



Application d'un logiciel de simulation de système urbain à un bâtiment de Martigny

Projet de semestre : Génie mécanique, Master II

Etudiant : Cédric Dorsaz

Assistante : Perez Diane

Professeurs responsables : Dr. Robinson Darren, Dr. Maréchal François

11/06/2010



Travail réalisé au laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESO-PB), avec le soutien du laboratoire d'énergétique industrielle (LENI) et la collaboration de Sinergy à Martigny

Résumé

Le but principal de ce projet est de tester les performances de prédiction de consommation de chaleur du logiciel CitySIM par l'application à un bâtiment de la ville de Martigny.

Ce travail présente d'abord les démarches d'acquisition des données utiles, à la modélisation (données physiques du bâtiment,...), à la prédiction (données météorologiques de la période et du lieu simulé), et à la comparaison (données mesurées de consommation d'énergie thermique). Les données physiques sont mesurées, observées ou estimées à partir de visites, valeurs typiques ou de discussions avec les habitants ; les données météorologiques sont essentiellement extrapolées de MétéoSuisse et les données de consommations sont mises à disposition par le fournisseur d'énergie du bâtiment, Sinergy.

Ensuite le modèle est réalisé sous CitySIM et les résultats de consommations simulés sont comparés à ceux fournis par Sinergy. Les résultats sont satisfaisants puisque, avec le premier modèle non-calibré, on obtient une erreur moyenne de 10.55% pour l'année 2009.

A l'aide du programme Matlab, une optimisation a été réalisée sur les paramètres principaux les plus incertains de ce modèle afin de calibrer la courbe de consommation simulée par CitySIM sur la courbe de consommation réelle. Le résultat de cette calibration est également satisfaisant, puisqu'on diminue l'erreur moyenne à 8.39% sur l'année. Cependant, l'interprétation des paramètres calibrés est assez délicate, car certaines valeurs semblent assez exceptionnelles et devraient être confirmées par une mesure sur place.

Finalement, à l'aide d'un scénario d'optimisation de performance énergétique et d'une comparaison avec les exigences de Minergie®, la fin de ce travail présente une brève entrevue du potentiel d'utilisation d'un tel modèle calibré.

Table des illustrations

Figure 1: Bâtiment Minerva, à gauche la face Sud-Est (avec les balcons) et la face Nord-Est, à droite la face Sud-Ouest (grande face) et la face Sud-Est	8
Figure 2: Image du quartier du bâtiment Minerva prise depuis le programme Google Earth. Le bâtiment Minerva est entouré en rouge.....	9
Figure 3: Consommation horaire de chaleur (moyenne journalière) pour l'année 2009	10
Figure 4: Signature énergétique du bâtiment Minerva.....	11
Figure 5: Plan de l'empreinte au sol du bâtiment Minerva.....	12
Figure 6: Valeurs typiques du coefficient U des vitres (W/m ² .K)	13
Figure 7: Représentation de la consommation d'eau chaude sanitaire en vert	15
Figure 8: Profil d'occupation utilisé pour les simulations	17
Figure 9: Comparaison des précipitations entre Sion et Martigny en 1965	18
Figure 10: Première modélisation. A gauche on voit le profil d'obstruction lointaine.	20
Figure 11: Modèle du bâtiment Minerva sous CitySIM.....	20
Figure 12: Modèle du bâtiment Minerva avec les balcons	21
Figure 13: Résultat de l'analyse de sensibilité.....	24
Figure 14: Comparaison des consommations de chaleur fournie par CitySIM à celles fournie par Sinergy	25
Figure 15: Pourcentage d'écart de la consommation de chaleur de CitySIM par rapport à celle de Sinergy.....	26
Figure 16: Résultat de l'analyse de sensibilité de chacune des variables du problème d'optimisation indépendamment sur la fonction objective	29
Figure 17: Valeur de la fonction objective en fonction du nombre d'itération avec un algorithme de type active set	31
Figure 18: En haut: avant l'optimisation, Au milieu : après optimisation (active set uniquement) En bas: après optimisation (méthode hybride).....	34
Figure 19: Erreurs résiduelles après la calibration	35
Figure 20: Résultat de consommation de chaleur du modèle calibré avec pré-conditionnement.....	36
Figure 21: Comparaison d'une simulation avec pré-conditionnement depuis le 1er janvier (à gauche) et une simulation sans pré-conditionnement depuis le 1er décembre de l'année précédente (à droite)	36
Figure 22: Résultats du scénario	39

Liste des tableaux

Tableau 1: Dimensions du bâtiment Minerva	12
Tableau 2: Composition du mur choisi. Le plâtre est à l'intérieur et ensuite il y a le béton, puis l'isolation et enfin le crépi.	14
Tableau 3: Résumé des valeurs utiles à la simulation	16
Tableau 4: Information météorologiques nécessaires.....	17
Tableau 5: Comparaison des données de température de l'air entre les stations de Sion et Martigny en 1965.....	18
Tableau 6: Variables du problème d'optimisation, CI =condition initiale, LB = borne inférieure, UB = borne supérieure.....	27
Tableau 7: Valeurs des paramètres après optimisation avec l'algorithme active set sous Matlab	31
Tableau 8: Valeurs des paramètres après optimisation.....	32

Table des matières

1	Introduction.....	7
1.1	Contexte du projet	7
1.2	Description du projet.....	7
1.3	Objectifs.....	8
1.4	Bâtiment choisi	8
2	Acquisition des données.....	10
2.1	Consommation	10
2.2	Bâtiment	11
2.2.1	Informations générales	11
2.2.2	Dimension de l'enveloppe.....	11
2.2.3	Proportion de vitrage et qualité des vitres	12
2.2.4	Type et propriétés des murs	14
2.2.5	Eau chaude sanitaire	15
2.2.6	Résumé des valeurs observées, calculées, estimées.....	16
2.3	Météorologiques	17
3	Modélisation sous CitySIM	20
4	Utilisation de Matlab	22
4.1	Fonctionnement de CitySIM.....	22
4.2	Structure du code Matlab	22
4.3	Analyse de sensibilité	23
4.4	Comparaison des résultats	25
5	Calibration du modèle	26
5.1	Définition du problème d'optimisation.....	27
5.2	Choix de l'algorithme	28
6	Résultats	31
6.1	Convergence et valeurs des paramètres.....	31
6.2	Consommations.....	33
6.3	Signature énergétique.....	37
7	Utilisation des résultats.....	38
7.1	Scénario d'amélioration de la performance énergétique	38
7.2	Comparaison avec les standard Minergie®	39
8	Conclusions.....	41

8.1	Conclusion du travail	41
8.2	Conclusion personnelle	42
9	Prochaines étapes	43
10	Remerciements	44
11	Bibliographie.....	45
11.1	Sites internet	45
11.2	Documentation.....	45
Annexe.....		47

1 Introduction

1.1 Contexte du projet

Tout d'abord, ce projet s'inscrit dans le cadre du projet MEU (Management Energétique Urbain), un projet réunissant les 4 villes de Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds, Lausanne et Martigny, dont le but est de créer un outil d'aide à la décision qui puisse les accompagner dans leurs choix de planification énergétique et dans le suivi des performances énergétiques de leur territoire, par exemple dans l'optique de réaliser des objectifs du type 3x20. Un des objectifs principaux du projet MEU est celui de fédérer les modèles et les logiciels existants en termes de management et de planification énergétique au niveau urbain. L'équipe du projet a donc utilisé deux outils informatiques existants - EnerGIS, développé par le LENI et CitySIM, créé par le LESO-PB.¹

Dans cette perspective, ce travail est une application pratique du logiciel CitySIM en vue de participer à son développement et surtout de tester ses performances, en collaborant principalement avec la ville de Martigny et leur fournisseur d'énergie Sinergy qui participe activement à ce projet MEU.

Le logiciel CitySIM est un programme de modélisation et de simulation des flux d'énergie en milieu urbain développé par le LESO-PB (Laboratoire d'Energie SOLaire et de Physique du Bâtiment) à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Ce programme est le successeur, du logiciel SUNtool, il a été développé pour une application allant du bâtiment individuelle, au quartier, ou encore à une ville (Kämpf 2009). Du point de vue de la consommation d'énergie de chauffage, son but est de tenir compte des principaux phénomènes de transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment en fonction de sa géométrie et de sa construction (radiation, convection, conduction), de considérer l'influence des occupants (comportement, gains internes,...) et également de quantifier l'impact de l'entourage du bâtiment (ombrage d'un bâtiment sur l'autre, obstruction lointaine,...).

1.2 Description du projet

Ce projet consiste à modéliser un bâtiment de la ville de Martigny afin de simuler sa consommation de chauffage (eau chaude sanitaire comprise). Le but est d'abord de tester le logiciel CitySIM pour déceler les éventuelles améliorations possibles, mais surtout de mieux connaître ses capacités de prédiction. Pour ce faire, les résultats simulés devront être comparés à des données mesurées fournies par le distributeur d'énergie de ce bâtiment, à savoir Sinergy. Ainsi, la démarche suivie dans ce travail sera d'abord la sélection d'un bâtiment, ensuite l'acquisition du maximum de données concernant ce bâtiment et son environnement (météo, sources d'ombrage,...). A l'aide de ces données, il s'agira de modéliser le bâtiment dans CitySIM en commençant par un modèle basique puis en l'affinant de plus en plus. Il est nécessaire, dans un premier temps, de faire une analyse de sensibilité des paramètres pour s'assurer que chaque paramètre soit correctement pris en compte dans les calculs de transfert de chaleur, mais également pour connaître les différentes influences de chacun d'eux. Enfin, la simulation pourra être lancée et les résultats devront être analysés et comparés.

Finalement, le modèle devra être calibré par rapport à ces résultats mesurés afin de pouvoir établir et tester des scénarios d'amélioration de la performance énergétique de ce bâtiment. Ce travail

¹ Tiré du cahier des charges de la réunion du 12 février 2010 à La Chaud-de-Fonds

aboutira sur un modèle calibré, mais, faute de temps, l'amélioration de la performance énergétique reste une prochaine étape.

1.3 Objectifs

Le premier objectif de ce travail est de tester le logiciel CitySIM en fournissant un compte rendu de ses performances en vue de contribuer à son développement. Ensuite, le deuxième but est d'acquérir de l'expérience dans la démarche de calibration de modèle et dans le domaine de l'énergétique du bâtiment. Enfin, le troisième résultat attendu de ce travail est la mise à disposition d'un modèle calibré, prêt pour la simulation de scénari d'amélioration de performance énergétique.

1.4 Bâtiment choisi

Sur la base des données disponibles par Sinergy, le choix s'est porté sur un bâtiment appelé Minerva, situé à la rue de Morasse 16 à Martigny-Ville. Ce bâtiment a été choisi, d'abord parce que les données de consommation de chaleur le concernant sont bien fournies et ensuite, parce qu'il semble assez représentatif d'un bâtiment « standard » de la région (par rapport à sa taille et à sa forme).



Figure 1: Bâtiment Minerva, à gauche la face Sud-Est (avec les balcons) et la face Nord-Est, à droite la face Sud-Ouest (grande face) et la face Sud-Est

Précisons que ce bâtiment est alimenté en chauffage par un système de chauffage à distance, et que chaque personne de chacun des appartements peut régler plusieurs vannes (une pour chaque pièce à peu près) pour atteindre la température intérieure souhaitée. Les températures du chauffage à distance sont d'environ 120° au départ et 80° au retour et la pression dans les conduites est d'à peu près 6 bars.

Comme on peut le voir sur l'image de Google Earth ci-dessous, le bâtiment est situé au nord d'un terrain de football. Il ne subit donc pas d'ombrage des bâtiments alentours. Il ne sera ainsi pas nécessaire dans la modélisation - du moins dans une première approche - de tenir compte des influences des bâtiments voisins.

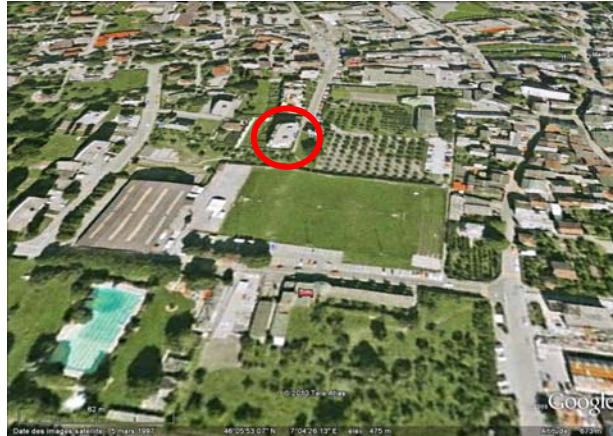


Figure 2: Image du quartier du bâtiment Minerva prise depuis le programme Google Earth. Le bâtiment Minerva est entouré en rouge.

2 Acquisition des données

La première étape de ce projet est l'acquisition du maximum de données utiles à la conception et calibration du modèle. Les données essentielles sont la consommation de chaleur pour la comparaison entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux, les données physiques et géométriques du bâtiment pour l'estimation des paramètres de simulation et la conception 3D de l'enveloppe et enfin les données météorologiques de Martigny pour la durée de simulation.

2.1 Consommation

Les données de consommation sont accessibles depuis internet grâce à la base de données de Synergy. On peut y trouver les consommations de chaleur calculées pour le bâtiment grâce à la mesure des températures d'entrée et de sortie de l'eau provenant du chauffage à distance et du débit de cette conduite. Les capteurs de températures sont des thermomètres Hänni Sika 160°C et le compteur de débit est un PN 16 à brides 130°.

Il est possible d'exporter les données de consommation sous forme de fichier Excel et donc d'obtenir des informations comme la moyenne journalière de la consommation horaire de chaleur pour l'année 2009 (Figure 3), ou encore comme la signature énergétique du bâtiment² (Figure 4).

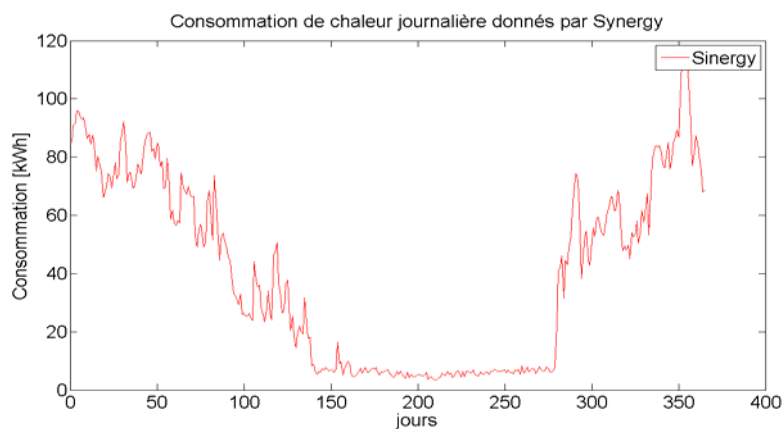


Figure 3: Consommation horaire de chaleur (moyenne journalière) pour l'année 2009

² La signature énergétique d'un bâtiment est la droite qui établit la consommation d'un bâtiment en fonction de la température extérieure.

