



HAL
open science

Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine : contribution de l'analyse de sensibilité à l'élaboration de modèles flexibles

David Garcia Sanchez

► To cite this version:

David Garcia Sanchez. Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine : contribution de l'analyse de sensibilité à l'élaboration de modèles flexibles. Thermique [physics.class-ph]. Ecole des Mines de Nantes, 2012. Français. NNT : 2012EMNA0007 . tel-00800205

HAL Id: tel-00800205

<https://theses.hal.science/tel-00800205>

Submitted on 13 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

David Garcia Sanchez

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Nantes
Sous le label de l'Université Nantes Angers Le Mans*

Discipline : Génie des Procédés
Spécialité : Energétique
Laboratoire : GEPEA, Ecole des Mines de Nantes

Soutenue le 29 octobre 2012

École doctorale : Sciences pour l'ingénieur, Géosciences, architecture
(SPIGA)

Thèse N° 2012EMNA0007

Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine **Contribution de l'analyse de sensibilité à l'élaboration de modèles flexibles.**

JURY

Rapporteurs :	M. Gilbert ACHARD , Professeur émérite, Université de Savoie M. Christian INARD , Professeur, Université de la Rochelle
Examineurs :	M. Darren ROBINSON , Professeur, University of Nottingham M. Robert FAIVRE , Directeur de Recherches, INRA – BIA
Directeur de Thèse :	Mme Marjorie MUSY , Ingénieur de recherche, HDR, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes
Co-encadrants de Thèse :	M. Bernard BOURGES , Professeur, Ecole des Mines de Nantes M. Bruno LACARRIERE , Maitre Assistant, Ecole des Mines de Nantes

Abstract.

Français

Pour répondre aux enjeux énergétiques et climatiques, une des échelles d'action pertinentes est désormais celle du quartier ou de la ville. Des besoins de connaissance, d'outils d'aide à la décision et d'évaluation à cette échelle se manifestent de plus en plus. Un des volets concerne la modélisation de la demande d'énergie des bâtiments résidentiels, préalable à la mise en place d'actions de rénovation de l'existant ou à la valorisation de sources d'énergie locales. La diversité de situations de terrains, d'objectifs d'acteurs et de contextes de disponibilité de données incitent à rechercher des modèles flexibles, aptes à produire de l'information pour différentes applications, à partir de jeux alternatifs de données d'entrée, combinant des modèles de natures diverses (notamment physiques et statistiques) selon les besoins.

Dans cet esprit, le présent travail cherche à explorer le potentiel de méthodes dites ascendantes, s'appuyant sur des modèles développés à l'origine pour la simulation à l'échelle d'un bâtiment isolé, mais extrapolés ici pour le parc de bâtiments d'une zone urbaine sur la base de bâtiments types. Les deux questions clés abordées sont celles de la sélection des bâtiments types et de la reconstitution des données d'entrée pertinentes sur le plan statistique pour la zone étudiée.

Des techniques d'analyse de sensibilité, en particulier la méthode des effets élémentaires de Morris, ont été appliquées à un code de calcul thermique de bâtiment (ESP-r). Elles ont mis en évidence une réponse non linéaire du modèle, notamment du fait des interactions entre paramètres et de la dispersion des paramètres d'entrée. Elles ont permis d'identifier les paramètres les plus sensibles et les plus en interaction (concernant les bâtiments eux-mêmes, leur environnement ou leurs habitants), sur lesquels doit être concentré le travail de collecte ou de reconstitution statistique.

Un modèle, dénommé MEDUS, de reconstitution de la distribution des besoins de chaleur sur un quartier à partir de trois typologies de bâtiments, a été développé et testé sur le secteur St-Félix à Nantes. Il est alimenté par des données INSEE à l'échelle d'un IRIS. Ses résultats sont analysés, à la fois sous l'angle de la pertinence des typologies choisies et dans une perspective d'application à l'échelle du quartier.

English

Urban scale is now considered as one of the most relevant scales to face energy and climate challenges. Specific needs for knowledge, decision making tools and evaluation are identified at urban scale. Modelling energy demand from residential buildings is one key aspect, prior to energy retrofitting of existing building asset or to valorisation of local energy sources. Diversity of local contexts, stakeholder goals and data availability lead to search flexible models, with ability to produce information for different applications, from alternative input data sets, combining different types of basic models (namely both physical and statistical ones), according to user needs.

The present work is exploring the potential of bottom-up approaches, based on engineering models, developed originally for isolated buildings. These models are extrapolated for the complete set of buildings in a city or neighbourhood, based on building archetypes. Two key questions tackled are the selection of suitable archetypes and the reconstitution of relevant input data, statistically representative for the area of interest

Sensitivity analysis techniques have been applied to a thermal simulation programme (ESP-r), particularly the Morris elementary effects method. A non-linear response of the model has been emphasized, caused by scattering of input parameters and interaction effects. The most influencing and interacting parameters have been identified. They concern the buildings themselves, their environment and the inhabitants. Data collection or statistical reconstitution must be concentrated in priority to these main parameters.

A model of the heat demand at a neighbourhood scale has been developed and tested on the sector St-Félix in Nantes. It is called MEDUS (Modelling Energy Demand at Urban Scale). Application is based on three building archetypes. Census data (INSEE) available at the sector scale are the main input data. Results are analysed both to check archetype relevancy and to study a possible application for evaluating actions at sector scale, such as energy retrofitting.

Remerciements

Au terme de ce travail, c'est avec émotion que je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus sincères à ma Directrice de thèse **Mme Musy** pour la confiance et la liberté qu'elle m'a accordée tout au long de ce processus de recherche. J'espère avoir été digne de sa confiance et avoir réalisé un travail à la hauteur de ses espérances.

Mes remerciements s'adressent ensuite au **Pr. Bernard Bourges** pour avoir dirigé cette thèse et m'avoir permis de la réaliser dans les meilleures conditions. Merci à lui de m'avoir accueilli dans son équipe de travail et d'avoir été très attentionné du début à la fin.

Merci à **Bruno Lacarrière** pour son soutien sans faille et son accueil, sa bonne humeur et sa grande capacité à m'encourager dans les moments les plus difficiles de ces quatre ans.

Je remercie également mon « quatrième encadrant » **Jean-Sébastien Broc** pour être un grand exemple d'honorabilité et d'amitié, représentant au mieux ce que la recherche et l'enseignement doivent être.

Je tiens également à remercier les membres de mon comité de thèse pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour les remarques constructives qu'ils ont pu faire sur mon projet de thèse. J'adresse mes remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail. Merci, **Robert Faivre**, président du jury, **Gilbert Achard** et **Christian Inard**, rapporteurs, et Thanks **Darren Robinson**, membre du jury, for your comments that help me to improve this work.

Je remercie la région **Pays de la Loire** et l'**Ecole des Mines de Nantes** pour le soutien financier qu'ils m'ont apporté au cours de ces 4 ans d'études et pour le magnifique cadre de travail qu'ils ont conclu.

Je tiens à remercier fortement toutes les personnes qui ont fait partie du groupe SEDET et qui ont participé à l'aboutissement de cette thèse en me permettant de m'appuyer sur leurs travaux et réflexions : **Marc Messerli**, **Aurélié Vérin**, **Charlotte Marguerite**, **Alexis Monteil** et **Ian McCall**.

Je remercie également plusieurs personnes qui m'ont beaucoup aidé dans ce long parcours avant et après cette thèse en milieu professionnel, très particulièrement : **Federico Carranza Almaguer**, **Pablo Fuentes Cantillana**, **Antonio Armengot Paradinas** et **Vicente Aparicio Grau** d'Iberdrola. **Marie Anne-Brodschii**, **Eric Ducourneau**

A mis padres,
Enrique Garcia Cuevas,
Marisela Sanchez Cedillo

y mi hermano,
Enrique Garcia Sanchez,

En memoria de

David Sanchez Abarca (1986-2008)

Table des matières

1	Modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine	23
1.1	Introduction	23
1.2	Les enjeux de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.	24
1.2.1	Une population urbaine en croissance.	25
1.2.2	Mise en œuvre des politiques de lutte contre le changement climatique	26
1.2.3	Une problématique locale de production et de distribution d'énergie.	27
1.2.4	Modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine	30
1.3	Définition de l'échelle urbaine et changement d'échelle.	31
1.4	Importance de la définition des objectifs de modélisation	33
1.4.1	Introduction	33
1.4.2	Les divers objectifs d'une modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine	33
1.5	Différentes approches de la modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine.	35
1.6	Revue de différents modèles de demande d'énergie à l'échelle urbaine, de type « bottom-up »	36
1.6.1	Avant propos	36
1.6.2	L'utilisation des enquêtes rapides et les Systèmes d'Information Geo-références : Jones et al.	37
1.6.3	Couplage entre une modélisation à l'échelle du bâtiment et une approche statistique de caractérisation du parc national de bâti- ments : The Canadian Hybrid Residential Energy and Emissions Model (CHREM)	38
1.6.4	L'utilisation des caractéristiques géométriques des bâtiments et des ratios de consommation pour une évaluation de la demande : Baker et Robinson.	40

1.6.5	Un premier exemple de combinaison d’approches physiques et statistiques et d’utilisation des typologies, SUNTool et CITYSim.	43
1.6.5.1	SUNtool	43
1.6.5.2	Citysim	44
1.6.6	Deuxième exemple de combinaison d’approches physique et statistique et d’utilisation des typologies, Shimoda (Shimoda et al., 2007)	44
1.7	Conclusion : Une approche flexible de la modélisation	45
2	L’outil MEDUS : Modelling Energy Demand at Urban Scale	47
2.1	Introduction	47
2.2	Description générale du modèle MEDUS dans sa première phase de développement	48
2.2.1	Objectifs et contexte	48
2.2.2	Principe	49
2.2.3	Structure de l’outil MEDUS	50
2.3	Les différentes sources d’informations mobilisables	51
2.3.1	Données nationales	51
2.3.1.1	Recensement de la population (bases de données population et logement de INSEE)	51
2.3.1.2	Données de l’IGN (Institut Géographique National).	52
2.3.1.3	Données météorologiques (Météo France)	53
2.3.1.4	Autres sources	53
2.3.2	Données internationales	54
2.3.3	Autres sources d’information	55
2.3.3.1	Google Maps.	55
2.3.3.2	OpenStreetMaps.	55
2.4	La sélection d’un cœur de calcul thermique	55
2.5	Définition et utilisation des typologies de bâtiments.	57
2.5.1	Principes de définition des typologies.	57
2.5.2	Hypothèses et données génériques à toutes les typologies.	59
2.5.2.1	Orientation	60
2.5.2.2	Infiltration	61
2.5.2.3	Les portes et cadres des fenêtres.	61
2.5.2.4	Caractéristiques thermiques des parois.	62

2.5.3	Typologie A – Maison individuelle isolée.	66
2.5.3.1	Généralités, zonage et description géométrique.	66
2.5.3.2	Rapport d’aspect- Surface au sol	68
2.5.4	Typologie B – Maison mitoyenne	69
2.5.4.1	Généralités, zonage et description géométrique	70
2.5.4.2	Affectation des résultats de simulation pour la typologie B.	70
2.5.5	Typologie C – Immeuble collectif.	71
2.5.5.1	Généralités, zonage et description géométrique	71
2.6	Données climatiques et microclimat urbain	72
2.6.1	Données climatiques	72
2.6.1.1	Température du sol	72
2.6.1.2	Microclimat urbain et îlot de chaleur	73
2.7	Usages et comportements	73
2.7.1	Apports gratuits des occupants du logements.	74
2.7.2	Les apports des équipements.	75
2.7.3	La définition de la température de consigne.	75
2.8	Conclusions.	75
3	La théorie de l’analyse de sensibilité	79
3.1	Les méthodes d’analyse de sensibilité et leur utilisations.	80
3.2	La méthode de Morris ou méthode des effets élémentaires.	81
3.2.1	Principes et utilisations.	81
3.2.2	Description détaillée de la méthode de Morris.	83
3.2.3	La création du plan d’expérience de Morris.	85
3.3	Mesure d’importance et décomposition de la variance fonctionnelle : Les indices de Sobol.	87
3.3.1	Principes des méthodes.	87
3.3.2	Implémentation numérique de la méthode de Sobol (Version Saltelli 2002)	90
3.3.3	Estimations des indices de sensibilité par quasi-Monte Carlo.	91
3.4	Relations entre la méthode de Morris et les méthodes de décomposition de la variance.	92
3.4.1	Quelques éléments théoriques et pratiques de comparaison.	92
3.4.2	Comparaison Morris et Sobol sur des fonctions test.	94

3.5	Une extension de la méthode de Morris pour l'analyse des interactions entre variables d'entrée.	97
3.5.1	Les principes.	97
3.5.2	La création d'un plan d'expériences efficace selon Campolongo et Braddock	99
3.5.3	Le calcul des effets d'ordres supérieurs à deux.	101
3.6	Implémentation des codes de calcul d'analyse de sensibilité	102
4	Application de l'analyse de sensibilité à la modélisation thermique des bâtiments	105
4.1	Objectifs de l'analyse.	105
4.1.1	Objectifs généraux.	105
4.1.2	Les expériences de l'utilisation de la méthode de Morris dans l'analyse des simulations de thermique du bâtiment	106
4.2	Description du bâtiment collectif test	107
4.3	Application de la méthode de Morris au bâtiment test	108
4.3.1	Présentation des expériences numériques	109
4.3.2	Le choix des intervalles pour les paramètres d'entrée utilisés dans l'analyse de sensibilité.	111
4.3.2.1	Hypothèses prises pour les petits intervalles.	111
4.3.2.2	Hypothèses prises pour les intervalles larges.	112
4.3.2.3	Présentation des résultats	112
4.3.3	Résultat de l'expérience numérique A (premier ordre)	115
4.3.4	Résultats de l'expérience numérique B (2eme ordre)	118
4.3.4.1	Premier ordre - grands intervalles (B1)	118
4.3.4.2	Second ordre grands intervalles (B2)	119
4.3.4.3	Premier ordre - petits intervalles (B3)	121
4.3.4.4	Second ordre - petits intervalles (B4).	122
4.4	Conclusions sur les applications de la méthode de Morris.	122
5	Modélisation énergétique d'un quartier : application et test de MEDUS sur le quartier Saint-Félix à Nantes	125
5.1	Les caractéristiques du quartier St-Félix	125
5.1.1	La population du quartier Saint-Félix	126
5.1.2	Description spatiale du quartier Saint-Félix	126
5.1.3	Caractérisation du parc de bâtiments dans le quartier Saint-Félix	127

5.2	Simulation et test des typologies	131
5.2.1	Hypothèses, choix des paramètres et récupération des résultats . . .	131
5.2.1.1	Récupération des résultats	132
5.2.1.2	Pondération statistique des résultats de simulation	133
5.2.2	Résultats par typologie	134
5.2.3	Comparaison avec des ratios de consommations	136
5.3	Simulation des besoins énergétiques du quartier	136
5.3.1	Besoins annuels, par source d'énergie	139
5.3.2	Distribution temporelle des besoins	139
5.3.3	Illustration dans un contexte opérationnel : Rénovation	141
5.4	Développements et améliorations à venir	143
5.4.1	Morphologie de l'enveloppe	143
5.4.2	Caractéristiques thermiques de l'enveloppe.	144
5.4.3	Systèmes de chauffage et production de l'énergie	144
5.4.4	Données climatiques et environnement urbain.	145
5.4.5	Occupants	145
5.4.6	Temps d'exécution du calcul	145
5.5	Conclusions	146
6	Conclusion générale	149
II	Annexes	167
A	Exemple du codage type pour le MEDUS Program.	169
A.1	Code principal (MEDUS.exe).	169
A.2	Procédure type pour le changement des caractéristiques des matériaux . .	183
A.3	Procédure type pour le changement des caractéristiques des vitrages	185
A.4	Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants . . .	187
A.5	Procédure pour le changement des caractéristiques des surfaces	198
A.6	Procédure pour le changement des caractéristiques des systèmes de control	202
B	Code de Campolongo pour l'évaluation des effets élémentaires.	207
B.1	Fonction de sampling.	207
B.2	Fonction de mesure des effets élémentaires.	212

C	Code de pour l'évaluation des effets élémentaires deuxième ordre.	217
C.1	Fonction de sampling.	217
C.2	Fonction de mesure des effets élémentaires.	220
D	Analyse bibliographique de modèles	227
E	Schéma générale du système MEDUS.	231

Table des figures

1.1	Progression annuelle moyenne du taux d'urbanisation en France	25
1.2	Relation entre le niveau d'urbanisation et les émissions de CO2 par tête, Source : United Nations Settlements Programme	28
1.3	Évolution de la production d'énergie primaire d'origine renouvelable en France.	29
1.4	Consommation d'énergie finale en France par secteur (1970-2008)	30
1.5	Diagramme « Pression-Etat-Réponse	34
1.6	Classification hiérarchique des techniques actuelles d'évaluation de la consom- mation d'énergie résidentielle	35
1.7	Distribution régionale des bases de données EGHD and SHEU-03 utilisées comme source d'information dans le modèle CHREEM	41
1.8	Courbe LT pour un bureau orienté sud situé dans le sud de l'Europe et flux d'énergie considérés pour la méthode LT model dans une « cellule unitaire »	42
2.1	Comparatif entre la structure générale de la modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine et le modèle MEDUS.	49
2.2	Schéma général du système MEDUS	50
2.3	Comparaison des besoins de chauffage d'une maison simulés par divers logiciels dans le cadre du projet ANR PreBat Maisonpassive	57
2.4	Définition du rectangle limite minimal (SMBR)	61
2.5	Date de construction des logements par région (sauf DOM-TOM), selon l'enquête logement 2006 de l'INSEE	64
2.6	Exemple de simplification de la géométrie des bâtiments dans le modèle à l'échelle urbaine de Swan (2010)	67
2.7	Modèle détaillé (a) d'un bâtiment type Hausmanien(b) et son équivalence simplifiée (c) dans les travaux de Bueno et al. (2011b)	68
2.8	Puissance [Wm^{-2}] de chauffage et de climatisation calculées pour le modèle détaillé et pour le modèle simplifié d'un bâtiment de type Haussmanien à Paris avec le logiciel EnergyPlus et le Modèle de Bueno et al. (2011b) . . .	69

2.9	Répartition des logements en France (Résidences principales) selon le type de logement, d'après le recensement de l'INSEE 2010.	70
2.10	Maisons mitoyennes (typologie B) : (a) Exemples. Maisons sur les Bords de la Sèvre Nantaise, Quartier Le Chêne à Vertou. (b) Représentation simplifiée dans le modèle MEDUS.	77
2.11	Immeuble collectif (Typologie C) : représentation du bâtiment type modélisé sous ESP-r avec ses 27 zones thermiques.	77
2.12	Représentation graphique des liens entre les divers facteurs qui influencent la modélisation d'énergie au niveau urbain (selon Steemers and Yun (2009))	78
2.13	Courbes de probabilité de l'occupation selon les jours de la semaine (du lundi à vendredi, samedi et dimanche) implementées dans le modèle MEDUS.	78
3.1	Exemple d'un vecteur de trajectoire \vec{x} de dans l'espace des paramètres Ω_w où $\vec{x} \in \Omega_w$ et $n = 3$	84
3.2	Plan d'expériences de l'algorithme de quasi Monte Carlo proposé par Sobol et implémenté par Stephen Joe et Frances Y. Kuo, pour différentes tailles d'échantillon et deux variables d'entrée	93
3.3	Indices de Sensibilité de Morris (μ^* et μ) vs les indices de Sobol totaux évalués pour la fonction test de Morris.	95
3.4	Graphique de μ^* versus S_i^{tot} pour la fonction g	96
3.5	Représentation graphique du problème des prisonniers menottés	100
3.6	Schéma des échanges de données entre routines de calcul pour évaluer les effets élémentaires sur un modèle ou une fonction.	103
4.1	Bâtiment collectif esquissé avec Google Sketchup	108
4.2	Nuage de points de (σ_i/μ_i^*) vs $\sigma_i/abs(\mu_i)$ pour toutes les analyses de premier ordre effectuées dans le présent travail (séries A1 et B1, B2).	113
4.3	Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier ordre des besoins de chauffage du bâtiment collectif test simulés par ESP-r (grands intervalles de variation des paramètres, expérience A1).	114
4.4	Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier ordre sur le bâtiment collectif test pour deux critères thermiques complémentaires simulés par ESP-r (grands intervalles de variation des paramètres, expérience A1).	116
4.5	Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier et du deuxième ordres des besoins de chauffage du bâtiment collectif test simulés par ESP-r (grands intervalles de variation des paramètres, expériences B1 et B2). . .	119
4.6	Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier et du deuxième ordre des besoins de chauffage du bâtiment collectif test simulés par ESP-r (petits intervalles de variation des paramètres, expériences B3 et B4). . . .	121

5.1	Localisation du quartier Saint Félix dans la commune de Nantes (les lignes intérieures jaunes représentent l'IRIS Saint Félix et les extérieures la commune de Nantes).	126
5.2	Profil de population de la commune de Nantes comparé à celui de l'IRIS Saint Félix (source : INSEE, recensement 2007.)	127
5.3	Positionnement et hauteur des bâtiments de l'IRIS de Saint Felix Source : Monteil (2010) , d'après données IGN.	128
5.4	Photos aériennes du secteur sud du quartier Saint Félix, à proximité du Pont de la Motte-Rouge (IRIS :44109-0409) : évolution entre 2000-2005, et 2011, Source IGN Geoportail. (voir comme référence le pont).	129
5.5	Distribution des logements dans le quartier Saint Félix, par période de construction et par type de logement.(d'après données INSEE)	130
5.6	Localisation des bâtiments présentant divers degrés de mitoyenneté, Source: Monteil (2010) , d'après BD Parcellaire IGN.	130
5.7	Histogramme des besoins en chauffage par typologie : A (maisons isolées, 1) B (maisons mitoyennes, 2);C (appartements, 3). Le nombre de logements correspond aux logements de l'échantillon simulé.	135
5.8	Comparaison des valeurs calculées par MEDUS pour les besoins en chauffage par m2 avec les moyennes des autres études pour des logements collectifs	137
5.9	Comparaison des valeurs des besoins de chauffage par mètre carré, calculées par MEDUS, avec les moyennes de l'étude PREBAT pour les logements individuels. Images de bâtiments types du quartier Saint Félix extraites de Monteil (2010)	138
5.10	Besoins de chauffage cumulés de l'IRIS Saint Félix, selon le type de logement et l'énergie de chauffage (données 2006). Valeurs extrapolées à l'IRIS en fonction des taux de sondage INSEE	139
5.11	Répartition du type d'énergie de chauffage dans l'IRIS Saint Félix Nantes (nombre de logements échantillonnées par catégorie ; données INSEE 2006) ; en moyenne seulement environ un logement sur trois à été enquêté.	140
5.12	Répartition du type d'énergie de chauffage dans l'IRIS Saint Félix Nantes (surfaces chauffées par catégorie données IRIS 2006, valeurs extrapolées à l'IRIS en fonction des taux de sondage INSEE).	140
5.13	Signature énergétique mensuelle du quartier Saint Félix par typologie de bâtiment. Le graphique représente pour chaque typologie et chaque mois, les besoins de chauffage cumulés en fonction des degrés-jours unifiés du mois.	141
5.14	Profil temporel des besoins horaires totaux de chauffage simulés pour le quartier Saint Félix (courbe rouge) et de la température extérieure de Nantes (courbe grise), pour l'année type IWEC.	142
5.15	Courbe monotone des puissances de chauffage pour l'ensemble du quartier St-Félix. La figure donne pour chaque valeur d'un seuil de puissance lue sur l'axe vertical, le nombre d'heures (sur l'axe horizontal) où une puissance égale ou supérieure au seuil a été appelée..	142

