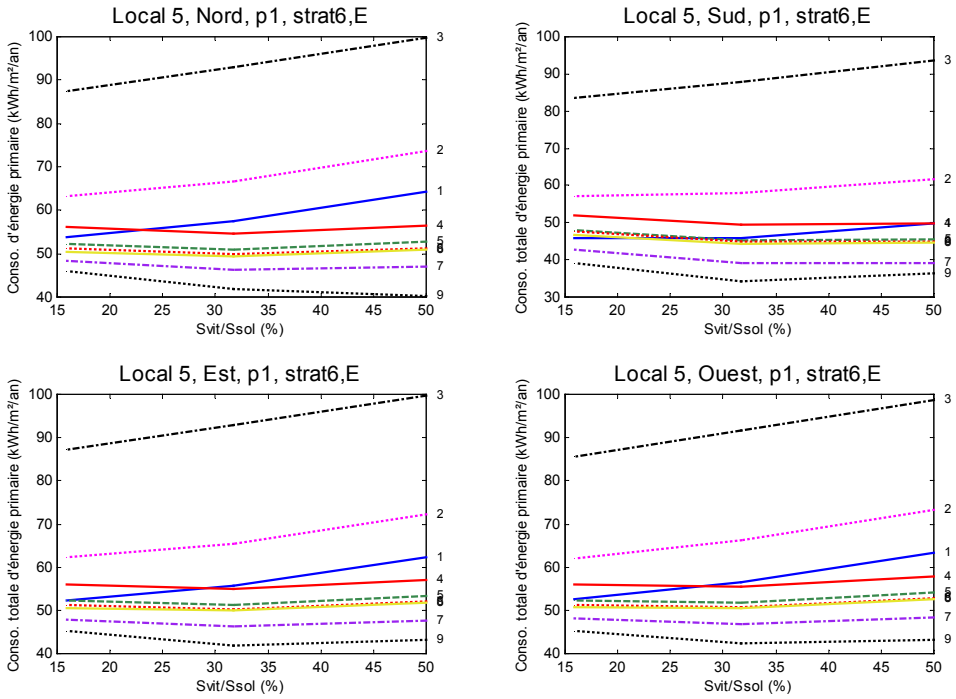
Graphique 75



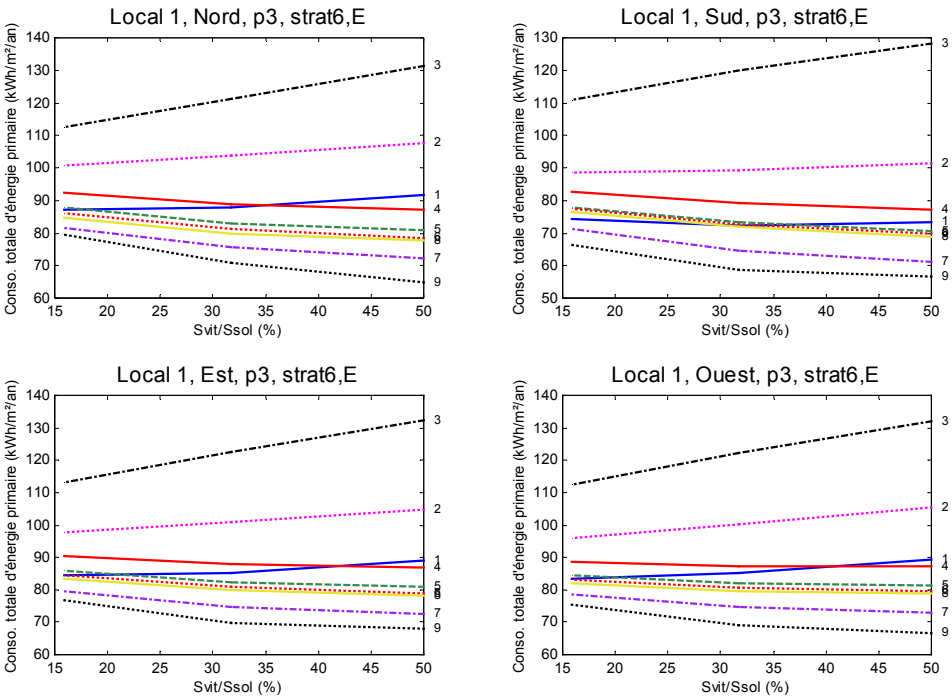
Graphique 76



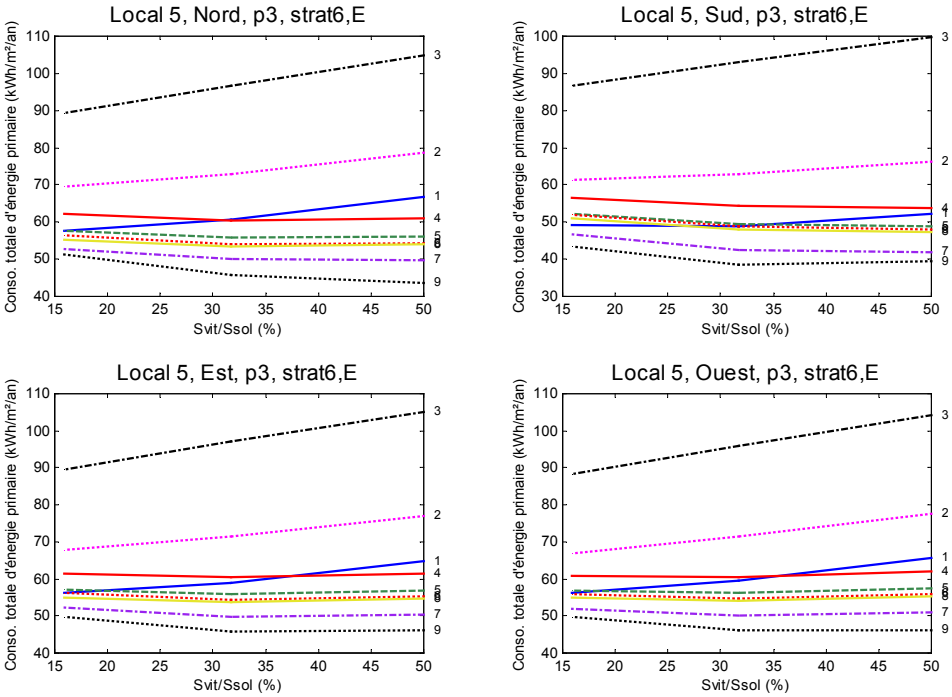
Graphique 77



Graphique 78

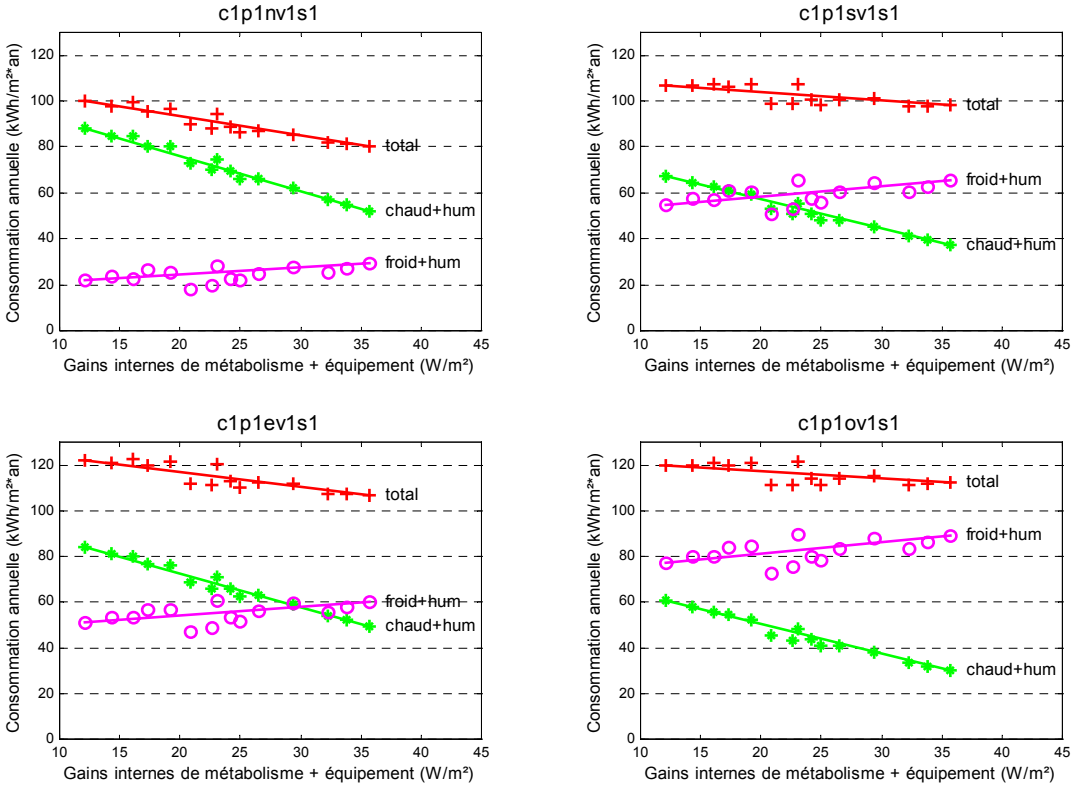


Graphique 79

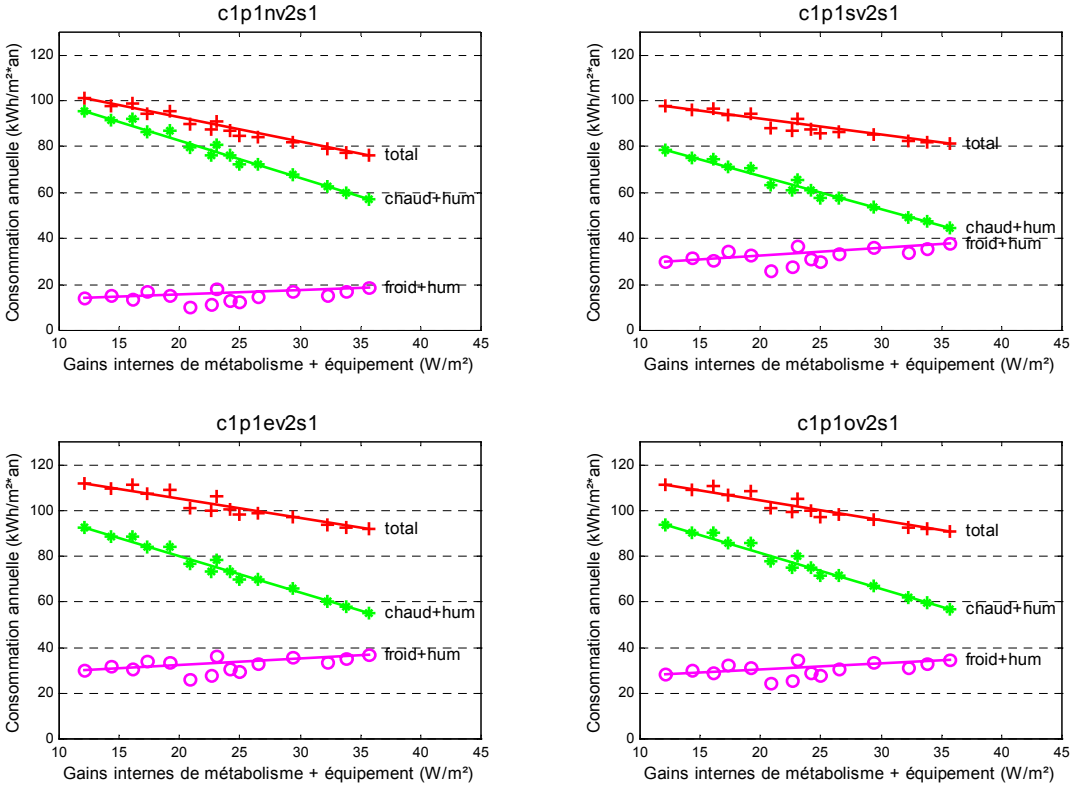


Graphique 80

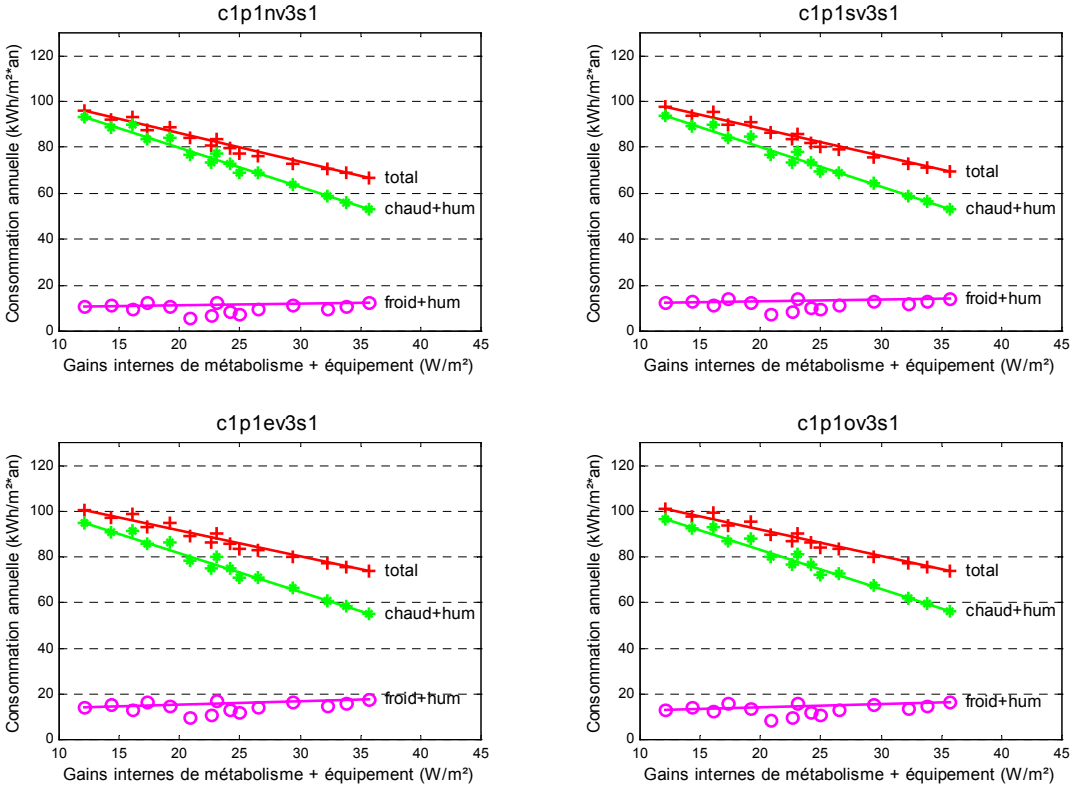
4. Influence des gains internes sur les consommations de chauffage et de refroidissement