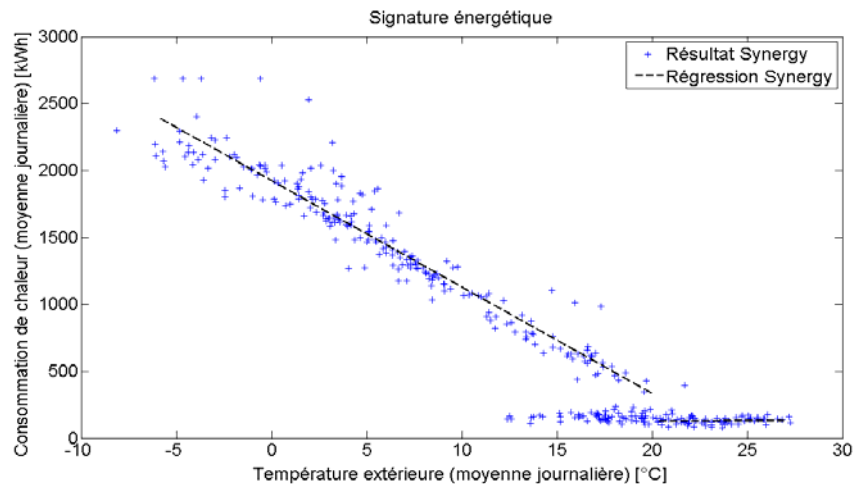


Figure 4: Signature énergétique du bâtiment Minerva

Pour donner un ordre de grandeur, le bâtiment Minerva a consommé à peu près 348'224 kWh en 2009, ce qui correspond environ à 105 kWh/m^2 .

2.2 Bâtiment

Toutes les données du bâtiment ont été en partie estimées, en partie obtenues par observation et en partie mesurées.

2.2.1 Informations générales

Ce bâtiment comporte deux parties jumelles (symétrie) avec un mur commun. Il y a donc deux entrées séparées et environ quinze appartements dans chacune des deux parties. Les appartements sont répartis de la manière suivante : un appartement et deux studios au rez-de-chaussée, deux appartements à chacun des six étages et un appartement sur l'attique (estimé à partir de visite, car le toit n'est accessible que depuis l'appartement). Au vu de la taille des appartements et après discussion avec un habitant, **le nombre d'habitants** est estimé à environ 2 personnes et demie par appartement, à savoir 75 pour l'immeuble au complet.

La **température de consigne inférieure** des appartements dépend fortement des habitudes des occupants. Malheureusement il n'a pas été possible d'aller mesurer cette température, mais à l'aide des statistiques et surtout en discutant avec les gens, nous prendrons dans ce travail une première valeur de 23° .

Le taux d'infiltration est une valeur très difficile à mesurer autant qu'à estimer par une simple visite du bâtiment. Mais, à nouveau, nous prenons une valeur de 0.4, assez classique pour ce genre d'immeuble. Le taux d'infiltration représente le volume d'air renouvelé par heure dans le bâtiment.

2.2.2 Dimension de l'enveloppe

L'empreinte au sol est tirée d'un plan cadastral représenté sur la Figure 5 (la figure n'est pas à l'échelle), et la hauteur est approximée à partir de photos. Les dimensions sont reportées dans le Tableau 1. Sur le plan de l'empreinte au sol, on peut estimer l'angle d'inclinaison du bâtiment par rapport à une droite nord-sud ; le bâtiment est aligné sur une droite à 40° au Nord-ouest.



Figure 5: Plan de l'empreinte au sol du bâtiment Minerva

Hauteur du bâtiment	18	m
Grande largeur	33.4	m
Petite largeur	14	m
Petite largeur attique	11	m
Grande largeur attique	18	m
Hauteur attique	2.4	m

Tableau 1: Dimensions du bâtiment Minerva

A l'aide de ces dimensions et d'une estimation de la grandeur de la cage d'escalier faite sur place, la **surface de référence énergétique** est estimée à 3292m². La surface de référence énergétique, définie dans la norme SIA416/1, édition 2007, chap. 3.2., est la somme de toutes les surfaces de plancher des étages et des sous-sols qui sont inclus dans l'enveloppe thermique et dont l'utilisation nécessite un chauffage ou une climatisation.³

2.2.3 Proportion de vitrage et qualité des vitres

Les dimensions des vitres ont d'abord été approximées à partir de photos, puis mesurées sur place pour calculer la **proportion de vitrage**. Seul les vitres des deux plus petites façades n'ont pas pu être mesurées sur place. Les proportions de vitrages peuvent donc être calculées et donner les résultats suivants :

Nord Est

	Nombre	Largeur [m]	hauteur[m]	Surface [m2]
Petites fenêtres1	16	1.6	1.05	26.88
Petites fenêtres2	30	1.8	1.05	56.7
Grandes fenêtres	2	3.5	20	140
				223.58

Surface totale de la face	644.4	m2
Glazing ratio	0.35	

³ http://www.endk.ch/tl_files/documents/fachleute/VoHi_EN-02_fr.pdf

Sud Est

	Nombre	Largeur [m]	hauteur[m]	Surface [m2]
Grandes fenêtres	14	2.65	2.1	77.91

77.91

Surface totale de la face	252
Glazing ratio	0.31

Sud Ouest

	Nombre	Largeur [m]	hauteur[m]	Surface [m2]
Petites fenêtres salon	14	2	2.1	58.8
Fenêtres chambre à coucher	14	2.1	2.1	61.74
Véranda	8	4.4	1.6	56.32
Grandes fenêtres salon	18	2.88	2.1	108.864

285.724

Surface totale de la face	644.4
Glazing ratio	0.44

Nord Ouest

	Nombre	Largeur [m]	hauteur[m]	Surface [m2]
Grandes fenêtres	14	2.65	2.1	77.91

77.91

Surface totale de la face	252
Glazing ratio	0.31

Pour la qualité des vitres, là aussi aucune valeur exacte n'a pu être définie, car certains appartements ont changé leurs vitres et d'autres pas. Mais la grande majorité des vitres sont d'origine, c'est-à-dire vieilles de 20 ans et donc de qualité plutôt médiocre. Toutes les vitres sont tout de même en double vitrage avec de l'air à l'intérieur, le **coefficient de transmission thermique U** est donc estimé à 2.8 (W/m².K), selon les valeurs typiques suivantes.⁴

WINDOWS (Building Regulations: 2.2)	U-Value
Single Glazing	5.6
Double Glazing	2.8
Double Glazing, with Argon	2.6
Double Glazing, Low-E	1.8
Double Glazing, Low-E with Argon	1.5

Figure 6: Valeurs typiques du coefficient U des vitres (W/m².K)

Pour le coefficient G des vitres, qui représente la proportion du flux énergétique laissé passer par le vitrage, lequel s'exprime en pourcentage du rayonnement reçu, la valeur est estimée à 0.7, une valeur plutôt standard pour un vitrage de ce type et de cette époque. Le coefficient G est donc la somme du rayonnement transmis et du rayonnement absorbé puis retransmis vers l'intérieur par le vitrage. Plus ce coefficient est grand, plus le gain d'énergie par rayonnement en présence du soleil

⁴ http://www.sei.ie/About_Energy/Energy_Technologies/Insulation/What_is_a_U_Value.pdf

est grand. De nos jours, on essaie d'optimiser le coefficient G en fonction de l'orientation des vitres. Les surfaces Nord peuvent avoir un plus grand coefficient G pour gagner le maximum d'énergie par rayonnement en hiver. Par contre, les fenêtres plus au Sud doivent avoir un coefficient G assez bas pour éviter que les appartements chauffent trop durant la saison chaude et qu'il faille recourir à des grosses consommations pour le refroidissement.

2.2.4 Type et propriétés des murs

Le **type de murs** a été difficile à obtenir, c'est pourquoi, pour ce travail, le choix s'est fait par rapport à la base de données existante pour la ville de Neuchâtel dans laquelle des murs types ont été définis pour chaque période de construction. Ici, le bâtiment a été construit en 1990 et nous estimons par observation que les murs sont isolés à l'extérieur. Ainsi, nous utiliserons des murs dont les caractéristiques sont les suivantes :

	Plâtre	Béton armé	Isolation polystyrene	Crépi
Epaisseur (e) [m]	0.01	0.17	0.08	0.02
Conductivité (λ) [W/m.K]	0.43	1.8	0.038	0.99
Densité (ρ) [kg/m ³]	1200	2400	20	1800
Chaleur spécifique (C_p) [J/kg.K]	1000	1100	1400	850

Tableau 2: Composition du mur choisi. Le plâtre est à l'intérieur et ensuite il y a le béton, puis l'isolation et enfin le crépi.

A l'aide de ces valeurs, il est possible d'estimer le coefficient de transmission thermique U de ces murs à l'aide des formules suivantes.

La résistance thermique est définie par : $R = \frac{e}{\lambda}$

Le coefficient de transmission thermique par: $U = \frac{1}{R_{tot}}$

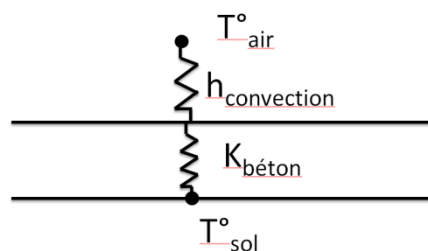
$$\text{Avec : } R_{tot} = R_{plâtre} + R_{béton} + R_{isolation} + R_{crépi}$$

Donc on obtient :

$$U = \frac{1}{\frac{e_{plâtre}}{\lambda_{plâtre}} + \frac{e_{béton}}{\lambda_{béton}} + \frac{e_{isolation}}{\lambda_{isolation}} + \frac{e_{crépi}}{\lambda_{crépi}}} = 0.45 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$$

Ensuite, le **coefficient de transmission thermique U du toit** est très incertain, car l'accès au toit n'était pas possible. Après discussion avec l'ingénieur de Sinergy, la première estimation de ce coefficient U du toit est 0.9 (W/m².K)

Pour le **transfert thermique à travers le sol** du sous-sol, le coefficient K est calculé de la manière suivante :



Ces résistances sont en série et donc on utilise la formule suivante pour calculer le coefficient K du sol :

$$K_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{K_{béton}} + \frac{1}{h_{convection}}} = 0.05 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$$

En considérant que la conductibilité thermique du béton est de $\lambda=1 \text{ [W/m.K]}$ et donc pour un sol de 20cm d'épais, on a $K_{béton}=0.05 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$. Aussi, le coefficient de transfert de chaleur est estimé à $h_{convection}=8 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$

2.2.5 Eau chaude sanitaire

Comme la simulation CitySIM ne calcule pas l'eau chaude sanitaire, mais que pour le bâtiment Minerva, l'apport de chaleur est également fourni par le réseau de chauffage à distance, il faut estimer cette consommation pour l'immeuble afin de pouvoir comparer les résultats.

L'idée est simplement de faire une moyenne de la courbe de consommation fournie par Sinergy durant la saison chaude, lorsque le chauffage est coupé. Normalement, cette consommation doit représenter uniquement l'énergie nécessaire pour le chauffage de l'eau durant cette période. Cependant, selon les statistiques, on utilise plus d'eau chaude sanitaire durant la saison froide que durant la saison chaude (longues vacances en été, température extérieure plus élevée,...) (Zraggen 2009). Cette différence entre l'été et l'hiver est variable selon les habitudes, mais nous allons considérer une augmentation de 20%, qui semble être une valeur raisonnable.

Pour représenter cette augmentation, un coefficient multiplicateur appelé « **coefficient ECS** » est ajouté à la liste des variables à déterminer.

La moyenne de consommation de l'été est représentée en vert sur le graphe suivant et elle vaut 5.8135 [kWh/h], soit 50'926 [kWh/année] pour le bâtiment complet.

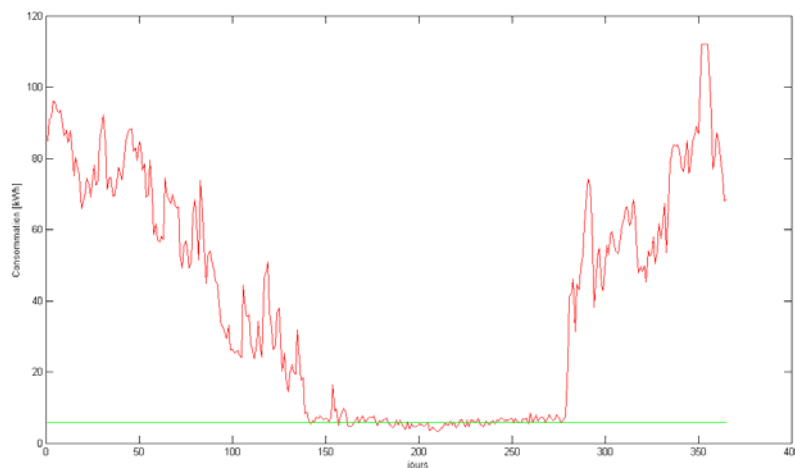


Figure 7: Représentation de la consommation d'eau chaude sanitaire en vert

Les statistiques considèrent que la consommation d'eau chaude sanitaire varie de 30 à 60 litres d'eau chaude à 60°C par personne par jour.⁵ (ce qui correspond environ à 30-40% de la consommation d'eau quotidienne estimée à 158 l/pers/jour).

Si on considère que la chaleur spécifique de l'eau est $c_p=4180$ [J/kg.K] on peut estimer la consommation annuelle pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire du bâtiment Minerva avec la formule suivante :

$$Consommation_annuelle_Minerva = \left(\frac{v * c_p * \Delta T}{(24 * 3600)} \right) * 8760 * nbre_habitants \quad [Wh]$$

v = consommation d'eau par habitant par jour [l/hab/jour]

ΔT = différence de température à chauffer [K]

Ainsi, en considérant qu'on peut obtenir l'eau en moyenne à 10° sur l'année, il faut donc la chauffer de 50K pour avoir une température de 60°. Si on considère 75 habitants, la fourchette de 30 à 60 litres nous donne une fourchette de consommation annuelle de 47'678 [kWh/année] à 95'356 [kWh/année]

Finalement on constate que la consommation extrapolée des données de Sinergy est bien dans la fourchette des statistiques et que le choix de multiplier cette consommation l'hiver par le coefficient ECS semble tout à fait plausible.

2.2.6 Résumé des valeurs observées, calculées, estimées

Paramètre	Valeur	unité
Température de consigne inférieure	23.00	°C
Taux d'infiltration	0.40	-
Coefficient U du toit	0.90	W/m2.K
Coefficient G des vitres	0.70	-
Epaisseur isolant	0.08	m
Coefficient U des vitres	2.80	W/m2.K
Coefficient K du sol	0.05	W/m2.K
Nbre d'occupants	75.00	-
Ratio de vitrage NE	0.35	-
Ratio vitrage NW	0.31	-
Ratio vitrage SW	0.44	-
Ratio vitrage SE	0.31	-
Coefficient ECS	1.20	-

Tableau 3: Résumé des valeurs utiles à la simulation

De plus, pour les résultats présentés dans ce travail, un profil d'occupation a été pris en compte. Ce profil détermine donc une probabilité de présence des habitants pour chaque heure de la journée.

⁵ http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF_Energie_ECS01_Part_FR.PDF

Ce profil est le même pour tous les jours de l'année. Ce profil a été fourni par le Dr. Haldi du laboratoire LESO-PB à l'EPFL.