D.1	Evolution des modèles énergétiques du bâtiment à l'échelle urbaine; les liens vers les publications respectives sont dans le tableauD.1	228
E.1	Schéma général du système MEDUS; avec trois typologies alimentées par la base de donnée de population et logements de l'INSEE. Des sources d'information complémentaires peuvent être ajoutées, telles que base de donnée topographique, cadastrale, ou enquête du terrain. Cette figure reprend plus en détail la figure 2.2 du chapitre 2.	232

Liste des tableaux

1.1	Concentrations en 1750 et 2005, du forçage radiatif, et le potentiel de réchauffement de la planète pour trois gaz à effet de serre. source: Tomizuka (2010)	27
1.2	SUNtool une coopération Européenne, source : Mersserli (2009)	43
2.1	Données provenant de la base des données de l'INSEE utilisées dans le système MEDUS.	59
2.2	Exemple simplifié de la fonction qui définit les valeurs aléatoires du taux d'infiltrations.	62
2.3	Propriétés physiques des matériaux utilisés dans les travaux de Kämpf (2009). Source : Kämpf (2009)	63
2.4	Composition et propriétés thermique des parois dans le parc de bâtiments parisien, source: Atelier parisien d'urbanisme (2007)	65
2.5	Caractéristiques des bâtiments historiques analysés par Cantin et al. (2010)	66
2.6	Classes d'âge de finies dans différentes études, de gauche à droite : l'enquête de l'INSEE ; les travaux de Kämpf sur le parc de bâtiments suisse ; l'étude de l'APUR sur le parc de bâtiments parisien ; et le système MEDUS. Les valeurs des coefficients U correspondent à celles du système MEDUS.	66
2.7	Apports des occupants utilisés dans le Système MEDUS	74
3.1	Valeurs utilisées dans le calcul de la fonction-g de Sobol par Campolongo et al.	96
4.1	Intervalles de variation des paramètres utilisés dans les expériences de Morris réalisées (premier et second ordre).	110
5.1	Paramètres utilisés dans le cas de modélisation du quartier Saint-Félix.	131
5.2	Liste des paramètres tirés au hasard lors de la modélisation du quartier Saint Félix.	132
5.3	Consommations unitaires (kWh/m ²) par classe d'âge et typologie de logement, corrigées par les surfaces pondérées. On n'a pas fait figurer les catégories qui représentent 2 logements ou moins dans l'échantillon.	134

5.4	Statistiques sur les besoins unitaires (kWh/m ²) par typologie pour le quartier St-Félix. Les résultats ne sont pas corrigés par les surfaces pondérées (chaque logement de l'échantillon a un poids égal), ce qui explique les moyennes un peu différentes de la table 5.3	135
D.1	References of the figure D.1	229

Introduction générale

Cette thèse a été mise en place à partir d'un constat : la nécessité de la réalisation d'un observatoire de l'énergie au niveau urbain. Suite à différentes analyses bibliographiques et à des premiers développements, nous proposons différentes voies de réflexion autour de cette thématique.

Le lecteur pourra aborder cette thèse plutôt comme le parcours de trois chemins différents qui convergent dans le chapitre 5 et les conclusions.

Le chapitre 1 évoque l'influence des diverses actions menées en matière d'énergie à ce jour dans les villes pour prouver la nécessité de réalisation de modèles qui mesurent l'énergie au niveau urbain. Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous expliquons en détail les modèles existants que nous considérons pertinents par rapport à notre problématique. Cette voie, on peut la nommer « réflexion autour de la thématique d'un changement d'échelle depuis le bâtiment jusqu'au niveau du quartier ».

Le chapitre 2 évoque un système développé à l'École des Mines de Nantes destiné dans un premier temps à donner une estimation des besoins en chauffage au niveau urbain. Ce outil s'appuie sur quelques éléments du chapitre 1. Il ouvre également la réflexion autour de la complexité requise pour faire un modèle de ce type, surtout dans le choix des types de bâtiments pertinents pour représenter le parc de bâtiments au niveau urbain. On s'intéresse donc ici à la complexité de la réalisation d'un modèle pour modéliser les besoins en énergie au niveau urbain.

Le chapitre 3 introduit les concepts mathématiques autour de l'analyse de sensibilité. Au cours des différentes recherches et analyses réalisées dans le cadre de cette thèse, nous avons trouvé très pertinent le développement des outils qui nous permettent de réduire le degré d'incertitude concernant les résultats par rapport aux paramètres d'entrée. Effectivement, la grande complexité des outils de modélisation au niveau urbain, se traduit par de nombreux sous modèles et hypothèses et la résolution d'équations non-linéaires : elle laisse à l'utilisateur la sensation de ne pas avoir de contrôle sur ces modèles vus comme des « boîtes noires ».

L'analyse de sensibilité est également la première phase pour essayer de réduire la complexité de ce type de modèles, sans réduire leur pertinence ou la qualité des résultats qu'on en tire. Et c'est pour cela que nous avons basé cette réflexion autour des outils de l'analyse de sensibilité.

Le chapitre 4 évoque ensuite un exemple d'application de l'analyse de sensibilité pour un bâtiment collectif. Effectivement au cours de la recherche bibliographique, nous avons trouvé les types de bâtiments collectifs comme les plus difficiles à modéliser.

Ces trois voies, l'analyse de l'état de l'art, la construction d'un modèle au niveau urbain et l'analyse de sensibilité convergent dans le chapitre 5 autour d'un cas applicatif, du modèle Medus construit au chapitre 2, au quartier Saint-Félix à Nantes. Nous essayerons notamment de voir comment l'analyse de sensibilité peut aider à améliorer les différentes étapes de la modélisation de la demande à l'échelle urbaine

Chapitre 1

Modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine

1.1 Introduction

La modélisation thermique des bâtiments a fait l'objet de nombreux travaux au cours des 40-50 dernières années. Ces travaux ont donné naissance à une multitude d'outils de simulations représentatifs de la diversité d'objectifs de modélisation (design, audit, rénovation...) et d'utilisateurs (architectes, bureaux d'études, laboratoires de recherche...). Ainsi les différents systèmes du bâtiment sont bien appréhendés dans les sous-modèles qui les concernent (enveloppe, systèmes énergétiques,...). Si des progrès ont également été réalisés concernant les méthodes numériques de résolution, la contre-partie de ce gain de précision est indéniablement un accroissement des données d'entrée des modèles.

Parallèlement à cette évolution, on observe une importance grandissante de la nécessité de connaître la demande en énergie à l'échelle de plusieurs bâtiments dans leur environnement (îlot, quartier, ville...). Les États s'engagent au niveau international lors des sommets (*Rio 1992, Kyoto 1997, Copenhague 2009, « Paquet Energie-Climat »*), mais les actions et les processus d'identification (et de classement) des opérations à mener sont locaux : développement de nouveaux quartiers, réhabilitation de quartiers existants, solutions de desserte énergétique et/ou de production locale d'énergie... Ce phénomène s'amplifie depuis quelques années avec le développement de nouvelles filières énergétiques (souvent locales). Les outils d'aide à la décision à ces échelles sont donc de plus en plus nécessaires et doivent répondre aux attentes d'une diversité d'acteurs de terrain (allant du décideur public à l'architecte, en passant par l'aménageur, les fournisseurs et distributeurs d'énergie...).

Même en se limitant au seul secteur du résidentiel (objet de cette thèse), la spécificité de cette échelle rend impossible la solution d'une simulation systématique de l'ensemble des bâtiments constituant l'objet d'étude (par exemple le quartier). Quand bien même cela serait envisagé, cette solution ne permettrait pas de prendre en compte les effets de couplage entre les bâtiments. De même, la solution d'une « simple » désagrégation de ratios ou de statistiques nationales, ne permet pas d'atteindre les objectifs évoqués.

La modélisation de la demande en énergie à l'échelle urbaine a donc fait l'objet de nombreux travaux (au cours des 10-15 dernières années) qui illustrent la diversité d'approches possibles, de recensement et de classement des outils, ainsi que de leur exploitation. La complexité de la thématique et le nombre important d'approches possibles et d'objectifs de modélisation ne permettent pas d'avoir une vision claire de la problématique spécifique de la modélisation à cette échelle. En particulier, il est parfois difficile de faire le lien entre les outils développés et les motivations de leur développement, ainsi que d'identifier les apports spécifiques à cette échelle.

Dans ce chapitre nous allons expliquer les principaux enjeux ainsi que les principes de base de la modélisation à l'échelle urbaine. Une analyse bibliographique des modèles existants, en lien avec les enjeux, permettra de définir les pré-requis nécessaires à une méthode de modélisation suffisamment flexible pour rendre la solution opérationnelle. Dans un premier temps, les raisons d'une approche à une échelle urbaine (selon le cas : un îlot, un quartier, une ville, voire une région) de la question énergétique et donc du développement d'outils à cette échelle sont décrites.

Une analyse spécifique est ensuite faite des modèles d'énergie à l'échelle urbaine basés sur des modèles à l'échelle du bâtiment avec un post-traitement spécifique des sorties pour une transposition à l'échelle urbaine. Cette analyse permettra de poser la question de la définition de l'échelle urbaine.

Dans une quatrième section sont présentés les différents objectifs de modélisation à l'échelle urbaine, dans le but d'identifier l'influence de ces objectifs sur les choix de modélisation.

Sur la base d'une synthèse bibliographique la dernière section de ce chapitre analyse les modèles existants. Une synthèse des différents choix de modélisation, des spécificités contextuelles des modèles, des difficultés de mise en œuvre y est présentée afin de définir une approche flexible de la modélisation à l'échelle urbaine, dans un souci d'utilisation opérationnelle des outils, en lien étroit avec les objectifs de modélisation.

1.2 Les enjeux de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.

La raréfaction des ressources fossiles et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre ont conduit les États à se positionner sur les actions à mener pour assurer leur développement tout en s'efforçant de limiter l'impact environnemental de ce développement. Selon le niveau et la vitesse de développement de ces pays, le niveau d'engagement est relatif, mais, quel que soit ce niveau, les actions sont plus ou moins comparables, de même que les échelles de mise en œuvre des actions.

Ainsi, le constat est unanime sur l'importance du secteur du bâtiment en général et du résidentiel en particulier. Pour la France, selon l'INSEE, le secteur résidentiel-tertiaire

1.2. Les enjeux de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.

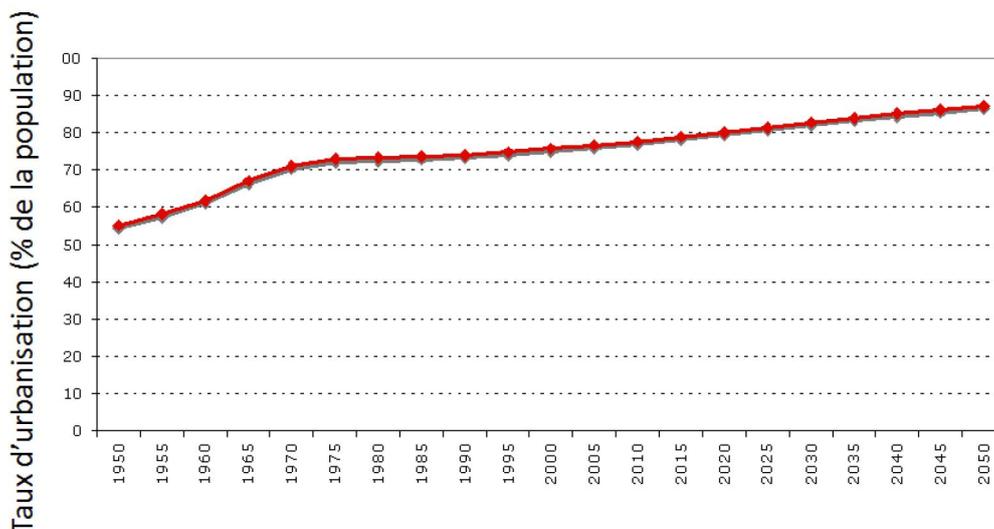


FIGURE 1.1 – Progression annuelle moyenne du taux d'urbanisation en France : rétrospective et projection (pourcentage de la population). A partir de l'année 2012, les chiffres sont estimés. Source : [Sénat République Française \(2012\)](#).

représente plus de 40% de la consommation en énergie finale et contribue à 18% des émissions de gaz à effet de serre. C'est donc naturellement que l'on a vu se multiplier différents textes réglementaires (Règlementation thermique, Directives européennes,...) et labels énergétiques (BBC, Passive House...), définissant les actions à mettre en œuvre (sur l'enveloppe, comme sur les systèmes). Dans la même logique des labels et/ou référentiels, propres à l'échelle du quartier, ont également vu le jour : éco-quartier (même si ce n'est pas vraiment un label au sens prescriptif du terme) BREAM, LEED (dans sa version quartier)... Ces labels/référentiels ne constituent pas des outils de modélisation énergétique à l'échelle du quartier, mais plus des catalogues de critères que doivent satisfaire les quartiers prétendant à la labélisation.

La suite de cette section développe les raisons de la nécessité d'une approche locale de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.

1.2.1 Une population urbaine en croissance.

La tendance au changement de profil de la population mondiale qui est devenue majoritairement urbaine, a pour conséquence un besoin réel de la maîtrise des ressources et des flux au niveau de la ville. Selon le dernier rapport d'UN Habitat ([United Nations Settlements Programme, 2011](#)) les aires urbaines représentent déjà plus de 50% de la population mondiale. Ce chiffre doit dépasser 70% d'ici à 45 ans.

Pour la France, la population est déjà majoritairement urbaine. Selon l'enquête de la population 2006 de l'INSEE, 82% de la population habite dans zones urbaines dont 60% dans les pôles urbains.

Dans les régions les plus développées du monde, cette tendance s'est accentuée. Dans

son rapport « Villes et changement climatique » [United Nations Settlements Programme \(2011\)](#), l'ONU précise qu'en moyenne, la population urbaine dans les pays développés était de 75,2% en 2010 et de 45,1% dans les pays en voie de développement (avec des valeurs localement plus importantes comme l'Amérique Latine où le pourcentage des populations urbaines est de 79,6% [United Nations Settlements Programme \(2011\)](#)). Il y a deux siècles, seules deux villes dépassaient le million d'habitants (Londres et Pékin), en 1950, elles étaient 75 et, en 2008, 431. Une forte proportion de ces villes dépassant le million d'habitants se situe en Afrique, en Asie et en Amérique Latine et elle est en augmentation. En 1950, on ne comptait que quatre villes de plus de 5 millions d'habitants (New-York, Tokyo, Londres et Paris), depuis 2010, il y a maintenant dans le monde 30 villes de plus de 5 millions d'habitants, dont 13 ont déjà une population supérieure à celle de New-York en 1950 (12 millions). Le monde compte actuellement 19 villes de plus de 10 millions d'habitants. Il en comptera 27 en 2025 [Sénat République Française \(2012\)](#).

Les agglomérations urbaines de taille moyenne, du fait de cette tendance de forte migration de la population rurale vers les villes, ont ainsi vu leur importance s'accroître, dans la prise de décisions en matière d'énergie, d'environnement et de politiques de développement durable. Une des premières apparitions du concept « agir localement » a été présentée lors du sommet de Rio de Janeiro (Rio de Janeiro Earth Summit) en 1992. Au cours de ce sommet, une stratégie d'actions a été établie pour aider à un développement soutenable et durable de la terre : Agenda21. Plus précisément, le chapitre 28 de l'Agenda 21 décrit la base des actions à suivre pour les collectivités territoriales. Il spécifie aussi la raison d'agir localement pour l'environnement dans ses principes d'action :

« Les problèmes abordés dans Action 21 qui procèdent des activités locales sont si nombreux que la participation et la coopération des collectivités à ce niveau là seront un facteur déterminant pour atteindre les objectifs du programme. En effet, ce sont les collectivités locales qui construisent, exploitent et entretiennent les infrastructures économiques, sociales et environnementales, qui surveillent les processus de planification, qui fixent les orientations et la réglementation locales en matière d'environnement et qui apportent leur concours à l'application des politiques de l'environnement adoptées à l'échelon national ou infra-national. Elles jouent, au niveau administratif le plus proche de la population, un rôle essentiel dans l'éducation, la mobilisation et la prise en compte des vues du public en faveur d'un développement durable » [Rio World Earth Summit Agenda 21](#).

La principale conséquence de ces flux migratoires urbains est la nécessité, pour les autorités locales, de répondre à la demande en logements, mettant de fait la question de la construction (et/ou de la rénovation), en accord avec les enjeux de limitation des émissions de gaz à effet de serre, au cœur des politiques locales. Le cas de la ville de Paris en est l'exemple emblématique qui illustre bien la difficulté de gérer le besoin en logements tout en limitant l'impact environnemental conséquent. ¹

1.2.2 Mise en œuvre des politiques de lutte contre le changement climatique

Selon le quatrième rapport du Panel Intergouvernemental en Changement Climatique

1. La difficulté est en réalité bien plus complexe puisque la problématique du logement est fortement couplée aux problématiques de prix du foncier, d'étalement urbain et de transport.

1.2. Les enjeux de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.

Gaz à effet de serre	Concentration (ppmv)		forçage radiatif W/m ²	Potentiel de réchauffement de la planète		
	1750	2005		20 années	100 années	500 années
Dioxyde de carbone	280	379.	1,66 (1,49-1,83)	1	1	1
Méthane	0,715	1,774	0,48 (0,43-0,53)	72	25	7.6
Protoxyde d'azote	0,270	0,319	0,16 (0,14-0,18)	289	298	153

Table 1.1: Concentrations en 1750 et 2005, du forçage radiatif, et le potentiel de réchauffement de la planète pour trois gaz à effet de serre. source: [Tomizuka \(2010\)](#)

(IPCC) [IPCC \(2007\)](#), il y a 90% de probabilité que l'observation d'une augmentation de la température moyenne de la terre, depuis la deuxième moitié du 20ème siècle, soit une conséquence directe d'une augmentation du niveau des gaz à effet de serre. Une concentration accrue de dioxyde du carbone, de méthane et d'oxyde nitreux a été observée depuis l'âge pré-industriel. Le tableau 1.1 résume l'impact de ces gaz sur l'environnement.

Malgré le fait qu'une relation entre le taux d'émission de CO₂ et le niveau d'urbanisation ² d'une région soit établie (voir figure 1.2) le Protocole de Kyoto n'impose pas un rôle particulier aux structures locales de gouvernement pour mettre en place les actions de lutte contre les causes et les effets du changement climatique (pas plus que les textes issus des sommets suivants). Mais, comme il a été évoqué plus haut, la lutte contre le changement climatique est une préoccupation mondiale qui se traduit par des engagements nationaux dont une composante de la mise en œuvre est locale. C'est pourquoi on constate, dans beaucoup de pays, une importance du niveau local dans les processus de décision des actions à mener.

En France, par exemple, toutes les grandes villes (et de plus en plus de villes moyennes) ont mis en place un « Plan Climat Énergie Territorial » [ADEME](#). Ces plans ont pour but, d'une part de dresser l'état des lieux des postes de consommations/émissions de CO₂ des territoires (villes ou régions) et d'autre part d'établir un plan d'actions (idéalement, mais, rarement quantifier et planifier) de réduction de la consommation énergétique et des émissions. Ces plans ne touchent pas seulement le secteur du bâtiment. On constate également une déclinaison locale de l'Agenda 21 dans de nombreuses collectivités territoriales ³.

1.2.3 Une problématique locale de production et de distribution d'énergie.

La sécurité énergétique d'une région est définie comme la capacité d'une région à assurer la fourniture en énergie, correspondant à sa demande. Un des gros défis de la sécurité

2. Indicateur produit pour la division population des Nations Unies et actualisé tous les deux ans. Cet indicateur définit le taux d'urbanisation de chaque pays selon leur définition d'aire urbaine.

3. <http://www.developpement-durable.gouv.fr>

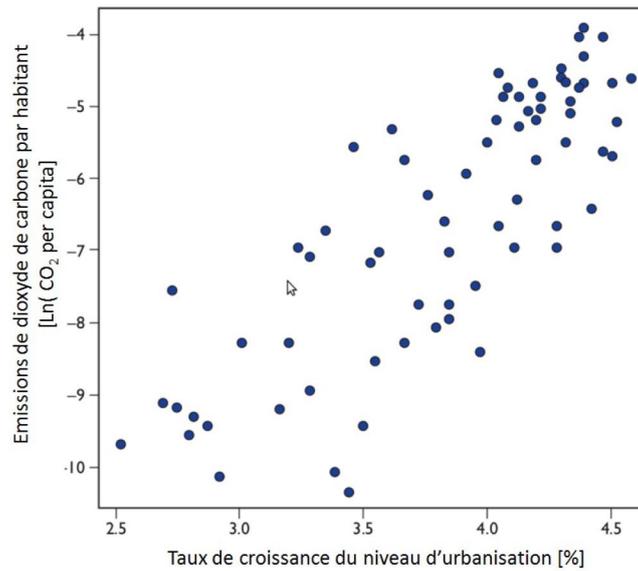


FIGURE 1.2 – Relation entre le niveau d'urbanisation et les émissions de CO₂ par tête, Source : United Nations Settlements Programme, Source : [United Nations Settlements Programme](#) (2011)

énergétique en France (et donc de ses régions et villes) est la demande croissante et la dépendance accrue à des importations⁴. Si le stockage énergétique (gaz, pétrole, hydraulique...) et la production locale d'énergie (par exploitation des ressources locales et/ou renouvelables) sont des éléments permettant d'assurer une fourniture continue en énergie d'un territoire, d'autres solutions comme la maîtrise de la demande ou l'efficacité énergétique deviennent de plus en plus importantes. L'efficacité peut être vue d'une part comme la caractéristique de performance des systèmes et infrastructures de transformation et de transport de l'énergie, d'autre part comme un aspect de réduction de la demande énergétique (sobriété énergétique).