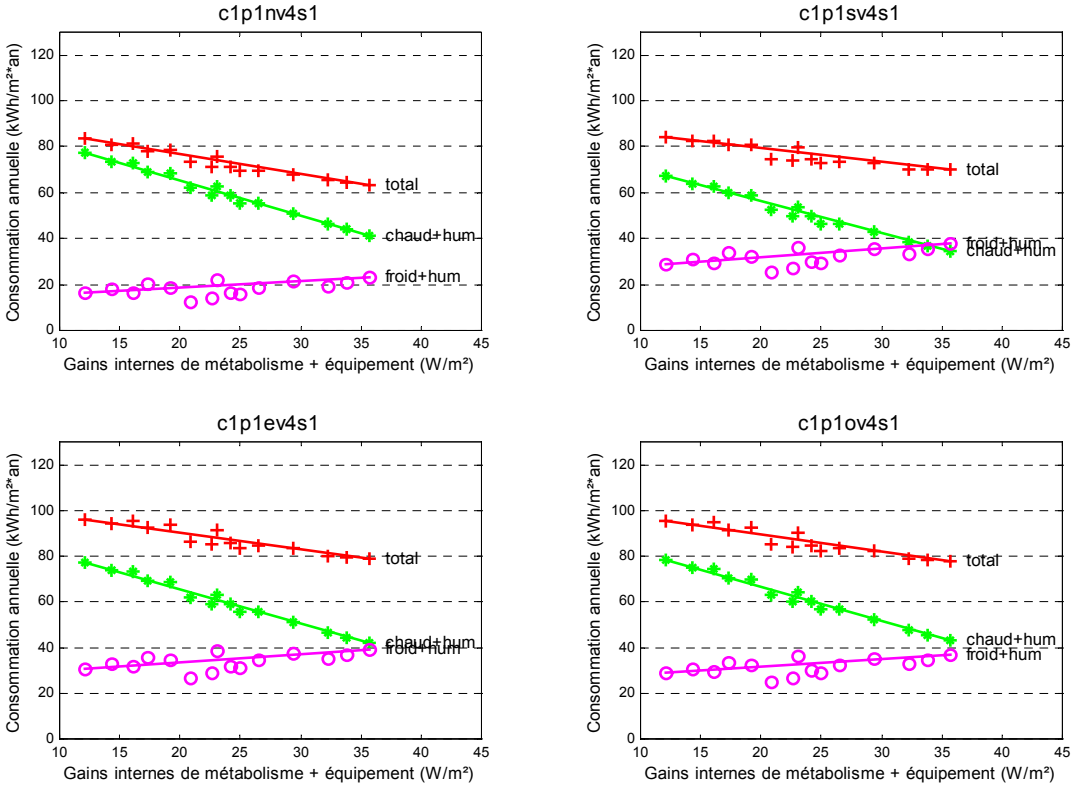
Graphique 81



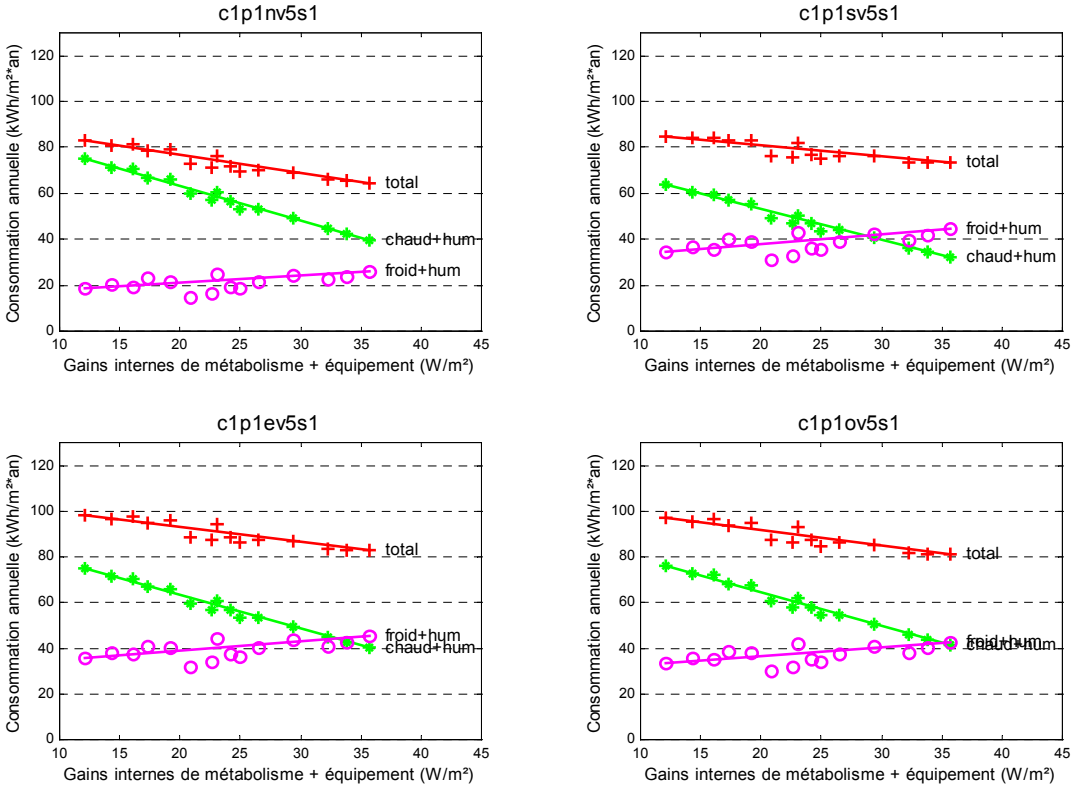
Graphique 82



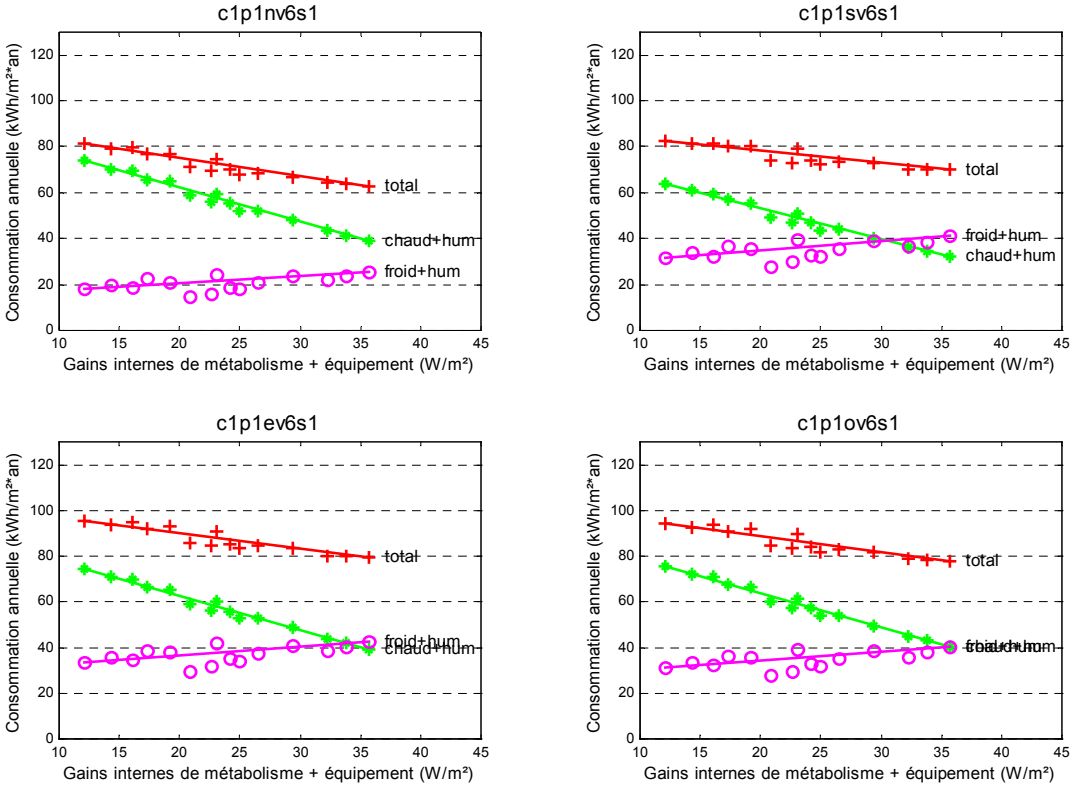
Graphique 83



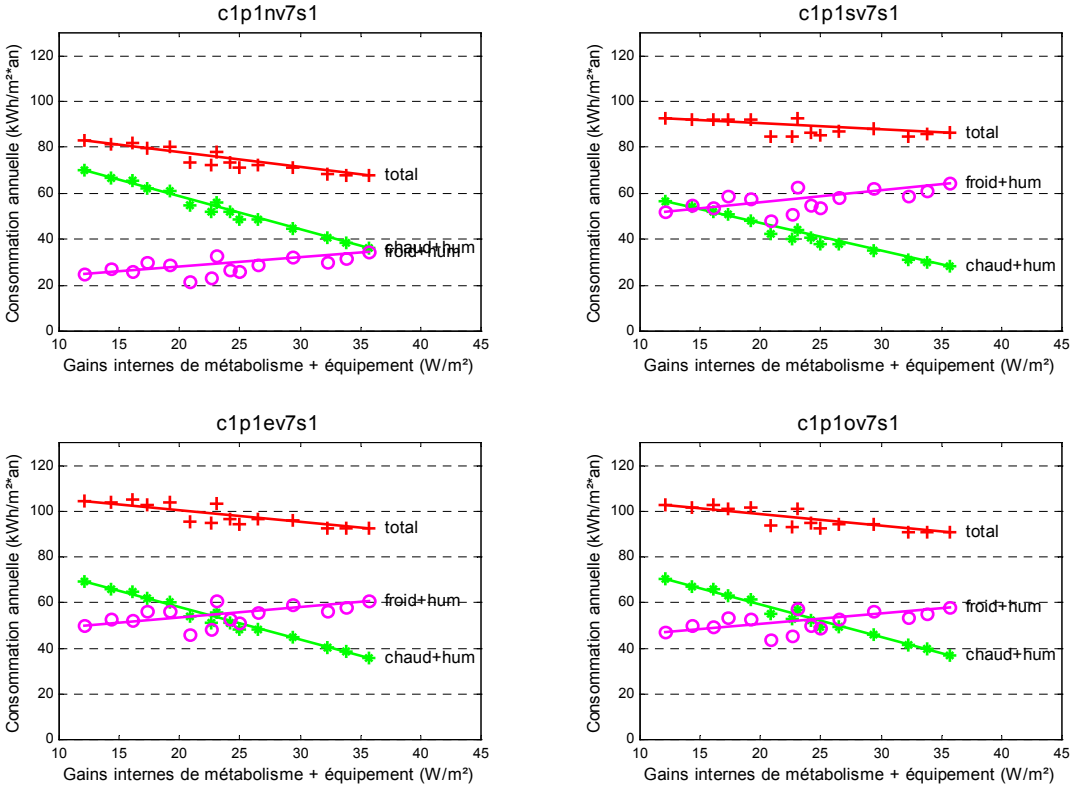
Graphique 84



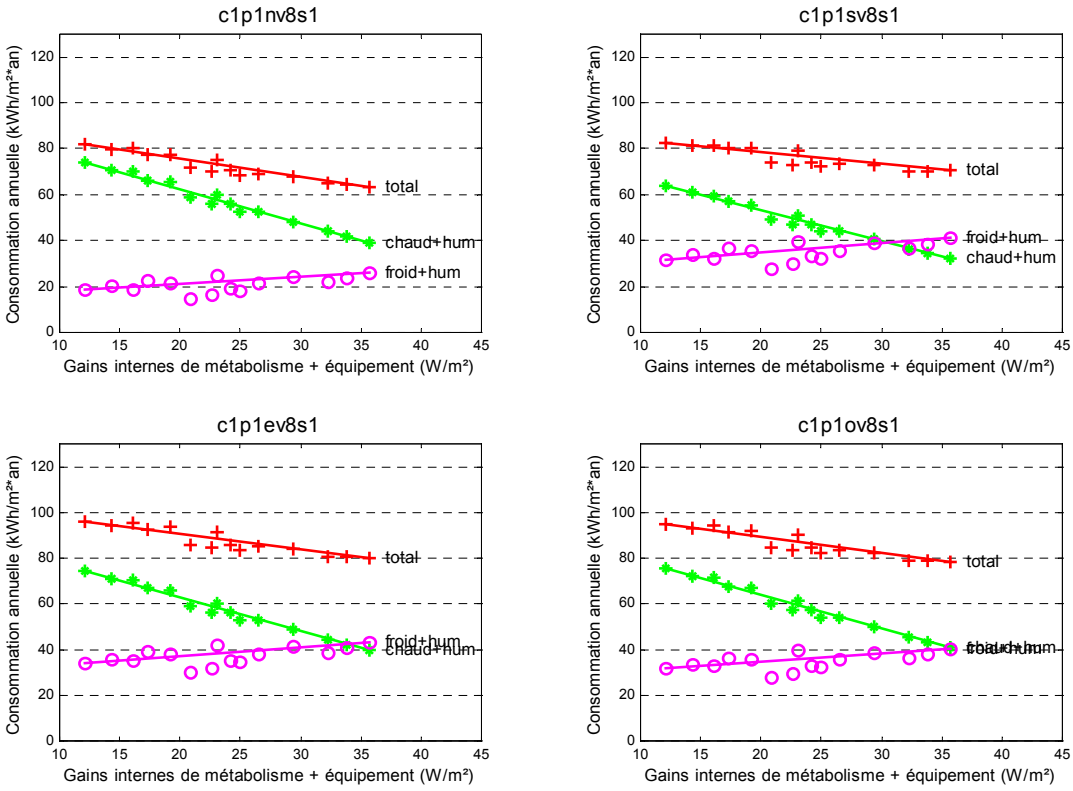
Graphique 85



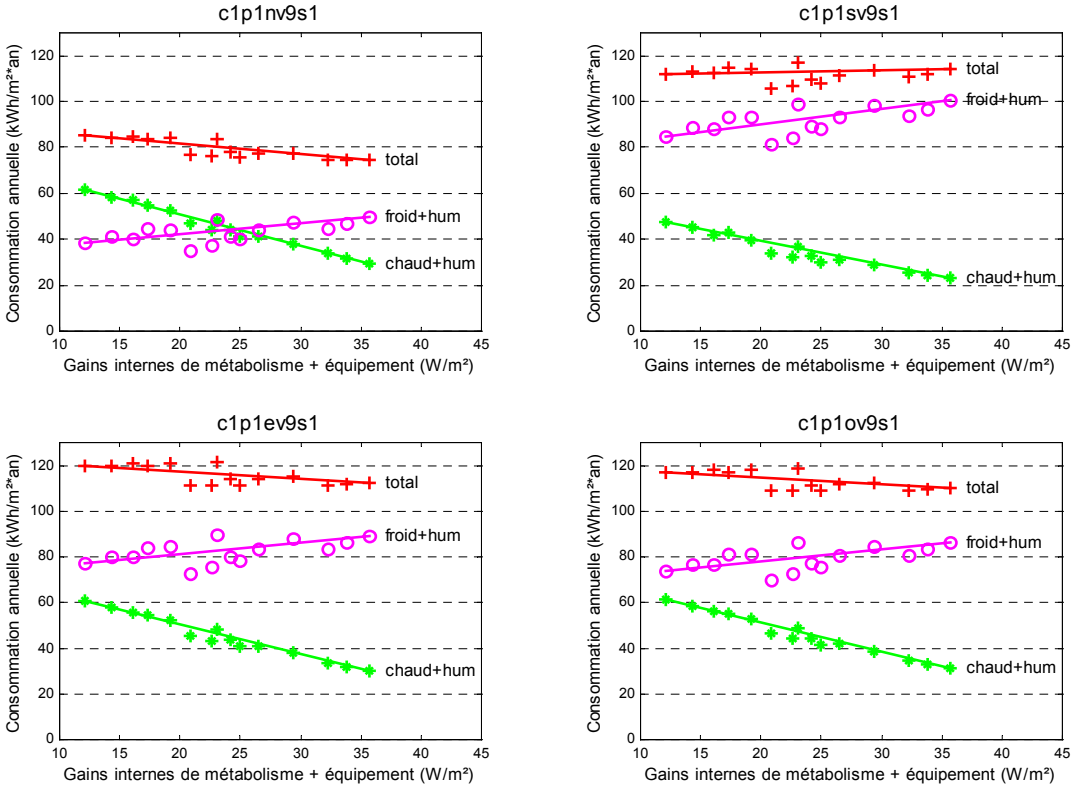
Graphique 86



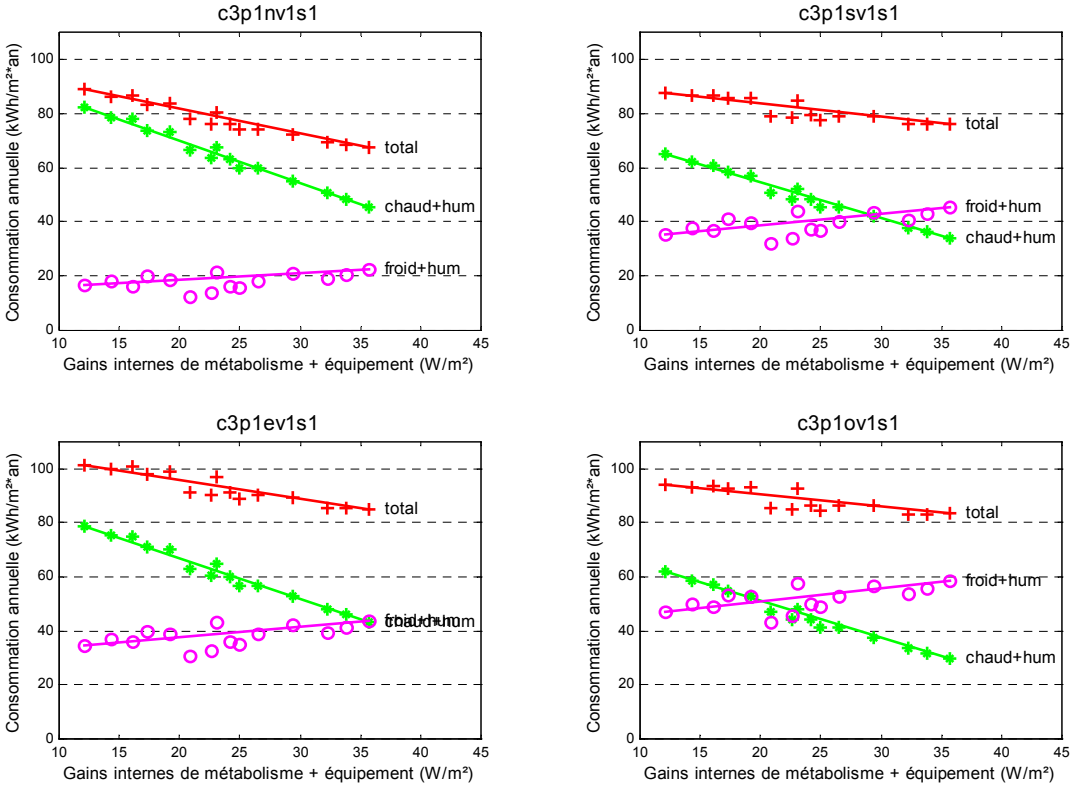
Graphique 87



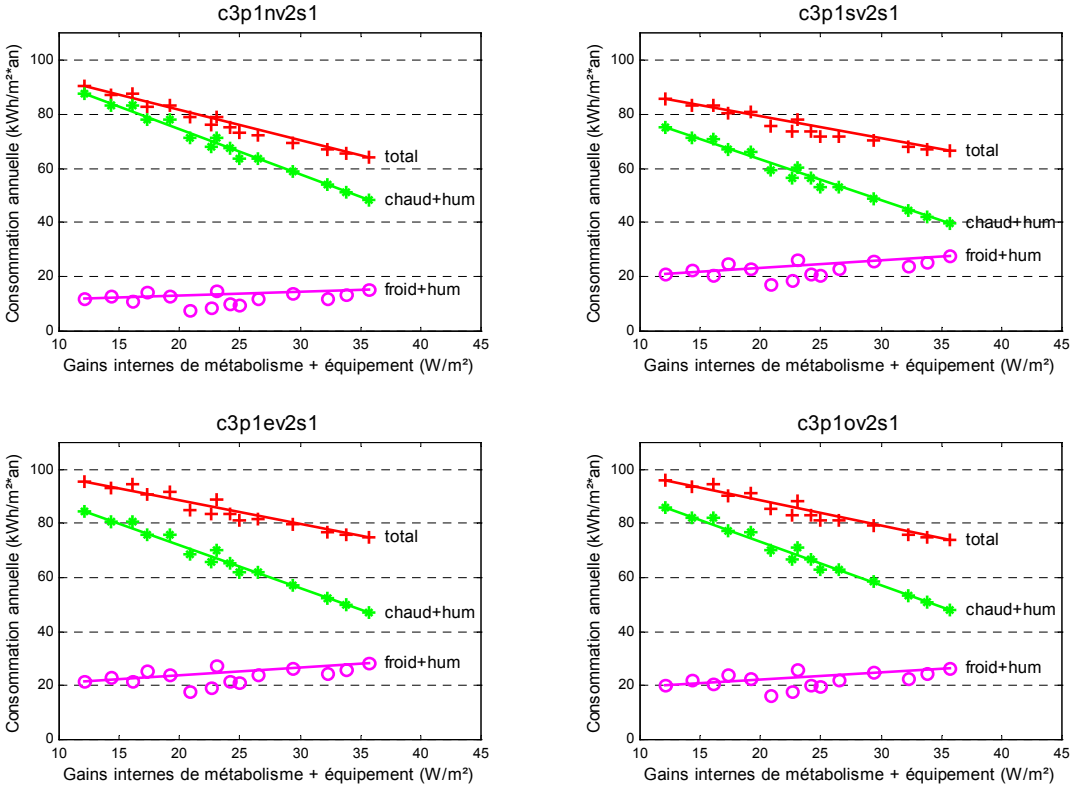
Graphique 88



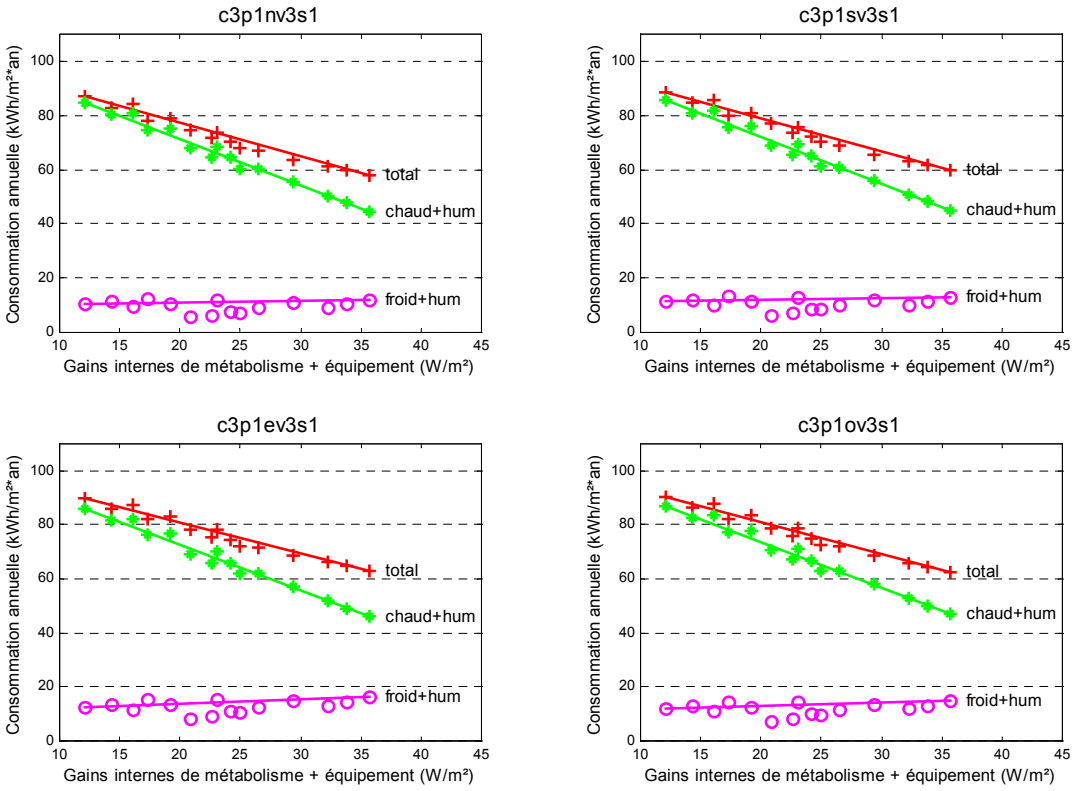
Graphique 89



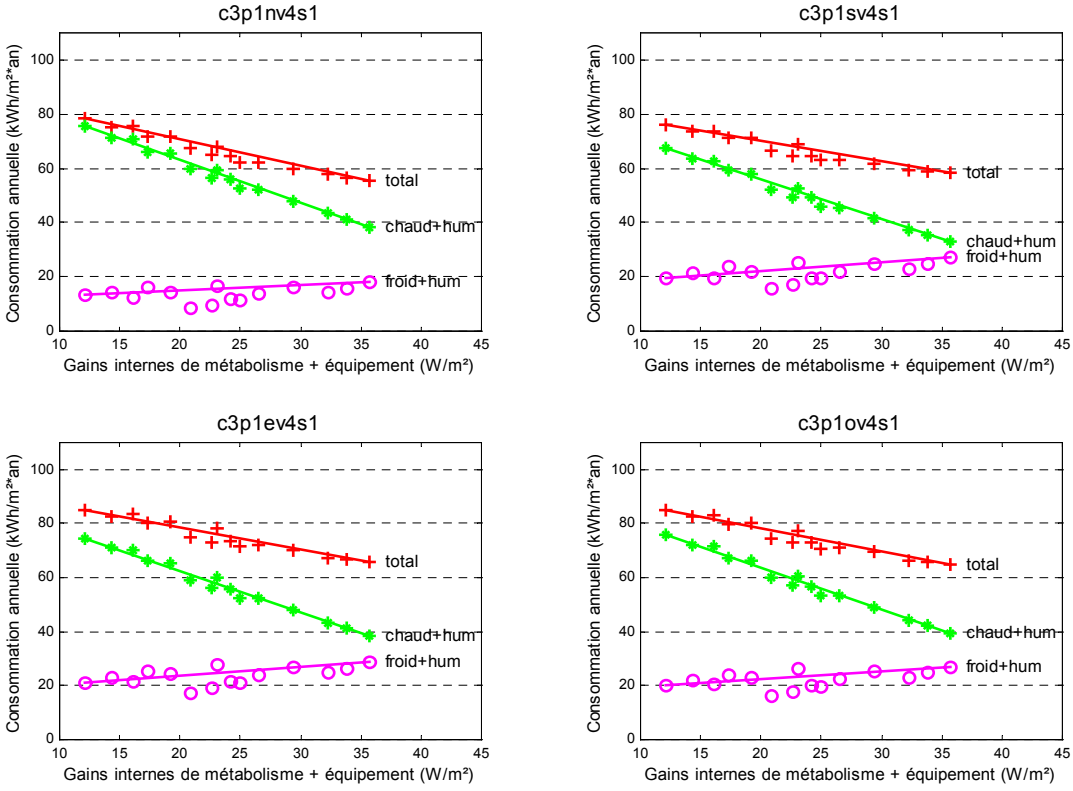