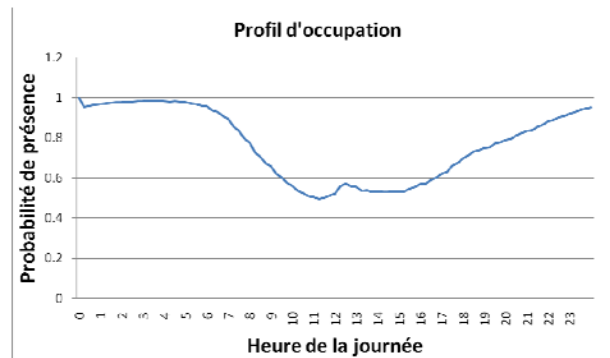


Figure 8: Profil d'occupation utilisé pour les simulations

2.3 Météorologiques

Pour lancer la simulation avec CitySIM, il faut définir un fichier texte contenant plusieurs informations sur la météo du lieu simulé. Pour ce travail, comme le but est de comparer les résultats simulés et mesurés, il est essentiel de créer le fichier météo le plus fiable possible de l'année étudiée, à savoir 2009.

Il s'agit de trouver des données sur le rayonnement, la température extérieure, les précipitations, le vent, l'humidité relative et la couverture nuageuse. Pour le rayonnement, il fallait d'abord trouver l'irradiance du diffus horizontale et l'irradiance directe perpendiculaire à la direction du soleil, mais, par la pratique, force était de constater qu'il était beaucoup plus évident de trouver de l'information sur le rayonnement globale. Ainsi, le nouveau fichier climatique requiert uniquement des données sur l'irradiance globale et la séparation des 2 rayonnements est extrapolée à partir d'une formule fournie par MétéoSuisse.

Finalement, il faut entrer les informations suivantes :

dm	Jour du mois
m	mois
h	heure
G_h	Irradiance globale (W/m ²)
Ta	Température de l'aire (°C)
FF	Vitesse du vent (m/s)
DD	Direction du vent [0,360°[
RH	Humidité relative (%)
RR	Précipitations (mm/m ²)
N	Nébulosité {0,1,2,3,4,5,6,7,8}

Tableau 4: Information météorologiques nécessaires

La solution la plus fiable et la plus évidente est la base de données de MétéoSuisse accessible aux étudiants sur demande. Le problème est que la station de Martigny est une vieille station qui a pris des mesures jusque dans les années 1970 et qui, depuis lors, est une station pluviométrique. Pour détourner ce problème, nous avons pris une station qui semblait avoir le climat le plus similaire

(surtout pour la température et le rayonnement) et nous avons comparé les différences sur plusieurs années avant 1970 entre ces deux stations pour se rendre compte des différences notoires.

La station choisie était celle de Sion, situé à 25km environ plus haut dans la vallée du Rhône. Les années choisies pour la comparaison sont 1965, 1967 et 1968. Par exemple les résultats de la comparaison pour la température en 1965 sont les suivants :

Comparaison degrés heure		
Martigny	89'083	degés-heure de chauffage
Sion	87'900	degés-heure de chauffage
Différence	1'183	degés-heure de chauffage
Pourcent de différence	1.33	%
Comparaison moyenne		
Martigny	8.62	°C
Sion	8.59	°C
Différence	0.03	°C
Pourcent de différence	0.37	%
Comparaison degrés jours		
Martigny	3'712	degés-heure de chauffage
Sion	3'663	degés-heure de chauffage
Différence	49	degés-heure de chauffage
Pourcent de différence	1.33	%

Tableau 5: Comparaison des données de température de l'air entre les stations de Sion et Martigny en 1965

Pour calculer les degrés-jour(-heure) de chauffage, un jour est considéré comme jour de chauffage lorsque la température moyenne journalière (horaire) est inférieure à 12°C.⁶ On calcule de combien la température extérieure de l'air s'écarte de la température intérieure souhaitée à 20°C. Ici par exemple la différence entre les deux stations est de 1,33% sur l'année, ce qui semble relativement faible. De plus les moyennes sont assez proches cette année-là.

Une comparaison a été faite également pour les autres données. Par exemple pour les précipitations on peut constater sur la figure ci-dessous que les fréquences sont quasi similaires, cette information confirme l'hypothèse que la couverture nuageuse ne devrait également pas trop différer entre ces deux stations.

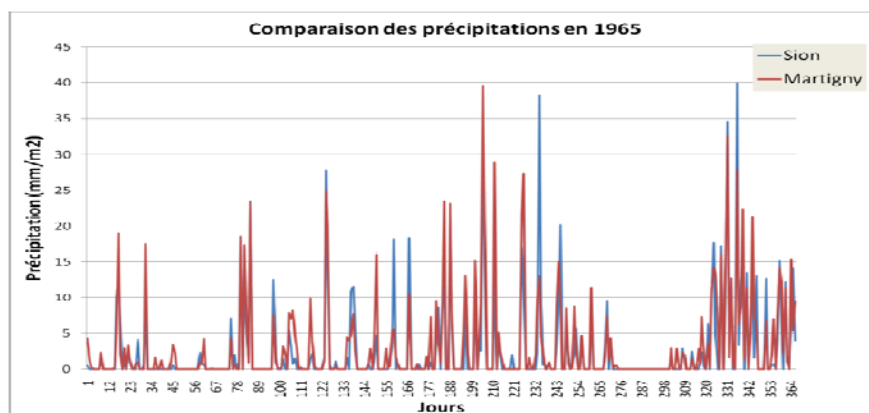


Figure 9: Comparaison des précipitations entre Sion et Martigny en 1965

⁶ http://www.meteosuisse.admin.ch/web/fr/services/portail_des_donnees/degres-jour_chauffage.html

Les résultats de cette comparaison ont montré que la température de Martigny est légèrement plus élevée que celle de Sion en moyenne et que pour les autres informations, les données de ces deux stations semblent assez similaires. **Finalement, le fichier météo pour les simulations reprendra les données fournies par la station météorologique de MétéoSuisse située à Sion avec une correction de 0.28°C à la hausse pour les températures.**

Enfin, le profil d'obstruction lointaine de Martigny a été obtenu à partir de la base de données de Meteonorm.

3 Modélisation sous CitySIM

Comme ce travail porte sur un unique bâtiment, la modélisation s'est faite directement depuis l'interface graphique de CitySIM avec les outils à disposition. D'abord le premier modèle était simplement un parallélépipède rectangle orienté comme sur le plan à disposition.

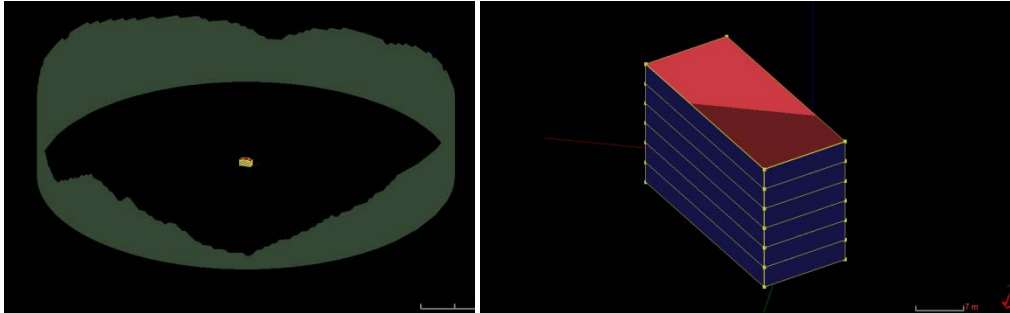


Figure 10: Première modélisation. A gauche on voit le profil d'obstruction lointaine.

Ce modèle a servi à la prise en main du logiciel et aux premières simulations. Ensuite, le modèle s'est précisé pour mieux représenter le volume réel avec une représentation de l'attique et une meilleure division en étages.

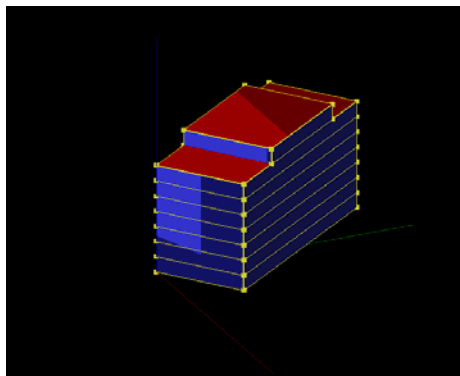


Figure 11: Modèle du bâtiment Minerva sous CitySIM

Ce modèle reste basique, mais le but de ce projet est aussi de tester la précision des résultats que l'on peut obtenir, sans avoir un modèle 3D forcément compliqué et très détaillé. Bien sûr, dans le prolongement de ce travail, il serait intéressant de tester l'impact d'un affinement du modèle sur la précision des résultats, par exemple en modélisant les balcons comme sur la figure ci-dessous. Cependant, pour tous les résultats qui suivront, le modèle utilisé est celui de la Figure 11.

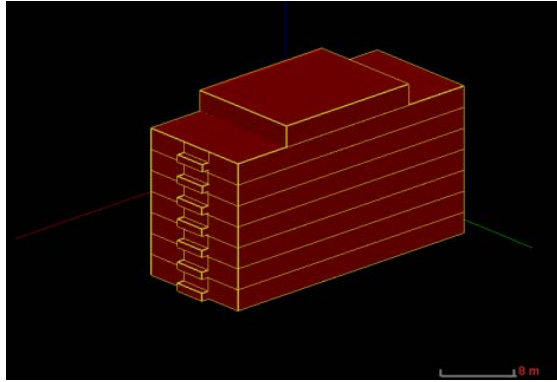


Figure 12: Modèle du bâtiment Minerva avec les balcons

4 Utilisation de Matlab

Le but de l'utilisation d'un programme comme Matlab est de pouvoir automatiser le lancement des simulations et la récupération des résultats sans avoir besoin de l'interface graphique. En effet, avant d'utiliser Matlab, pour une analyse de sensibilité par exemple, il fallait changer la valeur à la main dans l'interface graphique, lancer la simulation et copier-coller chacun des résultats dans un fichier Excel pour les répertorier. De plus la calibration du modèle requiert une méthode d'optimisation itérative qui ne serait pas possible avec cette méthode.

4.1 Fonctionnement de CitySIM

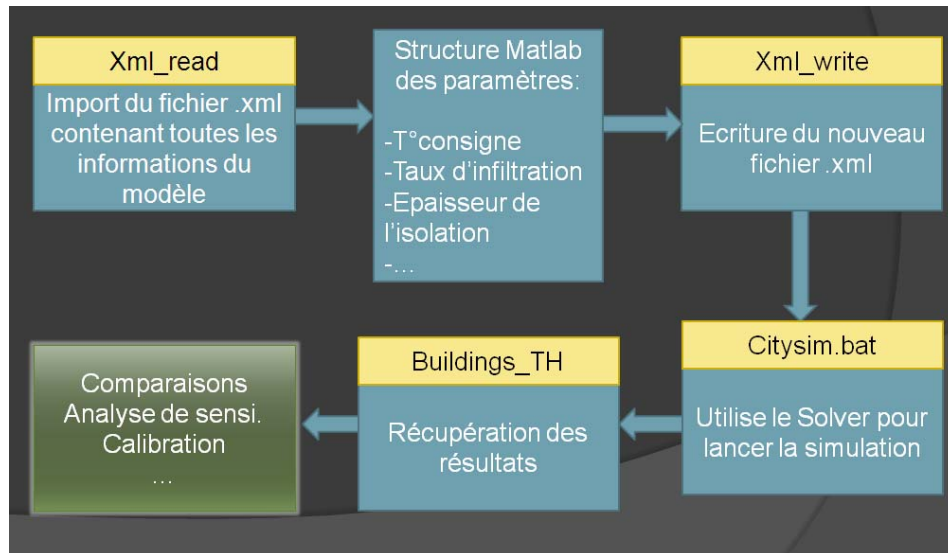
Le logiciel CitySIM utilise le format XML (Extensible Markup language) pour le stockage des informations du modèle. Le format XML est structuré en champs arborescents, ce qui permet de définir pour chaque « tag » un certain nombre d'attributs. Par exemple pour le tag « Wall » qui définit une face, il y a de nombreux attributs « area », « GlazingRatio »,... à savoir l'aire, la proportion de vitrage,... Les attributs sont toujours suivis de leur valeur. Un exemple d'un tag « Wall » est présenté ci-dessous.

```
- <Wall Area="46.26" GlazingGValue="0.9" GlazingRatio="0.35" GlazingUValue="2.8"  
  ShortWaveReflectance="0.2" Id="88" type="23">  
  <V0 x="-4.96361942261495" y="6.60862021226271" z="18.0000010786173" />  
  <V1 x="-4.96361942261495" y="6.60862021226271" z="20.5700010786173" />  
  <V2 x="-15.7962898393518" y="20.984059393114" z="20.5700010786173" />  
  <V3 x="-15.7962898393518" y="20.984059393114" z="18.0000010786173" />  
</Wall>
```

Ce format permet donc de structurer les informations pour la lecture par le solveur nommé **Citysim.exe**. Le solveur peut être perçu comme une boîte noire qui lit le fichier XML d'un modèle appelé **buildings.xml**, simule ses consommations sur une année et écrit les résultats dans un fichier texte nommé **buildings_TH.txt**.

4.2 Structure du code Matlab

Le but du code est donc d'importer les données contenues dans le fichier XML sous forme d'une structure arborescente de Matlab, afin de pouvoir changer les valeurs des attributs et de réécrire ensuite un nouveau fichier XML avec ces nouvelles valeurs. Ensuite, il faut lancer la simulation depuis Matlab en exécutant le solveur avec le nouveau fichier **buildings.xml**. Enfin il faut récupérer les informations écrites dans le fichier **buildings_TH.txt**. La structure du code est représentée sur le graphique suivant.



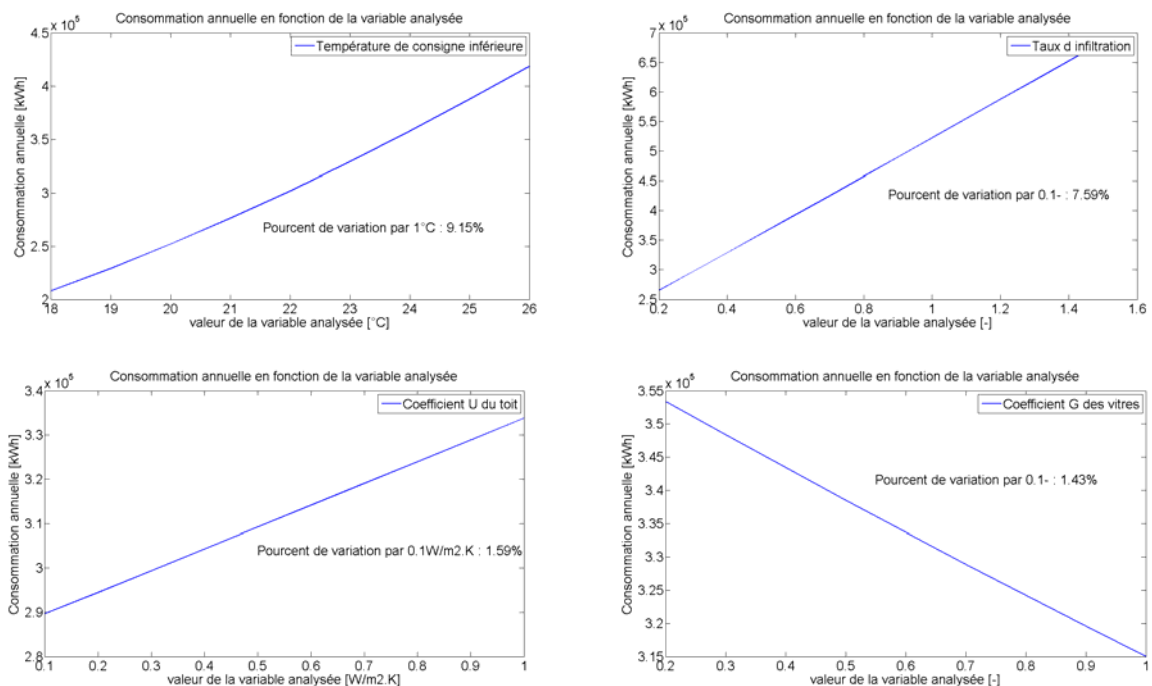
Rem : Un exemple de code se trouve en annexe.