La part du recours aux énergies nouvelles et traditionnelles est illustrée par la figure 1.3. Cette figure montre que la part d'énergie d'origines fossiles ou non renouvelables reste majoritaire. La demande d'énergie en France et dans le monde reste encore très dépendante des sources d'énergies fossiles comme le gaz naturel, le pétrole, et même en croissance (dans certains pays) concernant le charbon.

Cette distribution des sources répond à la croissance des besoins énergétiques, nécessairement corrélés au développement des aires urbaines, évoqué précédemment et ce, dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement.

En France, une analyse de la consommation d'énergie par secteur (figure 1.4) montre une croissance de la consommation d'énergie des trois secteurs principaux : le transport,

4. 80% du total de commerce de l'énergie en France sont des importations selon le Bilan énergétique 2010 du commissariat général au développement durable.

1.2. Les enjeux de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.

Production totale d'énergies renouvelables

En millions de tep¹

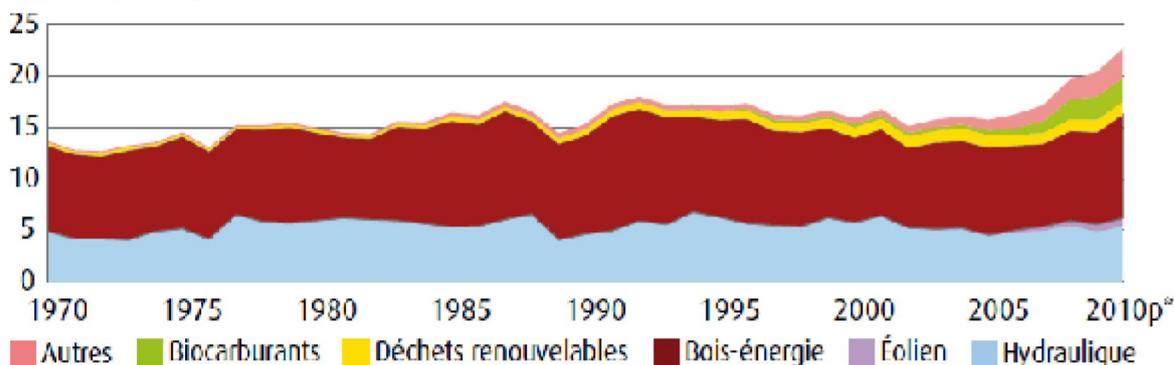


FIGURE 1.3 – Évolution de la production d'énergie primaire d'origine renouvelable en France. Dans la source « autres », figurent principalement les pompes à chaleur et le biogaz. Source [Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie \(2009\)](#)

l'industrie, et surtout le secteur résidentiel / tertiaire. La consommation énergétique de ce dernier secteur est en effet toujours en croissance au cours du dernier siècle et représente de 20% à 40% de la consommation énergétique en Europe [Perez-Lombard et al. \(2008\)](#). Cela illustre également le fort potentiel du secteur en terme de réduction de la consommation d'énergie.

L'augmentation de la consommation énergétique dans le résidentiel, en France, (figure 1.4) peut être en partie expliquée par le développement du pays au cours des dernières années. Pour [Perez-Lombard et al. \(2008\)](#), le secteur résidentiel est le secteur qui présente le plus de croissance quand un pays a fort développement économique. Une des raisons de cette tendance est que pour ces sociétés, ou régions, on constate une distribution équitable de ses ressources. Cela conduit à une augmentation naturelle dans des niveaux de confort des populations, qui se traduit par l'achat des nouveaux équipements, de chauffage/climatisation, de produits électroménagers et de services.

Si l'on rapproche ces éléments sociaux économiques avec les éléments de développement des aires urbaines et les schémas de mise en œuvre des politiques de lutte contre les changements climatiques, présentés dans les paragraphes précédents (§ 1.2.1 et 1.2.2), on comprend l'importance grandissante de politiques énergétiques locales (villes, régions). Ceci est renforcé par une approche nécessairement plus décentralisée de la question énergétique, ne serait-ce que du fait du développement des filières énergétiques locales et/ou renouvelables (éolien, énergie de la mer, biomasse...).

Cela ne signifie cependant pas que la structure politique locale peut (et doit) seule résoudre la question de l'efficacité énergétique (et plus généralement de la limitation des impacts environnementaux de l'activité urbaine). En France, par exemple, la question des transports, de la production centralisée de l'électricité soulignent bien la limite d'action

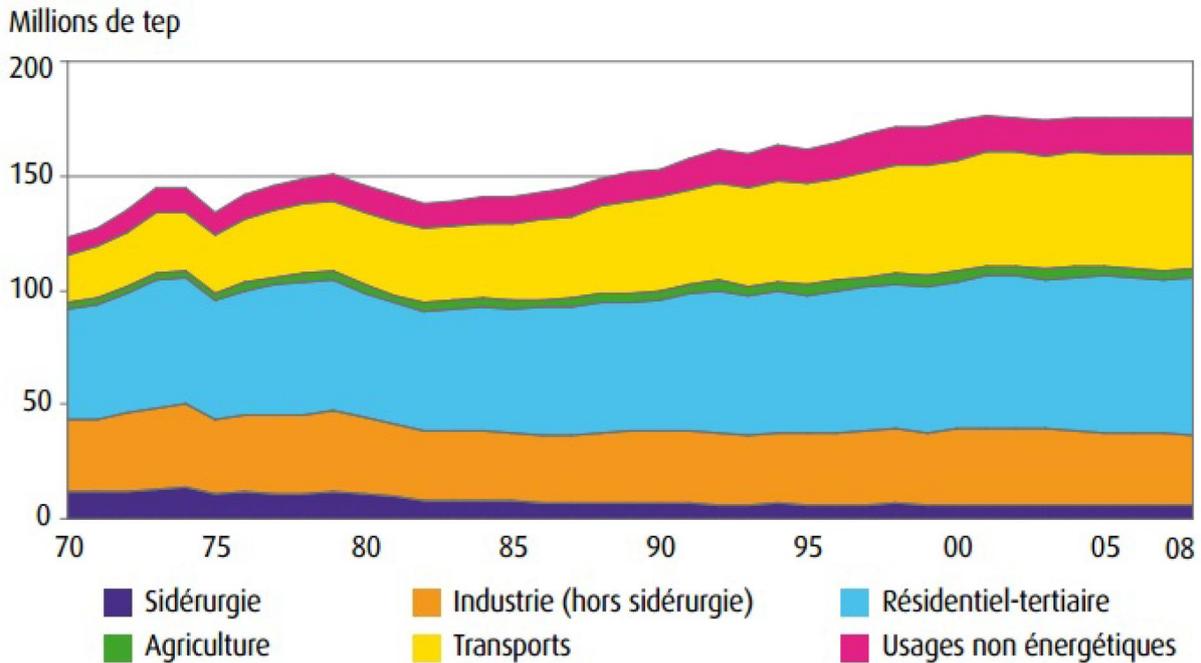


FIGURE 1.4 – Consommation d'énergie finale en France par secteur (1970-2008). source : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2009)

du seul pouvoir local. Cela est encore plus évident si l'on considère les leviers d'actions économiques (nécessaires à tous les plans d'actions) qui pour le coup sont loin d'être locaux.

1.2.4 Modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine

Les paragraphes précédents ont démontré la nécessité d'une approche locale de l'énergie, que se soit sous l'angle de l'offre ou de la demande. Ceci n'est cependant pas nouveau puisque les villes sont pilotes des programmes de développement urbain ou de rénovation urbaine à faible impact environnemental et/ou forte performance énergétique. Cela s'illustre par la diversité des programmes (Opération Programmée d'Amélioration Thermique et Énergétique des Bâtiments, Opération de Renouveau Urbain, ...), mais également par la structuration des villes entre elles ([Convention des maires](#), [Projets concerto...](#)).

La spécificité des programmes à cette échelle est la chaîne des acteurs (décideurs politiques, architectes, aménageurs, constructeurs...) qui doivent pouvoir prendre des décisions sur la base d'informations, notamment techniques (performance énergétique, solution de filière et/ou système énergétique...), adaptées à l'échelle considérée (îlot, quartier, patrimoine...)

La modélisation de la demande énergétique à l'échelle du quartier (ou de la ville) peut reposer sur la seule modélisation des bâtiments le constituant. Le degré de détails nécessaires à cette approche et la disponibilité des données d'entrée nécessaires aux modèles de bâtiments « classiques », rendent cette approche inadaptée. De plus, ces modèles ne prennent

1.3. Définition de l'échelle urbaine et changement d'échelle.

pas en compte les forts couplages qui existent entre un bâtiment et son environnement [Musy \(2007\)](#) (autres bâtiments, microclimat, comportement des usagers, occupation...).

Or cette modélisation de la demande s'avère nécessaire dans le contexte d'économie d'énergie et de besoins d'aide à la décision en matière de politiques énergétiques locales : construction de nouveaux bâtiments, rénovation, maîtrise de la demande ; valorisation des sources d'énergies locales, construction ou extension de systèmes énergétiques urbains, scénarios de rénovations urbaines, actions d'efficacité énergétiques...

La définition de ces différents scénarios, liés aux politiques énergétiques locales, nécessite une évolution des outils de modélisation. Cette évolution des modèles passe par une définition des méthodes et outils complémentaires nécessaire au changement d'échelle : Échelle du bâtiment → Échelle urbaine. En effet, il ne s'agit pas simplement de compter sur une évolution des systèmes informatiques et de leur capacité de calcul qui, tout aussi importante qu'elle puisse être, ne palliera jamais, par exemple, le manque de connaissance des données d'entrée.

1.3 Définition de l'échelle urbaine et changement d'échelle.

Avant de parler de modélisation à l'échelle urbaine, il est nécessaire de définir ce que représente « l'échelle urbaine ». Curieusement il existent peu de définitions de l'échelle urbaine dans la littérature. La plus pertinente est celle donnée par [Oke \(1987\)](#) qui définit en fait quatre échelles spatiales pour l'étude des phénomènes climatiques : l'échelle macro (>100 km), la méso-échelle (10 km – 200 km), l'échelle locale ou urbaine (100 m - 50 km) et l'échelle micro (1 cm – 1 km). En effet, les phénomènes climatiques locaux (et donc leurs diverses échelles d'étude) sont très importants lorsqu'on souhaite modéliser la demande énergétique des bâtiments (rue canyon, îlot de chaleur...).

L'échelle spatiale peut être issue de considérations physiques (comme nous venons de le voir), de considérations topographiques, mais également de considérations administratives et/ou politiques (quartier, arrondissement, commune, communauté de communes...) mais également les divers réseaux qui permettent un approvisionnement correct des ressources aux villes : les réseaux de transport, de chaleur, de froid, etc.

Par exemple, le concept d'IRIS⁵ définit une échelle statistique, avec ou sans définition implicite de la zone géographique concernée. On notera l'importance de ce type de définition spatiale puisqu'il est associé à des bases de données qui fourniront des renseignements ou des données d'entrée des modèles à l'échelle urbaine. A la différence des échelles issues de considérations climatologiques, l'IRIS n'implique pas de définir la géométrie ou la taille urbaine. A l'échelle d'un IRIS, un modèle de simulation peut ne pas prendre en compte les aspects géométriques ou d'aire urbaine, mais seulement les données statistiques des logements disponibles, en utilisant des ratios.

La définition que l'on donne de l'échelle urbaine ou locale est très importante puisqu'elle conditionne le degré de détails de la modélisation, ainsi que la quantité et le type de

5. Ilots Regroupés pour l'Information Statistique.

paramètres d'entrée du modèle. Concernant la spécificité de la modélisation du bilan énergétique local (lié au climat), on citera le travail de [Grimmond et al. \(2010\)](#) qui a comparé 33 modèles internationaux pour évaluer la complexité nécessaire pour modéliser les échanges énergétiques et hydriques d'une aire urbaine. Ce travail illustre l'équilibre à trouver entre complexité des modèles (et donc quantité associée en termes de données d'entrée) et précision de la modélisation. L'un des résultats montre que ce ne sont pas forcément les modèles les plus complexes et/ou les plus gourmands en données qui sont les plus précis.

Quelle que soit la taille du fragment urbain considéré, celui-ci sera toujours constitué d'un ensemble de bâtiments. Se pose alors la question du changement d'échelle : bâtiment → fragment urbain. Si l'on poursuit l'exemple de l'échelle définie par les considérations climatiques, une manière de prendre en compte ce changement d'échelle dans la modélisation de la demande énergétique serait d'effectuer une modélisation de tous les bâtiments en couplant ces simulations avec un modèle climatique. Dans les faits, les modèles climatiques au niveau urbain qui traitent le bilan énergétique des surfaces, sont souvent assez complexes et difficiles à mettre en œuvre dans une logique de chaînage de sous-modèles⁶. Cette solution est donc difficilement envisageable pour un fragment urbain dépassant quelques bâtiments. C'est pourquoi, la simplification des modèles climatologiques au niveau urbain devient la norme dans la grande majorité des modèles de demande d'énergie à l'échelle locale ([Shorrock and Dunster \(1997\)](#); [Jones et al. \(2007\)](#); [Heiple and Sailor \(2008\)](#); [Firth et al. \(2010\)](#); [Ratti et al. \(2005\)](#)). Les solutions possibles sont alors, par exemple, la correction des températures extérieures, la correction forfaitaire des consommations selon les valeurs d'un ou plusieurs paramètres climatiques... Il est bien évident que cette alternative n'est possible que pour certains objectifs de modélisation spécifiques et ne sera pas envisageable pour d'autres (ex : calcul du potentiel solaire des surfaces d'un fragment urbain). Ceci n'est qu'un exemple, mais il illustre bien la difficulté du changement d'échelle dans une approche de modélisation.

Cette difficulté se retrouve, par exemple, dans la modélisation de l'occupation, des comportements. Il n'y a pas de modèle parfait : un modèle très détaillé ne sera pas souhaitable à une grande échelle en raison de la grande quantité de données à recueillir lors d'enquêtes de terrain, très coûteuses en termes de temps et de ressources, et un modèle très simplifié ne donnera pas d'informations de sortie exploitables pour tous les objectifs de modélisation possibles (dimensionnement de systèmes énergétiques, définitions des actions de rénovation, définition des actions de sensibilisation...). On voit dès lors apparaître l'importance de bien définir le (ou les) objectifs de modélisation (qui sont d'ailleurs souvent dépendant du type d'utilisateur final), afin de déterminer le type d'approche dans la résolution de sous-modèles.

6. Les modèles de mécanique des fluides (CFD) présentent des difficultés liées à la définition des conditions limites de simulation. Ces conditions dans le contexte urbain sont très difficiles à définir. De plus, les modèles CFD requièrent un maillage en trois dimensions très coûteux en temps du calcul.

1.4 Importance de la définition des objectifs de modélisation

1.4.1 Introduction

L'objectif initial de tout modèle est de représenter, à partir d'un nombre limité de données d'entrée, la réalité d'une situation de terrain, au regard de certains objectifs spécifiques. Ces objectifs ont vocation (dans la majorité des cas) à être opérationnels et en lien avec un ou plusieurs acteurs d'un processus de décision d'actions (cf § 1.2.4). Aux yeux de ces acteurs, le parfait degré de détail du modèle (et de ses sous-modèles) sera celui qui lui permettra de prendre une décision sur la base d'une information relativement fiable. La « beauté » du modèle et son degré de complexité est au mieux secondaire.

Si, par exemple, le but d'un modèle est d'analyser la consommation des produits électroménagers, hors chauffage électrique, dans le secteur résidentiel, il n'est peut être pas indispensable de développer un modèle intégrant une description fine de l'échelle physique. Une approche statistique sur la zone géographique considérée peut suffire. Si maintenant, l'objectif est de déterminer la part des équipements sur la courbe de charge d'un quartier en particulier, l'approche statistique ne sera plus suffisante. Un modèle construit à l'échelle locale, basé sur une analyse fine de la situation sera plus pertinent. En effet, dans ce cas il sera nécessaire de modéliser les comportements des occupants (et donc de l'occupation) au regard de l'utilisation de ces équipements.

Dès lors, on conçoit facilement l'importance d'intégrer cette considération dès le début de la construction du modèle afin d'éviter au mieux tout développement inutile, au pire un modèle inutilisable en contexte réel. C'est malheureusement le cas d'un certain nombre d'outils de modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine qui sont souvent construits avec l'objectif de répondre à divers objectifs (et donc souvent à aucun réellement). Cela n'implique pas de construire un modèle par objectif. On peut envisager un outil multi-objectifs (limités quand même) mais qui intègre cette spécificité. Une solution étant d'introduire un certain degré de flexibilité dans les sous-modèles et/ou les données d'entrée (cf §1.7).

1.4.2 Les divers objectifs d'une modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine

Comme il a été évoqué dans la section 1.2, le contexte de gestion locale de la question énergétique nécessite l'interaction de différents acteurs (propres à l'échelle locale ou non) qui ont besoin de prendre des décisions sur la base d'informations fournies par les outils de simulation. Le schéma général de la figure 1.5 illustre le processus de décision selon [Pinter et al. \(1999\)](#). Cette figure illustre notamment la rétroaction entre une décision et la pression résultante, qui elle même influe sur la réponse en termes de décision. Selon l'acteur considéré, les questionnements sont donc différents, ainsi que les niveaux de compétences techniques, les champs d'action, les intérêts... Mais l'objet d'étude reste le même : l'aire urbaine et sa consommation énergétique. Par conséquent les modèles de simulation doivent être développés en lien avec la diversité d'objectifs consécutive de cette diversité d'acteurs. On trouvera ainsi comme objectifs possibles :

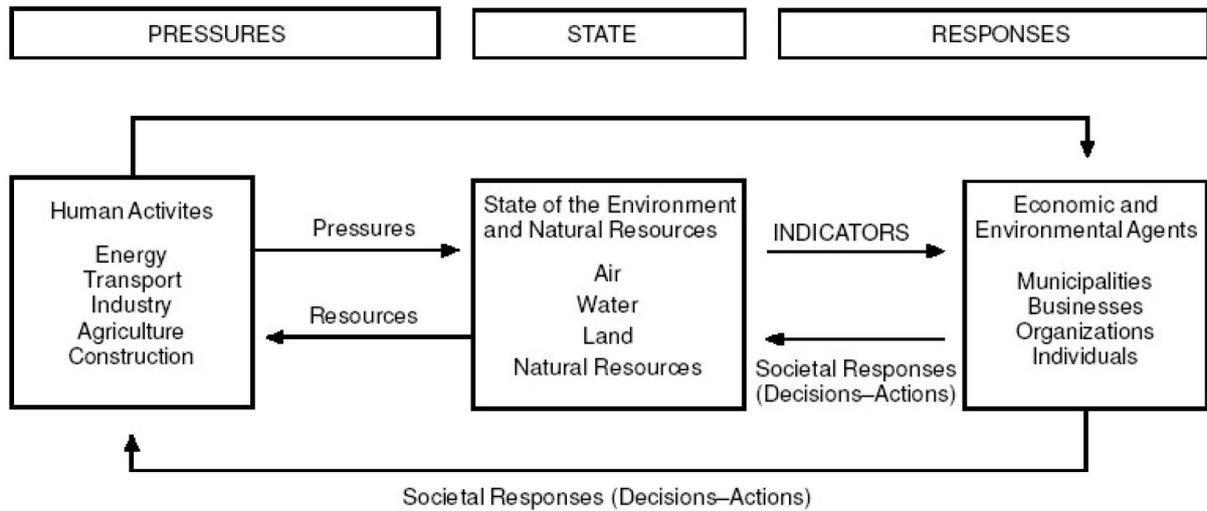


FIGURE 1.5 – Diagramme « Pression-Etat-Réponse » (Pressure state response, PSR) qui montre les principales relations entre les activités humaines, l'environnement et les réponses de la société pour limiter l'impact négatif dans le cadre du développement durable.

- La construction de nouveaux quartiers ou zones d'activité urbaine.
- La rénovation urbaine
- L'évaluation des politiques publiques (à travers les PCET par exemple)
- Mise en adéquation de l'offre et de la demande de façon générale. Selon le cas ce peut être pour des objectif de dimensionnement de systèmes énergétiques ou de pilotage de ces derniers.
- Extension/construction de réseaux énergétiques urbains (chaleur, gaz, électricité, froid)
- Audit énergétique
- Diagnostic énergétique
- Développement de filières énergétiques locales et/ou renouvelables
- Gestion de patrimoine public ou privé
- Détermination d'actions d'efficacité énergétique
- Sensibilisation des occupants (nécessitant une modélisation de l'occupation et des comportements).

Selon le cas et l'utilisateur, les données de sortie (fournies par le modèle concerné) ne seront pas les mêmes. Il pourra s'agir des consommations annuelles, des profils de puissance, de grandeurs moyennées, de grandeurs temporelles... Par conséquent, les données d'entrée (donc les données à rassembler pour réaliser la simulation), la structure du modèle, le degré de détail des sous-modèles ne seront également pas les mêmes.

1.5. Différentes approches de la modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine.

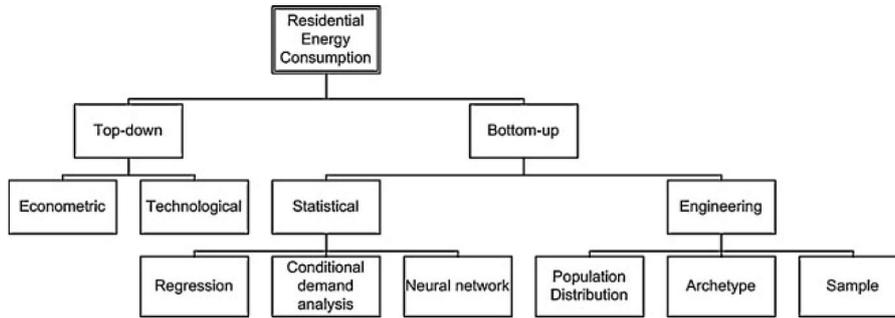


Figure 1.6: Classification hiérarchique des techniques actuelles d'évaluation de la consommation d'énergie résidentielle, source: [Swan and Ugursal \(2009\)](#)

1.5 Différentes approches de la modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine.

Les modèles de demande en énergie à l'échelle urbaine sont de natures très variées et il n'existe pas une façon préférentielle d'en faire une classification. Une classification chronologique des modèles peut être pertinente pour faire une analyse de l'évolution de la modélisation de la demande d'énergie à travers le temps. Un autre moyen (plus classique) de classer les modèles est de différencier la façon d'accéder à l'échelle considérée dans le processus de modélisation. Soit l'approche est ascendante (Bottom-Up), soit l'approche est descendante (Top-Down). Dans le premier cas le résultat donnant la consommation à l'échelle urbaine, sera une agrégation des simulations individuelles de chaque bâtiment, alors que dans le deuxième cas le résultat sera obtenu par désagrégation de grandeurs connues à des échelles supérieures (régionales, nationales..).