Graphique 90



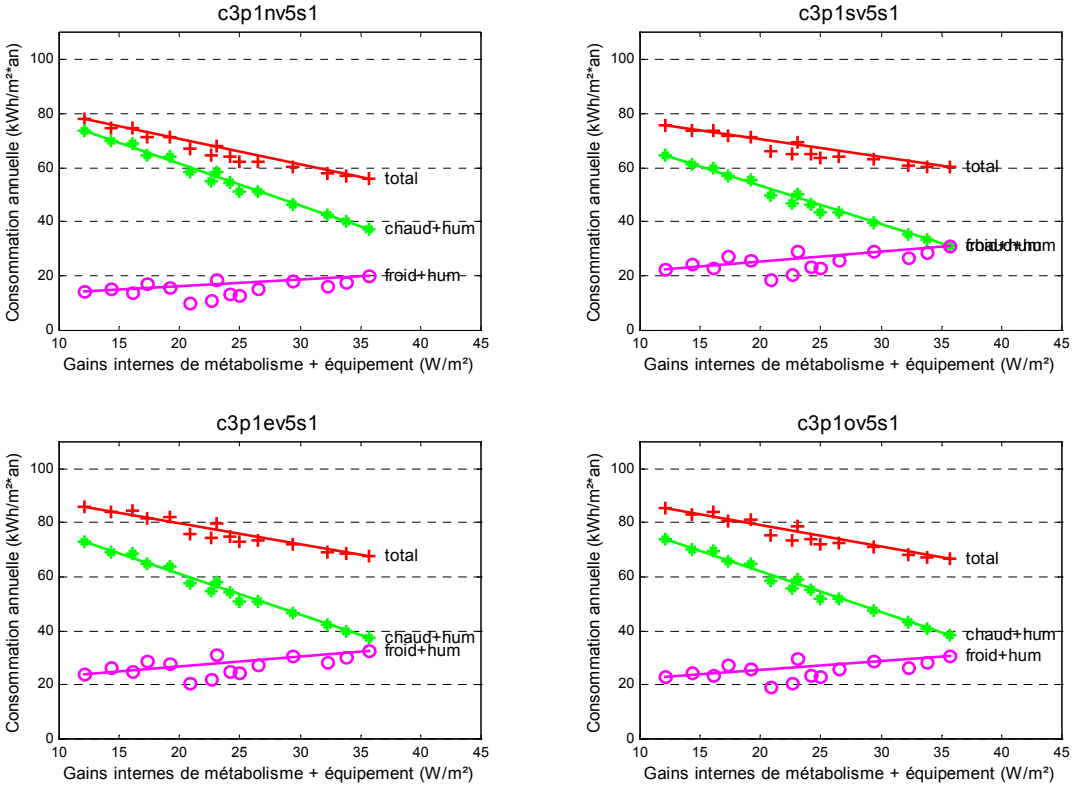
Graphique 91



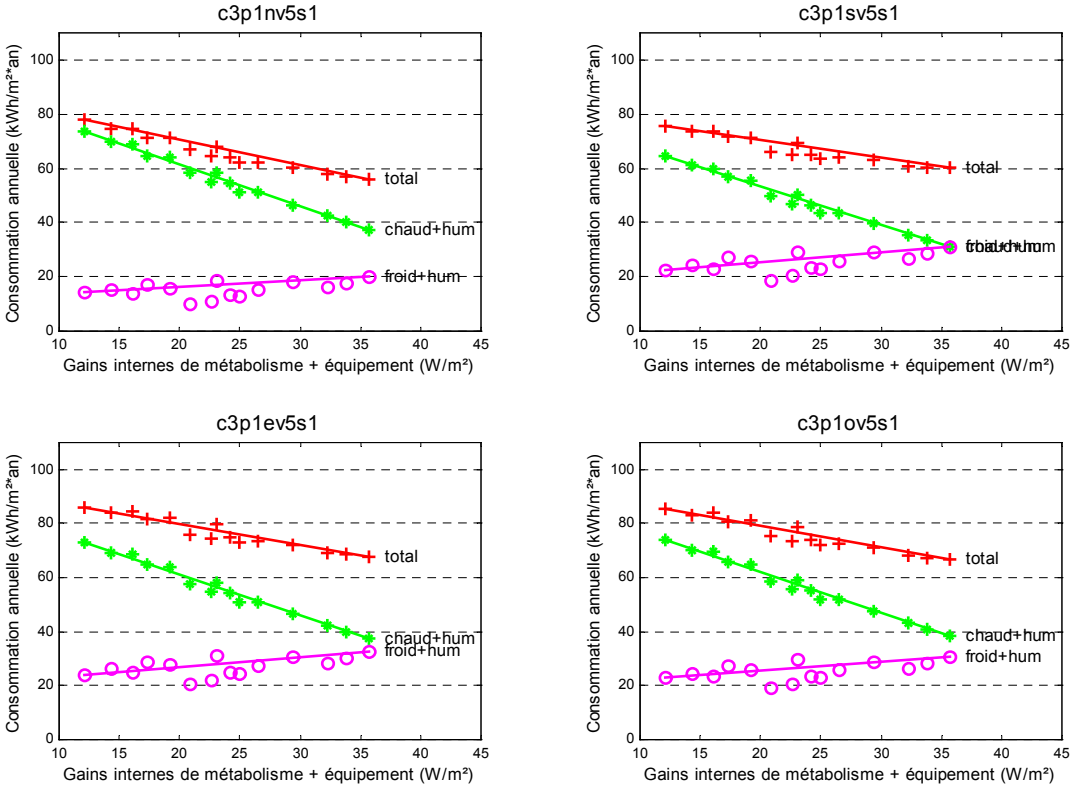
Graphique 92



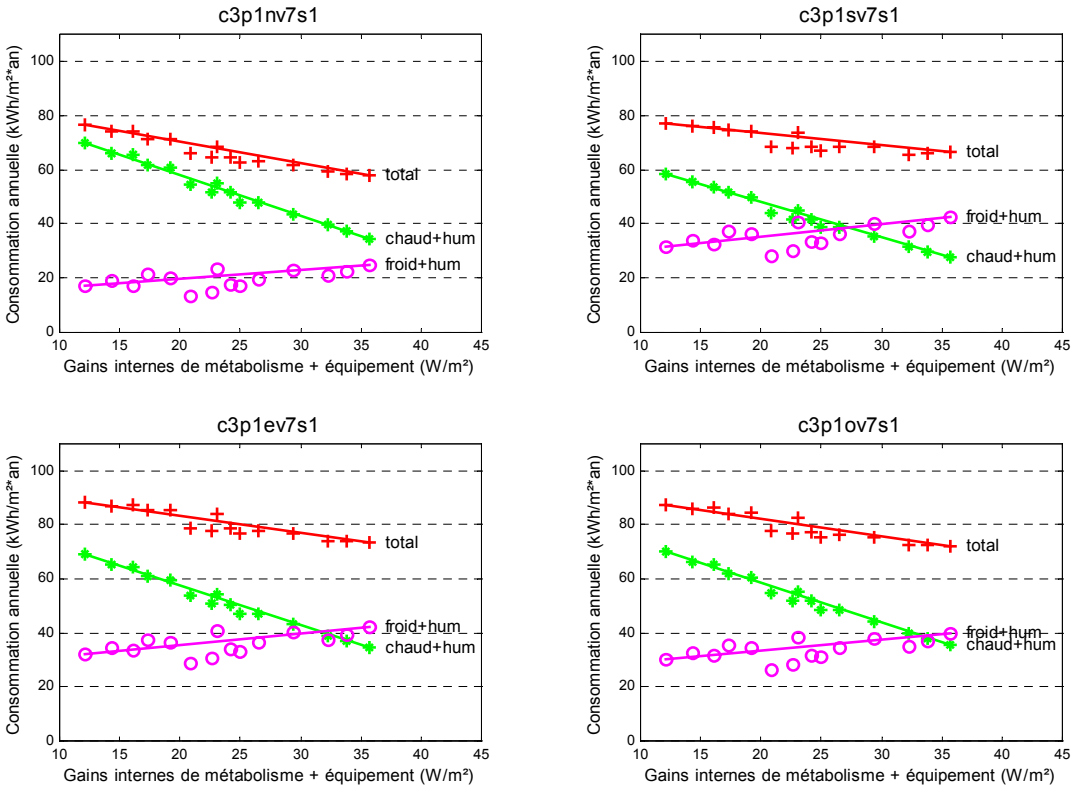
Graphique 93



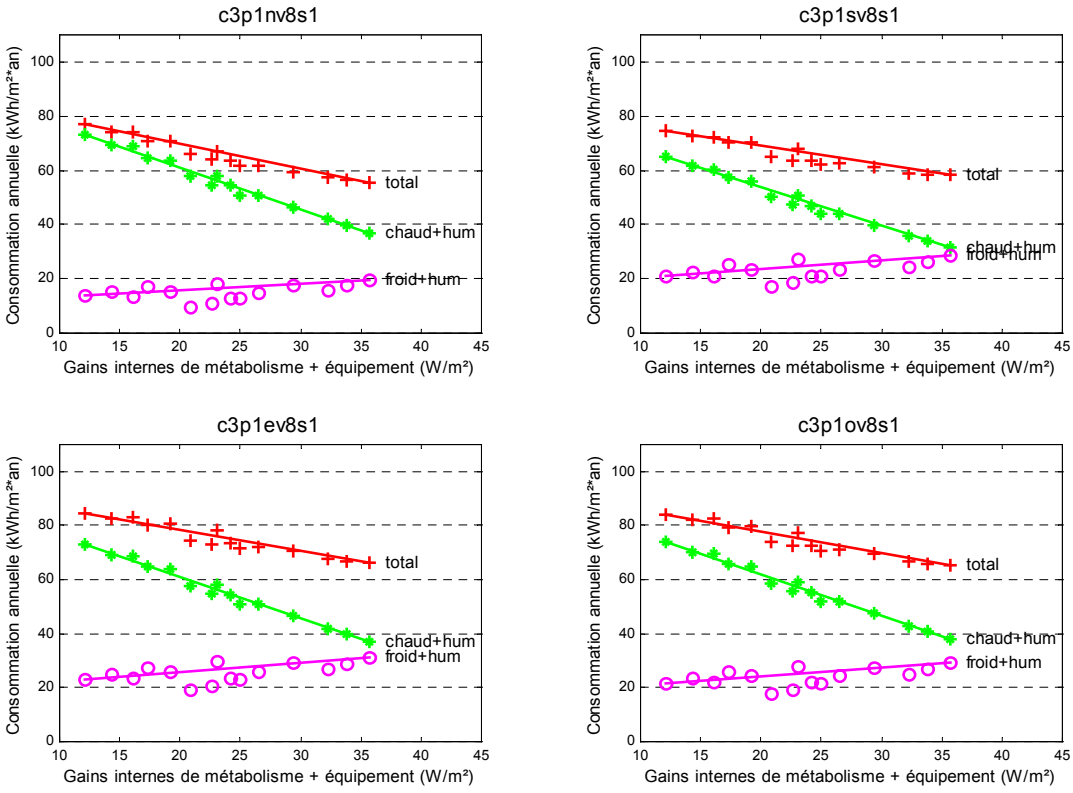
Graphique 94



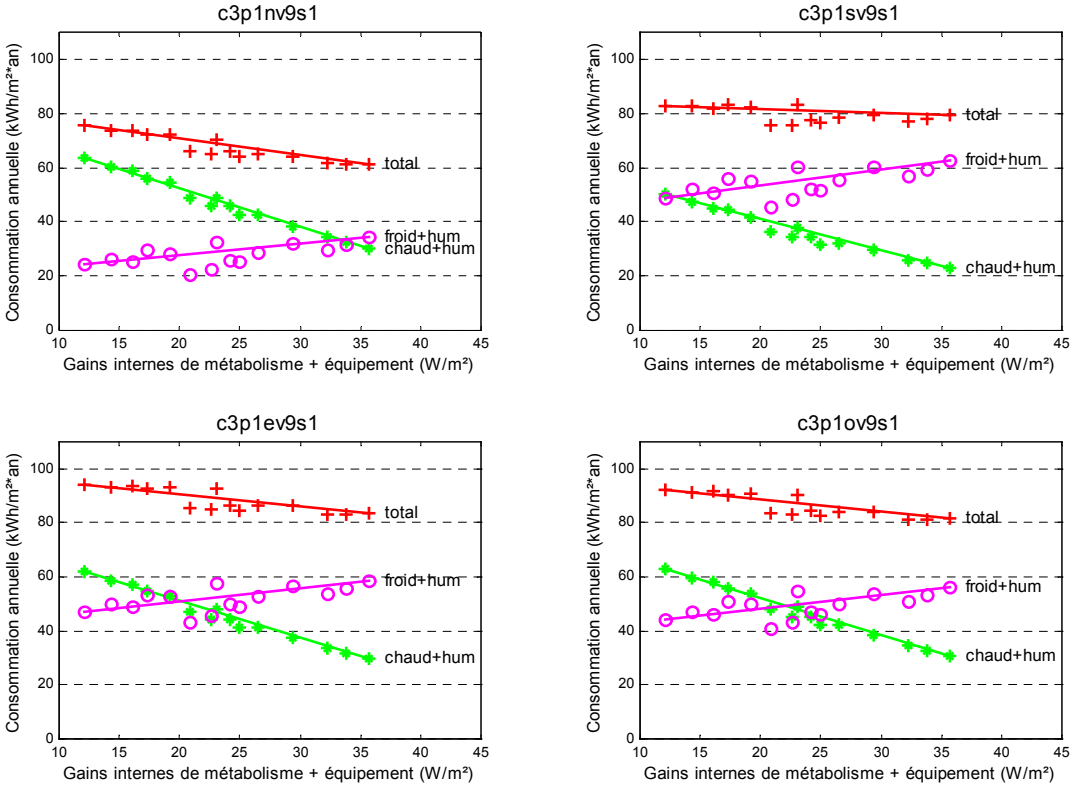
Graphique 95



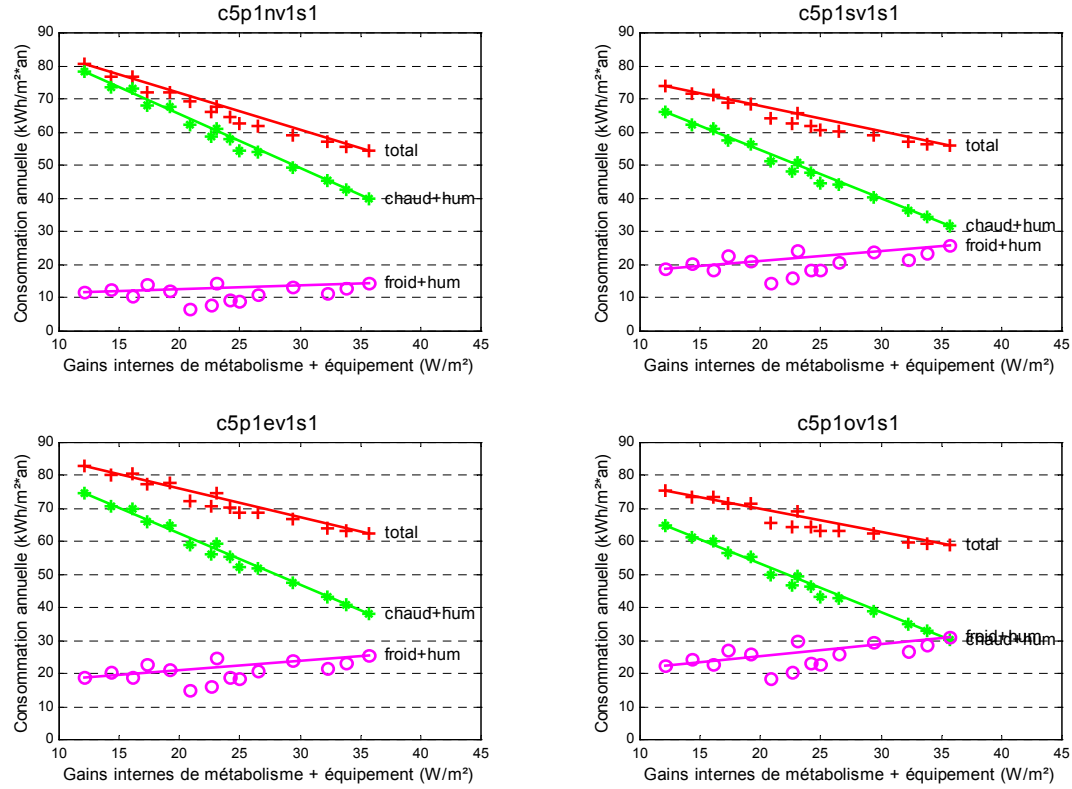
Graphique 96



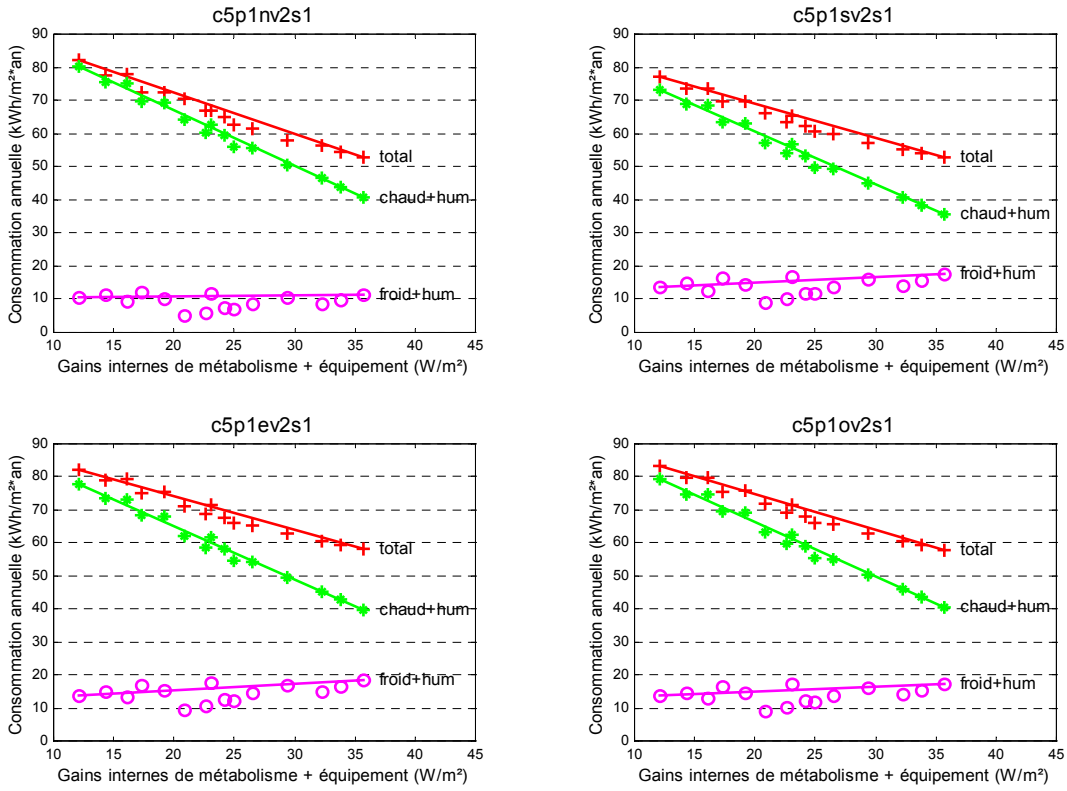
Graphique 97



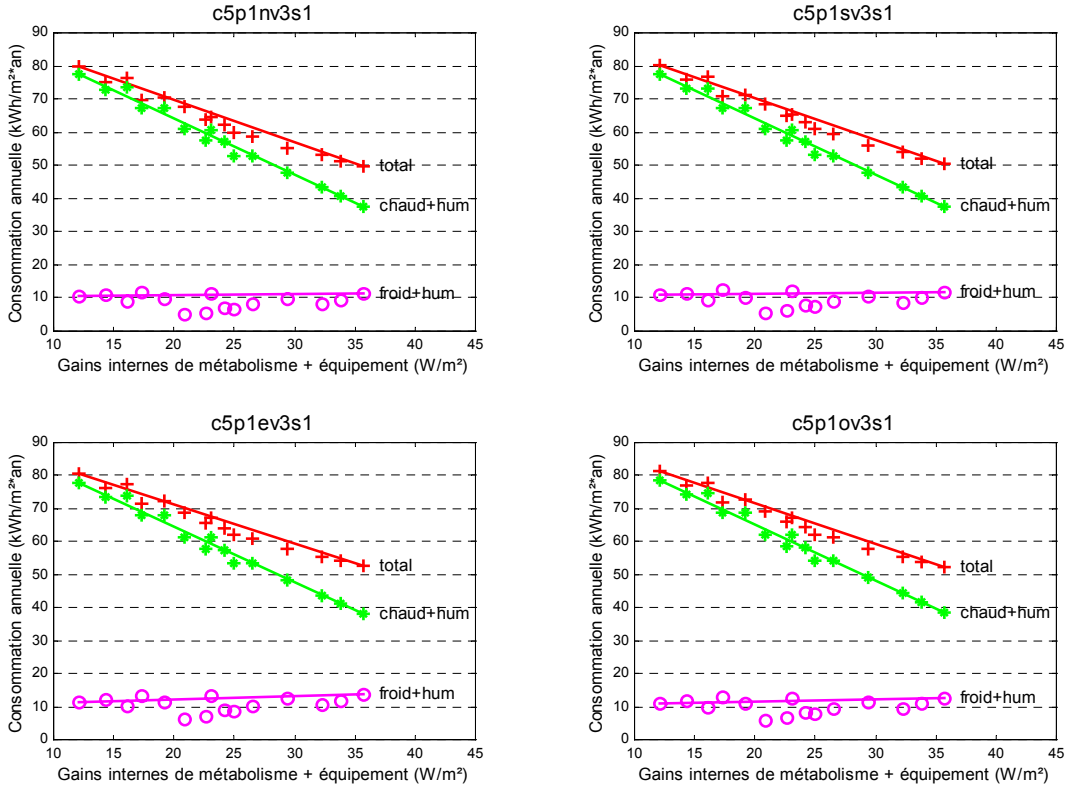
Graphique 98



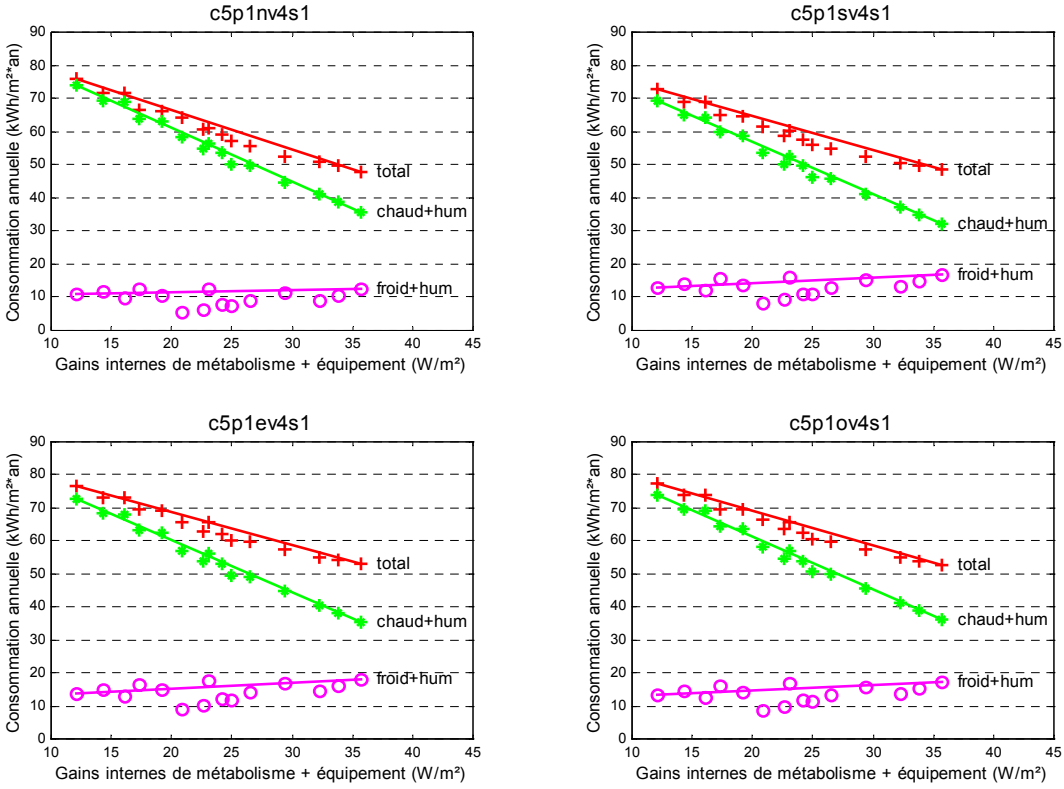
Graphique 99



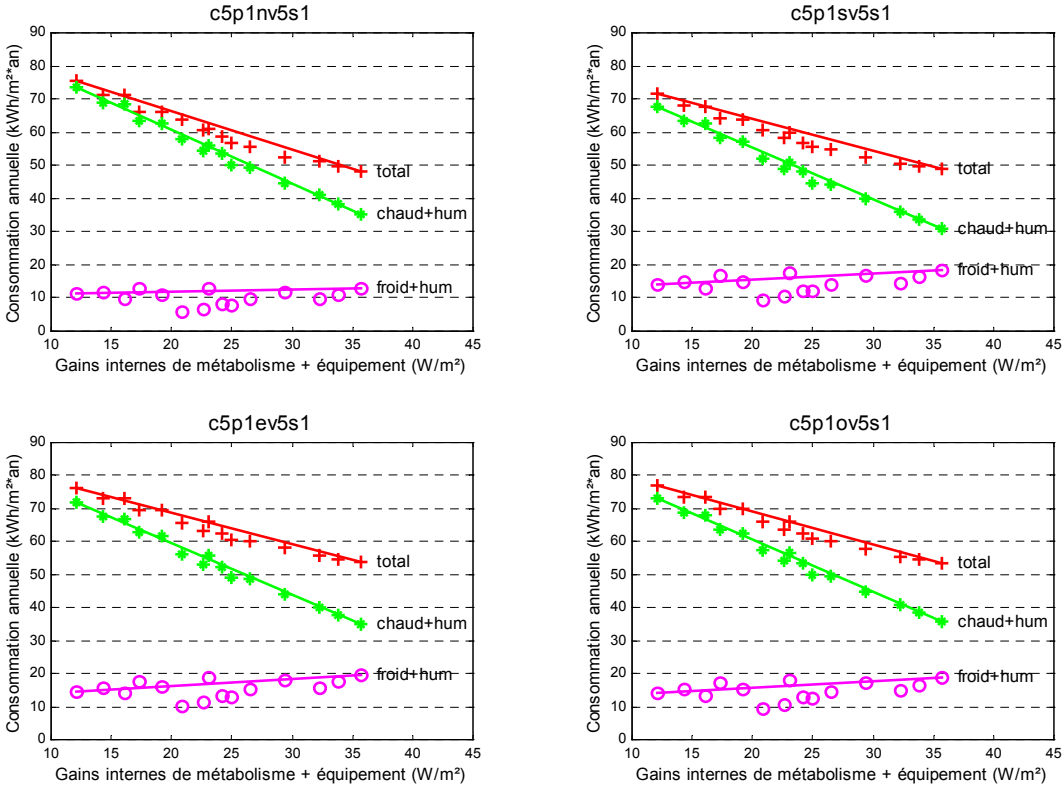