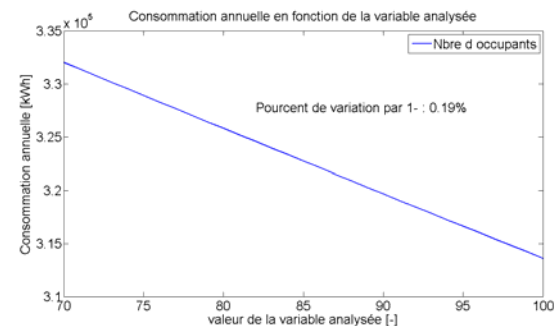
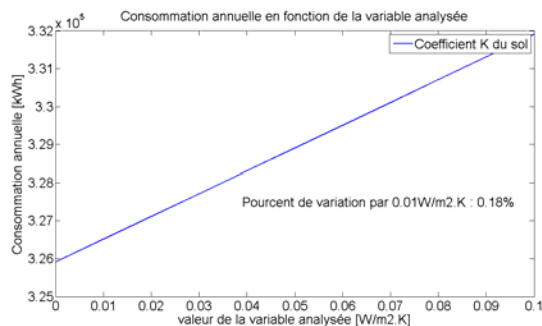
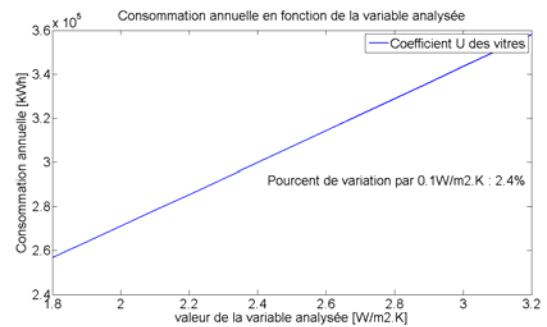
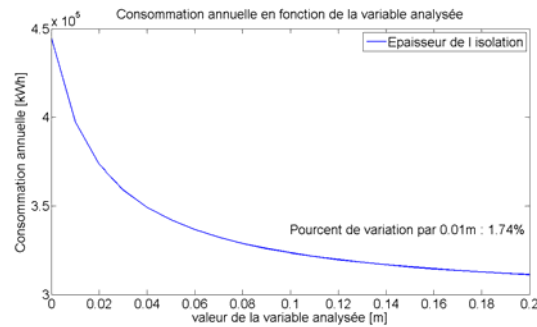
4.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est une quantification de l'impact sur la consommation de chaleur d'une variation d'un paramètre selon un intervalle choisi. Elle permet de mieux connaître l'influence de chacun des paramètres sur la consommation de chaleur. Aussi, avec la littérature existante, il est possible de savoir si l'ordre de grandeur de la sensibilité des paramètres est plausible et donc cela permet de corriger des erreurs potentielles.

Pour cette analyse de sensibilité, tous les paramètres sont fixés selon les valeurs du Tableau 3, seul le paramètre étudié varie. L'intervalle de variation est choisi en fonction de l'ordre de grandeur de la variable et également en fonction des valeurs possibles qu'elle pourrait prendre.

Les résultats graphiques de l'analyse de sensibilité sont représentés ci-dessous :





Le tableau suivant reprend ces résultats en mettant en évidence l'intervalle de variations des variables analysées et les classe selon leur ordre d'influence. En plus des résultats graphiques ci-dessus, les influences des proportions de vitrage de chaque exposition ont été calculées.

	Variation		Intervalle de variation
Température de consigne inférieure	9.15 %/1	°C	18-26
Taux d'infiltration	7.59 %/0.1		0.2-1.5
Coefficient U des vitres	2.4 %/1	W/m².K	1.8-3.3
Epaisseur de l'isolation	1.74 %/0.01	m	0-0.2
Coefficient U du toit	1.59 %/0.1	W/m².K	0.1-1
Coefficient G des vitres	1.43 %/0.1		0.2-1
Ratio vitrage NE	0.47 %/0.01		0.3-0.4
Ratio vitrage SE	0.45 %/0.01		0.25-0.5
Ratio vitrage SW	0.41 %/0.01		0.3-0.55
Ratio vitrage NW	0.21 %/0.01		0.25-0.5
Nbre d'occupants	0.19 %/1	personne	70-100
Coefficient K du sol	0.18 %/0.01	W/m².K	0-0.1
Reflectance onde courtes	Influence seulement si il y a une interaction d'un bâtiment sur l'autre		

Figure 13: Résultat de l'analyse de sensibilité

La première observation est que les deux valeurs les plus influentes, à savoir la température de consigne et le taux d'infiltration, sont certainement les plus incertaines et les plus dures à calibrer. C'est pourquoi, avant de pouvoir faire des scénari d'optimisation de la performance énergétique sur un bâtiment existant, il est important de d'abord calibrer ces valeurs à l'aide de données expérimentales.

Ensuite, on constate que la couche d'isolation est la seule qui s'éloigne vraiment d'une droite. Ce résultat montre qu'une petite couche d'isolation sur les murs influence énormément sa consommation de chaleur, mais que, dans un cas comme le nôtre où il existe déjà une couche

d'isolation de 8cm, un scénario imposant une augmentation de cette couche d'isolation n'aurait pas un énorme impact.

4.4 Comparaison des résultats

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les résultats de la simulation de consommation de chaleur du bâtiment Minerva pour l'année 2009 à ceux obtenu par le fournisseur d'énergie de la ville de Martigny, Sinergy.

A nouveau, les valeurs des paramètres utilisés pour la simulation sont ceux du Tableau 3. En comparant les consommations de chaleur simulées par CitySIM à celles fournies par Sinergy pour l'année 2009, on obtient le résultat graphique suivant.

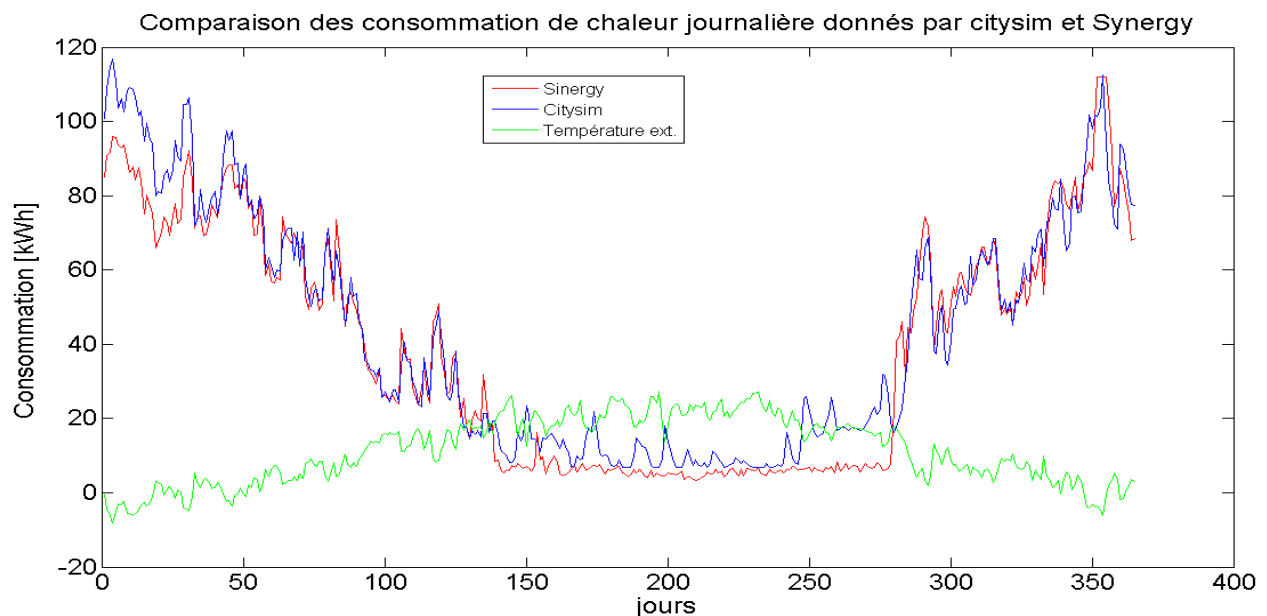


Figure 14: Comparaison des consommations de chaleur fournie par CitySIM à celles fournie par Sinergy

Les données utilisées pour ce graphe sont des moyennes journalières de la consommation horaire. Pour être plus précis, l'unité est représentée donc des kilowattheures par heure.

Rem : Le fait de moyenner sur une journée ne permet pas de représenter les inerties jour/nuit, les variations sur la journée et il semblerait intéressant, dans une seconde approche de calibration, de comparer les deux courbes heure par heure.

Sur ce graphe, on constate déjà que les deux comportements sont assez similaires durant la période froide, mais qu'ils sont moins proches durant l'été. En effet, il faut savoir que le chauffage du bâtiment Minerva est coupé du 19 mai au 6 octobre et que la simulation ne prend pas en compte cette coupure. C'est pour cette raison que dans les calculs d'erreur entre les deux courbes, cette période chaude ne sera jamais prise en compte. Aussi voit-on que le fichier climatique est fiable, car à chaque creux de température sur la courbe verte correspond un pic de consommation.

L'erreur est calculée donc sur la période froide et elle peut être calculée de deux manières différentes :

- La première façon est de prendre la moyenne annuelle du pourcentage d'erreur de chaque jour de la courbe de CitySIM par rapport à celle de Sinergy. Avec ces valeurs non calibrées, issues du Tableau 3, on trouve une erreur moyenne de **10.55%**. La figure suivante illustre la répartition de ces erreurs sur l'année.

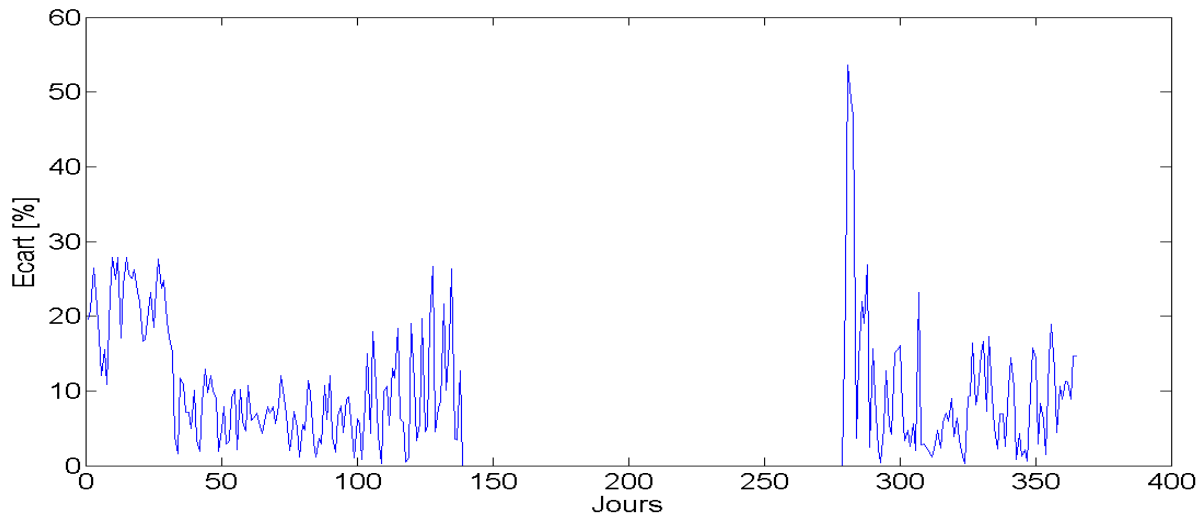


Figure 15: Pourcentage d'écart de la consommation de chaleur de CitySIM par rapport à celle de Sinergy

On constate un pic d'erreur au redémarrage du chauffage en octobre. Ce pic est dû au fait que CitySIM ne simule pas la coupure et donc ne connaît pas une phase de redémarrage. En effet, le chauffage qui s'était arrêté depuis mi-mai doit redémarrer et, durant la période transitoire où il faut atteindre à nouveau la température de consigne inférieure des appartements, le chauffage utilisera plus d'énergie que dans le cas inertiel simulé. D'ailleurs, sur la Figure 14, on voit qu'à partir du 250^{ème} jour environ, la consommation simulée augmente considérablement, car la température extérieure diminue, alors que le chauffage est en réalité éteint. Ensuite, toujours sur cette même figure, on voit clairement qu'au redémarrage, la courbe rouge de Sinergy forme un pic bien supérieur à la consommation simulée en bleu.

Ainsi, pour diminuer l'erreur de simulation, il vaudrait mieux simuler cette coupure de chauffage.

- La deuxième manière de calculer l'erreur est de comparer les sommes de consommation de chaleur durant la saison froide. Pour Sinergy, on obtient une consommation de 327'250 kWh et, pour CitySIM, on trouve 345'260 kWh. L'erreur totale est donc seulement de **5.21 %**. En admettant que le chauffage est coupé hors de cette saison, cette erreur représente donc l'erreur de prédiction de la consommation annuelle.

5 Calibration du modèle

Même si les erreurs calculées au §4.4 sont relativement faibles et les prédictions dès lors déjà très bonnes avec les valeurs estimées, calculées et observées sur place, il est essentiel de passer par une étape de calibration du modèle avant de pouvoir envisager des scénari d'optimisation des performances énergétiques. Cette étape de calibration a pour but d'ajuster au mieux les paramètres

du modèle pour se rapprocher de la courbe fournie par Sinergy. Dans ce travail, nous utiliserons une démarche de minimisation des différences entre les deux courbes par algorithme d'optimisation.

5.1 Définition du problème d'optimisation

Pour ce problème d'optimisation, il faut définir une fonction objective, c'est-à-dire une fonction retournant une grandeur scalaire que l'on veut minimiser. A chaque itération, et donc à chaque simulation, cette fonction sera évaluée.

La fonction objective de ce problème est la suivante :

$$F_{obj} = \sum_{k=1}^{138} (ConsoCitySIM(k) - ConsoSinergy(k))^2 + \sum_{k=280}^{365} (ConsoCitySIM(k) - ConsoSinergy(k))^2$$

Elle représente donc la somme des différences au carré entre les deux courbes durant la période froide.

Les variables de décisions de ce problème d'optimisation sont toutes des variables continues et elles représentent les paramètres sur lesquels il y a une certaine incertitude. Pour chacun de ces paramètres, il faut définir deux contraintes d'inégalités qui forment les bornes inférieures et supérieures de variation. Ces bornes sont définies selon une certaine plausibilité et donc selon des valeurs rencontrées dans la pratique. Les treize paramètres utilisés pour l'optimisation sont présents dans le tableau ci-dessous, mais nous verrons par la suite que tous ne sont pas utilisés pour les mêmes raisons, car les incertitudes sur ces différentes variables ne sont pas les mêmes.