[Swan and Ugursal \(2009\)](#) proposent une classification des différents modèles de prédiction de la demande dans le secteur résidentiel (voir figure 1.6). Ils divisent les méthodes Top-Down en modèles économétriques et modèles technologiques. Pour les modèles Bottom-Up ils font également une division en modèles statistiques et modèles d'ingénierie (eux mêmes classés selon trois sous-catégories). Sur la figure 1.6 on peut facilement constater que les catégories de troisième niveau (modèles économétriques, technologiques, statistiques et d'ingénierie) ont une relation directe avec la définition de l'échelle telle que présentée dans la section 1.3 (statistique, physique et politique respectivement). Dans la réalité, la plupart des modèles font partie de plusieurs classifications à la fois. Par exemple, selon [Swan and Ugursal \(2009\)](#), le modèle de [Shimoda et al. \(2004\)](#) est répertorié dans les modèles suivant une approche Bottom-up > Ingénierie > Archétype; mais il peut également être classé dans la catégorie Bottom-up > Ingénierie > Statistique, puisque l'approche statistique est utilisée pour définir les typologies de bâtiments. Ce type de classification des modèles ([Swan and Ugursal, 2009](#)) repose sur l'identification de l'échelle de l'analyse ou sur la caractérisation de la structure même du modèle. Cela ne renseigne que partiellement sur le type et la quantité de données d'entrée qui en résulte, ni sur la façon dont celles-ci sont traitées.

Grimmond et al. (2010) proposent une autre méthodologie de classification des modèles à l'échelle urbaine. Dans une problématique de comparaison de divers modèles climato-énergétiques de bilan énergétique au niveau urbain, Grimmond et al. (2010) préfèrent établir une liste exhaustive des caractéristiques majeures utilisées par chaque modèle étudié pour les classer entre eux.

Enfin, Laurent et al. (2011) proposent une classification des modèles selon qu'ils soient « déterministes » ou « empiriques ». Les modèles empiriques de demande sont basés sur l'observation des tendances passées alors que les modèles déterministes nécessitent une description physique relativement fine des caractéristiques de parcs et des équipements. Pour les auteurs, ces deux familles de modèles ne répondent pas aux mêmes questions. Les modèles « déterministes » sont plutôt adaptés pour quantifier l'impact de variables macro-économiques tandis que les seconds sont plus à même de décrire l'impact d'actions techniques. Même si une étude macro-économique peut aboutir à des propositions techniques et des modèles empiriques peuvent apporter des réponses à des questions macro-économiques, pour Laurent et al., 2011, il est plus facile d'utiliser un modèle du type empirique (ou « bottom-up ») pour répondre à des questions macroéconomiques que le contraire.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.2, les enjeux de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine mettent en avant la dimension locale (du fait de la dynamique de réduction de la consommation à cette échelle et du fait des acteurs de la mise en œuvre de cette dynamique). Cela se traduit par une échelle physique déjà évoquée qui va du quartier à la ville (voire la communauté de communes). De plus, comme nous l'avons vu également, la définition des actions liées aux différents objectifs de modélisation (cf § 1.4) nécessite une connaissance fine de la demande, propre au tissu urbain étudié et paramétrable afin d'établir différents scénarios d'actions. C'est pour cette raison que la suite de ce chapitre ne se focalisera que sur les modèles de simulation suivant une approche « bottom-up ». En effet, la taille du fragment urbain étudié permet une mise en œuvre de techniques d'agrégation/distribution/répartition... de simulations physiques de bâtiments le constituant (caractéristiques d'une approche bottom-up), alors que la désagrégation d'informations d'une échelle supérieure (souvent nationale), propre à l'approche top-down, ne permet pas de satisfaire ces contraintes de connaissance précise de la situation locale.

1.6 Revue de différents modèles de demande d'énergie à l'échelle urbaine, de type « bottom-up »

1.6.1 Avant propos

Dans cette revue bibliographique, nous considérons les modèles de type « bottom-up » construits dans le but d'expliquer les phénomènes qui se produisent à l'échelle urbaine et qui interviennent dans la modélisation de la demande d'énergie, dans le secteur résidentiel. Nous avons choisi de nous focaliser sur les modèles bottom-up car nous les considérons

plus pertinents dans le but d'évaluer la mise en place des améliorations physiques et des systèmes du parc urbain.

Les travaux étudiés illustrent différentes approches de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine. Le but n'est pas d'être exhaustif mais d'établir un panorama des méthodologies et outils utilisés dans ce but. Parmi ces travaux nous nous pencherons plus particulièrement sur :

- la relation entre les diverses formes urbaines et la demande d'énergie (Modèle LT-Urban [Ratti et al. \(2000\)](#); [Robinson and Baker \(2000\)](#))
- l'approche statistique de la modélisation de la demande d'énergie dans le secteur résidentiel (modèles de [Shimoda et al. \(2010a,b, 2004\)](#))
- l'utilisation des enquêtes de terrain et les systèmes SIG (Systèmes d'Information Géographique) [Jones et al. \(2007\)](#)
- l'approche systématique où tous les bâtiments sont simulés pour tester des nouvelles stratégies de réduction de la demande [Swan \(2010\)](#)
- Un modèle construit depuis sa conception pour expliquer des phénomènes à l'échelle urbaine. [Robinson et al. \(2009\)](#); [Robinson \(2011\)](#)

Ces différents modèles sont conçus pour réaliser des simulations à l'échelle urbaine, même si pour certains modèles un cœur de calcul à l'échelle bâtiment est utilisé ([Swan, 2010](#); [Jones et al., 2007](#); [Robinson and Baker \(2000\)](#)). La manière de transposer les divers phénomènes (propres aux bâtiments, occupation, microclimat...) à l'échelle urbaine est analysée pour chacun de ces modèles.

1.6.2 L'utilisation des enquêtes rapides et les Systèmes d'Information Geo-références : Jones et al.

L'outil EEP (« Energy and Environmental Prediction Model ») [Jones et al. \(2007\)](#) est un outil du type « bottom-up » qui utilise des données géo-référencées, pour la plupart issues d'enquêtes de terrain, dans le but de prédire : les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur résidentiel, les flux de trafic et certaines variables concernant la santé publique. Concernant la partie spécifique des émissions de CO₂, le but principal de ce modèle est de localiser les points de grande consommation d'énergie et l'estimation des émissions de CO₂ associées.

Le cœur thermique est basé en la norme UK SAP Ratings [Building Research Establishment \(1998\)](#). Il utilise un système d'assignation des données à des typologies de bâtiment (« cluster analysis technique ») .⁷

Le géo-référencement des données exploite le système de code postal anglais (un code postal représente environ 30 logements [Jones et al. \(2007\)](#)). Un autre aspect important de l'approche utilisée dans ce modèle est l'utilisation d'enquêtes de terrain rapides (« fast-drive survey »). Ces enquêtes aident à décrire le bâtiment à partir d'une visualisation

7. La méthode de création des typologies n'est pas clairement définie dans les diverses publications associées à ce modèle.

rapide de sa façade, et à collecter les informations nécessaires à la modélisation des bâtiments : forme du bâtiment (bâtiment isolé, mitoyen, bâtiment collectif etc.), nombre d'étages, nombre de cheminées, hauteur des étages, surface vitrée de la façade.

Même si une analyse des façades donne une information précieuse concernant la géométrie du bâtiment, sa compacité ou son taux de vitrage, une modélisation de la demande basée totalement sur ce type d'enquête est impossible. C'est pourquoi ces dernières sont complétées par d'autres sources d'informations : cartes historiques du Royaume-Uni pour trois périodes (1870-90, 1895-1905, 1919-1922), plans de ville et une «connaissance locale»⁸ pour récupérer plus d'informations concernant les bâtiments construits après 1973. Les données ainsi récupérées sont principalement : surface au sol chauffée, surface de la façade, pourcentage de la surface vitrée, surface de l'enveloppe et âge du bâtiment. A partir de ces données, 100 types de bâtiments sont créés et complétés, pour évaluer leur performance avec l'outil SAP qui donne comme résultat un bilan mensuelle de consommations du type BREEDEM. Il est important de remarquer que cet outil n'est pas un outil de simulation thermique dynamique et le calcul est basé sur un bilan énergétique qui prend en compte une série de facteurs tels que : les matériaux utilisés pour sa construction, le degré d'isolation, les caractéristiques du système de ventilation, l'efficacité et le contrôle des systèmes de chauffage, les gains solaires par les fenêtres, le combustible utilisé pour les systèmes de chauffage, l'ECS (Eau Chaude Sanitaire), l'éclairage et les équipements. Jones et al. (2007) utilisent un scénario de rénovation à grande échelle comme un exemple d'utilisation de son outil. La notation finale est exprimée à l'aide d'une échelle allant de 1 à 100. Plus élevée est la note, plus bas sera le coût de rénovation.

Finalement, l'outil assigne une consommation par m² visualisée grâce à un outil SIG. Il faut noter que le calcul de la consommation via SAP n'intègre pas l'influence de la position du bâtiment (sa position géographique, son orientation, les effets de masques...), comme toute approche par typologie. Malgré cela cet outil permet de faire une estimation grossière au niveau de la ville, des zones prioritaires d'actions à mener (« hot spots ») dans un but d'économie d'énergie par amélioration du parc urbain.

1.6.3 Couplage entre une modélisation à l'échelle du bâtiment et une approche statistique de caractérisation du parc national de bâtiments : The Canadian Hybrid Residential Energy and Emissions Model (CHREM)

CHREM Swan (2010) est un modèle qui couple l'approche de modélisation physique (le logiciel thermique dynamique ESP-r, (Strachan et al., 2008) et l'approche statistique (données très détaillées sur le parc de bâtiments canadien). Dans ce modèle chaque bâtiment est associé à une typologie générale de maison isolée (qui représente la grande majorité du parc de bâtiments canadien). La modélisation est réalisée sur un échantillon de bâtiments représentatifs, pour lesquels des données très précises sont disponibles (concernant les caractéristiques thermiques des matériaux et les systèmes).

L'objectif principal du modèle CHREM est l'évaluation de diverses actions (liées aux technologies, la rénovation, l'amélioration de l'efficacité des systèmes de chauffage...) sur

8. Connaissance locale des rues, des types de bâtiments et de commerces, fournis pour des habitants de la ville à partir d'entretiens informels.

1.6. Revue de différents modèles de demande d'énergie à l'échelle urbaine, de type « bottom-up »

la consommation en énergie et les émissions des gaz à effet de serre à l'échelle nationale. Ce modèle est construit sur la base de deux sources d'information importantes disponibles au Canada : the EnerGuide for Houses Databases (EGHD)⁹ et l'enquête sur l'utilisation de l'énergie des ménages (SHEU) [Natural Resources Canada \(2005\)](#). Les résultats de ces enquêtes sont adaptés et ces résultats sont pré-traités pour garantir une représentativité du parc de logements canadien. L'utilisation d'ESP-r permet une analyse temporelle très détaillée des besoins en énergie. Ce logiciel permet de faire des évaluations de l'impact des nouvelles technologies et des stratégies de rénovation (implémentation à grande échelle de changement des vitrages, d'une nouvelle isolation, etc.) dans la consommation du parc de bâtiments canadien.

Le point fort de ce modèle est l'utilisation extensive des enquêtes de terrain. L'EGHD est le résultat de 200 000 audits énergétiques à domicile qui ont été commandés par les occupants intéressés, financés par le gouvernement et menés de 1997 à 2006.

L'aspect le plus important de cette enquête est que les audits ont été réalisés par des auditeurs professionnels, ce qui assure une erreur minimale dans les estimations de performance des bâtiments. Cette qualité de l'information n'est pas systématique dans les enquêtes nationales réalisées dans d'autres pays. Pour le modèle CHREM, les données, récoltées lors de l'enquête, sont : la localisation du logement et son orientation, le type de bâtiment, la géométrie, le nombre d'étages, le type de fondation, la présence ou l'absence d'un grenier, les matériaux de construction (y compris les portes et fenêtres), la ventilation et infiltrations d'air dans les portes (tests spécialisés), le type de source pour l'eau chaude sanitaire et les informations concernant les systèmes de chauffage. Le principal inconvénient de cette base de données est qu'elle ne couvre pas les bâtiments collectifs (seulement les maisons mitoyennes et individuelles).

D'après [Swan et al. \(2009\)](#), les appartements concernent seulement 18,5% du parc des bâtiments au Canada. Cette limitation du modèle CHREM est donc toute relative et permet d'utiliser les variables disponibles de ces sources d'informations [Swan and Ugursal \(2009\)](#).

Afin de pallier partiellement les biais de la démarche volontaire des propriétaires de réaliser les audits, pour cette base de données, le modèle CHREM utilise un algorithme de sélection aléatoire des bâtiments.¹⁰

L'enquête SHEU-03 a été effectuée en 2003 pour quantifier les caractéristiques énergétiques du parc de logements au Canada et évaluer l'efficacité des divers programmes d'efficacité énergétique menés au Canada, par le gouvernement central. La version 2003 de cette enquête couvre 4551 logements et a été extrapolée pour couvrir la totalité du parc des bâtiments canadiens¹¹. Les informations contenues dans cette base de données telles que le type de logement, la surface du logement, etc., sont des caractéristiques classiques que l'on retrouve dans beaucoup d'enquêtes similaires, réalisées dans d'autres pays comme l'enquête sur l'utilisation de l'énergie des ménages aux Etats-Unis ([US Department of Energy, 2012](#)) ou l'enquête Logement de l'INSEE en France ([INSEE, 2006](#)). Dans ces en-

9. <http://oee.nrcan.gc.ca>

10. Les propriétaires intéressés par la démarche d'audit sont en général déjà sensibilisés aux économies d'énergie et leur habitation n'est pas totalement représentative de l'ensemble du parc.

11. 11,1 millions de logements.

quêtes, représentatives du parc de logements nationaux ou même régionaux, l'information concernant la localisation du logement n'est pas disponible. Dans le cas français (enquête de l'INSEE) l'information disponible l'est au niveau de l'IRIS ¹².

Sur la base de ces deux enquêtes, Swan a développé une technique pour assimiler la distribution de l'enquête de terrain biaisée nommée EGHD à l'enquête de terrain non biaisée SHEU-03 (voir figure 1.7). Cette technique est basée sur la méthode d'allocation des quotas. Pour cela, Swan utilise une méthode de sélection aléatoire où les logements sont tirés au hasard à partir de contraintes bien définies et fixées par l'enquête non biaisée (par exemple le type d'énergie utilisée par les systèmes de chauffage). Il complète ainsi (de façon représentative) la deuxième enquête (voir figure 1.7). Finalement 17 000 maisons mitoyennes et individuelles sont choisies et intégrées dans la nouvelle base de données nommée CSDDRD Swan (2010).

Pour la création de la base de données CSDDRD, une réduction de l'enquête SHEU-03 a été réalisée et des maisons représentatives ont été créées. Dans CSDDRD, chaque maison est représentative de 525 maisons du parc canadien. Avec cette réduction une approximation de la distribution de l'enquête SHEU-03 est faite en choisissant de façon aléatoire des maisons de l'enquête EGHD, avec des contraintes liées au type de maison, à la géométrie et aux caractéristiques des matériaux. Le couplage de ces deux bases de données permet donc d'avoir une information détaillée du parc de logements canadien (illustrant ainsi le potentiel d'une approche statistique pour définir des typologies).

L'information contenue dans cette nouvelle base de données alimente enfin un sous-modèle qui donne une estimation de la consommation d'eau chaude sanitaire et des appareils électroménagers (Aydinalp et al., 2002), en utilisant la méthode des réseaux de neurones. Les profils d'apports gratuits dus aux occupants ont été créés en fonction des travaux d'Armstrong et al. (2009).

Les données de la base de données CSDDRD sont transmises directement au logiciel du calcul thermique-dynamique ESP-r via un codage PERL et fonctions XML. Les données d'entrée et hypothèses concernant les matériaux et la ventilation sont détaillées dans Swan (2010). Swan utilise également une description unifiée de la géométrie pour tous les bâtiments modélisés : la cave, la zone principale chauffée et le grenier, ce qui correspond à trois zones thermiques.

1.6.4 L'utilisation des caractéristiques géométriques des bâtiments et des ratios de consommation pour une évaluation de la demande : Baker et Robinson.

Ce modèle utilise comme cœur de calcul la méthode LT (Baker and Steemers, 1996; Robinson and Baker, 2000). LT est une méthode conçue pour prédire la demande énergétique

12. La moyenne des logements disponibles dans un IRIS est de 2000 logements.

1.6. Revue de différents modèles de demande d'énergie à l'échelle urbaine, de type « bottom-up »

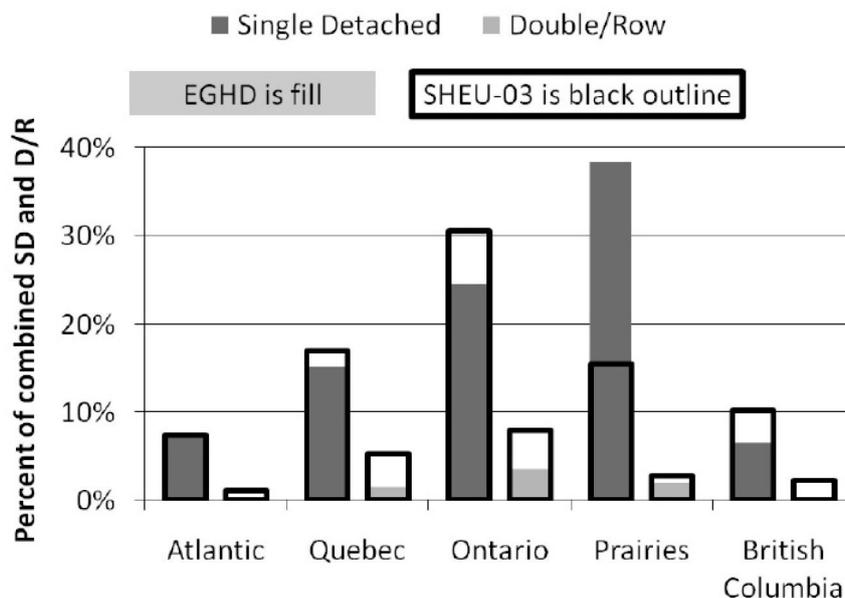


Figure 1.7: Distribution régionale des bases de données EGHD and SHEU-03 utilisées comme source d'information dans le modèle de Swan (Source Swan (2010))

et sa variation en fonction de certains paramètres dans une étape de construction du bâtiment. Conçue comme un outil d'aide à la décision dans la conception des bâtiments, la méthode LT est basée sur le concept de « zones passives ». Une « zone passive » est définie comme la distance maximale à partir d'un mur qui peut encore recevoir les avantages de la ventilation naturelle en été ou de l'éclairage naturel ou des gains thermiques en hiver. Cette zone a également la particularité d'être la zone où les pertes énergétiques sont les plus importantes. Le reste des zones dans un bâtiment sont définies comme « zones non-passives » et sont des zones qui ont besoin de ventilation mécanique, de chauffage et d'éclairage. La valeur de cette distance est variable, mais dans la méthode LT la valeur par défaut est de six mètres.

La procédure pour obtenir le besoin énergétique annuel avec la méthode LT est simple. Il faut dans un premier temps, à partir d'un plan de l'immeuble par étage, définir les zones passives et non-passives. Les zones passives orientées sud, nord, est et ouest, sont répertoriées ainsi que la surface vitrée et les obstructions. La sortie de ce modèle est le besoin en énergie par mètre carré, en fonction de l'orientation de la zone, le type de vitrage et la surface vitrée (voir exemple figure 1.8a). Ces courbes sont obtenues à partir d'un modèle mathématique dans lequel le logement est modélisé comme une « cellule unitaire ». La consommation annuelle est calculée en considérant les transferts à travers l'enveloppe, les pertes par ventilation, les gains solaires, l'intermittence de chauffage. De par sa conception ce modèle est particulièrement adapté pour évaluer l'influence des éléments occultant les fenêtres (stores, volets, rideaux...)

Selon les auteurs, le modèle LT est un outil de conception qui ne doit pas être considéré comme un modèle énergétique précis, mais plutôt comme un outil pour tester la performance relative d'un certain nombre d'options de conception au niveau du bâtiment.