Graphique 100



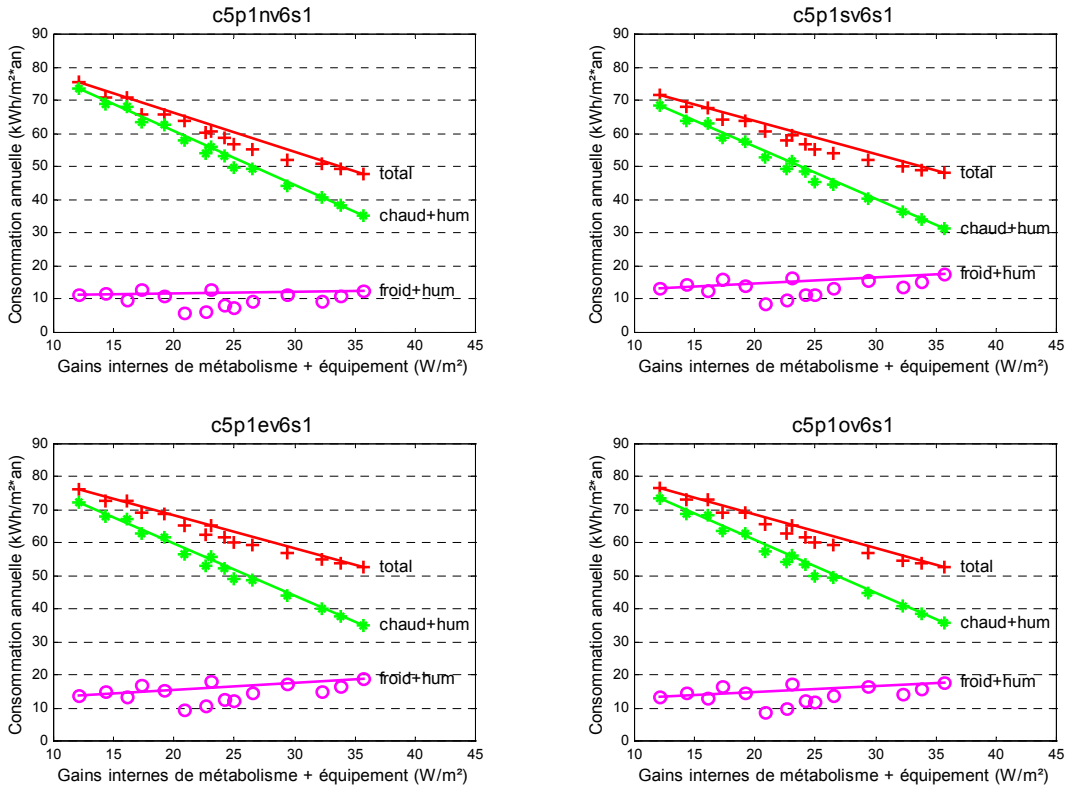
Graphique 101



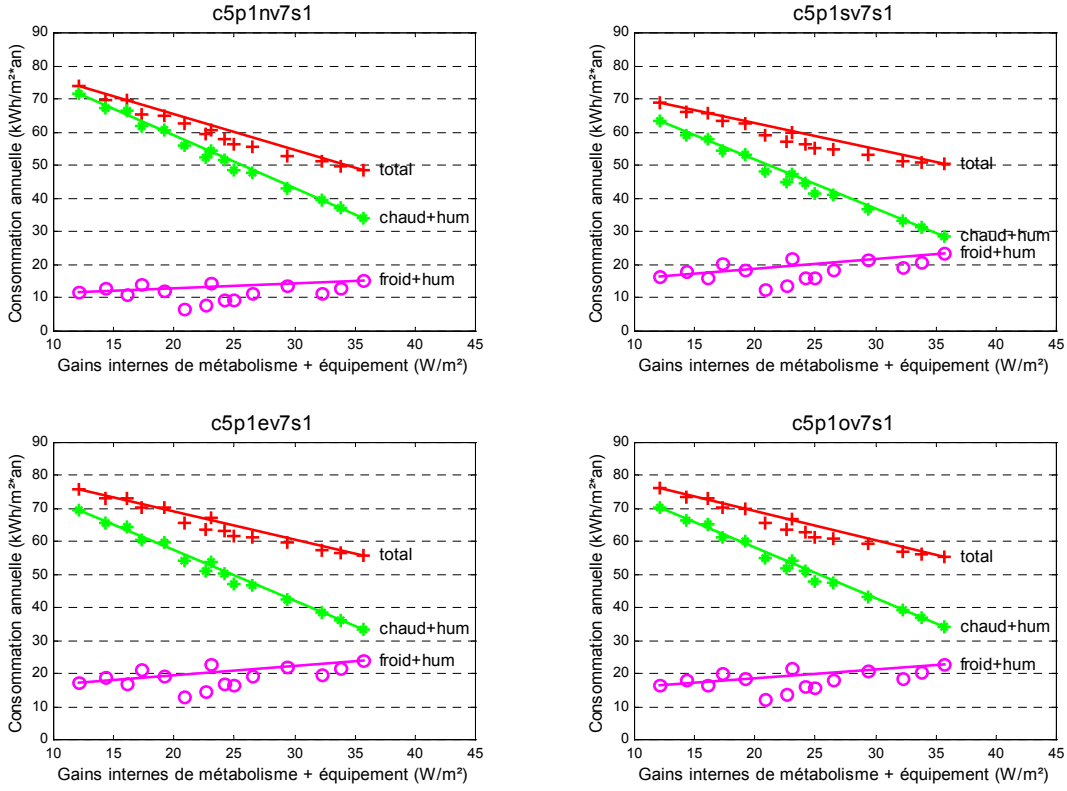
Graphique 102



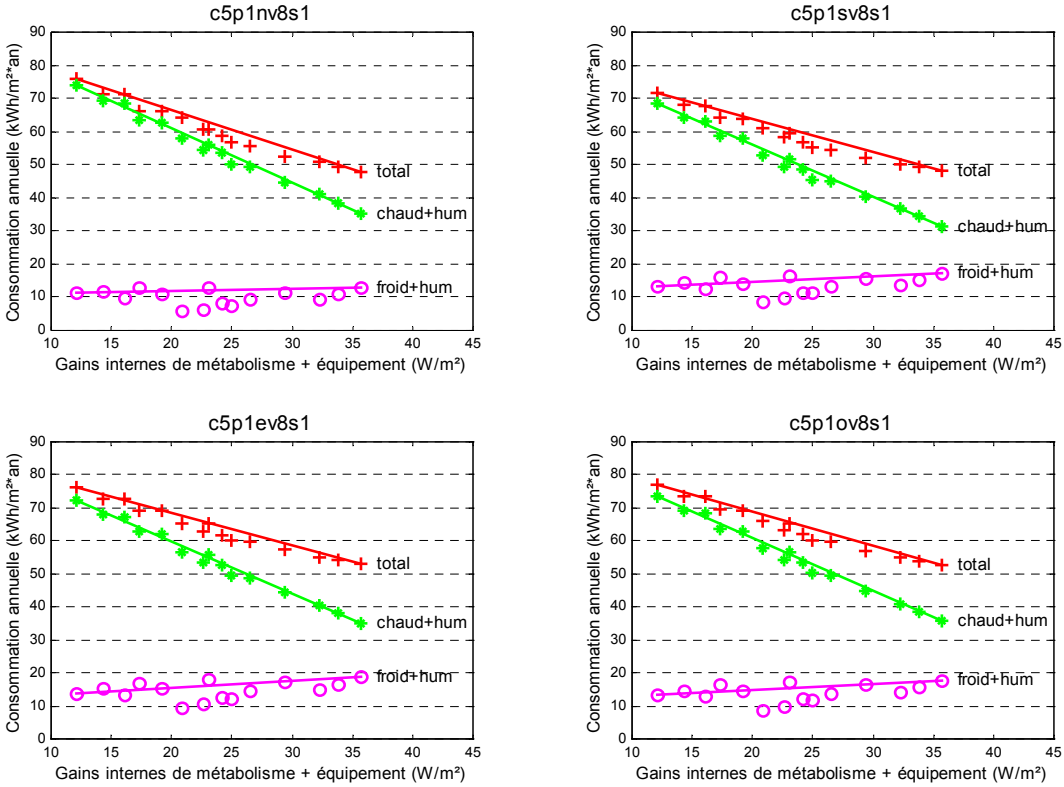
Graphique 103



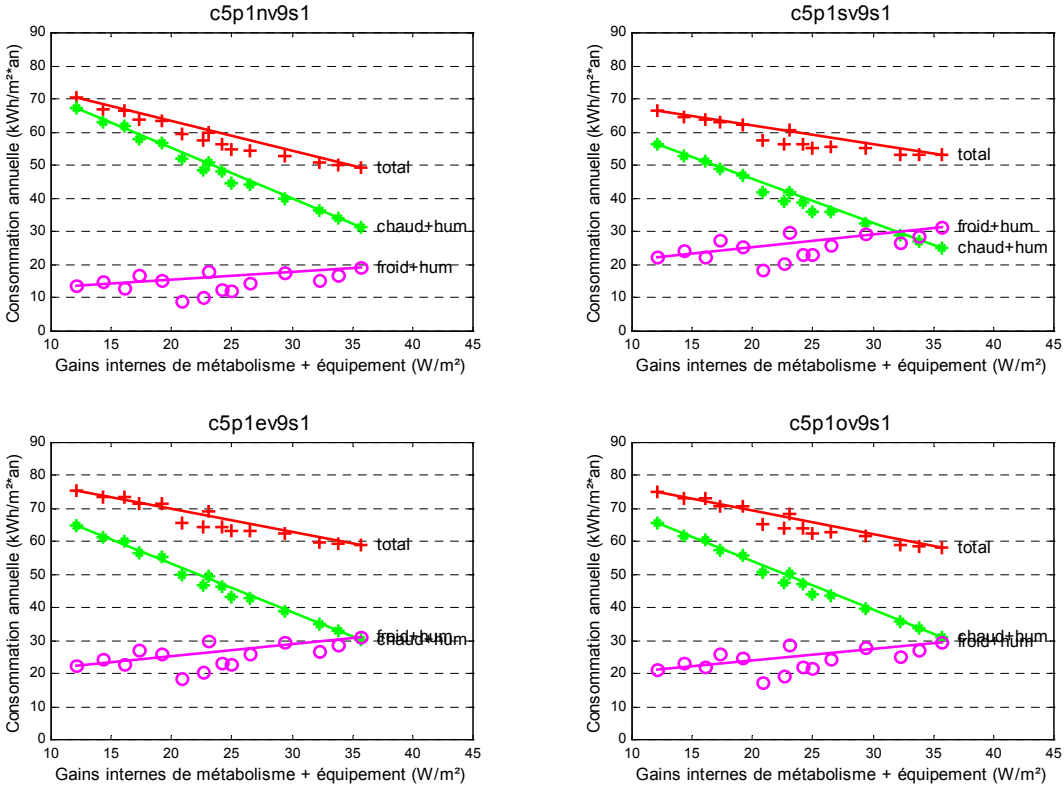
Graphique 104



Graphique 105



Graphique 106



Graphique 107

5. Influence de l'inertie thermique sur la consommation totale d'énergie

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p1 local 1	v1	-3.47%	-2.71%	-2.72%	-2.71%	0.23%	0.16%	0.21%	0.31%	0.21%
Ouest	v2	-3.97%	-2.23%	-2.23%	-2.23%	0.77%	0.70%	0.76%	0.85%	0.75%