Paramètre	CI	LB	UB	Unités
Température de consigne inférieure	23	18	25	°C
Taux d'infiltration	0.4	0.1	1	-
Coefficient U du toit	0.9	0.1	1	W/m2.K
Coefficient G des vitres	0.7	0.5	0.8	-
Epaisseur isolant	0.08	0	0.2	m
Coefficient U des vitres	2.8	2	3.2	W/m2.K
Coefficient K du sol	0.05	0	0.1	W/m2.K
Nbre d'occupants	75	70	100	-
Ratio de vitrage NE	0.35	0.3	0.4	-
Ratio vitrage NW	0.31	0.25	0.5	-
Ratio vitrage SW	0.44	0.3	0.55	-
Ratio vitrage SE	0.31	0.25	0.5	-
Coefficient ECS	1.2	1	1.5	-

Tableau 6: Variables du problème d'optimisation, CI =condition initiale, LB = borne inférieure, UB = borne supérieure

Certains intervalles sont assez larges, comme la température de consigne inférieure qui monte jusqu'à une température intérieure des appartements de 25°C. Le but est de ne pas activer les bornes pour les résultats de l'optimisation, tout en restant dans le domaine du plausible. Il faut savoir qu'il n'est pas si rare de trouver des personnes qui se plaisent à vivre avec des températures intérieures pouvant même aller jusqu'à 26° de moyenne, surtout en hiver.

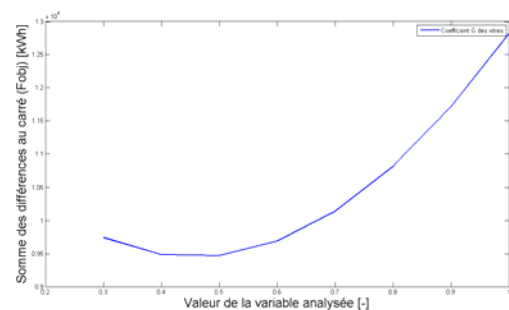
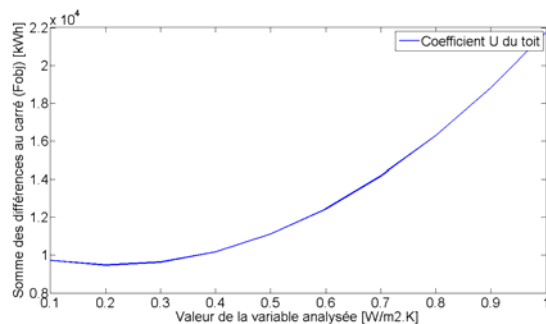
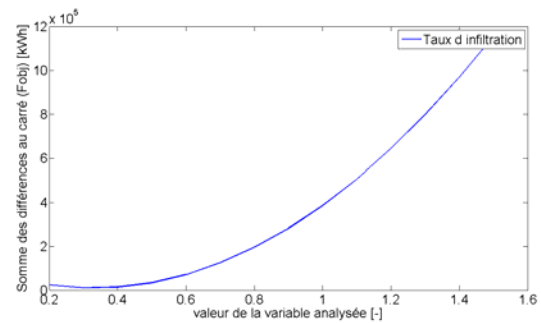
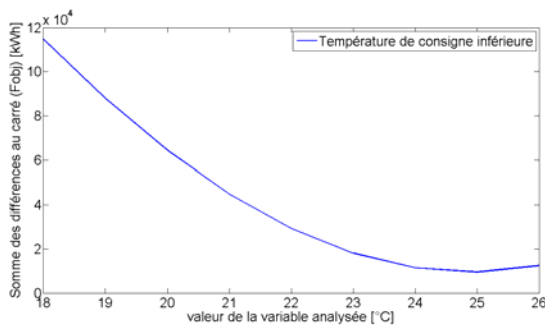
Aussi, pour la borne inférieure des vitres, comme les visites sur place ont montré que les vitres étaient plutôt vieilles dans l'ensemble, il semble peu plausible que la valeur du coefficient U soit

proche des valeurs des vitres actuelles, à savoir entre 1 et 1.8 W/m².K, c'est pourquoi la borne de 2W/m².K est assez restrictive.

Aussi, les bornes des proportions de vitrage sont assez serrées, car l'incertitude est beaucoup plus faible. Le but de faire varier ces paramètres de ratio de vitrage est bien sûr de permettre un affinement de la calibration, mais aussi d'observer dans quelle mesure l'optimisation tendra à faire varier ces valeurs. En effet, on pourrait peut-être avoir plus d'informations sur les habitudes des habitants par cette méthode, car si la calibration voulait diminuer nettement un de ces ratios, cela pourrait traduire par exemple une tendance à souvent fermer les stores, car l'observation a été faite qu'au mois de février par un jour froid ensoleillé beaucoup de stores de la face Sud-Est étaient fermés.

5.2 Choix de l'algorithme

Comme nous n'avons pas d'information sur la forme de la fonction objective, ni une dérivée explicite de cette fonction, la première étape est d'observer comment les paramètres influencent indépendamment la valeur de la fonction objective.



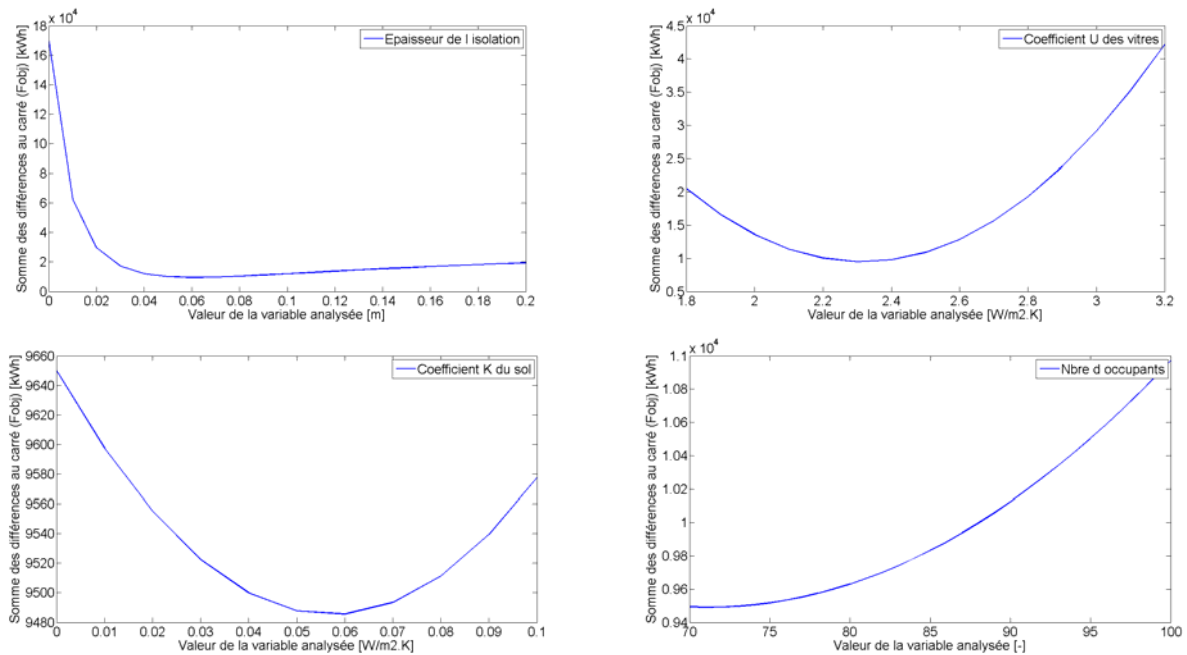


Figure 16: Résultat de l'analyse de sensibilité de chacune des variables du problème d'optimisation indépendamment sur la fonction objective

On constate que toutes les courbes sont bien lisses, qu'il n'y a pas de perturbation d'ordre élevé et que chacune de ces courbes prise indépendamment ne poserait aucun problème d'optimisation. Bien sûr, le fait que ces courbes soient toutes convexes avec un seul minimum ne veut pas dire que le problème d'optimisation globale soit aussi convexe et uni-modal. La combinaison de l'influence de chacun de ces neuf paramètres peut donner tout autre chose. Cependant, par cette analyse de sensibilité, on peut supposer qu'il n'y a pas besoin d'appliquer un filtre sur les résultats.

En voyant ce comportement, la première idée était de partir sur un algorithme de recherche direct, un algorithme assez standard de descente en direction du gradient à partir des conditions initiales, puisque celles-ci donnent déjà de bons résultats et que la solution la plus plausible ne devrait pas trop s'éloigner de ces observations. Pour ce faire, nous avons utilisé le solveur « fmincon » de la toolbox de Matlab. Ce solveur s'applique aux problèmes de minimisation de fonctions non-linéaires sous contraintes et multivariables spécifiés de la manière suivante :

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases}$$

Où x , b , beq , lb , ub sont des vecteurs, A et Aeq sont des matrices, $c(x)$ et $ceq(x)$ sont des fonctions qui retournent un vecteur et $f(x)$ la fonction objective qui retourne un scalaire. $c(x)$ et $ceq(x)$ peuvent être non-linéaires.⁷

Ce solveur utilise le Lagrangien et sa seconde dérivée appelée matrice Hessienne. Comme la dérivée de la fonction objective dans notre cas n'existe pas sous forme analytique, il faut l'approximer pour

⁷ <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/optim/ug/fmincon.html>

trouver la matrice Hessienne. Il y a trois algorithmes possibles liés à ce solveur, les deux premiers, « région de confiance » et « points intérieurs » peuvent accepter une entrée à la main par l'utilisateur de la matrice Hessienne, alors que l'algorithme « active set », utilisé dans ce travail, approxime la Hessienne du Lagrangien par une méthode de quasi-Newton.

L'algorithme « active set » transforme le problème en un problème plus simple qui peut servir de base à un procédé itératif. L'algorithme réduit le problème contraint à un problème basique non contraint en utilisant une fonction de pénalité pour les contraintes qui sont activées ou proches de l'être. Ensuite, l'algorithme converge vers une solution du problème contraint en utilisant une séquence d'optimisation paramétrique sur le problème non-constraint.

Cependant, les résultats ont montré que la valeur optimale des variables de décision dépend fortement des valeurs initiales. Ceci prouve que les minima trouvés sont certainement des minima locaux et qu'il semble vraiment difficile, voire très improbable, de tomber sur un minimum global avec cet algorithme pour une telle fonction objective multimodale. Même si le but n'est peut-être pas de trouver forcément le minimum global, mais un bon minimum plausible, cette méthode n'est pas adéquate, car du fait de la forte dépendance entre les paramètres l'algorithme de descente se retrouve souvent bloqué et ne fait pas forcément varier tous les paramètres. En effet, il se peut que, en montant un peu la température de consigne inférieure et en baissant légèrement le taux d'infiltration, la valeur de la fonction objective soit la même. Il y a donc peut-être des « vallées » dans la forme de la fonction objective, c'est-à-dire des droites sur lesquelles la valeur de la fonction est la même, mais la valeur des paramètres différente.

Pour augmenter donc les chances de trouver un bon minimum, il semblerait plus judicieux de recourir à un algorithme génétique. L'algorithme précédent convergait en moyenne après environ 8 itérations, soit à peu près 120 évaluations de fonction ; il faut compter environ 12sec par évaluation sur un ordinateur portable et donc l'optimisation dure environ 25 minutes. Pour un algorithme génétique, avec les mêmes conditions, il faut compter environ une nuit pour une convergence.

Finalement, la calibration des paramètres du modèle Minerva utilisera d'abord un algorithme génétique avec les 9 paramètres les plus incertains (on ne considère pas les ratios de vitrage) pour trouver une bonne solution qui servira de condition initiale pour un affinement avec l'algorithme « active set » avec les 13 variables. Cette méthode est en quelque sorte une méthode hybride.

L'algorithme génétique utilisé est à nouveau celui proposé par la toolbox de Matlab. L'utilisation d'un algorithme génétique reste toutefois très complexe et le temps imparti pour ce travail est légèrement court pour véritablement maîtriser les conditions d'utilisation. Ainsi, les résultats présentés au chapitre suivant pourraient certainement être encore améliorés en réglant mieux les paramètres de dimensionnements comme la taille de la population, le nombre total de générations ou critère d'arrêt, les probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation...

6 Résultats

Ce chapitre présente les résultats de la calibration.

6.1 Convergence et valeurs des paramètres

D'abord avec la première méthode d'optimisation, comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, la convergence est rapide. Les valeurs initiales sont toujours celles du Tableau 3.

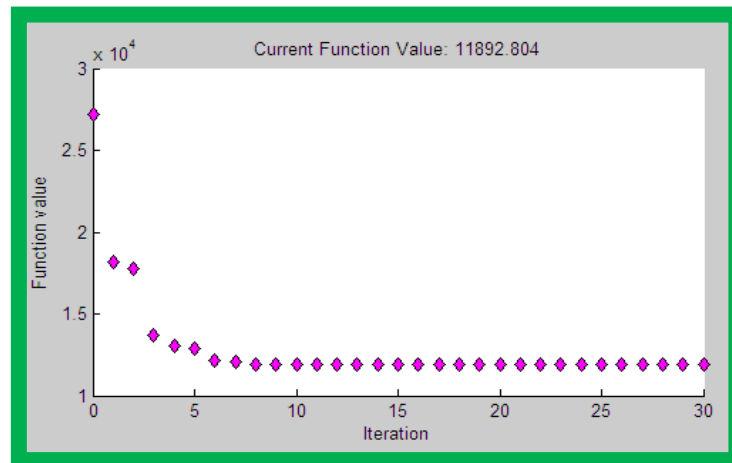


Figure 17: Valeur de la fonction objective en fonction du nombre d'itération avec un algorithme de type active set

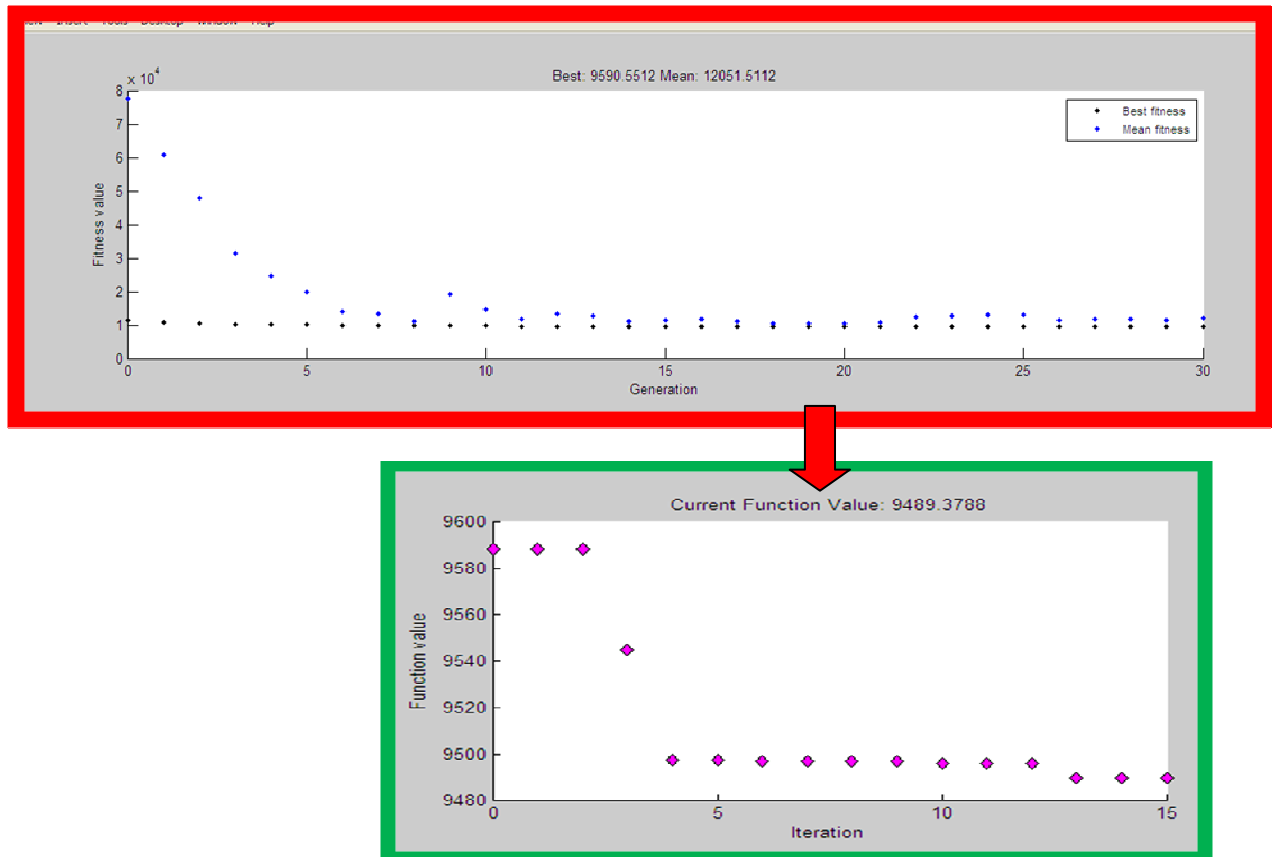
Avec cette méthode, on obtient les valeurs suivantes pour les 13 paramètres :