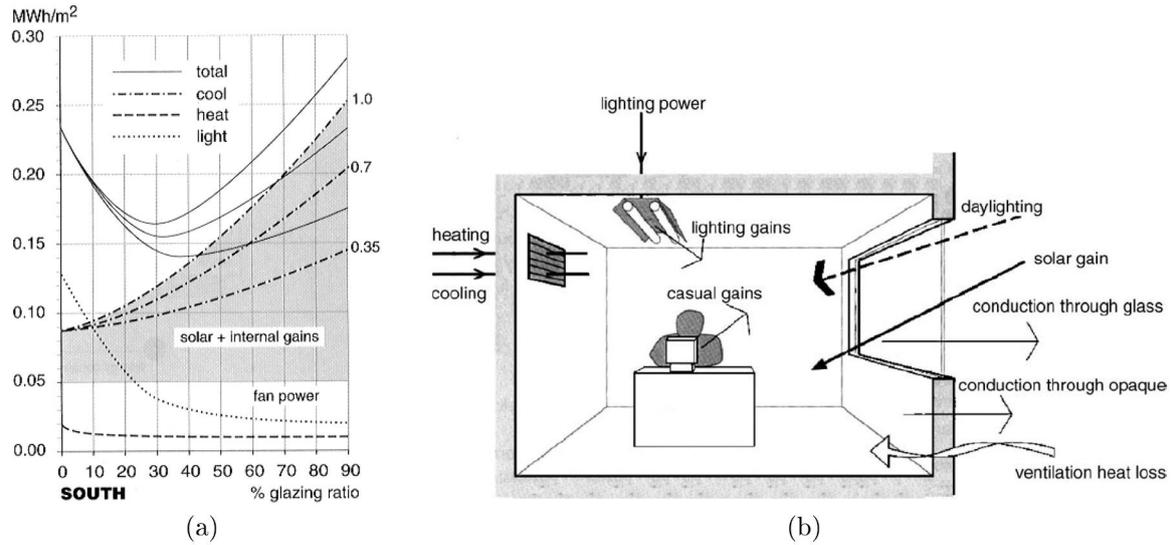


Figure 1.8: (a) Courbe LT pour un bureau orienté sud situé dans le sud de l'Europe, source: [Baker and Steemers \(1996\)](#) (b) Flux d'énergie considérés pour la méthode LT model dans une « cellule unitaire » de 3m x 3m x 6m, source: [Ratti et al. \(2005\)](#)

Malgré cette limitation, ([Robinson and Baker, 2000](#)) font une extension de l'utilisation de cet outil en le couplant à une représentation numérique de terrain (DEM : Digital Evaluation Model), en étendant le concept de zone passive au tissu urbain modélisé, pour calculer la consommation énergétique de plusieurs bâtiments et analyser sa relation avec la morphologie urbaine. Pour analyser cette relation le modèle LT-Urbain s'appuie sur des valeurs par défaut pour la plupart des paramètres d'entrée du modèle mathématique et sur seulement 4 variables principales liées à la géométrie urbaine :

- (1) La définition des zones passives et non-passives décrites ci-dessus
- (2) L'orientation de la façade associée à chaque pixel
- (3) L'angle horizontal urbain (UHA) ¹³
- (4) Facteur d'obstruction du ciel (Obstruction Sky view) ¹⁴ .

Cette variante du modèle est testée sur les villes de Berlin, Toulouse et Londres ([Ratti et al., 2005](#); [Robinson and Baker, 2000](#)). Parmi les résultats, les auteurs avancent une différence de seulement 10% entre le besoin d'énergie entre Berlin et Toulouse, due uniquement à la différence de morphologie entre les deux villes.

13. Urban Horizontal Angle [Baker and Steemers \(2005\)](#), défini comme l'angle entre le centre de la fenêtre considérée et la hauteur moyenne du toit du bâtiment adjacent.

14. Le facteur d'obstruction du ciel (Obstruction Sky View, [Baker and Steemers \(2005\)](#)) est l'angle d'élévation des façades opposées, obstruant le ciel

1.6. Revue de différents modèles de demande d'énergie à l'échelle urbaine, de type « bottom-up »

Nom pays	Responsabilités
BDSP Paternship Ltd (BDSP)	Intégration/Interface graphique/Modèle microclimat
Czech Technical University	Test et validation
Électricité de France	Modèles thermique, énergies et équipements
EPFL Lausanne	Modèle Stochastique
IDEC Sa.	Outil pédagogique et site web.
Tech. Res. Centre Finland	Outil pédagogique.

TABLE 1.2 – SUNtool une coopération Européenne, source : [Mersserli \(2009\)](#)

1.6.5 Un premier exemple de combinaison d'approches physiques et statistiques et d'utilisation des typologies, SUNTool et CITYSim.

Ces deux outils, conçus et réalisés au cours de la dernière décennie, ont été développés suite à des réflexions concernant la modélisation à l'échelle urbaine et ses problématiques connexes (modélisation des occupants [Haldi \(2010\)](#), rayonnement au niveau urbain [Robinson and Stone \(2005\)](#), conception des outils thermiques dynamiques [Kämpf and Robinson \(2007\)](#), parmi autres). Nous décrivons de façon rapide la conception de ces deux outils, SUNtool [Robinson et al. \(2007\)](#) dans un premier temps, Citysim ensuite [Robinson et al. \(2009\)](#)

1.6.5.1 SUNtool

SunTool est un outil de modélisation de la consommation d'énergie à l'échelle urbaine développé par un consortium d'instituts et entreprises en Europe (voir tableau 1.2). Leur principal objectif était de pouvoir aider à l'aménagement et à la conception des quartiers durables, en s'appuyant sur une modélisation des besoins de consommation et des émissions de CO₂. Le logiciel est articulé autour de 3 sous modèles principaux (micro-climatique, thermique et stochastique).

Le sous-modèle micro-climatique est basé sur un algorithme de radiosité [Robinson and Stone \(2005\)](#). Le sous-modèle thermique est basé sur les travaux de [Déqué et al. \(2000\)](#) et s'appuie sur un modèle simplifié du type RC qui prend en compte les paramètres considérés comme importants. Ces paramètres d'entrée du modèle sont : La température extérieure, l'enveloppe du bâtiment, le flux solaire, les gains internes, le principe de ventilation et les caractéristiques thermiques simplifiées (inertie, taux d'infiltration, coefficients de pertes).

Le sous-modèle d'occupation a été basé en grande partie sur les travaux menés par [Jessen Page à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne Page \(2007\); Page et al. \(2008\)](#). L'approche du comportement des occupants est menée de façon aléatoire au lieu des modèles déterministes souvent utilisés pour les approximations de consommation. Le modèle stochastique développé joue sur 4 variables principalement : l'occupation (apports gratuits des occupants), l'ouverture des fenêtres et des portes, l'éclairage artificiel, et la

consommation des équipements électriques et de l'eau chaude sanitaire. D'après Messerli, les variables déterminées de façon aléatoire semblent être correctement intégrées dans l'outil SunTool. [Mersserli \(2009\)](#). Malgré les grands efforts de conception de ce logiciel, le logiciel n'est plus mis à jour et n'est pas non plus dans une version open source qui permettrait de faire des évolutions.

1.6.5.2 Citysim

Au sein de l'EPFL, les expériences recueillies lors des travaux de conception et d'implémentation de l'outil SUNtool ont servi pour la création d'un nouvel outil nommée CITYSim [Robinson et al. \(2009\)](#); [Robinson \(2011\)](#). L'outil CitySim ([Robinson et al. 2009](#); [Robinson 2011](#)) est une illustration de chaînage possible de différents sous-modèles entre eux. Développé dans une optique d'aide à la décision dans la phase de design des quartiers, CitySim repose principalement sur des sous-modèles physiques. CitySIM intègre le sous-modèle climatique de SUNTool [Robinson and Stone \(2005\)](#) et lui couple un modèle thermique simplifié à trois nœuds spécialement conçu pour son utilisation avec CitySIM [Kämpf and Robinson \(2007\)](#). Les résultats de cette simplification du modèle thermique semblent valides en comparaison avec d'autres logiciels de référence comme ESP-r [Strachan et al. \(2008\)](#). Le sous-modèle d'occupation reste sur les bases du modèle SUNtool [Page \(2007\)](#); [Page et al. \(2008\)](#), avec certaines améliorations proposées dans les travaux de [Haldi and Robinson \(2008\)](#); [Haldi \(2010\)](#) notamment sur le modèle d'occupation qui est basé sur huit ans d'enquêtes de terrain menées par l'EPFL.

Les données d'entrée sont une description géométrique de la scène (quartier), les caractéristiques des systèmes (HVAC, DHW, constructions...), les profils de comportement (modélisés spécifiquement) et un sous-modèle du rayonnement (pour tenir compte des effets directs de l'ensoleillement, ainsi que des réflexions multiples).

L'outil CITYSim est encore dans une phase de développement ([Robinson, 2011](#)), mais il a déjà été utilisé pour la modélisation à l'échelle urbaine. Les objectifs d'une première utilisation étaient de tester la sensibilité des occupants à différents scénarios thermiques (dans un contexte de bureaux) [Haldi \(2010\)](#). L'outil a également été couplé à une analyse de sensibilité et à une approche inverse, dans le but d'évaluer son potentiel d'utilisation dans le cas d'une simulation de bâtiments existants (pour lesquels toutes les données d'entrée ne sont pas connues) [Marguerite \(2010\)](#).

Finalement, les diverses études menées pour la conception de ces deux logiciels ont grandement aidé au développement des outils conçus depuis le début pour modéliser à l'échelle urbaine.

1.6.6 Deuxième exemple de combinaison d'approches physique et statistique et d'utilisation des typologies, Shimoda ([Shimoda et al., 2007](#))

Le modèle développé par Shimoda et al. ([Shimoda et al., 2004, 2010a,b](#)) est également un exemple intéressant de combinaison de différentes alternatives de modélisation énergétique

à l'échelle urbaine. Le travail réalisé a pour but d'évaluer les mesures prises pour réduire la consommation énergétique dans le secteur résidentiel du Japon. Outre l'objectif clairement identifié, ce modèle illustre également la démarche de l'analyse des données disponibles en phase amont du travail de développement. En effet, le travail présente l'ensemble des ressources disponibles au Japon pour atteindre l'objectif et présente les développements complémentaires nécessaires.

L'objectif précis est de déterminer les mesures possibles (à l'attention des occupants des bâtiments) pour réduire la consommation énergétique. L'efficacité de ces mesures est également évaluée. Pour cela, les auteurs modélisent à la fois le comportement dynamique des bâtiments mais également le couplage avec les habitants.

Les éléments intégrés au modèle sont :

- un modèle dynamique de bâtiment basé sur l'analogie électrique (modèle RC à 3 nœuds par pièce), incluant un modèle d'ECS,
- une représentation des occupants par approche typologique des catégories de ménage,
- un modèle d'utilisation des équipements (issue d'une enquête réalisée tous les 5 ans au Japon),
- un modèle d'occupation couplé avec une modélisation des activités de chacun dans le logement, aussi basée sur une approche typologique,
- un modèle d'utilisation de l'éclairage.

Le modèle est ensuite mis en œuvre pour analyser les combinaisons entre 19 types de ménages, 8 catégories d'occupants, 20 types de bâtiments et 5 niveaux d'isolation.

Les sorties du modèle sont les profils temporels qui permettent d'identifier les corrélations entre consommation, occupation, actions d'efficacité, actions de rénovation. Des combinaisons d'action sont également testées.

1.7 Conclusion : Une approche flexible de la modélisation

Nous avons vu dans ce chapitre la spécificité d'une modélisation à l'échelle locale. Cette spécificité est avant tout due à l'échelle (ou les échelles) spatiales qui est la conséquence des processus de mise en œuvre des politiques énergétiques et de réduction des émissions. De plus, ces échelles spatiales sont corrélées à des échelles administratives, ce qui implique une diversité d'acteurs dans les processus de décision, en lien avec une diversité d'objectifs propres. Par ailleurs, s'ajoute à ce panorama, une variabilité dans la connaissance des informations de terrain (caractéristiques techniques détaillées du patrimoine par exemple).

L'analyse bibliographique des modèles développés à ces échelles montrent une diversité d'approches de modélisation (modèles physiques, modèles statistiques, approche top-down, approche bottom-up...), souvent couplées entre elles. L'approche bottom-up de façon générale et les modèles d'ingénierie en particulier, apparaissent comme les plus adaptés à la problématique qui nous intéresse.

Ce chapitre met en avant la nécessité d'une définition précise des objectifs de modélisation en amont du développement du modèle lui-même. Comme nous l'avons dit, cela ne

signifie pas qu'il faille imaginer une solution de modélisation pour chaque objectif (cela diminuerait le côté opérationnel des outils).

La solution qui se dessine est donc une approche flexible de la modélisation en lien direct avec les objectifs de modélisation, avec une définition de la flexibilité qui peut (et doit) être à plusieurs niveaux :

- Flexibilité dans les sous-modèles mis en œuvre : la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine nécessite la prise en compte de différents phénomènes (comportement dynamique des bâtiments, interaction entre les bâtiments, micro climat, occupation, systèmes ...) qui, pris individuellement, ont fait l'objet de nombreux travaux de modélisation (offrant des modèles plus ou moins détaillés, plus ou moins faciles à intégrer dans une chaîne de sous-modèles, plus ou moins gourmands en ressource informatique...). Aussi, un modèle flexible à l'échelle urbaine doit permettre une substitution de ces sous-modèles entre eux, encore une fois en lien avec les objectifs du modèle général. L'enjeu devient alors la communication entre les différentes solutions de chaînes de sous-modèles et donc la mise en forme des données d'entrée propres à chaque type de sous-modèle.
- Flexibilité dans les sources de données : pour alimenter les sous-modèles évoqués précédemment, il faut pouvoir exploiter les différentes sources d'information disponibles (bases de données statistiques, enquêtes de terrain, agrégation/désagrégation d'indicateurs et ratios, relevés de mesures/de facturation, modélisations parallèles...). La plupart du temps les données exploitables et/ou à exploiter sont liées au contexte de la modélisation et bien sûr aux objectifs.
- Combinaison des approches de modélisation : les sous-modèles évoqués dans le premier point peuvent être des sous-modèles physiques ou statistiques, ce qui constitue un premier élément de combinaison des deux approches. Mais on peut également envisager une combinaison impliquant les outils statistiques comme solution de traitement de l'information en préparation des données d'entrée nécessaires aux sous-modèles physiques, ou inversement, les modèles physiques peuvent être utilisés pour générer des populations de résultats permettant d'établir des modèles statistiques (souvent plus simples d'utilisation).

C'est ce dernier point qui est exploré dans la suite de ce travail qui constitue la première pierre à l'édifice d'une approche de modélisation flexible de la demande en énergie à l'échelle urbaine. En particulier, le rapprochement de l'approche statistique et de la modélisation physique est abordé sous l'angle d'une analyse de sensibilité d'un modèle physique de thermique du bâtiment à ses paramètres d'entrée. Cette analyse est réalisée avec pour enjeu, dans un premier temps, de déterminer l'importance relative de ces paramètres et leurs interactions éventuelles. Elle est également réalisée avec un double objectif de réduction de modèle ultérieure et de définition des paramètres pertinents à retenir dans une approche de typologie de bâtiments. Ce travail, qui constitue le principal apport scientifique de la thèse, se penche sur les méthodologies et méthodes d'analyse de sensibilité. Avant cela, le chapitre 2 présente la structure du modèle général qui est une illustration de l'approche flexible de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine.

Chapitre 2

L'outil MEDUS : Modelling Energy Demand at Urban Scale

2.1 Introduction

Sur la base des conclusions du chapitre 1 sur les approches de modélisation de la demande énergétique à l'échelle urbaine, ce chapitre présente la démarche de construction d'un outil de modélisation flexible qui associe approche ingénierie et approche statistique par ratios, et des données énergétiques locales, suivant une approche bottom-up de la modélisation. Outre la description de la structure du modèle, ce chapitre décrit la démarche de combinaison flexible des ressources disponibles dans le but d'une modélisation dans un contexte spécifique, avec des objectifs bien identifiés en amont. Le travail réalisé dans cette thèse, concernant l'outil MEDUS, est une première étape qui doit être considérée comme telle. En particulier, l'objectif (dans le cadre de cette thèse encore une fois) n'est pas d'atteindre un outil opérationnel mais d'établir une structure type de modèle flexible, basée sur des choix a priori de sous-modèles, de sources de données, d'hypothèses... dans le but de lever une partie des verrous scientifiques associés à la démarche. En l'occurrence, sera traitée dans les chapitres suivants la question de la disponibilité de l'information et des solutions pour une modélisation cependant réalisable. La structure de base a été baptisée MEDUS pour « *Modelling Energy Demand at Urban Scale* »

In fine, la version opérationnelle de MEDUS doit déboucher sur un modèle flexible, adaptable à divers contextes de disponibilité de données, d'objectifs, et doit faciliter la collecte et la structuration des données dans le cadre d'observatoires locaux de la demande énergétique. Pour cela l'approche vise à faire converger :

- tantôt un modèle physique numérique de thermique du bâtiment, tantôt un modèle basé sur des ratios (selon l'objectif de modélisation),
- des données descriptives du fragment urbain (bâtiments et populations) ,
- une approche typologique pour limiter le nombre de simulations et permettre de remonter à l'échelle urbaine,

- des modèles statistiques fondés sur la désagrégation par usage et par périodes de données énergétiques disponibles, en provenance de diverses sources (opérateurs des réseaux, factures, DPE, enquêtes de terrain, ...),
- les données météo locales corrigées et/ou des modèles de microclimat spécifiques,
- une prise en compte de l'occupation et des comportements des occupants, propres à l'échelle considérée (modèles déterministes ou stochastiques, ainsi que l'agrégation/désagrégations de ratios),
- une nécessité d'intégrer ou de combiner d'autres alternatives de sous-modèles à venir.

Les sorties attendues du modèle sont à minima la consommation ainsi que les informations relatives aux courbes de charge du quartier étudié.

2.2 Description générale du modèle MEDUS dans sa première phase de développement

2.2.1 Objectifs et contexte

L'objectif de l'outil, dans sa première phase de développement (objet de ce travail) est double :

- proposer une première solution de modélisation de la consommation énergétique d'un quartier,
- établir les conditions d'adaptation de la solution de modélisation thermique de bâtiments pour la rendre compatible avec la nécessité du changement d'échelle bâtiment-quartier et avec les données disponibles. Ce deuxième aspect n'est pas un objectif opérationnel mais scientifique, nécessaire pour atteindre le premier objectif.

Dans le premier cas, l'objectif est de déterminer la consommation énergétique d'un quartier de Nantes (St Felix), principalement résidentiel (voir chapitre 5). Le contexte est la connaissance de la performance énergétique d'un quartier pour lequel on ne dispose pas des caractéristiques détaillées des bâtiments, ni des factures ou relevés de consommations. Les données disponibles sont :

- les informations de la base de données TOPO,
- les informations de l'INSEE (enquête logement, recensement de la population),
- les éléments donnés par les images aériennes (google maps, IGN...),
- la possibilité d'enquêtes sommaires de terrain (dans les rues principalement).

Le deuxième objectif (qui est une étape scientifique de construction du modèle) est d'identifier le potentiel d'un couplage entre un modèle dynamique de bâtiment et les méthodes d'analyse de sensibilité pour rendre compatible la modélisation physique avec un accès limité aux données d'entrée du modèle, établir les classes typologiques pertinentes pour limiter le nombre de simulations tout en permettant de reconstituer la consommation à l'échelle du quartier. Ces aspects seront abordés dans les chapitres 3 et 4.

Pour garantir la pérennité de ce projet, le logiciel est conçu pour travailler avec des outils du type « open source », ce qui renforce l'aspect de flexibilité en permettant une amélioration constante des sous-modèles.

2.2. Description générale du modèle MEDUS dans sa première phase de développement

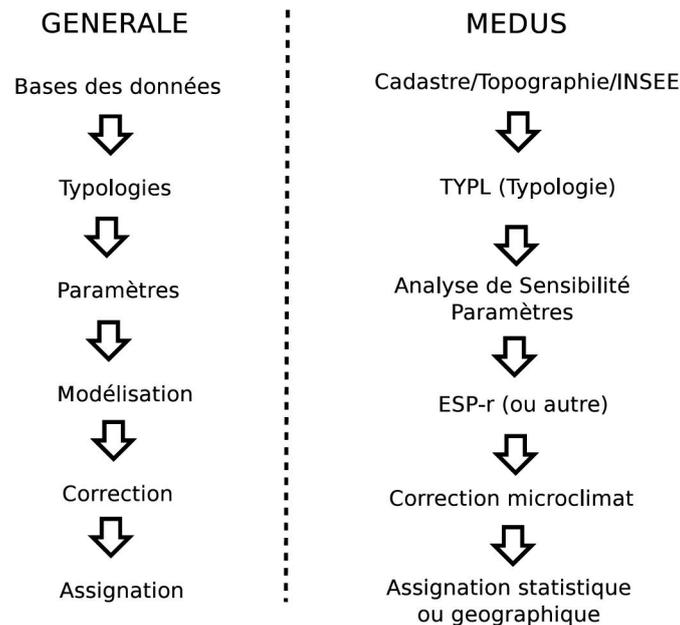


FIGURE 2.1 – Comparatif entre la structure générale de la modélisation de la demande d'énergie à l'échelle urbaine et le modèle MEDUS.

2.2.2 Principe

Une des faiblesses des modèles existants pour modéliser la demande énergétique à l'échelle urbaine, est le manque de flexibilité (en lien avec des objectifs souvent peu clairs) . En théorie, nombre des modèles présentés dans le chapitre I sont conçus pour être appliqués à des contextes différents. En réalité, la plupart des modèles nécessitent des informations d'entrée assez complexes ou des données difficiles à obtenir. Par exemple, si l'objectif de la modélisation est la connaissance de la demande énergétique de bâtiments existants dans un but de détermination des actions de rénovation, la connaissance de la composition des parois devient vite problématique C'est pourquoi l'approche suivie dans le cadre de MEDUS consiste en :

1. **Evaluer les informations disponibles** dans le contexte propre de la simulation. Cela passe en particulier par un inventaire des données disponibles, cet inventaire étant structurant pour la suite de la méthodologie de modélisation.
2. Une **analyse des objectifs** de modélisation est réalisée afin d'identifier clairement les données de sorties attendues (consommation annuelle, profils puissances, besoins spécifiques...) ainsi que les paramètres indispensables à prendre en compte dans les différents sous-modèles pour une utilisation opérationnelle du modèle final. Si, par exemple l'objectif de modélisation est la détermination des actions de rénovation des enveloppes, il est nécessaire d'avoir un sous modèle thermique qui permettra une étude paramétrée afin d'établir les différents scénarios.

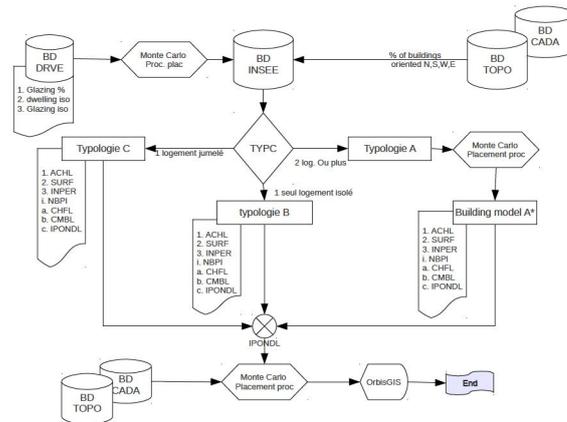


FIGURE 2.2 – Schéma général du système MEDUS ; avec trois typologies alimentées par la base de données de population et logements de l’INSEE. Nous pouvons également ajouter d’autres sources d’information complémentaire, comme c’est le cas d’une base de données topographiques, cadastrales, ou une enquête de terrain. Note : une version plus lisible de cette figure est présentée dans l’annexe E

3. **Itérer entre les données disponibles et les attentes en termes de données de sortie** pour identifier les informations complémentaires à collecter et/ou à déterminer (agrégation/ désagrégation de données secondaires, simulations parallèles à mener, enquêtes de terrain, valeurs issues de réglementations ou normes, approche par typologie...). Cette étape met en œuvre la flexibilité des données d’entrée, évoquée dans le chapitre 1.
4. **Identifier les sous-modèles nécessaires et suffisants** (pour limiter leur gourmandise en données d’entrée), à mettre en œuvre pour répondre aux objectifs définis dans les étapes précédentes. C’est en particulier ici que l’on trouve la flexibilité des modèles, évoquée précédemment et en particulier le potentiel de la combinaison des approches de modélisation physiques et statistiques.
5. Cette étape consiste à « **chaîner** » les sous-modèles entre eux. Dans la mesure où leur choix (ou leur développement parallèle) est le résultat de l’analyse du contexte, des objectifs et des données disponibles, la difficulté de compatibilité des formats de données entre les entrées et les sorties des différents sous-modèles, devient minime.