	v3	-2.88%	-1.19%	-1.19%	-1.19%	1.02%	1.00%	1.02%	1.04%	1.02%
	v4	-4.77%	-2.31%	-2.31%	-2.30%	1.32%	1.22%	1.31%	1.44%	1.30%
	v5	-4.71%	-2.55%	-2.55%	-2.55%	1.26%	1.15%	1.24%	1.38%	1.24%
	v6	-4.86%	-2.47%	-2.47%	-2.46%	1.45%	1.35%	1.43%	1.58%	1.43%
	v7	-4.14%	-2.61%	-2.60%	-2.60%	0.74%	0.64%	0.71%	0.86%	0.72%
	v8	-4.90%	-2.52%	-2.52%	-2.52%	1.45%	1.35%	1.42%	1.58%	1.43%
	v9	-2.36%	-2.31%	-2.30%	-2.31%	0.10%	0.06%	0.09%	0.15%	0.09%

Tableau 1

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p1 local 1	v1	-3.55%	-2.91%	-2.91%	-2.90%	-0.36%	-0.40%	-0.37%	-0.30%	-0.37%
Ouest	v2	-4.24%	-2.64%	-2.65%	-2.64%	0.36%	0.28%	0.35%	0.45%	0.34%
	v3	-3.26%	-1.55%	-1.55%	-1.55%	0.73%	0.71%	0.72%	0.75%	0.72%
	v4	-5.04%	-2.79%	-2.80%	-2.78%	0.69%	0.58%	0.67%	0.80%	0.66%
	v5	-4.92%	-2.93%	-2.94%	-2.92%	0.50%	0.41%	0.48%	0.61%	0.48%
	v6	-5.10%	-2.90%	-2.90%	-2.90%	0.70%	0.60%	0.68%	0.82%	0.68%
	v7	-4.20%	-2.85%	-2.86%	-2.85%	0.09%	0.03%	0.07%	0.16%	0.07%
	v8	-5.11%	-2.94%	-2.95%	-2.94%	0.69%	0.59%	0.66%	0.81%	0.67%
	v9	-2.31%	-2.44%	-2.44%	-2.44%	-0.25%	-0.29%	-0.26%	-0.20%	-0.26%