Paramètres	Valeur	Avant opt.	LB	UB	Unités
Température de consigne inférieure	22.103	23	18	25	°C
Taux d'infiltration	0.400	0.4	0.1	1	-
Coefficient U du toit	0.900	0.9	0.1	1	W/m2.K
Coefficient G des vitres	0.700	0.7	0.5	0.8	-
Epaisseur isolant	0.142	0.08	0	0.2	m
Coefficient U des vitres	2.800	2.8	2	3.2	W/m2.K
Coefficient K du sol	0.027	0.05	0	0.1	W/m2.K
Nbre d'occupants	75	75	70	100	-
Ratio de vitrage NE	0.363	0.35	0.3	0.4	-
Ratio vitrage NW	0.310	0.31	0.25	0.5	-
Ratio vitrage SW	0.463	0.44	0.3	0.55	-
Ratio vitrage SE	0.310	0.31	0.25	0.5	-
Coefficient ECS	1.405	1.2	1	1.5	-

Tableau 7: Valeurs des paramètres après optimisation avec l'algorithme active set sous Matlab

Ces valeurs sont toutes assez réalistes, mais comme il a été présenté dans le chapitre précédents, le résultat a de forte chance d'être simplement un minimum local proche des conditions initiales, sans être forcément un bon minimum. On vérifie cette affirmation par le fait que beaucoup de paramètres n'ont pas varié par rapport à leur valeur initiale. Notamment, un paramètre comme le taux d'infiltration qui reste assez incertain devrait s'ajuster pour véritablement prétendre à une calibration du modèle.

Pour la deuxième méthode, utilisant d'abord un algorithme génétique (encadré en rouge) puis un algorithme de descente (encadré en vert), la convergence est beaucoup plus lente.



Avec cette méthode hybride on obtient les valeurs des paramètres suivants :

Paramètres	Valeur	Avant opt.	LB	UB	Unités
Température de consigne inférieure	24.92	23	18	25	°C
Taux d'infiltration	0.33	0.4	0.1	1	-
Coefficient U du toit	0.24	0.9	0.1	1	W/m2.K
Coefficient G des vitres	0.52	0.7	0.5	0.8	-
Epaisseur isolant	0.061	0.08	0	0.2	m
Coefficient U des vitres	2.33	2.8	2	3.2	W/m2.K
Coefficient K du sol	0.068	0.05	0	0.1	W/m2.K
Nbre d'occupants	71.92	75	70	100	-
Ratio de vitrage NE	0.34	0.35	0.3	0.4	-
Ratio vitrage NW	0.31	0.31	0.25	0.5	-
Ratio vitrage SW	0.43	0.44	0.3	0.55	-
Ratio vitrage SE	0.31	0.31	0.25	0.5	-
Coefficient ECS	1.50	1.2	1	1.5	-

Tableau 8: Valeurs des paramètres après optimisation

Tout d'abord, la valeur de la température de consigne inférieure est bien supérieure à ce que l'on pouvait attendre. Une température intérieure de 24.92°C est une valeur plausible mais assez exceptionnelle. Il faudrait au moins vérifier cette valeur par des mesures pour véritablement valider cette calibration. D'autant plus que la valeur du taux d'infiltration est assez basse et peut-être que si

on suivait une logique expérimentale, on aurait tendance à contrebalancer une baisse de la température de consigne inférieure par une augmentation du taux d'infiltration. Il faudrait donc avoir une mesure expérimentale pour ajuster ces valeurs, ou alors vérifier ces résultats sur une autre année.

Le coefficient U du toit a beaucoup baissé, il est passé de 0.9 à 0.24 W/m².K. Cette valeur est tout à fait possible, car nous n'avons aucune information sur la composition de ce toit, et comme il semble que ce soit un toit plat, s'il est bien isolé cette valeur est justifiable.

Le coefficient G des vitres a diminué. Ce comportement est très intéressant, car il traduit certainement une volonté de compenser l'influence des balcons. En effet le bâtiment Minerva comporte beaucoup de balcons, notamment sur la face SO où la proportion de vitrage est élevée, et le modèle ne prend pas en compte leur influence. Comme le coefficient G représente le flux d'énergie transmise à travers la vitre, s'il diminue, cela peut être causé par une opacité accrue due aux balcons. Il serait donc intéressant de comparer un modèle calibré avec les balcons et un modèle calibré sans les balcons pour voir dans quelle mesure un simple ajustement de ce coefficient pourrait éviter une modélisation 3D complexe des balcons.

Le coefficient U des vitres a diminué. Comme nous l'avons constaté lors des visites sur place, une petite partie des fenêtres avait déjà été changée et c'est certainement la cause d'une amélioration de ce coefficient.

La seule borne activée est celle du coefficient d'eau chaude sanitaire. Cependant, comme on l'a vu au chapitre §2.2.5, la consommation calculée comme la moyenne en été est proche de la borne inférieure des statistiques, donc une augmentation de une fois et demie reste plausible.

6.2 Consommations

Sur la page suivante se trouvent les 3 graphes de comparaison des consommations pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire pour l'année 2009, avec les valeurs du Tableau 3 pour le graphe avant l'optimisation, avec les valeurs du Tableau 7 pour le graphe après une optimisation uniquement avec l'algorithme active set, et les valeurs du Tableau 8 pour le graphe après optimisation avec la méthode hybride (algorithme génétique+active set).

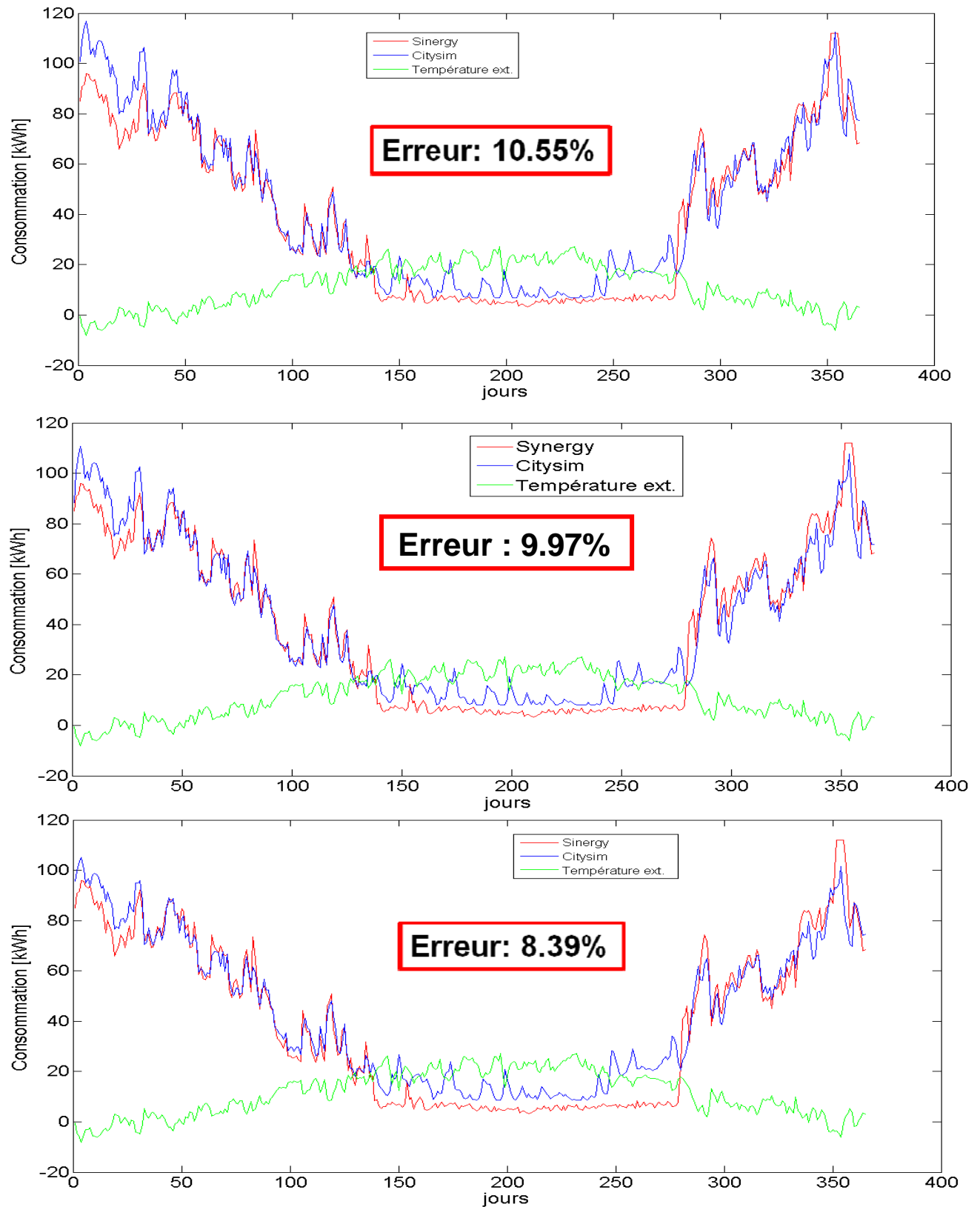


Figure 18: En haut: avant l'optimisation, Au milieu : après optimisation (active set uniquement) En bas: après optimisation (méthode hybride)

Par la suite, les différences et améliorations seront discutées entre le premier graphe (avant l'optimisation) et le graphe du bas (optimisation par la méthode hybride) de la Figure 18

L'optimisation a donc permis une amélioration de 2.16%. Cette amélioration n'est pas énorme, mais c'est parce que l'erreur de 10.55% d'avant était déjà très petite. En effet, la première remarque à faire en voyant ce résultat est que les prédictions de CitySIM avec une simple visite du bâtiment et une estimation des paramètres permet déjà d'avoir une excellente simulation de la consommation de chaleur, puisqu'une optimisation ne permet d'améliorer ce résultat que de 2.16%.

Finalement, pour ce modèle calibré, les différences résiduelles entre les deux modèles sont représentées sur la figure suivante.

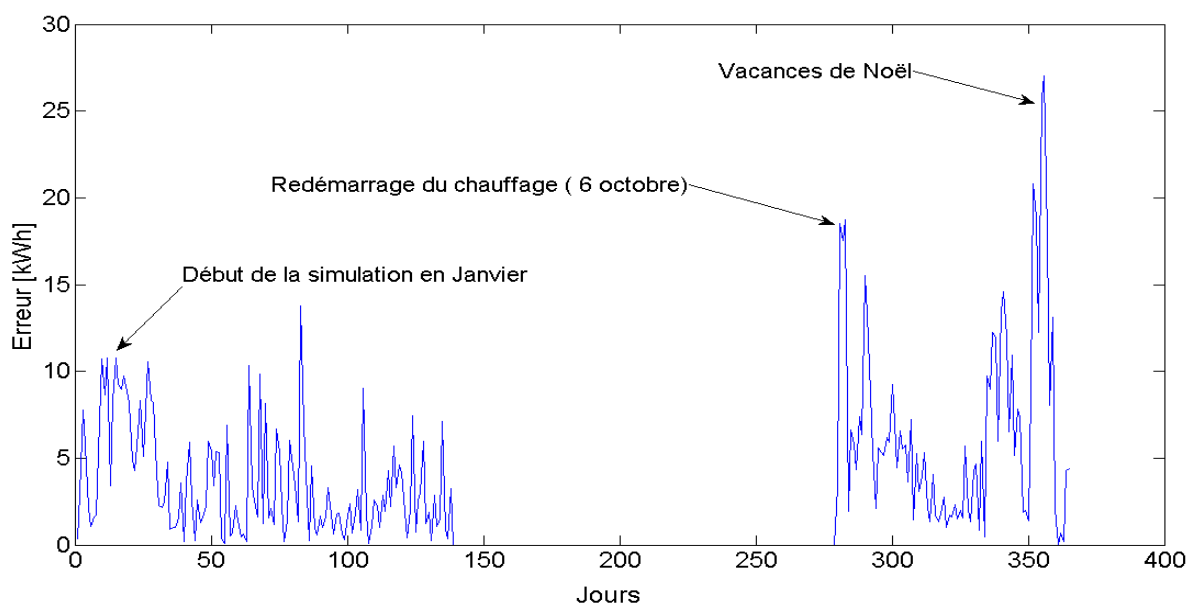


Figure 19: Erreurs résiduelles après la calibration

Les pics d'erreurs se trouvent donc au début de la simulation, au redémarrage du chauffage après la saison chaude et vers la fin décembre, pendant les vacances de Noël. Ce dernier pic s'explique certainement par le fait que les personnes sont plus à la maison durant ces vacances et consomment donc plus ; ou encore durant les fêtes, il y a souvent des invités qui entrent et sortent et donc augmentent le taux d'infiltration avec des températures extérieures froides, ce qui augmente considérablement la consommation pour le chauffage. Il faudrait donc avoir des profils d'occupation variables sur l'année avec peut-être aussi des paramètres comme le taux d'infiltration à adapter en fonction de l'année.

Ensuite, on constate que l'amélioration s'est beaucoup faite sur les premiers jours de l'année, correspondant à peu près au mois de janvier. Cette différence est en partie due au fait que le logiciel CitySIM ne considère pas que l'immeuble soit à la température de consigne inférieure au début de la simulation, il considère plutôt qu'il est à la température moyenne de l'air de 15°C. Il y a donc une phase transitoire durant laquelle la consommation est plus grande avant d'atteindre justement cette température intérieure souhaitée. Durant la dernière semaine de ce travail, le solveur a été amélioré

pour pré-conditionner les paramètres quinze jours avant la période simulée. Le résultat est présenté graphiquement ci-dessous, mais, faute de temps, une nouvelle calibration n'a pas été possible.