La première étape (qui, comme on l’a dit, est structurante pour les autres étapes) étant l’analyse des données disponibles, il est important de s’attarder sur les sources d’informations disponibles en France et analyser leur potentiel d’utilisation.

2.2.3 Structure de l’outil MEDUS

La structure générale du modèle MEDUS est présentée figure 2.1. Cette structure (totalement définie dans le cadre de la thèse) permet de voir les “grandes briques” de la

modélisation à l'échelle urbaine ainsi que de mieux expliquer le modèle développé. Le choix de chacune des briques représente une partie du concept de flexibilité du modèle MEDUS, dans la mesure où elles définissent une attente de résultat sans préjuger de l'outil à mettre en œuvre pour le produire. Par exemple la "brique" Modélisation peut être un outil de simulation dynamique comme un ratio de consommation ou le résultat d'un audit. La structure modulaire de MEDUS permet de plus d'identifier de façon claire les entrées et sorties de chaque module.

2.3 Les différentes sources d'informations mobilisables

De nombreuses bases de données existent, établies par des acteurs publics ou privés. Leur potentiel d'utilisation varie selon le contenu mais aussi selon la facilité d'y accéder. Elles peuvent être payantes, en accès libre, en accès restreint ou totalement inaccessibles. [The Tyndall Centre for Climate Change Research \(2004\)](#) montre que les données pertinentes concernant le parc de bâtiments au niveau urbain sont difficiles à obtenir et celles qui sont disponibles sont souvent payantes.

Pour le cas de la France, les données disponibles ne sont pas identiques à celles utilisées dans les modèles de modélisation énergétique à l'échelle urbaine présentés dans le chapitre 1. Par exemple, le niveau de détails des données concernant le stock de bâtiments n'est pas comparable à celui disponible aux Etats Unis (RECS) [US Department of Energy \(2012\)](#). Ou encore, il n'existe pas d'enquête gratuite donnant le niveau de performance des bâtiments, comme c'est le cas au Canada ([Natural Resources Canada, 2005](#)).

Il existe cependant plusieurs sources d'informations pour la France qui sont présentées dans la suite selon leur échelle (nationale/locale), leur accessibilité, leur statut (public/-privé), afin d'identifier leur potentiel d'utilisation dans l'approche MEDUS.

2.3.1 Données nationales

Il existe différents organismes nationaux (autres que l'[Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques](#), INSEE), qui font vivre des bases de données regroupant des informations locales. Celles-ci ne concernent pas toujours les aspects liés directement aux questions énergétiques, mais certaines de ces informations sont néanmoins utilisables et intéressantes dans cette optique (données logement, données liées au taux d'équipement des ménages...).

2.3.1.1 Recensement de la population (bases de données population et logement de INSEE)

Le recensement de la population est classiquement utilisé dans la plupart des outils de modélisation à l'échelle urbaine. Concernant la France, le recensement, effectué par l'INSEE offre deux sources d'information intéressantes, exploitées toutes les deux dans MEDUS. Tout d'abord, cette base de données est une représentation fine du parc de logements

français (jusqu'au niveau de l'IRIS¹). De plus, la base de données logement de l'INSEE est liée au recensement de la population, ce qui permet au système MEDUS de représenter au mieux l'évolution des profils des occupants. En effet, le recensement de la population en France évolue chaque année avec des recensements partiels et en prenant en compte la moyenne des résultats des cinq dernières années. Cette information peut notamment être exploitée dans un objectif de modélisation de l'influence de la population sur les consommations hors chauffage ou la consommation liée aux appareils électroménagers, l'éclairage, les appareils de communication. L'enquête logement est l'une des principales enquêtes de l'INSEE par son ancienneté (1955). Elle ne comporte cependant pas de thème « Énergie spécifique » et donc pas de consommations, ou de performances associées aux logement.

2.3.1.2 Données de l'IGN (**Institut Géographique National**).

L'IGN fournit des données spatiales avec différents niveaux de précision, qui sont de première importance dans la problématique de modélisation énergétique à l'échelle urbaine. Les principales bases de données intéressantes sont :

Base de données TOPO (IGN) Cette base de données contient une description du tissu urbain sous forme des vecteurs avec une précision métrique, classés selon une thématique adaptée. La description de la plupart des objets sont en trois dimensions (incluant l'empreinte au sol des bâtiments). Cette base de données est gratuite pour une mission de service public ou pour la recherche et l'enseignement. Parmi les informations fournies par cette base de données, on trouve :

1. **Réseau routier.** Il existe 5 classes différentes : la première (ROUTE) contient le réseau routier dans son intégralité, y compris les chemins et les sentiers ; la deuxième (ROUTE_PRIMAIRE) et la troisième (ROUTE_SECONDAIRE) ne contiennent qu'une partie des tronçons suivant leur importance. La classe ROUTE NOMMEE ne contient quant à elle que les tronçons de route possédant un nom de rue. La classe des tronçons de chemin (CHEMIN) déjà présente dans la BD TOPO «Pays» est conservée.
2. **Voies Ferrées** et autres : les voies et aires de triage, téléphériques et autres transports par câble, les gares et les toponymes se rapportant au réseau ferré.
3. **Transport Énergie** : haute et très haute tension, et les conduites utilisées pour le transport de matières premières.
4. **Hydrographie** : les cours d'eau, les surfaces d'eau, les réservoirs et autres points d'eau.
5. **Bâtiment** : a été divisée en 3 classes, des bâtiments remarquables c'est-à-dire possédant une fonction particulière (sportif, religieux, château, gare, mairie...), des bâtiments industriels, agricoles ou commerciaux et des bâtiments indifférenciés (sans

1. « Ilots Regroupés pour l'Information Statistique » : maillage homogène du territoire. Une maille représente environ 2 000 habitants. Les communes d'au moins 10 000 habitants et une forte proportion des communes de 5 000 à 10 000 habitants sont découpées en IRIS. La France compte environ 16 100 IRIS dont 650 dans les DOM.

fonction particulière). Cette différenciation offre à l'utilisateur la possibilité de n'importer que les bâtiments dont il a réellement besoin, alors qu'auparavant il devait manipuler la classe entière très volumineuse. Il existe également dorénavant une classe de constructions légères de type baraquement, cabane, ou grange.

6. **Végétation** : elle est différenciée par rapport à la version 1.2 qui ne contenait qu'une valeur de surface de végétation. Dans la version 2, la zone arborée est différenciée en 12 valeurs. Celles-ci seront présentes dans le produit au fur et à mesure de l'avancement de la production de ces données réalisée en partenariat avec l'[Inventaire Forestier National](#).
7. **Orographie** : décrivant des ruptures de pentes artificielles, et les toponymes relatifs au relief (oronymes).
8. **Zone d'activité** : les points d'activité ou d'intérêt (PAI), qui localisent des bâtiments ou sites ayant des caractères particuliers (administratif, religieux, sportif...).
9. **Toponymes**

BD Parcellaire. La BD Parcellaire est la composante du référentiel géographique français contenant les informations relatives au plan cadastral. Dans ce plan cadastral, sont bien différenciés la parcelle (la zone géométrique correspondant à une unité cadastrale et qui peut contenir une surface sans construction) et le bâtiment.

IGN-Geoportail. L'outil geoportail est un outil de visualisation (vue aérienne), complémentaire des informations données par les bases de données. L'information fournie n'est que qualitative et donc limitée.

2.3.1.3 Données météorologiques (Météo France)

Les données (payantes) fournies par Météo France sont issues de relevés de mesures sur l'ensemble des stations maillant le territoire national. Cependant dans la majorité des cas ces mesures sont réalisées sur des sites hors aire urbaine (aéroports principalement). Les valeurs proposées ne sont donc pas exactement celles correspondant au microclimat local. Ceci est important dans la mesure où les phénomènes d'îlot de chaleur, de rue canyon... ont une réelle influence sur le comportement dynamique des bâtiments. Il faut donc envisager des mesures de correction de ces données ou, le cas échéant, des simulations complémentaires localisées ([Musy, 1999](#)).

Les informations accessibles sont principalement : les données d'ensoleillement, la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité.

2.3.1.4 Autres sources

D'autres bases de données existent mais leur accès est au mieux restreint voire impossible. Parmi ces bases de données on citera le fichier Filocom. Le fichier Filocom (fichier du logement communal) est constitué à partir du fichier de la taxe d'habitation auquel sont

rapprochés le fichier foncier (des propriétés bâties), le fichier des propriétaires et le fichier de l'impôt sur les revenus des personnes physiques. Les informations répertoriées sont de différents ordres :

- Logement : type (individuel / collectif), nombre de pièces, surface habitable, année de construction, confort, classement cadastrale,
- occupation : mode (propriétaire / locataire), statut (résidence principale ou secondaire), durée d'occupation ou de vacance,
- occupant : nombre de personnes (et nombre d'enfants, situation et âge de la personne de référence, informations sur le niveau de richesse (revenus, statut d'imposition, dégrèvements...)).

A une échelle plus nationale le CEREN (Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie) est une ressource sur les statistiques propres au secteur de l'énergie. Le CEREN regroupe les organismes tels que l'ADEME, EDF, ErDF, RTE, GDF, GrDF, GRTgaz.

Il y a aussi les informations produites (statistiques ou mesurées) par les structures de type bureau d'études tels que [Enerdata](#) et [Enertech](#) qui proposent comme service des données énergétiques à différentes échelles.

Enfin, une autre source potentielle d'information est celle détenue par les fournisseurs d'énergie, distributeurs d'énergie et exploitant de réseaux. Ces données ne sont généralement pas accessibles, sauf collaboration partenariale avec l'une de ces entités.

On notera à titre prospectif la veille nécessaire sur le développement des compteurs intelligents (et les modalités d'accès aux données correspondantes) comme source potentielle d'information. Une incertitude demeure à l'heure actuelle sur le potentiel de ces instruments.

2.3.2 Données internationales

Parmi les informations potentiellement intéressantes pour la modélisation à l'échelle urbaine, il y a aussi des sources internationales d'information. Certaines sont trop spécifiques au contexte national d'où elles sont issues, mais d'autres sont soit transposables moyennant quelques adaptations soit utilisables dans la mesure où, même si elles sont produites hors de France, elles concernent la France.

Parmi ces sources on citera à titre d'exemple :

- les données européennes comme celles venant de l'EEA (European Environmental Agency), qui produit notamment la base de données géospatiale Corin Land Cover. Cette base de données référence l'occupation biophysique des sols en Europe,
- celles venant des États Unis comme les données climatiques IWEC (International Weather for Energy Calculation) qui propose les données météo de plusieurs villes par pays à travers le Monde,
- Les données internationales, souvent plus macroscopiques et donc moins exploitables à l'échelle qui nous intéresse (IEA, OECD...).

2.3.3 Autres sources d'information

Parmi les alternatives à une information collectée systématiquement et structurée, il est envisageable de mener des enquêtes de terrain. Celles-ci peuvent inclure un contact avec les occupants des bâtiments ou plus simplement avoir pour but de collecter des informations visibles de l'extérieur du bâtiment. Dans ce dernier cas, les outils géographiques grand public proposés sur internet peuvent parfois éviter un déplacement. Il faut cependant préciser que ces derniers donnent rarement accès à toutes les faces d'un bâtiment et que donc l'analyse extérieure de l'enveloppe reste limitée.

2.3.3.1 Google Maps.

Google Maps est un service partiellement gratuit de cartographie en ligne largement utilisé pour la géolocalisation des zones commerciales, le positionnement GPS. L'utilisation de cette source d'information pour des applications scientifiques n'est pas une nouveauté. [Farreny et al. \(2008\)](#) fait un analyse des émissions dans une zone commerciale dans le sud de la ville de Barcelone en Espagne où des informations cartographiques étaient disponibles pour l'analyse. En l'absence de sources, Farreny recommande l'utilisation de google maps. Cette base de données est également utilisée pour l'optimisation des transports (en liaison directe avec l'énergie de transport des produits) par [Pearce et al. \(2007\)](#). Une autre exemple peut être trouvé pour visualiser et valider les données du cadastre en Espagne et estimer des surfaces potentielles pour la construction des solutions photovoltaïques au niveau urbain [Izquierdo et al. \(2008\)](#).

2.3.3.2 OpenStreetMaps.

OpenstreetMap (OSM-3d : [OpenStreetMap](#)) est un projet collaboratif qui a pour but de créer des cartographies en ligne sur la base de retours d'expérience de particuliers. Ainsi chaque personne impliquée dans le développement de la cartographie devient un « capteur » mobile. Ceci permet à OpenStreetMaps une réactivité dans la mise à jour des informations (changements de formes urbaines, infrastructures routières...). Des informations concernant les bâtiments sont actuellement en cours d'intégration. Outre le fait que tout le territoire n'est pas couvert, il convient de rester conscient des incertitudes sur les données issues de telles sources (qui méritent cependant une veille).

2.4 La sélection d'un cœur de calcul thermique

Concernant le sous modèle thermique des bâtiments la flexibilité recherchée autorise plusieurs alternatives allant du ratio statistique de consommation, à la simulation dynamique complète, donnant les profils de puissance, en passant par l'audit énergétique, les DPE...

Comme il a été évoqué, l'objectif relatif au cœur de calcul thermique est double : établir les consommations des bâtiments et coupler ce dernier modèle à une analyse de sensibilité pour identifier les opportunités de réduction de modèle (en identifiant les paramètres

influent) ou de définition de typologies de bâtiments. Ce dernier aspect participe à la réflexion sur les méthodes de changement d'échelle Bâtiment→Quartier.

Pour atteindre ce double objectif, il était nécessaire (dans cette étape de développement) de mobiliser un outil qui soit très complet en termes de méthode de modélisation (donc proposant une réelle modélisation physique des équations gouvernant les transferts thermiques) et en terme de paramètres d'entrée pris en compte. Le choix (non restrictif) s'est porté sur ESP-r [Strachan et al. \(2008\)](#). Ce modèle multi-zones est très complet et certainement trop exigeant en terme d'informations à collecter pour une utilisation à l'échelle urbaine. Cependant, ce choix se justifie dans un premier temps pour mener en parallèle du développement de MEDUS, le couplage avec l'analyse de sensibilité (chapitres 3 et 4)

ESP-r [Strachan et al. \(2008\)](#) a été développé à l'Université de Strachclyde en Écosse. Il permet de faire la simulation dynamique des bâtiments à partir des caractéristiques détaillées de celui-ci (composition de l'enveloppe, caractéristiques des vitrages, des systèmes de ventilation, de chauffage et d'air conditionné...). Un autre avantage de cet outil est sa faculté à pouvoir être exécuté en mode « batch », permettant la simulation séquentielle de plusieurs bâtiments au sein d'une chaîne de modèles comme MEDUS. Pour cela **ESP-r** utilise une arborescence de fichiers qui regroupent les caractéristiques du bâtiment (fichiers *.geo pour la géométrie du bâtiment, fichiers *.cnn pour les connections des nœuds dans cette géométrie, fichiers *.ctl pour le contrôle des températures de consigne...). Ces fichiers (texte) peuvent être modifiés à l'extérieur du logiciel **ESP-r**, ce qui permet de simplifier le processus de changement des variables (pour l'analyse de sensibilité entre autres) dans le bâtiment et de générer facilement les fichiers de connexion entre sous-modèles et bases de données dans MEDUS

On rappelle que le choix d'**ESP-r** n'est pas restrictif et dépend des objectifs de modélisation. Par exemple, l'outil **Trnsys** [Klein \(1976, 2006, 2011\)](#) est reconnu pour sa pertinence dans la modélisation des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (HVAC). Ainsi, dans le cas d'une analyse de rénovation des systèmes HVAC à une échelle locale, il pourrait être plus pertinent de réaliser les simulations de bâtiment avec **Trnsys** plutôt qu' **ESP-r**. En effet, l'enjeu n'est pas la précision de la modélisation mais les variables paramétrables pour chacun d'eux. [Tittlein \(2008\)](#) a réalisé une étude en comparant quatre logiciels de modélisation dynamique des comportements thermiques pour un même bâtiment. La conclusion de ce travail (voir figure 2.3) est la concordance des résultats donnés par chacun des outils, qui correspondent de plus à la moyenne des besoins en chauffage mesurés. Parmi les alternatives, on citera (de façon non exhaustive) : IES VE [Integrated Environmental Solutions](#), EnergyPlus [Crawley et al. \(2000\)](#), TrnSys [Klein \(2011\)](#), Simulink [Mathworks](#), Comfie-Pleiades [Leconte \(2010\)](#), DOE 2 [Buhl \(1979-2003\)](#).

Concernant la méthode de changement d'échelle Bâtiment→Quartier, l'approche suivie repose sur la définition de typologies de bâtiments. Ces typologies sont déterminées sur la base de la sensibilité du résultat de simulation aux différents paramètres d'entrée du modèle. Cela permet par la suite de limiter le nombre de simulations en identifiant la classe typologique d'appartenance du bâtiment considéré. Cette approche classique a été mise en oeuvre dans différents travaux de modélisation énergétique à l'échelle urbaine

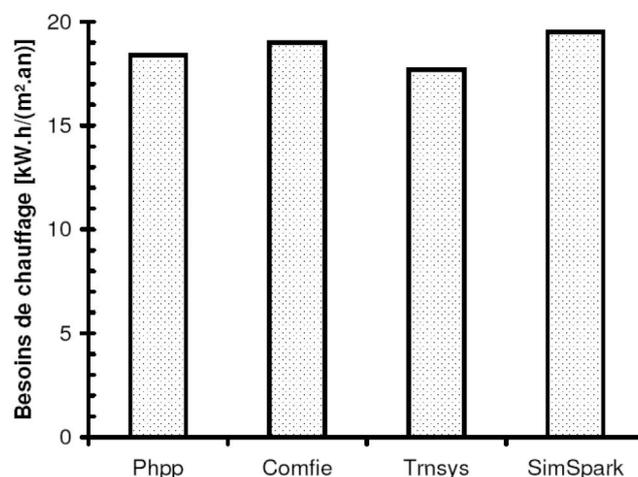


FIGURE 2.3 – Comparaison des besoins de chauffage d’une maison simulés par divers logiciels dans le cadre du projet ANR PreBat Maisonpassive. Source : [Tittlein \(2008\)](#)

([Shimoda et al.](#); [Shimoda et al.](#); [Shorrock and Dunster](#); [Swan et al.](#); [Swan](#); [Atelier parisien d’urbanisme ...](#)). Pour mener à bien cette analyse, l’outil de simulation doit avoir la capacité de modéliser un bâtiment en prenant en compte les données d’entrée indiquées dans le tableau [2.1](#)

2.5 Définition et utilisation des typologies de bâtiments.

On présente ici les principes pour définir et utiliser des typologies de bâtiments. Trois exemples de typologie de base sont abordés et pourront par la suite être complétés par des sous-typologies plus précises (définies à l’échelle nationale ou à l’échelle locale).

Un des principes fondamentaux de l’outil MEDUS est que pour obtenir les résultats de la consommation à l’échelle urbaine, la modélisation doit être réalisée pour chaque logement à la fois pour ensuite assigner le résultat à un bâtiment individuelle ou collectif.

La définition des typologies est générale et sera affinée dans l’étude de cas du quartier St Félix (chapitre [5](#))

2.5.1 Principes de définition des typologies.

Comme nous l’avons évoqué, la première étape de la modélisation est l’analyse des données disponibles dans le contexte de modélisation. Aussi, les typologies ont été créées en fonction de la variable **TYPL** (Type de logement) de la base de données de l’INSEE (voir tableau [2.1](#)). Cette variable a six options concernant les différents types de bâtiments dans lesquels le logement peut se trouver :

1. **Bâtiment d’habitation d’un seul logement isolé.** Dans cette typologie de logement, une transposition de l’échelle du logement à l’échelle du bâtiment peut être faite facilement puisqu’un logement isolé peut être assimilé à une maison individuelle non-mitoyenne.

2. **Bâtiment d'habitation d'un seul logement jumelé ou groupé de toute autre façon.** Dans cette classification de logement, une transposition à l'échelle bâtiment peut être modélisée en prenant un bâtiment de trois zones thermiques du style trois bâtiments accolés les uns aux autres, comme cela est expliqué dans la section 2.5.4.
3. **Bâtiment d'habitation de 2 logements ou plus.** Dans cette classe de bâtiments la connaissance de la distribution des logements est inconnue. Il peut s'agir d'un bâtiment avec 3 ou 5 logements collectifs, ou s'agir d'un gros bâtiment collectif avec plus d'une dizaine de logements. Plusieurs approximations ou sous-typologies devront être faites concernant cette typologie.
4. **Bâtiment à usage autre qu'habitation.**
5. **Construction provisoire.**
6. **Hors logement principal.**

Dans le cadre de notre travail, seuls les trois premiers types de logements sont retenus parmi les 6 possibles pour définir les typologies de bâtiments. Sur ce choix trois types de bâtiments ont été construits pour représenter le bâtiment dans lequel le logement est situé :

1. Une maison isolée (qui représente un logement individuel).
2. Une maison mitoyenne par ses côtés.
3. Un bâtiment collectif.

Des sous-typologies sont également construites pour les logements appartenant à un bâtiment collectif de 2 logements ou plus en raison de la complexité de la distribution de ces logements à l'intérieur d'un bâtiment. Pour la conception de ces typologies on, a pris en compte les facteurs suivants :

1. La **disponibilité des données** ; la base de données de l'INSEE joue alors un rôle prépondérant ;
2. La **morphologie au niveau urbain**, conclusion issue de l'analyse d'une enquête du terrain sur un quartier représentatif de la ville de Nantes ;
3. La **simplification** de la géométrie des bâtiments-types pour simplifier le codage et améliorer le temps de calcul.