Tableau 2

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p1 local 1	v1	-3.57%	-3.08%	-3.09%	-3.08%	-0.87%	-0.88%	-0.87%	-0.84%	-0.87%
Ouest	v2	-4.50%	-3.15%	-3.16%	-3.14%	-0.34%	-0.39%	-0.35%	-0.28%	-0.35%
	v3	-3.70%	-1.99%	-2.00%	-1.99%	0.27%	0.26%	0.26%	0.29%	0.26%
	v4	-5.29%	-3.20%	-3.22%	-3.19%	-0.15%	-0.21%	-0.17%	-0.10%	-0.17%
	v5	-5.08%	-3.25%	-3.27%	-3.25%	-0.28%	-0.33%	-0.29%	-0.22%	-0.29%
	v6	-5.30%	-3.27%	-3.28%	-3.26%	-0.16%	-0.21%	-0.18%	-0.10%	-0.17%
	v7	-4.20%	-3.11%	-3.12%	-3.11%	-0.47%	-0.51%	-0.48%	-0.42%	-0.48%
	v8	-5.32%	-3.30%	-3.31%	-3.30%	-0.18%	-0.23%	-0.19%	-0.11%	-0.19%
	v9	-2.30%	-2.55%	-2.56%	-2.55%	-0.68%	-0.70%	-0.69%	-0.64%	-0.68%

Tableau 3

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p1 local 3	v1	-2.55%	-2.10%	-2.10%	-2.10%	0.75%	0.68%	0.72%	0.81%	0.72%
Ouest	v2	-3.14%	-1.62%	-1.62%	-1.63%	1.06%	0.99%	1.03%	1.13%	1.03%
	v3	-2.21%	-0.77%	-0.76%	-0.77%	1.14%	1.12%	1.14%	1.16%	1.13%
	v4	-4.09%	-1.67%	-1.66%	-1.67%	1.65%	1.55%	1.61%	1.75%	1.60%
	v5	-4.02%	-1.96%	-1.95%	-1.96%	1.67%	1.57%	1.63%	1.79%	1.62%
	v6	-4.19%	-1.84%	-1.84%	-1.84%	1.85%	1.74%	1.81%	1.97%	1.80%
	v7	-3.26%	-2.09%	-2.09%	-2.09%	1.41%	1.31%	1.36%	1.51%	1.36%
	v8	-4.23%	-1.90%	-1.90%	-1.90%	1.86%	1.76%	1.82%	1.97%	1.81%
	v9	-1.32%	-1.60%	-1.59%	-1.60%	0.53%	0.46%	0.49%	0.61%	0.49%

Tableau 4

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p1 local 3	v1	-2.58%	-2.24%	-2.24%	-2.24%	0.33%	0.26%	0.30%	0.39%	0.30%
Ouest	v2	-3.33%	-1.91%	-1.90%	-1.91%	0.88%	0.82%	0.86%	0.96%	0.85%
	v3	-2.45%	-0.97%	-0.97%	-0.98%	1.04%	1.02%	1.03%	1.06%	1.03%
	v4	-4.29%	-2.09%	-2.09%	-2.09%	1.40%	1.30%	1.36%	1.49%	1.35%
	v5	-4.17%	-2.31%	-2.31%	-2.31%	1.33%	1.22%	1.28%	1.43%	1.27%
	v6	-4.37%	-2.25%	-2.25%	-2.25%	1.52%	1.42%	1.48%	1.63%	1.47%
	v7	-3.32%	-2.27%	-2.27%	-2.27%	0.80%	0.70%	0.75%	0.90%	0.75%
	v8	-4.39%	-2.29%	-2.29%	-2.29%	1.51%	1.41%	1.47%	1.61%	1.46%
	v9	-1.29%	-1.69%	-1.69%	-1.69%	0.16%	0.12%	0.14%	0.21%	0.14%

Tableau 5

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p1 local 3	v1	-2.62%	-2.40%	-2.40%	-2.39%	-0.26%	-0.31%	-0.28%	-0.21%	-0.28%
Ouest	v2	-3.56%	-2.31%	-2.31%	-2.31%	0.48%	0.39%	0.45%	0.56%	0.44%
	v3	-2.80%	-1.29%	-1.28%	-1.29%	0.80%	0.78%	0.79%	0.82%	0.79%
	v4	-4.52%	-2.56%	-2.56%	-2.55%	0.72%	0.60%	0.67%	0.83%	0.66%
	v5	-4.34%	-2.67%	-2.68%	-2.67%	0.51%	0.42%	0.47%	0.63%	0.46%
	v6	-4.54%	-2.66%	-2.66%	-2.66%	0.71%	0.61%	0.67%	0.84%	0.66%
	v7	-3.33%	-2.49%	-2.49%	-2.49%	0.14%	0.08%	0.11%	0.21%	0.11%
	v8	-4.56%	-2.70%	-2.70%	-2.69%	0.70%	0.60%	0.66%	0.82%	0.65%
	v9	-1.23%	-1.75%	-1.75%	-1.76%	-0.17%	-0.21%	-0.19%	-0.11%	-0.19%

Tableau 6

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p1 local 5	v1	-1.97%	-2.55%	-2.55%	-2.55%	-1.28%	-1.29%	-1.29%	-1.27%	-1.28%
Ouest	v2	-3.86%	-3.25%	-3.25%	-3.23%	-0.98%	-0.99%	-0.99%	-0.97%	-0.99%
	v3	-3.91%	-2.58%	-2.58%	-2.55%	-0.58%	-0.57%	-0.57%	-0.57%	-0.57%
	v4	-5.16%	-3.75%	-3.74%	-3.71%	-0.86%	-0.88%	-0.88%	-0.85%	-0.88%
	v5	-4.70%	-3.63%	-3.63%	-3.60%	-0.95%	-0.97%	-0.97%	-0.94%	-0.97%
	v6	-5.08%	-3.74%	-3.73%	-3.72%	-0.88%	-0.91%	-0.91%	-0.87%	-0.91%
	v7	-2.95%	-2.90%	-2.90%	-2.89%	-1.03%	-1.06%	-1.06%	-1.02%	-1.06%
	v8	-5.06%	-3.77%	-3.77%	-3.76%	-0.92%	-0.94%	-0.94%	-0.90%	-0.94%
	v9	-0.19%	-1.39%	-1.38%	-1.39%	-0.91%	-0.92%	-0.92%	-0.90%	-0.91%

Tableau 7

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p1 local 5	v1	-1.91%	-2.53%	-2.53%	-2.52%	-1.40%	-1.41%	-1.41%	-1.40%	-1.41%
Ouest	v2	-3.92%	-3.40%	-3.40%	-3.38%	-1.15%	-1.16%	-1.15%	-1.15%	-1.16%
	v3	-4.00%	-2.67%	-2.68%	-2.64%	-0.70%	-0.68%	-0.68%	-0.70%	-0.68%
	v4	-5.18%	-3.84%	-3.83%	-3.79%	-1.10%	-1.11%	-1.11%	-1.10%	-1.11%
	v5	-4.67%	-3.66%	-3.66%	-3.63%	-1.19%	-1.20%	-1.20%	-1.17%	-1.20%
	v6	-5.05%	-3.80%	-3.80%	-3.78%	-1.12%	-1.14%	-1.13%	-1.10%	-1.14%
	v7	-2.87%	-2.90%	-2.90%	-2.89%	-1.18%	-1.19%	-1.19%	-1.17%	-1.19%
	v8	-5.03%	-3.81%	-3.81%	-3.79%	-1.14%	-1.17%	-1.17%	-1.13%	-1.17%
	v9	-0.06%	-1.37%	-1.37%	-1.37%	-0.97%	-0.97%	-0.97%	-0.96%	-0.97%

Tableau 8

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p1 local 5	v1	-1.83%	-2.47%	-2.47%	-2.47%	-1.54%	-1.53%	-1.53%	-1.54%	-1.53%
Ouest	v2	-3.97%	-3.54%	-3.54%	-3.50%	-1.42%	-1.41%	-1.41%	-1.42%	-1.41%
	v3	-4.12%	-2.83%	-2.83%	-2.79%	-0.86%	-0.84%	-0.84%	-0.86%	-0.83%
	v4	-5.15%	-3.88%	-3.88%	-3.83%	-1.37%	-1.35%	-1.34%	-1.37%	-1.34%
	v5	-4.60%	-3.71%	-3.71%	-3.69%	-1.43%	-1.41%	-1.41%	-1.43%	-1.41%
	v6	-4.99%	-3.86%	-3.85%	-3.84%	-1.39%	-1.38%	-1.38%	-1.39%	-1.38%
	v7	-2.75%	-2.89%	-2.89%	-2.89%	-1.36%	-1.36%	-1.36%	-1.36%	-1.37%
	v8	-4.97%	-3.86%	-3.85%	-3.84%	-1.40%	-1.40%	-1.40%	-1.39%	-1.40%
	v9	0.09%	-1.31%	-1.31%	-1.31%	-1.04%	-1.04%	-1.04%	-1.03%	-1.05%

Tableau 9

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p2 local 1	v1	-3.45%	-2.69%	-2.70%	-2.68%	0.12%	0.03%	0.10%	0.21%	0.09%
Ouest	v2	-3.90%	-2.22%	-2.23%	-2.22%	0.65%	0.56%	0.64%	0.73%	0.62%
	v3	-2.85%	-1.19%	-1.20%	-1.20%	0.99%	0.98%	0.99%	1.01%	0.98%
	v4	-4.67%	-2.29%	-2.29%	-2.29%	1.15%	1.00%	1.13%	1.27%	1.10%
	v5	-4.65%	-2.51%	-2.53%	-2.50%	1.07%	0.91%	1.04%	1.22%	1.02%
	v6	-4.80%	-2.44%	-2.45%	-2.44%	1.27%	1.11%	1.25%	1.42%	1.23%
	v7	-4.10%	-2.59%	-2.60%	-2.58%	0.58%	0.46%	0.56%	0.71%	0.55%
	v8	-4.83%	-2.49%	-2.50%	-2.49%	1.27%	1.11%	1.24%	1.42%	1.23%
	v9	-2.35%	-2.28%	-2.29%	-2.27%	0.01%	-0.05%	0.00%	0.08%	0.00%

Tableau 10

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p2 local 1	v1	-3.52%	-2.88%	-2.89%	-2.87%	-0.43%	-0.48%	-0.43%	-0.37%	-0.44%
Ouest	v2	-4.15%	-2.61%	-2.62%	-2.61%	0.22%	0.13%	0.21%	0.31%	0.19%
	v3	-3.20%	-1.54%	-1.55%	-1.54%	0.71%	0.69%	0.70%	0.72%	0.70%
	v4	-4.92%	-2.73%	-2.75%	-2.72%	0.51%	0.38%	0.49%	0.62%	0.46%
	v5	-4.85%	-2.87%	-2.89%	-2.86%	0.34%	0.22%	0.33%	0.47%	0.30%
	v6	-5.02%	-2.84%	-2.86%	-2.83%	0.53%	0.40%	0.51%	0.67%	0.49%
	v7	-4.15%	-2.81%	-2.83%	-2.80%	0.00%	-0.07%	-0.01%	0.07%	-0.02%
	v8	-5.04%	-2.89%	-2.91%	-2.88%	0.53%	0.39%	0.50%	0.66%	0.49%
	v9	-2.32%	-2.40%	-2.42%	-2.39%	-0.32%	-0.36%	-0.32%	-0.27%	-0.33%

Tableau 11

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p2 local 1	v1	-3.54%	-3.04%	-3.06%	-3.03%	-0.89%	-0.91%	-0.89%	-0.87%	-0.90%
Ouest	v2	-4.39%	-3.08%	-3.11%	-3.08%	-0.43%	-0.49%	-0.44%	-0.38%	-0.45%
	v3	-3.63%	-1.97%	-1.98%	-1.97%	0.25%	0.23%	0.24%	0.26%	0.23%
	v4	-5.15%	-3.12%	-3.15%	-3.10%	-0.26%	-0.33%	-0.27%	-0.20%	-0.28%
	v5	-4.99%	-3.17%	-3.20%	-3.15%	-0.36%	-0.42%	-0.37%	-0.30%	-0.38%
	v6	-5.21%	-3.20%	-3.22%	-3.18%	-0.25%	-0.33%	-0.26%	-0.18%	-0.28%
	v7	-4.15%	-3.07%	-3.08%	-3.05%	-0.53%	-0.57%	-0.53%	-0.48%	-0.54%
	v8	-5.23%	-3.23%	-3.26%	-3.22%	-0.27%	-0.33%	-0.28%	-0.19%	-0.29%
	v9	-2.28%	-2.49%	-2.51%	-2.48%	-0.72%	-0.75%	-0.72%	-0.69%	-0.73%

Tableau 12

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p3 local 1	v1	-3.42%	-2.65%	-2.67%	-2.64%	0.02%	-0.08%	0.01%	0.11%	-0.01%
Ouest	v2	-3.83%	-2.23%	-2.22%	-2.22%	0.55%	0.47%	0.54%	0.62%	0.52%
	v3	-2.82%	-1.20%	-1.20%	-1.20%	0.97%	0.96%	0.97%	0.99%	0.96%
	v4	-4.55%	-2.29%	-2.28%	-2.29%	0.98%	0.84%	0.97%	1.11%	0.93%
	v5	-4.55%	-2.49%	-2.50%	-2.48%	0.89%	0.73%	0.88%	1.04%	0.84%
	v6	-4.70%	-2.42%	-2.42%	-2.42%	1.09%	0.90%	1.07%	1.25%	1.03%
	v7	-4.04%	-2.55%	-2.57%	-2.54%	0.44%	0.30%	0.43%	0.57%	0.39%
	v8	-4.76%	-2.47%	-2.48%	-2.47%	1.09%	0.90%	1.07%	1.26%	1.03%
	v9	-2.32%	-2.24%	-2.26%	-2.23%	-0.06%	-0.11%	-0.06%	0.00%	-0.08%