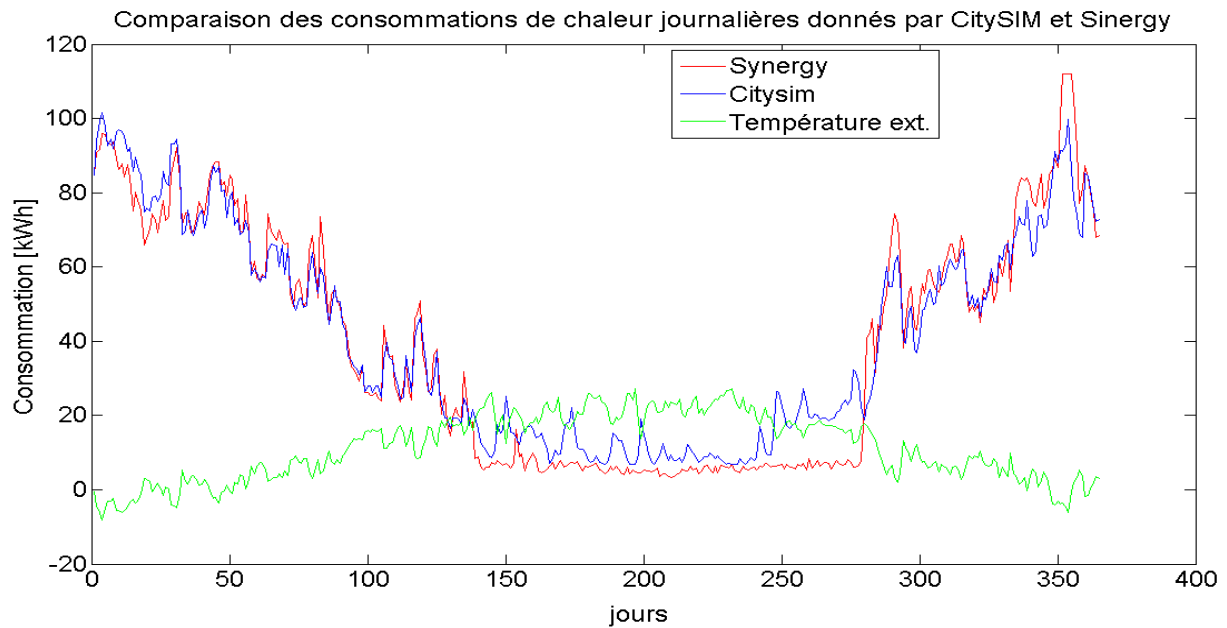


Figure 20: Résultat de consommation de chaleur du modèle calibré avec pré-conditionnement

Grâce à ce nouveau solveur, l'erreur est passée de 8.39% à 7.97% pour le modèle calibré. Nous pouvons d'ailleurs constater, sur les deux agrandissements ci-dessous, que le comportement simulé à l'aide du nouveau solveur en commençant la simulation le 1^{er} janvier (à gauche) est très proche du comportement simulé à l'aide de l'ancien solveur en commençant la simulation le 1^{er} décembre de l'année d'avant (à droite). Ainsi le pré-conditionnement est convaincant.

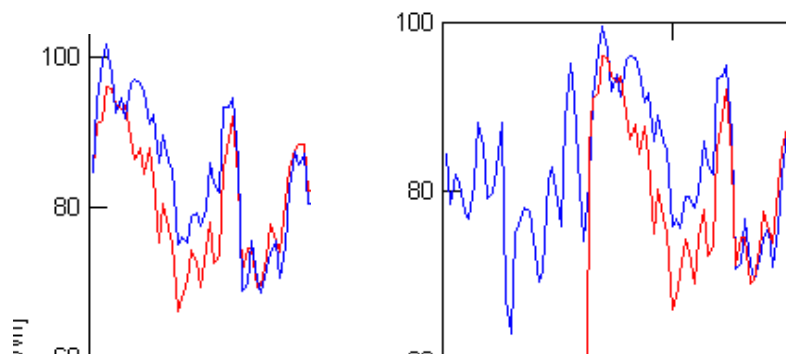
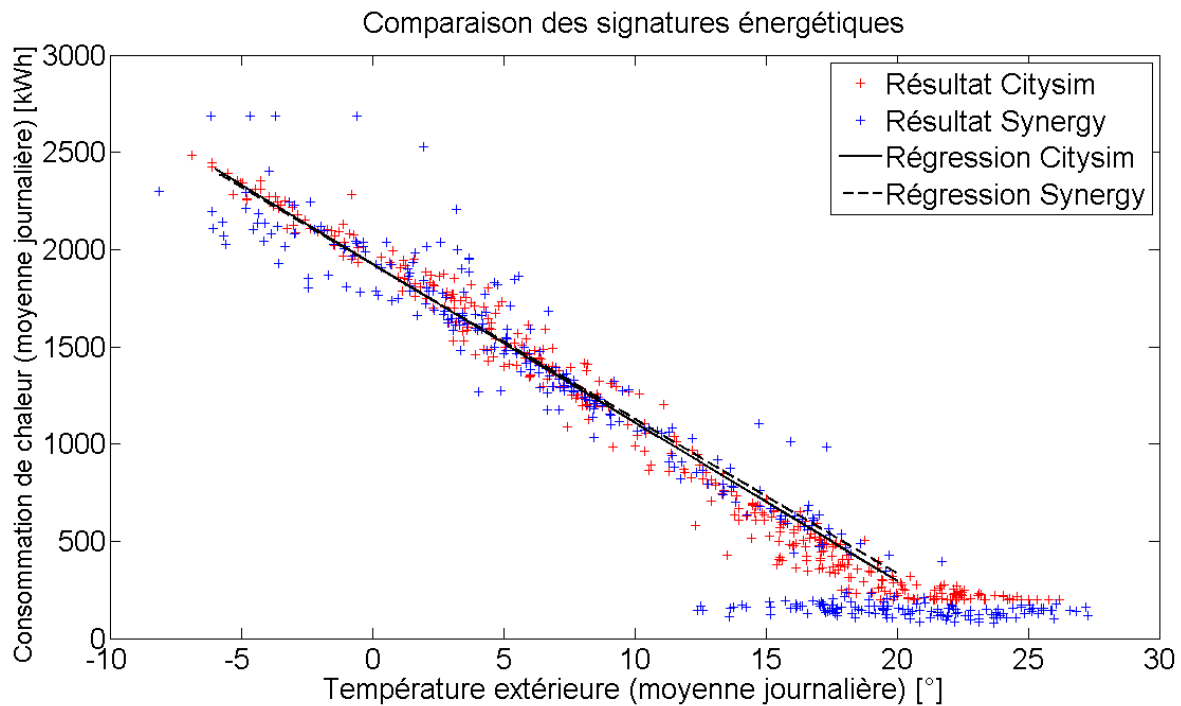


Figure 21: Comparaison d'une simulation avec pré-conditionnement depuis le 1er janvier (à gauche) et une simulation sans pré-conditionnement depuis le 1er décembre de l'année précédente (à droite)

6.3 Signature énergétique



La régression s'est faite sur la période froide, c'est-à-dire du 6 octobre au 19 mai, quand le chauffage n'est pas coupé.

Les deux droites de régression sont très proches. Elles s'éloignent légèrement pour des températures entre 15°C et 20°C. Ce résultat montre que les prédictions de CitySIM sont très bonnes pour la signature énergétique, ce qui est particulièrement intéressant pour le dimensionnement des systèmes de conversion et de distribution de l'énergie de chauffage. En effet, ces systèmes sont réglés par rapport à cette signature et donc une bonne prédiction de la signature avant la construction du bâtiment permettra d'installer le système le plus adéquat qui pourra donc tourner à son fonctionnement nominal. Il faudra bien sûr encore obtenir les puissances maximales à fournir pour le dimensionnement et il serait donc intéressant de comparer les puissances maximales prédites par CitySIM à celles mesurées par Synergy.

7 Utilisation des résultats

A présent que le modèle est calibré, il est intéressant de donner un bref aperçu de ce qu'il est possible d'en faire. D'abord un exemple de scénario d'amélioration de la performance énergétique et ensuite une comparaison avec les standards Minergie® pour se rendre compte des performances actuelles du bâtiment.

7.1 Scénario d'amélioration de la performance énergétique

Comme exemple d'amélioration nous allons prendre simplement un scénario de rénovation classique qui consiste à ajouter une couche d'isolation pour chacune des façades. Bien sûr, ce scénario sert seulement d'exemple pour tester les possibilités d'utilisation du modèle, car si on voulait vraiment utiliser le potentiel de ce modèle, il faudrait réaliser une optimisation thermo-économique dont le but serait de déterminer l'épaisseur de la couche d'isolation optimale à ajouter sur chacune des façades en fonction de leur orientation.

Selon le Tableau 8, l'épaisseur actuelle est de 6.1cm. Dans ce scénario nous rajoutons 6cm d'isolation supplémentaire sur chacune des façades. En simulant ce scénario, la consommation annuelle (lorsque le chauffage est enclenché) passe de 317'600 [kWh/saisonfroide] à 296'653[kWh/saisonfroide] . En reprenant la surface de référence énergétique estimée à 3292 m², la consommation annuelle pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire passe de 96.47 [kWh/m2] à 90.11 [kWh/m2]. Si on considère que le prix du kilowattheure thermique est de 9.234 ct/kWh⁸ selon les données du fournisseur d'énergie Sinergy, l'économie par année pour le bâtiment est de

1934 CHF/année

En choisissant un isolant avec le même coefficient de conductibilité que celui déjà en place, à savoir 0.038 [W/m.K], on trouve un prix de 7.9 CHF/m2⁹.

La surface à couvrir est calculée en déduisant la surface vitrée de la surface totale du bâtiment, soit environ 1215 m².

Avec un taux d'intérêt de 5% et une durée d'amortissement de 30 ans, on peut calculer le facteur d'annuité par la formule suivante :

$$\text{Facteur d'annuité : } F = \frac{t}{(1-(1+t)^{-D})} [-/an]$$

⁸ http://www.sinergy.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=181

⁹ http://www.swisspor.ch/images/content/pdf/preislisten/hochbau_2010_d.pdf

On obtient donc les résultats suivants :

Profitabilité		
Δ Bénéfices	Fr/an	1'934
Prix isolant	Fr/m ²	7.90
Surface	m ²	1'215
Prix de pose	Fr.	20'000
Investissement	Fr.	29'598.50
Taux d'intérêt	%	5%
Durée d'amortissement	an	30
Facteur d'annuité	-/an	0.0651
Investissement annualisé	Fr./an	1'925.42

Figure 22: Résultats du scénario

Ainsi, il faudrait que le total entre le prix de pose de l'isolation et le prix du crépi soit inférieur à 20'000 CHF pour que les bénéfices soient supérieurs aux investissements. Il est difficile d'avoir un devis précis pour ce genre de travaux, mais pour une telle surface, le prix serait au minimum de 50'000 CHF. Ce scénario n'est donc pas viable, et il est donc inutile d'entreprendre de tels travaux du point de vue économique. Bien sûr, dans la pratique, il faudrait mener une étude plus précise et considérer plusieurs autres critères, comme la réduction de CO₂ émise, pour véritablement prendre une décision de rénovation.

7.2 Comparaison avec les standard Minergie®

Le standard MINERGIE® est un standard de construction facultatif qui permet une utilisation rationnelle de l'énergie et une mise en œuvre plus large des énergies renouvelables, tout en assurant une amélioration de la qualité de vie, une meilleure compétitivité et une diminution des atteintes à l'environnement.

Les exigences suivantes doivent être respectées:

- Exigences primaires pour l'enveloppe du bâtiment
- Renouvellement d'air contrôlé pendant l'année
- Valeur limite MINERGIE® (indice énergétique pondéré)
- Justificatif du confort thermique en été
- Exigences supplémentaires suivant la catégorie de bâtiment éclairage, froid industriel et production de chaleur
- Surcoûts ne dépassant pas 10 % par rapport à des bâtiments conventionnels équivalents

Le label Minergie® reste une référence de nos jours pour connaître les performances énergétiques d'un bâtiment. Dans ce chapitre, le but n'est pas de vérifier tous les points énumérés ci-dessus, mais de faire une simple comparaison entre la consommation maximale exigée par Minergie® pour une rénovation d'un bâtiment antérieur à 2000, qui est de 60 [kWh/m².année]¹⁰ et la consommation actuelle du bâtiment Minerva de 102 [kWh/m².année] (chauffage et eau chaude sanitaire).

¹⁰ http://www.minergie.ch/minergie_fr.html#lessentiel-en-bref

La consommation actuelle du bâtiment Minerva est donc 1.7 fois plus grande que les exigences pour l'obtention du label Minergie®. Cependant, à l'aide du modèle calibré, si on considère que la température de consigne inférieure soit baissée à 22°C, que les vitres soient changées par des vitres actuelles dont le coefficient U serait de 1.1 [W/m².K] et que des panneaux solaire soient installés sur le toit pour diminuer de moitié les besoins de chauffage d'eau chaude sanitaire sur la période chaude et d'avoir la même consommation durant la période froide que celle actuellement durant l'été (coefficient ECS=1), la consommation annuelle atteindrait 58 [kWh/m²] et donc satisferait les exigences de Minergie®.

Cet exemple permet donc de démontrer le potentiel d'utilisation d'un tel modèle de bâtiment calibré avec des simulations sous CitySIM. Ce logiciel permet donc une bonne prédiction des performances énergétiques lors de rénovation et se présente donc comme un véritable outil d'aide à la décision

8 Conclusions

8.1 Conclusion du travail

Ce travail reprend la démarche de calibration d'un modèle, avec d'abord l'acquisition des données nécessaires à la modélisation, à la simulation et à la comparaison des résultats, ensuite la modélisation du bâtiment et enfin une optimisation qui vise à minimiser l'écart entre la courbe de consommation simulée et la courbe mesurée par Sinergy en calibrant les paramètres incertains.

Premièrement, les démarches entreprises pour ce travail ont montré que l'acquisition de donnée reste une étape longue et fastidieuse et qu'il est vraiment difficile sur le temps d'un semestre d'obtenir toutes les données nécessaires. Ce travail nécessite donc un compromis entre le temps imparti pour la récolte des données et la complétude et la précision de ces données ; et ce particulièrement pour les données physique du bâtiment (obtention des plans, obtention de l'accord pour une visite approfondie du bâtiment,...).

Ensuite, du point de vue des performances de prédiction de CitySIM, l'erreur moyenne de 10.55% pour la première simulation est excellente, puisque les données nécessaires à cette première simulation restaient toutefois assez incertaines (température de consigne inférieure, taux d'infiltration,...). Surtout, la plupart des paramètres choisis pour cette première simulation sont des paramètres faciles à obtenir avant que le bâtiment soit construit ou rénové. Ce résultat montre donc l'efficacité de CitySIM en tant qu'outil de prédiction et d'aide à la décision pour la réalisation de projet de construction ou de rénovation.

Aussi, suite à la calibration du modèle, l'erreur moyenne entre la courbe simulée et la courbe mesurée est descendue à 8.39%, ce qui permet d'avoir un bon modèle du bâtiment Minerva pour envisager divers scénari d'amélioration de la performance énergétique. Cependant, il faut garder un œil critique sur les résultats de cette optimisation qui demandent une vérification par des mesures supplémentaires.

Outre ces résultats, l'utilisation de CitySIM tout au long de ce semestre a permis d'apporter un certain compte rendu et donc d'effectuer quelques améliorations, comme la correction de certaines erreurs du code, l'ajout de certaines options, ou quelques simplifications d'utilisation. D'ailleurs, les résultats de simulations se sont nettement améliorés entre le début du semestre (plus de 20% d'erreur moyenne) et la rédaction de ce rapport.