Ce choix des trois typologies correspond également aux résultats présentés dans le rapport du Projet BATAN [Ministère du développement durable](#). Ce projet mené par le CETE Ouest, et commandé par le ministère de l'Écologie, du développement durable, des transports et du logement, a établi une typologie des bâtiments anciens dans le but d'optimiser des travaux de rénovation à grande échelle, à partir d'une campagne de mesures « in situ » approfondie. Dans ce projet, le bâtiment est vu comme un ensemble des système interdépendants : implantation, enveloppe/matériaux, modes constructifs, équipements, occupants, environnement extérieur.

Le [Projet Tabula](#) rassemble différents organismes et institutions en Europe pour concevoir les typologies représentatives du pays d'origine de l'organisme. L'objectif est de créer une base de données des typologies approximatives du parc de bâtiments en Europe. Dans un

2.5. Définition et utilisation des typologies de bâtiments.

N	Code	Description	Data
1	ACHL	Date de construction	avant. 1949, 1949-1974, 1975-1981, 1982-1989, 1990-1998, après 1999.
2	ASCEN	Desservi par un ascenseur	oui, non.
3	CATL	Catégorie de logement	principale, occasionnel, secondaire, non-habité.
4	CHFL	Système de chauffage	collectif, individuel, électrique, autre.
5	CMBL	Type de combustible	urbain, gaz, fioul, électricité, bouteille de gaz, autre.
6	IPONDL	pondération statistique	Pondération statistique attribué à chaque logement.
7	NBPI	Nombre du pièces	entre 1 et 20.
8	SURF	Surface du logement	<25 m ² , 25-40 m ² , 40-70 m ² , 70-100 m ² , 100-150 m ² , >150 m ²
9	TYPC	Type de construction	1 log. isolé, 1 log. mitoyen, 2 log. ou plus, autre usage.
10	TYPL	Type de logement	maison, appartement, chambre d'hôtel.
11	INPER	Habitants	nombre

TABLE 2.1 – Données provenant de la base des données de l'INSEE utilisées dans le système MEDUS.

deuxième temps, la mise en place des scénarios pour réduire la consommation d'énergie dans le stock urbain européen est envisagée dans ce projet.

Pour ce projet, l'ADEME est l'organisme français chargé de mettre en place les diverses typologies pour le stock des bâtiments résidentiels en France. D'après le rapport d'activités du projet Tabula ([Typologie Approach for Building Stock Energy Assessment : Tabula, 2012](#)), une liaison avec les trois typologies du projet BATAN est envisageable grâce à sa représentativité du parc des bâtiments français. Cela représente une source fiable et une certaine validation des typologies choisies dans l'outil MEDUS.

En conclusion, dans le cadre de l'outil MEDUS, les typologies doivent répondre à trois principes, en accord avec les informations de la base de données INSEE : (I) Un choix lié à la géométrie. Ce choix doit être le plus représentatif possible du parc. De plus, Il faut aussi intégrer les caractéristiques thermiques du bâtiment. (II) Il faut minimiser le nombre de zones thermiques pour réduire le temps de calcul. (III) Il faut s'assurer de la représentativité des caractéristiques thermiques des matériaux, vitrage, zones chauffées et non chauffées. Mais il doit avoir une généralité et une représentativité avec la base de données de l'INSEE. Cinq matériaux qui représentent l'époque de construction selon l'INSEE sont définis (Table 2.6).

2.5.2 Hypothèses et données génériques à toutes les typologies.

Ce paragraphe aborde les différents aspects pouvant être communs à toutes les typologies. Pour chacun des items, une ou plusieurs solutions de prise en compte dans la modélisation sont présentées. Le cas échéant, il est également précisé la solution retenue pour cette prise en compte dans l'outil MEDUS.

2.5.2.1 Orientation

Dans l'analyse des bâtiments, la connaissance de l'orientation permet une évaluation plus précise de la demande d'énergie. Cette orientation peut donner des indications valides sur la variation de la réduction de la demande d'énergie due à l'éclairage naturel ou aux apports gratuits solaires. La grande majorité des modèles étudiés dans le chapitre 1 ne disposent pas de méthode pour la prise en compte de l'orientation dans leur analyse. Malgré cela, des informations concernant l'orientation des bâtiments peuvent être obtenues à partir des enquêtes ou des analyses d'images satellites.

Une description qualitative de l'orientation des bâtiments dans le parc est un processus difficile qui dépend fortement de la géométrie et de la complexité d'un bâtiment. Par exemple, les bâtiments de formes géométriques totalement circulaires ne possèdent pas une orientation précise. De même, la notion d'orientation d'un bâtiment n'a pas de sens si sa géométrie est très complexe (un bâtiment à plusieurs façades, etc).

Dans le cas d'une base de données topographiques où des informations de cadastre sont disponibles, il existe plusieurs solutions pour calculer l'orientation d'un parc de bâtiments de manière efficace et rapide. L'une des solutions consiste à décomposer les surfaces fermées des données cadastrales représentant les bâtiments en segments (lignes). On calcule ensuite l'orientation moyenne de ces segments (de 0 à 180 degrés). Il reste à fixer le mode d'utilisation de cette information générale d'orientation dans l'analyse. Par exemple, dans le cas le plus simple, un "facteur d'orientation" (terme correctif) peut être défini et multiplié par la demande d'énergie totale de l'ensemble des bâtiments. Cette approche ne tient pas compte de l'orientation individuelle de chacun des bâtiments et est le résultat de la moyenne de l'orientation d'un ensemble de segments géométriques de la totalité du parc de bâtiments à analyser. Puisque l'orientation d'un petit immeuble ne doit pas avoir la même influence dans la demande d'énergie à l'échelle urbaine par rapport à l'orientation d'un grand bâtiment collectif il est préférable d'obtenir l'orientation individuelle de la plupart des bâtiments contenus dans le parc à analyser.

Duchêne et al. (2003) ont développé diverses méthodologies pour obtenir l'orientation des bâtiments dans un parc à partir de leur empreinte au sol . Ces méthodologies sont basées dans la combinaison de deux indicateurs spatiaux :

1. Le rectangle limite minimal (*SMBR = Smallest Minimum Bounding Rectangle*). Le plus petit rectangle qui contient un bâtiment lorsque sa structure est complexe (voir la figure 2.4).
2. L'orientation de chacun des murs qui composent l'empreinte au sol du bâtiment. Elle est définie comme une pondération de ces orientations avec la statistique modulo $[\frac{\pi}{2}]$. Cette approche donne toujours une orientation, même si celle-ci n'a pas de sens. Duchêne et al. (2003) ont proposé la construction d'une variable qualitative (indicateur de confiance) pour tester la pertinence de la mesure obtenue pour donner l'orientation du bâtiment étudié.

Les deux indicateurs peuvent donner une valeur quantitative sur l'orientation d'un bâtiment. Néanmoins, puisque des différences entre les deux approximations sont possibles,

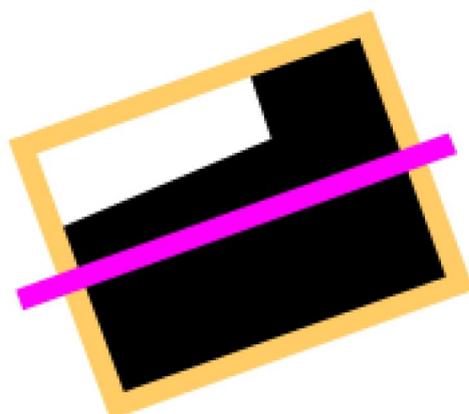


FIGURE 2.4 – Définition du rectangle limite minimal (SMBR). Le bâtiment, représenté en plan par le polygone irrégulier sombre, est entouré par un rectangle : le rectangle limite minimal qui contient le bâtiment. L’axe de ce rectangle est une représentation graphique de l’orientation principale du bâtiment. Source : [Duchêne et al. \(2003\)](#)

[Duchêne et al. \(2003\)](#) proposent une combinaison des deux variables, ce qui donne une valeur correcte de l’orientation générale d’un bâtiment. Ces méthodes sont programmées en java comme un « plugin » pour le logiciel SIG [OpenJump GIS Software](#). Le plugin, nommé **MorphAL** a été créé dans le cadre du projet **ALPAGE** à [Projet Alpage - Institut Geographique National](#). Le projet **MorphAL** (encore en développement) représente une opportunité qui ne sera pas intégrée dans le modèle MEDUS dans le cadre de cette thèse.

2.5.2.2 Infiltration

La définition du taux d’infiltration, dans toutes les typologies considérées dans MEDUS, se fait de façon aléatoire pour chacune des zones thermiques. Ce tirage aléatoire horaire est défini sur la journée-type de la zone thermique, dans un intervalle défini par rapport à l’âge de construction du bâtiment et à la surface au sol (voir tableau 2.6). La classification par rapport à l’âge de construction permet d’augmenter la dispersion naturelle du phénomène d’infiltration, qui est plus élevée dans les bâtiments anciens comparés aux bâtiments plus récents. La relation taux d’infiltration-âge de construction et surface au sol a été analysée par [Chan et al. \(2005\)](#). De plus, cette infiltration est majorée pour tenir compte de l’augmentation due aux occupants, comme cela est présenté dans les études expérimentales de [Iwashita and Akasaka \(1997\)](#) et [Chan et al. \(2005\)](#). Cette prise en compte aléatoire est la même pour les trois typologies de logements-bâtiments définies dans le système MEDUS.

2.5.2.3 Les portes et cadres des fenêtres.

Les effets des portes ne sont pas pris en compte dans les typologies modélisées avec ESP-r. Pour ESP-r les portes n’ont d’influence sur la consommation du chauffage que dans

```
#!/usr/bin/perl
use strict ;
use warnings ;
my $range = 50 ;
my $minimum = 100 ;
my $random_number = int(rand($range)) + $minimum ;
print $random_number . "\n" ;
```

TABLE 2.2 – Exemple simplifié de la fonction qui définit les valeurs aléatoires du taux d'infiltrations.

le cas où une modélisation fine du flux d'air est établie. Ce type de modélisation ne se justifie que dans un objectif de design pour, par exemple, positionner les portes et les fenêtres, pour augmenter la performance du bâtiment. Le positionnement des portes n'a pas d'intérêt majeur pour l'outil MEDUS car la modélisation des flux d'air intérieurs et extérieurs est prise en compte au travers de la ventilation (communication d'air entre zones thermiques) et l'infiltration (communication d'air entre une zone et l'extérieur). Dans MEDUS, la modélisation des volets et des masques proches se fait en diminuant ou augmentant le pourcentage des surfaces vitrées sur chaque façade.

La base de données logements de l'INSEE ne contient pas les propriétés physiques des surfaces vitrées. Pour contourner cette difficulté, une enquête de terrain peut être réalisée pour collecter plus d'informations. Une distribution aléatoire des pourcentages de surfaces vitrées sur les bâtiments à analyser peut être également réalisée lorsque ce pourcentage n'est pas connu pour toutes les surfaces du bâtiment, en complément de l'enquête de terrain. Dans MEDUS, un poids plus important est donné aux taux de vitrage des 2 parois les plus larges du bâtiment².

Le type de surface vitrée est une variable discrète (simple vitrage, double vitrage et triple vitrage), ce qui représente une difficulté supplémentaire de modélisation (dans cette version de MEDUS, en première approche, les fenêtres sont constituées de double vitrage) qui peut être contournée par la prise en compte du coefficient de transmission plutôt que de la résistance thermique issue de la description des différentes couches du vitrage (ce qui n'est pas possible sous ESP-r).

Parmi les paramètres important caractérisant les vitrages, [Gasparella et al. \(2011\)](#) concluent dans une étude de sensibilité que le coefficient de transmission thermique est également une grandeur importante à considérer (notamment pour caractériser la différence entre les conditions hivernales et estivales).

2.5.2.4 Caractéristiques thermiques des parois.

Les caractéristiques thermiques des parois sont parmi les données les plus difficiles à obtenir quand on modélise des bâtiments existants. C'est en grande partie en raison de cette difficulté que l'approche par typologie de bâtiments est utilisée dans la plupart des modèles à l'échelle urbaine. Généralement, ces modèles utilisent l'âge des bâtiments pour

2. Dans toutes les typologies, la géométrie du bâtiment est simplifiée (parallélépipède).

2.5. Définition et utilisation des typologies de bâtiments.

Age	Matériaux des parois verticales.	Uw	Uroof	Infiltr.
		[W/m ² K]	[W/m ² K]	[h ⁻¹]
1900-1945	Maçonnerie de moellons	6,0	2,5	2,0
1946-1960	1 cm de plâtre,	5,5	1,0	1,8
	4 cm de brique, ,			
	6 cm de lame d'air,			
	20 cm de brique			
	2 cm plâtre.			
1960-1970	1 cm de plâtre,	5,5	0,8	1,6
	8 cm de brique creuse,			
	2 cm d'isolant (polystyrène),			
	15 cm de brique creuse,			
1970-1980	2 cm de plâtre,	2,8	0,6	1,4
	1 cm de plâtre,			
	8 cm de brique creuse,			
	6 cm d'isolant,			
	8 cm de brique creuse,			
	1 cm de plâtre.			
1980-1990	1 cm de plâtre,	2,8	0,46	1,2
	15 cm de brique en béton,			
	8 cm d'isolant (polystyrène),			
	10 cm de brique béton.			
1990-2000	1 cm de plâtre,	1,6	0,32	1,0
	20 cm de béton renforcé,			
	12 cm d'isolant (polystyrène),			
	2 cm de plâtre			

Table 2.3: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans les travaux de [Kämpf \(2009\)](#).
Source : [Kämpf \(2009\)](#)

attribuer des caractéristiques thermiques types (issues des réglementations thermiques par exemple).

Dans MEDUS, la définition des caractéristiques thermiques des parois est liée également à l'âge du bâtiment. Pour un couplage correct avec la base de données de l'INSEE, MEDUS prend en compte 6 tranches d'âge de bâtiments (voir tableau 2.6).

Selon les études, les références de caractéristiques thermiques varient. Pour Shimoda, ([Shimoda et al. \(2004, 2010b\)](#); [Jones et al. \(2007\)](#); [Atelier parisien d'urbanisme \(2007\)](#)... etc), les caractéristiques sont issues d'enquêtes spécifiques au contexte de modélisation.

On citera également l'étude menée par l'Atelier parisien de l'urbanisme (APUR) [Atelier parisien d'urbanisme \(2007\)](#) qui a mené un travail de modélisation du parc de bâtiments parisien à l'aide des études déjà faites sur le parc de bâtiments parisien avant 1974. Dans cette étude, pour les bâtiments après 1975 l'existence d'une réglementation thermique permet d'établir la valeur U des parois (en supposant que les réglementations soient respectées). Le résultat de ce travail concernant les caractéristiques des matériaux est donné dans le tableau 2.4.

Dans son travail de modélisation des flux urbains, [Kämpf \(2009\)](#) lie les caractéristiques thermiques des parois à l'âge des bâtiments. Dans cette étude, 26 bâtiments sont étudiés avec une hétérogénéité d'âge allant de la fin du 19^{ème} siècle à 1990. Le tableau 2.3 présente les caractéristiques thermiques des parois utilisées.

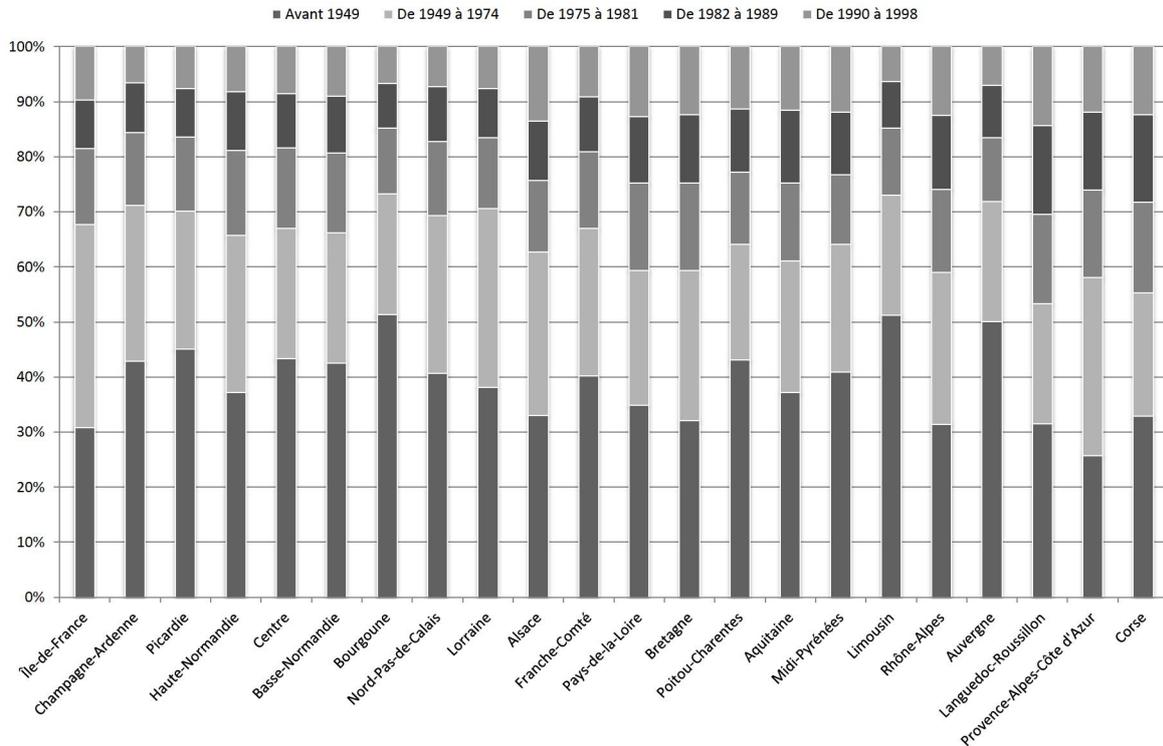


FIGURE 2.5 – Date de construction des logements par région (sauf DOM-TOM), selon l'enquête logement 2006 de l'INSEE.

Il est important de noter que ce type d'approche est très lié aux habitudes constructives du pays considéré. Concernant le travail de Kampf, le parc de bâtiments est suisse. Cependant, du fait de la proximité entre les deux pays, et en première approximation, les grandeurs proposées pourront être utilisées dans la phase de développement de MEDUS.

Dans le cadre du développement de MEDUS, les caractéristiques thermiques des parois correspondent à un mélange de ces deux sources d'informations : caractéristiques thermiques des parois présentées par Kämpf pour les bâtiments construits après 1974 et l'étude menée par l'APUR pour les bâtiments construits avant 1974, comme l'illustre le tableau 2.6 (sachant qu'en France, le pourcentage des logements construits avant 1975 représente plus de 50% du stock de logements, comme l'illustre la figure 2.5).

Enfin, il faut souligner l'importance des modes constructifs régionaux dans ce type d'approche de caractérisation des propriétés des enveloppes. Cantin et al. (2010) ont ainsi réalisé une analyse thermique de dix différents types de logements anciens pour différentes régions de France (voir tableau 2.5). Cantin et al. (2010) montrent ainsi que la consommation moyenne de ces 10 bâtiments anciens était plus basse (entre 107 et 227 kWh/m²/an) par rapport à la moyenne nationale (364 kWh/m²/an). cependant, ce résultat est vraisemblablement dû à l'échantillonnage et au choix du type de bâtiment.

2.5. Définition et utilisation des typologies de bâtiments.

	Umurs (W/K/m)	Enduit Conduct. (W/K/m)	Épaisseur (m)	Conduct. (W/K/m)	Épaisseur (m)	Matériaux	Taux de vitrage et fréquence de double vitrage	Conductance vitrages (W/m ² /K) simple-double	Uparois (W/m ² /K)
Ant. XIXe	1,75	0,9	0,06	1,05	0,35	calcaire	20%-30%	4,95-2,4	2,24
	1,91	0,9	0,06	1,05	0,3	tendre			2,37
1800-1850	1,91	0,9	0,06	1,4	0,4	Pierre	30%-30%	4,95-2,4	2,59
	2,22	0,9	0,06	1,4	0,3	1/2-ferme			2,81
1850-1914	2,01	0,9	0,03	1,7	0,5	Pierre	30%-30%	4,95-2,4	2,66
	2,42	0,9	0,06	1,7	0,3	ferme			2,95
1918-1939	2,09	0,9	0,03	1,2	0,33	brique	40%-30%	4,95-2,4	2,93
	2,09	0,9	0,03	1,2	0,33				2,93
1945-1967	2,8	0,9	0,04	1,75	0,25	béton	40%-30%	4,95-2,4	3,35
1968-1974	2,8	0,9	0,04	1,75	0,25	béton	50%-30%	4,95-2,4	3,49
1975-1981	1,8						50%-100%	2,8	2,3
1982-1989	1,15						40%-100%	2,8	1,81
après 1990	0,65						40%-100%	1,2	0,87

Table 2.4: Composition et propriétés thermique des parois dans le parc de bâtiments parisiens, source: [Atelier parisien d'urbanisme \(2007\)](#)

ID	Localisation	Description	Année de construction
B1	Paris	5ème étage, appartement Haussmannien	1918
B2	Strasbourg	1ère étage, appartement Haussmannien	1898
B3	Toulouse	3ème étage, appartement, brique	18ème siècle
B4	Vouvray	Pierre, RDC, appartement	1756
B5	Paris	Pierre, 1ere étage, appartement	17ème siècle
B6	Marne	Brique, maison	1870
B7	Nice	Pierre, maison	18ème siècle
B8	Bretagne	Granite, maison	17ème siècle
B9	Corrèze	Granite, maison	15ème siècle
B10	Normandie	Bois, maison	1789
B11	Alsace	Béton, isolé, maison	2004

Table 2.5: Caractéristiques des bâtiments historiques analysés par [Cantin et al. \(2010\)](#)

INSEE	Kampf 2009	APUR	MEDUS	U-value [W/m ² K]
1900-1945	1900-1945	1918-1939	1900-1945	2,23
1949-1974	1949-1960	1945-1967	1949-1974	3,19
1975-1981	1971-1980	1968-1974	1975-1981	2,10
1982-1989	1981-1990	1975-1981	1982-1989	1,52
1990-1998	1991-2000	1982-1989	-	1,52
1998-2011	1991-2000	1990-actuel	1990-actuel	0,84

Table 2.6: Classes d'âge de finies dans différentes études, de gauche à droite : l'enquête de l'INSEE ; les travaux de Kämpf sur le parc de bâtiments suisse ; l'étude de l'APUR sur le parc de bâtiments parisien ; et le système MEDUS. Les valeurs des coefficients U correspondent à celles du système MEDUS.