Tableau 13

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p3 local 1	v1	-3.48%	-2.83%	-2.85%	-2.81%	-0.49%	-0.55%	-0.49%	-0.43%	-0.51%
Ouest	v2	-4.06%	-2.60%	-2.60%	-2.59%	0.12%	0.05%	0.11%	0.18%	0.09%
	v3	-3.16%	-1.53%	-1.54%	-1.54%	0.69%	0.68%	0.69%	0.70%	0.68%
	v4	-4.80%	-2.69%	-2.71%	-2.68%	0.36%	0.26%	0.35%	0.46%	0.32%
	v5	-4.73%	-2.82%	-2.84%	-2.81%	0.20%	0.11%	0.19%	0.31%	0.17%
	v6	-4.91%	-2.79%	-2.81%	-2.78%	0.38%	0.26%	0.37%	0.51%	0.34%
	v7	-4.09%	-2.75%	-2.78%	-2.73%	-0.09%	-0.16%	-0.09%	-0.01%	-0.11%
	v8	-4.94%	-2.84%	-2.86%	-2.82%	0.37%	0.24%	0.36%	0.51%	0.33%
	v9	-2.31%	-2.35%	-2.37%	-2.34%	-0.36%	-0.39%	-0.37%	-0.33%	-0.37%

Tableau 14

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p3 local 1	v1	-3.50%	-2.97%	-3.01%	-2.95%	-0.92%	-0.92%	-0.91%	-0.90%	-0.92%
Ouest	v2	-4.29%	-3.03%	-3.06%	-3.02%	-0.49%	-0.52%	-0.50%	-0.46%	-0.51%
	v3	-3.58%	-1.96%	-1.97%	-1.96%	0.23%	0.22%	0.22%	0.24%	0.21%
	v4	-5.00%	-3.04%	-3.08%	-3.02%	-0.33%	-0.37%	-0.33%	-0.28%	-0.35%
	v5	-4.86%	-3.09%	-3.13%	-3.07%	-0.43%	-0.47%	-0.43%	-0.37%	-0.44%
	v6	-5.08%	-3.11%	-3.15%	-3.09%	-0.33%	-0.39%	-0.34%	-0.27%	-0.35%
	v7	-4.08%	-2.99%	-3.02%	-2.97%	-0.58%	-0.60%	-0.58%	-0.54%	-0.59%
	v8	-5.12%	-3.15%	-3.19%	-3.13%	-0.35%	-0.41%	-0.35%	-0.28%	-0.37%
	v9	-2.23%	-2.42%	-2.46%	-2.41%	-0.75%	-0.77%	-0.75%	-0.73%	-0.76%

Tableau 15

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p1 local 1	v1	-3.85%	-1.74%	-1.73%	-1.74%	1.79%	1.64%	1.76%	1.93%	1.75%
Nord	v2	-2.60%	-0.66%	-0.63%	-0.68%	1.91%	1.78%	1.90%	2.03%	1.88%
	v3	-1.40%	-0.05%	-0.03%	-0.06%	1.78%	1.75%	1.77%	1.80%	1.77%
	v4	-3.76%	-0.66%	-0.62%	-0.68%	2.46%	2.27%	2.44%	2.63%	2.41%
	v5	-4.25%	-1.04%	-1.02%	-1.06%	2.55%	2.37%	2.53%	2.75%	2.51%
	v6	-4.30%	-0.90%	-0.88%	-0.92%	2.73%	2.55%	2.70%	2.93%	2.69%
	v7	-4.82%	-1.73%	-1.71%	-1.73%	2.42%	2.23%	2.38%	2.62%	2.37%
	v8	-4.36%	-0.97%	-0.95%	-0.98%	2.77%	2.58%	2.73%	2.97%	2.72%
	v9	-4.82%	-2.34%	-2.34%	-2.34%	1.52%	1.37%	1.48%	1.69%	1.48%

Tableau 16

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p1 local 1	v1	-4.21%	-2.29%	-2.30%	-2.29%	1.13%	1.01%	1.10%	1.25%	1.10%
Nord	v2	-3.11%	-1.22%	-1.20%	-1.23%	1.41%	1.28%	1.39%	1.54%	1.37%
	v3	-1.85%	-0.52%	-0.51%	-0.53%	1.35%	1.33%	1.34%	1.37%	1.34%
	v4	-4.44%	-1.49%	-1.47%	-1.50%	1.86%	1.70%	1.84%	2.04%	1.82%
	v5	-4.86%	-1.81%	-1.79%	-1.82%	1.88%	1.72%	1.85%	2.06%	1.84%
	v6	-4.95%	-1.73%	-1.71%	-1.73%	2.06%	1.89%	2.03%	2.26%	2.02%
	v7	-5.20%	-2.38%	-2.37%	-2.38%	1.60%	1.45%	1.57%	1.77%	1.56%
	v8	-4.99%	-1.78%	-1.76%	-1.78%	2.08%	1.91%	2.04%	2.27%	2.04%
	v9	-5.05%	-2.79%	-2.78%	-2.79%	0.72%	0.62%	0.70%	0.87%	0.69%

Tableau 17

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p1 local 1	v1	-4.59%	-2.86%	-2.87%	-2.86%	0.24%	0.16%	0.22%	0.35%	0.22%
Nord	v2	-3.72%	-1.95%	-1.95%	-1.96%	0.79%	0.67%	0.77%	0.90%	0.76%
	v3	-2.44%	-1.05%	-1.05%	-1.05%	0.89%	0.87%	0.89%	0.91%	0.89%
	v4	-5.18%	-2.41%	-2.41%	-2.41%	0.98%	0.83%	0.95%	1.13%	0.94%
	v5	-5.43%	-2.70%	-2.69%	-2.69%	0.86%	0.73%	0.84%	1.04%	0.83%
	v6	-5.55%	-2.69%	-2.68%	-2.69%	1.03%	0.88%	0.99%	1.22%	0.99%
	v7	-5.55%	-3.04%	-3.03%	-3.04%	0.50%	0.38%	0.47%	0.66%	0.47%
	v8	-5.58%	-2.72%	-2.71%	-2.72%	1.04%	0.88%	1.00%	1.22%	1.00%
	v9	-5.32%	-3.20%	-3.20%	-3.19%	-0.15%	-0.21%	-0.16%	-0.08%	-0.17%

Tableau 18

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p1 local 1	v1	-0.69%	-1.33%	-1.33%	-1.34%	0.78%	0.71%	0.76%	0.87%	0.77%
Sud	v2	-3.17%	-1.81%	-1.81%	-1.81%	0.71%	0.66%	0.70%	0.77%	0.70%
	v3	-3.16%	-1.47%	-1.49%	-1.47%	0.66%	0.65%	0.67%	0.67%	0.65%
	v4	-3.78%	-1.61%	-1.60%	-1.61%	1.25%	1.17%	1.23%	1.34%	1.23%
	v5	-3.39%	-1.69%	-1.69%	-1.69%	1.29%	1.21%	1.27%	1.40%	1.27%
	v6	-3.76%	-1.65%	-1.65%	-1.66%	1.42%	1.33%	1.39%	1.53%	1.39%
	v7	-1.22%	-1.45%	-1.44%	-1.45%	1.25%	1.15%	1.22%	1.37%	1.23%
	v8	-3.83%	-1.74%	-1.73%	-1.74%	1.42%	1.33%	1.39%	1.54%	1.40%
	v9	1.55%	0.20%	0.21%	0.18%	0.90%	0.82%	0.88%	1.02%	0.88%

Tableau 19

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p1 local 1	v1	-0.49%	-1.27%	-1.26%	-1.27%	0.43%	0.36%	0.41%	0.52%	0.41%
Sud	v2	-3.26%	-2.04%	-2.05%	-2.03%	0.46%	0.42%	0.45%	0.52%	0.45%
	v3	-3.45%	-1.69%	-1.71%	-1.69%	0.52%	0.51%	0.52%	0.54%	0.51%
	v4	-3.90%	-1.97%	-1.97%	-1.96%	0.93%	0.88%	0.91%	1.01%	0.92%
	v5	-3.32%	-2.00%	-1.99%	-2.00%	0.93%	0.86%	0.91%	1.03%	0.92%
	v6	-3.73%	-2.03%	-2.03%	-2.03%	1.07%	1.00%	1.06%	1.18%	1.06%
	v7	-1.05%	-1.46%	-1.46%	-1.46%	0.84%	0.75%	0.81%	0.97%	0.82%
	v8	-3.78%	-2.09%	-2.09%	-2.09%	1.07%	1.00%	1.06%	1.18%	1.06%
	v9	1.72%	0.20%	0.22%	0.19%	0.50%	0.46%	0.49%	0.58%	0.49%

Tableau 20

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p1 local 1	v1	-0.26%	-1.10%	-1.10%	-1.10%	-0.04%	-0.09%	-0.06%	0.03%	-0.06%
Sud	v2	-3.30%	-2.28%	-2.29%	-2.28%	0.12%	0.08%	0.11%	0.16%	0.11%
	v3	-3.76%	-1.95%	-1.98%	-1.94%	0.31%	0.29%	0.31%	0.32%	0.30%
	v4	-3.87%	-2.29%	-2.30%	-2.28%	0.41%	0.35%	0.40%	0.50%	0.40%
	v5	-3.14%	-2.26%	-2.27%	-2.26%	0.37%	0.30%	0.35%	0.46%	0.35%
	v6	-3.63%	-2.36%	-2.36%	-2.36%	0.47%	0.39%	0.45%	0.59%	0.45%
	v7	-0.81%	-1.44%	-1.43%	-1.45%	0.25%	0.19%	0.23%	0.34%	0.23%
	v8	-3.68%	-2.41%	-2.41%	-2.41%	0.46%	0.37%	0.43%	0.57%	0.44%
	v9	1.93%	0.25%	0.26%	0.23%	0.16%	0.13%	0.15%	0.21%	0.15%

Tableau 21

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
F p1 local 1	v1	-3.57%	-2.68%	-2.68%	-2.67%	0.05%	-0.04%	0.03%	0.13%	0.02%
Est	v2	-4.16%	-2.39%	-2.40%	-2.39%	0.53%	0.44%	0.52%	0.61%	0.49%
	v3	-3.01%	-1.27%	-1.27%	-1.26%	0.88%	0.86%	0.88%	0.89%	0.88%
	v4	-4.83%	-2.41%	-2.42%	-2.40%	1.01%	0.89%	0.99%	1.13%	0.96%
	v5	-4.73%	-2.53%	-2.53%	-2.53%	0.90%	0.79%	0.88%	1.02%	0.85%
	v6	-4.88%	-2.49%	-2.49%	-2.49%	1.11%	0.99%	1.08%	1.24%	1.06%
	v7	-4.16%	-2.51%	-2.51%	-2.51%	0.51%	0.40%	0.47%	0.63%	0.46%
	v8	-4.90%	-2.53%	-2.53%	-2.53%	1.11%	0.99%	1.08%	1.24%	1.06%
	v9	-2.56%	-2.16%	-2.15%	-2.16%	0.12%	0.07%	0.12%	0.18%	0.11%

Tableau 22

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
M p1 local 1	v1	-3.63%	-2.83%	-2.84%	-2.83%	-0.42%	-0.45%	-0.43%	-0.36%	-0.43%
Est	v2	-4.37%	-2.73%	-2.73%	-2.72%	0.07%	0.00%	0.06%	0.15%	0.04%
	v3	-3.38%	-1.61%	-1.62%	-1.61%	0.60%	0.58%	0.60%	0.62%	0.59%
	v4	-5.05%	-2.78%	-2.80%	-2.77%	0.39%	0.29%	0.37%	0.50%	0.35%
	v5	-4.93%	-2.84%	-2.85%	-2.83%	0.24%	0.15%	0.22%	0.35%	0.20%
	v6	-5.11%	-2.83%	-2.84%	-2.82%	0.43%	0.32%	0.41%	0.55%	0.39%
	v7	-4.21%	-2.76%	-2.76%	-2.76%	0.02%	-0.03%	0.01%	0.09%	0.00%
	v8	-5.12%	-2.87%	-2.88%	-2.87%	0.43%	0.32%	0.40%	0.55%	0.38%
	v9	-2.53%	-2.28%	-2.28%	-2.28%	-0.15%	-0.20%	-0.16%	-0.10%	-0.17%

Tableau 23

(s1-s2)/s1		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
E p1 local 1	v1	-3.64%	-2.97%	-2.97%	-2.97%	-0.79%	-0.81%	-0.80%	-0.76%	-0.80%
Est	v2	-4.60%	-3.12%	-3.15%	-3.11%	-0.52%	-0.55%	-0.52%	-0.47%	-0.53%
	v3	-3.78%	-2.07%	-2.08%	-2.07%	0.19%	0.18%	0.20%	0.21%	0.19%
	v4	-5.29%	-3.12%	-3.15%	-3.11%	-0.28%	-0.33%	-0.29%	-0.23%	-0.30%
	v5	-5.05%	-3.16%	-3.18%	-3.15%	-0.33%	-0.38%	-0.35%	-0.28%	-0.35%
	v6	-5.29%	-3.20%	-3.21%	-3.19%	-0.25%	-0.30%	-0.26%	-0.18%	-0.27%
	v7	-4.24%	-2.97%	-2.97%	-2.97%	-0.41%	-0.45%	-0.41%	-0.36%	-0.43%
	v8	-5.30%	-3.23%	-3.23%	-3.22%	-0.26%	-0.31%	-0.27%	-0.19%	-0.29%
	v9	-2.55%	-2.39%	-2.39%	-2.38%	-0.55%	-0.58%	-0.56%	-0.52%	-0.57%

Tableau 24