En ce qui concerne l'étape d'optimisation, ce travail fourni une méthode pour la calibration d'un modèle de CitySIM à l'aide de Matlab. La méthode utilisée est une méthode hybride, c'est-à-dire que l'optimisation se fait sur un minimum de paramètres à l'aide d'un algorithme génétique, afin de fournir un bon point de départ pour affiner toutes les variables à l'aide d'un algorithme active set de descente. Le choix de l'algorithme demande peut-être encore un peu d'expérience, surtout dans l'utilisation des algorithmes génétiques qui restent compliqués à paramétrer.

8.2 Conclusion personnelle

D'abord ce travail m'a permis de rencontrer et collaborer avec des ingénieurs de différents domaines (ingénieurs du LESO-PB, ingénieur de Sinergy, ingénieurs du projet MEU,...), ce qui m'a énormément apporté du point de vue de la connaissance de mon futur métier. Grâce à la réunion du projet MEU, j'ai également pu observer comment les ingénieurs collaborent avec les hommes politiques et voir qu'il n'est pas toujours évident de concilier ces deux points de vue.

Aussi, avec mes multiples visites dans les locaux du LESO-PB, j'ai pu participer à la collaboration qui existe pour le développement du programme CitySIM. Cela m'a beaucoup apporté professionnellement mais aussi humainement.

Du point de vue des connaissances théoriques, ce travail m'a permis de comprendre, tester et acquérir de l'expérience dans la démarche à entreprendre pour la calibration d'un modèle, de la récolte de données à l'interprétation des résultats ; le tout à l'aide d'un logiciel de simulation de système urbain et d'un outil comme Matlab. Aussi, ai-je pu travailler avec les phénomènes mis en jeu dans l'énergétique du bâtiment, me sensibiliser aux ordres de grandeurs des paramètres (coefficient de transferts thermique, taux d'infiltration, rayonnement,...), aux ordres de grandeurs de consommations de chauffage, et à l'ordre de grandeur de consommation d'eau chaude sanitaire.

Pour l'aspect technique, j'ai acquis quelques connaissances pour le traitement de fichier et de données depuis Matlab. Aussi, j'ai pu mettre en pratique et mieux comprendre comment fonctionne l'optimisation multiparamétrique avec le choix des variables, le choix de l'algorithme, les temps de convergence, les minimum locaux, le paramétrage des algorithmes avec les critères d'arrêts,...

9 Prochaines étapes

Les prochaines étapes sont nombreuses. D'abord il serait intéressant de voir la différence sur la précision des résultats en affinant le modèle. La première méthode pour affiner le modèle est de prendre en compte l'influence des balcons, c'est-à-dire utiliser le modèle 3D avec les balcons modélisés. Ensuite, pour mieux comprendre l'influence des diverses parties du bâtiment, il faudrait diviser l'intérieur de l'enveloppe en plusieurs zones, comme la cage d'escalier, le sous-sol, les vérandas, chacune ayant ses propres températures de consigne et autres paramètres. La troisième possibilité pour affiner le modèle serait de mieux considérer les gains internes. En effet, pour le moment les gains sont extrapolés du profil d'occupation, mais il faudrait plutôt extrapoler ces gains de la consommation électrique ou alors directement définir un profil de gains sur la base de mesures expérimentales.

Ensuite, pour améliorer la calibration du modèle, il faudrait peut-être utiliser un algorithme d'optimisation plus adapté ou alors mieux choisir les paramètres de l'algorithme génétique actuel. Cela permettrait de se rapprocher du minimum global. Aussi, pour l'optimisation, serait-il intéressant de faire une optimisation multi-objective en définissant une deuxième grandeur à minimiser, à savoir la différence entre les valeurs initiales des variables et les valeurs optimisées. Le but est de se rapprocher le plus possible des valeurs observées et mesurées tout en calibrant la courbe de consommation. Mais encore, comme il a été dit dans ce rapport, toutes les comparaisons sont faites sur des moyennes journalières et une optimisation heure par heure permettrait de mieux calibrer les paramètres qui sont influencés par les différences jours/nuits et l'inertie qui en résulte.

Qui plus est, pour « valider » en quelque sorte cette calibration, il faudrait simuler et comparer d'autres années sur ce même bâtiment. Cela n'a pas été possible dans ce travail, faute de temps premièrement, et aussi parce qu'il faudrait mieux se renseigner sur un problème de réglage de la consommation d'eau chaude sanitaire effectué au cours de ces dernières années, et qui a nettement baissé la consommation (selon les dires d'un habitant).

Finalement, d'une fois que la calibration sera validée, ou alors avec la calibration actuelle qui semble déjà convaincante, on peut envisager d'établir et de simuler des scénari d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment et faire une analyse économique pour définir les solutions rentables, tant du point de vue environnemental que financier.

10 Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement les personnes suivantes qui ont pris de leur temps pour m'aider :

- Diane Perez pour sa disponibilité et son aide précieuse,
- Dr. Jérôme Kämpf qui a souvent repoussé ses priorités pour m'aider à avancer,
- Dr. Philippe Leroux pour son travail sur l'interface graphique du logiciel,
- Charlotte Marguerite pour sa collaboration fructueuse,
- Jonathan Carron pour m'avoir permis l'accès aux données précieuses de Sinergy et pour son aide en général,
- MER Darren Robinson pour m'avoir permis de réaliser ce projet de semestre et pour ses précieux conseils
- MER François Maréchal pour ses idées partagées et son approbation pour ce projet
- Dr. Frédéric Haldi pour son aide à propos des capteurs de température
- Serge Pravato pour m'avoir fait profiter de ses compétences
- Et tous les autres qui m'ont aidé pour ce projet...

(Affenzeller Michael 2009)

11 Bibliographie

11.1 Sites internet

Site officiel du fournisseur d'énergie de Martigny, Sinergy :

<http://www.sinergy.ch>

Accès aux données météorologiques de MétéoSuisse (sur demande d'inscription) :

http://www.meteosuisse.admin.ch/web/fr/services/portail_des_donnees/idaweb.html

Autre site fournissant des informations météorologiques :

<http://www.agrometeo.ch/sr/indexsr.php?lang=fr>

Surface de référence énergétique :

http://www.endk.ch/tl_files/documents/fachleute/VoHi_EN-02_fr.pdf

Valeur standard du coefficient U des vitres :

http://www.sei.ie/About_Energy/Energy_Technologies/Insulation/What_is_a_U_Value.pdf

Statistiques Bruxelloises de consommation d'eau chaude sanitaire :

http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF_Energie_ECS01_Part_FR.PDF

Description de l'algorithme d'optimisation utilisé sous Matlab :

<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/optim/ug/fmincon.html>

Prix du kWh thermique pour le raccordement sur le chauffage à distance de Sinergy :

http://www.sinergy.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=181

Descriptifs et prix des différents isolants chez Swisspor :

http://www.swisspor.ch/images/content/pdf/preislisten/hochbau_2010_d.pdf

Descriptif des standards Minergie® pour les bâtiments rénovés :

http://www.minergie.ch/minergie_fr.html#lessentiel-en-bref

Descriptif de fonctionnement des algorithmes génétiques :

<http://www.recherche.enac.fr/opti/papers/thesis/HABIT/main002.html>

11.2 Documentation

Thèse expliquant comment a été conçu CitySIM et quelles sont les équations qui régissent la simulation des transferts de chaleurs :

1. Kämpf, J.H., *On the modelling and optimisation of urban energy fluxes*. 2009, EPFL, LESO-PB: Lausanne

Polycopié du cours dispensé pour les élèves de génie civil de 4^{ième} et 5^{ième} année :

2. Morel, N., Gnansounou E., *Energétique du bâtiment*. 2008, EPFL, Faculté ENAC

Bonne analyse énergétique d'un bâtiment :

3. Zraggen, J.-M., *Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique: objectifs et réalités*. 2009, Université de Genève, Faculté des Sciences: Genève.

Théorie sur les algorithmes génétiques :

4. Affenzeller Michael et al. (2009), *Genetic algorithms and genetic programming: modern concepts and practical applications*, Boca Raton : Chapman & Hall/CRC Press

Annexe

Ci-dessous un exemple du code Matlab. Cet exemple est celui utilisé pour l'analyse de sensibilité.

```

clc;
clear all;

%vecteur des valeurs initiales
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

initial_val=[23;0.4;0.35;0.9;0.7;0.31;0.44;0.31;2.8;0.05;1.2;0.08;75];
%initial_val=[24.922;0.333;0.342;0.239;0.518;0.31;0.432;0.31;2.333;0.068;1.5;0.061;71.924]
%après optimisation
y=initial_val;
l=1;

%attribution des valeurs du vecteur aux paramètres
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for k=18:1:26 %choix de l'intervalle de variation

y(1)=k; %choix de la variable à analyser
variable_choisie='Temperature de consigne inférieure';
unite='°C';
x_axe(1)=k;

%attribution des valeurs
Tconsigne_inf=y(1);
Infiltration_rate=y(2);
Glazing_ratio_NE=y(3);
Uvalue_roof=y(4);
Glazing_Gvalue=y(5);
Glazing_ratio_NW=y(6);
Glazing_ratio_SW=y(7);
Glazing_ratio_SE=y(8);
Glazing_Uvalue=y(9);
Kground=y(10);
ECS_mult=y(11);
Thickness_isol=y(12);
Nbre_occupants=y(13);

%Entrée des valeur dans le fichier XML
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

CitySim = xml_read('C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet
MasterII\Netbeans_project\citysim\buildings.xml');

CitySim.District.Building.ATTRIBUTE.Tmin=Tconsigne_inf;
CitySim.District.Building.ATTRIBUTE.Ninf=Infiltration_rate;
CitySim.District.Building.Wall(1,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_NE;
CitySim.District.Building.Wall(2,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_NE;
CitySim.District.Building.Roof(1,1).ATTRIBUTE.Uvalue=Uvalue_roof;
CitySim.District.Building.Roof(2,1).ATTRIBUTE.Uvalue=Uvalue_roof;
CitySim.District.Building.Roof(3,1).ATTRIBUTE.Uvalue=Uvalue_roof;
for i=1:8
CitySim.District.Building.Wall(i,1).ATTRIBUTE.GlazingGValue=Glazing_Gvalue;
end
CitySim.District.Building.Roof(1,1).ATTRIBUTE.GlazingGValue=Glazing_Gvalue;
CitySim.District.Building.Roof(2,1).ATTRIBUTE.GlazingGValue=Glazing_Gvalue;
CitySim.District.Building.Roof(3,1).ATTRIBUTE.GlazingGValue=Glazing_Gvalue;
CitySim.District.Building.Floor.ATTRIBUTE.GlazingGValue=Glazing_Gvalue;
CitySim.District.Building.Floor.ATTRIBUTE.Kground=Kground;
CitySim.District.Building.Wall(3,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_NW;
CitySim.District.Building.Wall(4,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_NW;
CitySim.District.Building.Wall(5,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_SW;
CitySim.District.Building.Wall(6,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_SW;
CitySim.District.Building.Wall(7,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_SE;
CitySim.District.Building.Wall(8,1).ATTRIBUTE.GlazingRatio=Glazing_ratio_SE;
for i=1:8
CitySim.District.Building.Wall(i,1).ATTRIBUTE.GlazingUValue=Glazing_Uvalue;
end
CitySim.District.Building.Roof(1,1).ATTRIBUTE.GlazingUValue=Glazing_Uvalue;
CitySim.District.Building.Roof(2,1).ATTRIBUTE.GlazingUValue=Glazing_Uvalue;

```

```

CitySim.District.Building.Roof(3,1).ATTRIBUTE.GlazingUValue=Glazing_Uvalue;
CitySim.District.Building.Floor.ATTRIBUTE.GlazingUValue=Glazing_Uvalue;
CitySim.District.WallType(20,1).Layer(2,1).ATTRIBUTE.Thickness=Thickness_isol;
CitySim.District.Building.Occupants.ATTRIBUTE.n=Nbre_occupants;

xml_write('C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet
MasterII\Netbeans_project\citysim\buildings.xml', CitySim);

%lancement de la simulation dans CitySIM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cd 'C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet
MasterII\Netbeans_project\citysim\'
system('"C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet
MasterII\Netbeans_project\citysim\citysim.bat"')

%Récupération des données de consommation Sinergy
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fid = fopen('C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet
MasterII\Minerva\Resultats_sinergy\heating_conso.txt');

C = textscan(fid,'%f');

Conso_journaliere = C{1};

% figure(1)
%
% plot(Conso_journaliere, '-r');
% xlabel('jours');
% ylabel('Consommation [kWh]');
% title('Comparaison des consommation de chaleur journalière donnés par citysim et Synergy')
% hold on

%calcul eau chaude sanitaire
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

conso_ete=Conso_journaliere(170:270);
ECS=mean(conso_ete);

%Récupération des données de consommation de CitySIM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fid = fopen('C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet
MasterII\Netbeans_project\citysim\buildings_TH.out');

C = textscan(fid,'%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f','headerLines', 1);
S=0;
Heating = C{3};

Consommation_annuelle(1)=sum(Heating);

Moyenne_journaliere(1:365)=0;
for i=0:364
    for j=1:24
        jour(j)=Heating((i*24)+j);
    end
    Moyenne_journaliere(i+1)= (mean(jour)/1000)+(ECS_mult*ECS); %consommation ECS
end

% plot(Moyenne_journaliere, '-b');
%
% xlabel('jours');
% ylabel('Consommation [kWh]');
% title('Comparaison des consommation de chaleur journalière donnés par citysim et Synergy')
%
% legend('Sinergy','Citysim');
% hold off

%Comparaison des deux courbes de consommation
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



```

difference_unit(1:365)=0;

for i=1:138    %coupure de chauffage du 19mai au 6 octobre

difference_unit(i)=(Moyenne_journaliere(i)-Conso_journaliere(i))^2;
end
for i=280:365

difference_unit(i)=(Moyenne_journaliere(i)-Conso_journaliere(i))^2;
end

difference(1)=sum(difference_unit);

l=l+1;

%Revenir dans le dossier initial
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cd 'C:\Documents and Settings\Dorsaz\Mes documents\EPFL\Projet MasterII\Mathlab'
end

%Pourcent de différence
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[a,b]=size(x_ave);
for p=1:b-1
    Pourcent_variation(p)=abs((Consommation_annuelle(p+1)-
    Consommation_annuelle(p))/10)/(Consommation_annuelle(p)/1000);
end
Moyenne_pourcent_variation_non_arrondi=mean(Pourcent_variation);
Moyenne_pourcent_variation=round(Moyenne_pourcent_variation_non_arrondi*100)/100
Pourc_string=num2str(Moyenne_pourcent_variation);

%Affichage des résultats sur un graphe
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(50)
plot(x_ave,(Consommation_annuelle/1000),'-b','LineWidth',2);
xlabel(['Valeur de la variable analysée [' unite ']], 'fontsize',20);
ylabel('Consommation annuelle [kWh]', 'fontsize',20);
title('Consommation annuelle en fonction de la variable analysée', 'fontsize',20)
st_num=x_ave(2)-x_ave(1);
st_str=num2str(st_num);
text(mean(x_ave),mean(Consommation_annuelle)/1000,['Pourcent de variation par ' st_str unite '
: ' Pourc_string '%'], 'fontsize',20)

legend(variable_choisie)
hold off

figure(100)
plot(x_ave, difference,'-b','LineWidth',2);
xlabel(['Valeur de la variable analysée [' unite ']], 'fontsize',20);
ylabel('Somme des différences au carré (Fobj) [kWh]', 'fontsize',20);
% title('Analyse de sensibilité du paramètre sur la somme des différences au carré avec les
donnée de Synergy (résultat de la fonction objective)', 'fontsize',20)
legend(variable_choisie)
hold off

```