2.5.3 Typologie A – Maison individuelle isolée.

2.5.3.1 Généralités, zonage et description géométrique.

Les maisons individuelles sont très répandues en France puisqu'elles représentent 57% du parc en France³ (voir figure 2.9). Elles sont surtout prépondérantes dans les villes

3. Analyse de la base de données de l'INSEE pour l'année 2008

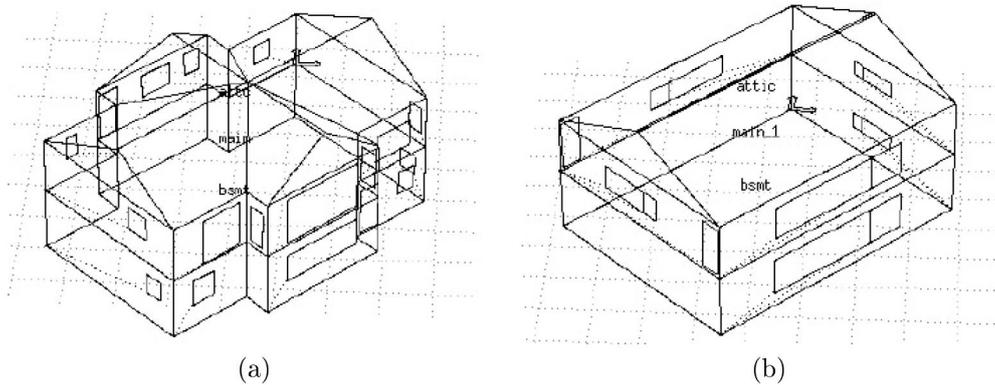


Figure 2.6: Exemple de simplification de la géométrie des bâtiments dans le modèle à l'échelle urbaine de Swan (2010). : (a) Géométrie complexe et (b) géométrie simplifiée. Les deux modèles sont modélisés thermiquement à l'aide logiciel ESP-r. Image source :[Swan \(2010\)](#).

françaises de petites et moyennes tailles. Cela représente 64% de la surface habitable (contre 36% pour les bâtiments collectifs). Dans l'approche développée dans MEDUS, nous faisons l'hypothèse que tout logement isolé (au sens de l'INSEE) correspond à une maison individuelle non mitoyenne.

Tout d'abord, une simplification du bâtiment a été faite pour mieux standardiser les valeurs qui sont liées à cette typologie. Dans cette typologie, deux zones thermiques sont considérées. La première zone thermique représente la zone chauffée de la maison. La deuxième zone thermique modélise les combles.

Le type de combles est identifié grâce à une enquête rapide de terrain, comme cela sera décrit dans le chapitre 5. Ainsi, sont considérés comme combles perdus non chauffés toutes combles ne possédant ni fenêtre, ni Velux. Dans le cas où l'information n'est pas connue, soit une affectation aléatoire est faite (combles aménagés chauffés/combles perdus non-chauffés), soit un forçage par l'utilisateur est possible.

Ce choix de seulement deux zones thermiques pour modéliser une maison individuelle peut paraître simpliste. Diverses études valident cependant cette approche [Swan \(2010\)](#); [Swan et al. \(2009\)](#); [Bueno et al. \(2011b\)](#); [Ratti et al. \(2005\)](#). Swan, dans son modèle à l'échelle urbaine **CHREM**, considère seulement trois zones thermiques dans les bâtiments canadiens, composés à 80% de maisons isolées. La grande majorité comporte un garage souterrain ou un cellier (voir figure 2.6) qui justifie la considération de cette troisième zone thermique. Cette hypothèse n'a pas été retenue dans MEDUS, qui ne considère que 2 zones.

[Bueno et al. \(2011b,a\)](#) utilisent une simplification du zonage thermique pour la modélisation couplée d'un bâtiment du type « Haussmannien » et du micro-climat urbain (voir figure 2.7). Les auteurs concluent que la création d'une typologie complexe plus proche du bâtiment réel (figure 2.7a) n'améliore pas les résultats. En effet, la figure 2.8 que les



FIGURE 2.7 – Modèle détaillé (a) d'un bâtiment type Haussmannien (b) et son équivalence simplifiée (c) dans les travaux de [Bueno et al. \(2011b\)](#) source : [Bueno et al. \(2011b\)](#)

besoins en chauffage rapportés au m^2 estimés par les deux types de modèle (détaillé et simplifié) sont proches quelle que soit l'approche (les besoins en climatisation sont légèrement plus faibles pour le modèle détaillé par rapport au modèle simplifié, mais la différence reste faible).

Cette simplification permet l'amélioration des temps de calcul.

2.5.3.2 Rapport d'aspect- Surface au sol

Le rapport d'aspect (largeur divisée par la longueur du bâtiment) est défini par une analyse géo-spatiale de l'empreinte au sol des bâtiments. Cette analyse est faite en utilisant la base de données cadastrale couplée au Système d'Information Géographique **OrbisGIS**. Pour le cas du quartier Saint Félix (cf chapitre 5), la moyenne du rapport largeur sur longueur de l'IRIS Saint Félix est de : 0,78.

La surface de logement est issue directement de la base de données de l'INSEE (variable SURF dans le tableau 2.1). L'enquête de l'INSEE ne donne pas une valeur réelle mais diverses classes de surface. La surface est donc choisie par un tirage au sort au sein d'une classe. Une voie d'amélioration serait d'utiliser des distributions statistiques pour ce type de choix aléatoire, surtout pour les tranches maximales et minimales (les logements les plus grands et les plus petits). Le choix pourrait être une distribution lognormale, car les dernières et premières tranches correspondent à des surfaces atypiques, écartant une distribution uniforme. La surface au sol est établie de telle façon que la surface tirée au hasard représente la somme des surfaces de plancher des deux zones thermiques.

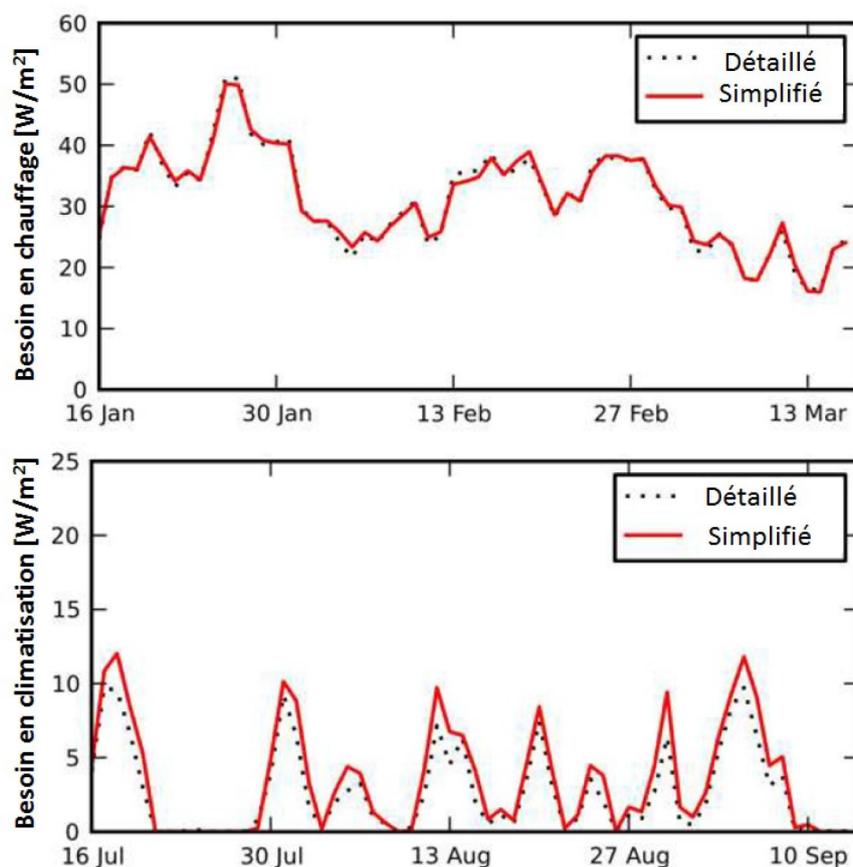


FIGURE 2.8 – Puissances [Wm^{-2}] de chauffage (en haut) et de climatisation (en bas), calculées pour le modèle détaillé (voir figure 2.7a) et pour le modèle simplifié (voir figure 2.7c) d'un bâtiment de type Haussmannien à Paris (voir figure 2.7b) avec le logiciel EnergyPlus. Source : Bueno et al. (2011b)

2.5.4 Typologie B – Maison mitoyenne

La typologie B prend en compte les bâtiments jumelés ou groupés de 2 ou 3 logements. Dans une analyse des données issues de la base de données cadastrale pour la ville de Nantes, nous trouvons souvent que les bâtiments non collectifs sont jumelés dans une distribution type « bande », c'est à dire qu'ils forment un couloir le long de la rue. Sur la base de ces observations nous considérons une distribution géométrique pour la typologie 2 résumée dans la figure 2.10.

Le système MEDUS définit la géométrie de cette catégorie comme une combinaison de logements du type A, mitoyens par une ou deux faces (figure 2.10b). Six zones thermiques sont donc considérées pour les bâtiments de cette typologie. Ceci correspond à un compromis acceptable entre temps de calcul et finesse de modélisation.

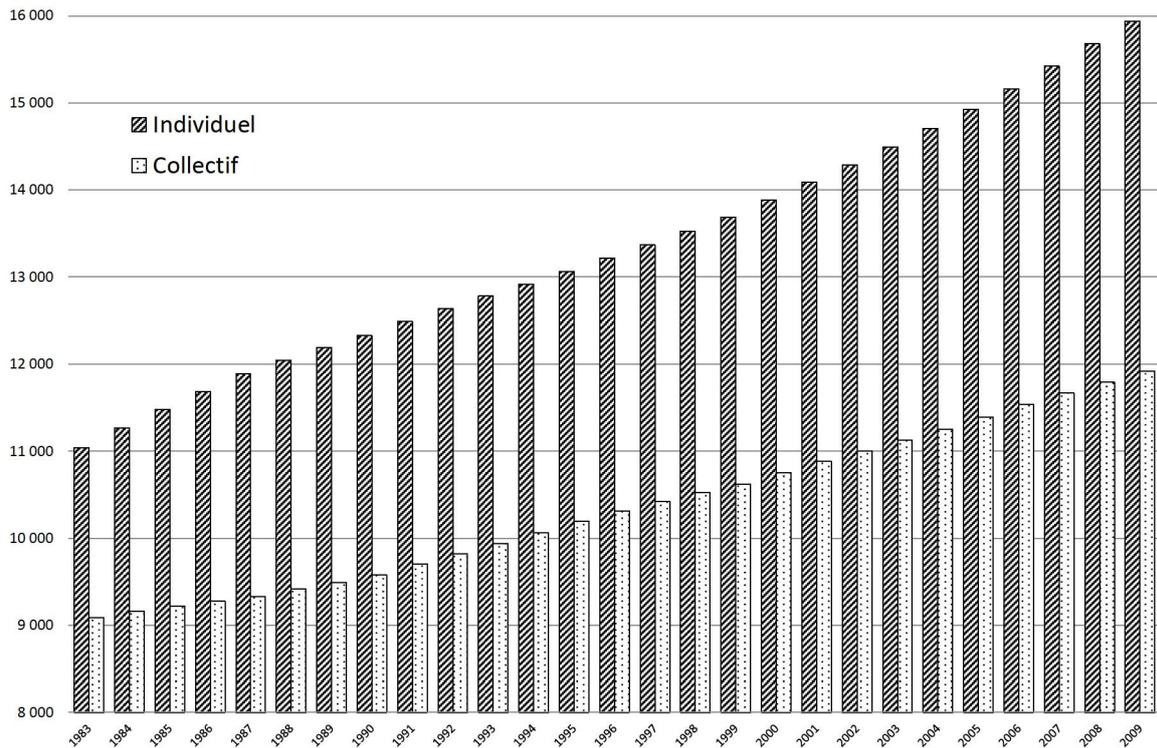


FIGURE 2.9 – Répartition des logements en France (Résidences principales) selon le type de logement, d’après le recensement de l’INSEE 2010.

2.5.4.1 Généralités, zonage et description géométrique

De la même façon que pour la typologie A, la typologie de bâtiment B pose la question de la pertinence des zones thermiques utilisées pour représenter un logement. La typologie B est donc divisée de la même façon que la typologie A, avec deux zones thermiques représentant une maison avec la différence de la prise en compte de la mitoyenneté.

2.5.4.2 Affectation des résultats de simulation pour la typologie B.

Concernant la typologie B, tous les logements ne sont pas mitoyens des deux côtés. Là encore, dans le cadre de MEDUS, une procédure aléatoire d’affectation des résultats a été mise en place (affectation au logement de gauche, de droite ou au milieu).

Concernant le choix du logement, le système MEDUS prend en compte un seul logement pour chaque simulation de la typologie B. Lorsqu’un logement est assigné à la typologie B, une simulation est réalisée et une récupération des données des besoins de chauffage est faite que pour le logement assigné. Les 2 autres logements, non concernés, n’ont pas d’information concernant leur consommation. Le choix des logements des bâtiments concernés, ou pas, se fait de façon aléatoire avec une probabilité plus grande (80%) pour les logements localisés en position centrale. Lorsqu’un bâtiment est choisi de cette façon aléatoire, toutes les caractéristiques associées restent fixées jusqu’à ce que ce même bâtiment soit choisi une autre fois pour faire une autre analyse. Cela permet de considérer une diversité de profils d’occupation, de caractéristiques thermiques des matériaux, etc.

Cette diversité reste basée sur les données propres au quartier étudié.

2.5.5 Typologie C – Immeuble collectif.

C'est la typologie la plus complexe à modéliser (c'est aussi la plus commune pour une ville comme Nantes). En effet, concernant le quartier de Saint Félix (cf chapitre 5), sur 800 logements, 513 sont situés dans des bâtiments collectifs.

Un des problèmes vient du fait que la base de données de l'INSEE ne contient aucune information concernant le bâtiment auquel le logement appartient. En effet, il est difficile d'affecter ces logements aux bâtiments sans avoir une grande incertitude. La base de données de l'INSEE précise simplement qu'il s'agit de logements qui font partie d'un bâtiment collectif, sans donner aucune autre information concernant la localisation de ces logements ou une liaison avec le bâtiment. Ils peuvent donc appartenir à un gros bâtiment collectif de plus de 30 logements, mais peuvent aussi appartenir à un petit ensemble de 4 ou 5 logements.

Le traitement particulier des logements collectifs dans les modèles de demande énergétique à l'échelle urbaine, est une difficulté qui n'est pas propre au contexte français. En Amérique du Nord, par exemple, ces derniers sont tout simplement écartés en avançant le fait qu'ils ne représentent qu'une faible partie du parc des bâtiments aux États Unis et au Canada (20% du stock) (Swan, 2010). D'après Swan, cette faible représentativité permet d'écarter des bâtiments collectifs dans leurs analyses.

Pour cette problématique du placement géométrique des logements dans les bâtiments collectifs, MEDUS repose sur la création d'une typologie « collectif »

2.5.5.1 Généralités, zonage et description géométrique

Aucune analyse géométrique ou enquête de terrain n'a été prise en compte pour la création de cette typologie. MEDUS fait une approche basée sur la représentativité géométrique du positionnement du logement dans le bâtiment. Nous prenons la forme géométrique la plus basique pour un bâtiment (un parallélépipède) que l'on divise en trois étages, eux-mêmes divisés en neuf logements. Cette dernière division permet de faire une représentativité du positionnement des logements sur chaque façade (côté gauche, milieu et côté droit). On obtient ainsi une forme semblable à un « Rubik's cube », avec au total 27 zones thermiques, neuf par étage. Les logements situés au cœur de chaque étage ne sont cependant pas représentatifs de la réalité des constructions en France (normalement au moins un côté du logement est exposé soit à l'extérieur soit à un espace aéré intérieur). Ces logements ne sont donc pas considérés lors d'analyses faites avec MEDUS, ils sont plutôt considérés avec des profils d'infiltration et caractéristiques thermiques qui correspondent aux espaces intérieurs communs des bâtiments collectifs (zones non-chauffées, couloirs...). En particulier, le profil d'infiltration de l'air extérieur est considéré aléatoire avec de fortes oscillations irrégulières, afin de modéliser les effets des oscillations irrégulières des flux d'air dues aux passages et ouvertures des portes donnant sur l'extérieur.

2.6 Données climatiques et microclimat urbain

2.6.1 Données climatiques

Les données climatiques pour les différents cas analysés dans ce travail, proviennent du site du ministère de l'énergie aux États-Unis (DOE) et plus spécifiquement de la base de données climatiques de l'IWEC (International Weather for Energy Calculations) ([ASHRAE, 2001](#)). Ce site propose des données climatiques de nombreuses villes dans le monde, sous forme d'années-types reconstituées à partir de 18 années de données climatiques réelles (projet DATSAV3 menée par l'U.S. Climatic Data Center voir ([ASHRAE, 2001](#))). Ces données climatiques sont disponibles pour 227 sites (hors États-Unis et Canada).

Les données climatiques horaires requises pour ESP-r sont :

- l'irradiation diffuse horizontale (W/m^2),
- la température ($^{\circ}\text{C}$),
- l'irradiation normale directe (W/m^2),
- la vitesse du vent (m/s),
- la direction du vent,
- l'humidité relative.

L'année, la latitude, la longitude sont aussi requises pour la réalisation d'une simulation.

L'alternative aux données de l'IWEC peut être une autre source (ex Météo France) ou des simulations de modèles climatiques spécifiques, si l'objectif de simulation le requiert.

Meteonorm constitue une autre source d'information possible (base de données climatiques fournies par 7 756 stations réparties dans le monde entier). Cet outil est plus qu'une base de données dans la mesure où les valeurs horaires d'insolation globale, de la température ainsi que d'autres paramètres météorologiques peuvent être générées à partir des bases de données, par l'intermédiaire des algorithmes de calcul inclus dans le programme. L'utilisateur peut également importer ses propres données de mesures ou interpoler des données météorologiques pour n'importe quel point de la surface du globe, à partir des stations connues les plus proches.

2.6.1.1 Température du sol

Les températures du sol des typologies correspondent à des températures définies par mois. Dans MEDUS, comme cela a été décrit, pour chaque typologie on change à chaque fois les paramètres d'entrée issus de la base de données de logements de l'INSEE. Suivant cette logique, chaque bâtiment simulé est localisé différemment (au sens de la température du sol) d'une simulation à l'autre. Là encore, afin de mieux représenter cette variabilité des profils de température de la surface au sol une sélection aléatoire des profils de sol est mise en œuvre dans cette version de MEDUS. Cette sélection aléatoire permet d'augmenter la dispersion des résultats des besoins de consommation et de s'approcher au mieux de la réalité des divers besoins de demande d'énergie. Bien entendu la flexibilité se retrouve ici, avec la possibilité de proposer une alternative à cette sélection aléatoire (connaissance géolocalisée des températures par exemple).

2.6.1.2 Microclimat urbain et îlot de chaleur

La relation entre le tissu urbain et son environnement dépend de la prise en compte de différents phénomènes selon [Erell et al. \(2011\)](#) :

- le bilan d'énergie au niveau urbain (interaction avec le micro climat),
- le phénomène d'îlot de chaleur [Bouyer et al. \(2009\)](#), décrit pour la première fois par Luke Howard en 1818 comme un incrément de la différence de la température entre le tissu urbain et les surfaces rurales avoisinantes,
- et le flux d'air au niveau urbain.

Ces trois phénomènes influent sur la consommation d'énergie des bâtiments. Le phénomène de masques proches (influence de la présence d'autres bâtiments sur les transferts radiatifs) est également à considérer car il modifie le bilan énergétique local sur les façades des bâtiments [Nikoofard et al. \(2011\)](#).

Les aspects de micro-climatologie urbaine et d'îlots de chaleur sont très importants pour comprendre la frontière entre le bâtiment et son environnement. Ils constituent de plus un des éléments essentiels de l'approche énergétique à l'échelle du quartier et justifient pleinement les questionnements scientifiques relatifs au changement d'échelle Bâtiment->Quartier. Pour mieux comprendre les grands enjeux de la micro climatologie urbaine le lecteur pourra se reporter aux travaux de [Santamouris and Asimakopoulos \(2001\)](#), [Harman \(2003\)](#), [Musy \(2007\)](#) et [Erell et al. \(2011\)](#).

Les effets micro-climatologiques d'îlot de chaleur ne sont pas pris en compte dans la version actuelle de MEDUS. Une des voies possibles sera la prise en compte des analyses de sensibilité dans les fichiers climatologiques de l'IWEC et les trois typologies du logiciel pour pouvoir modéliser la micro climatologie en modifiant le fichier météorologique de façon correcte.

2.7 Usages et comportements

Les usages et le comportement des occupants jouent également un rôle important dans la prédiction de la demande d'énergie dans les bâtiments et donc à l'échelle du quartier. Ils sont également la principale source d'incertitudes liées à la simulation des bâtiments [Garcia-Sanchez et al. \(2012\)](#). Les différents sous-modèles de comportements peuvent correspondre à des modèles stochastiques complexes [Haldi \(2010\)](#); [Zhang and Barrett \(2012\)](#) du à l'utilisation de profils fixés ou de ratios d'occupation.

La grande majorité des études lient l'influence de la température extérieure aux diverses interactions des occupants avec leur environnement [Haldi and Robinson \(2008\)](#) (ouverture des fenêtres, degré d'habillement, augmentation-diminution de la température de consigne, baisse des stores), avec une corrélation moyenne de tous ces phénomènes avec la température extérieure de l'ordre de 0,7 [Zhang and Barrett \(2012\)](#). Il existe également des facteurs économiques et de qualité de service à prendre en compte [Haas et al. \(1998\)](#).

Dans MEDUS, la présence de l'occupant et les conséquences de cette présence pour les apports gratuits, sont pris en compte via des profils d'occupation (associés à des usages) fixés. Même si une connaissance fine des comportements des occupants est nécessaire pour

Activité	T Intérieure	Chaleur sensible	Chaleur latente	Chaleur totale totale	Apports en eau
Hiver	21C	83 W	49 W	132 W	71 g/h
été	24C	71 W	60 W	131 W	86 g/h
été	26C	63 W	69 W	132 W	99 g/h

TABLE 2.7 – Apports des occupants utilisés dans le Système MEDUS (en valeur par occupant), source : Bilan Carrier.

avoir une meilleure réponse du modèle, par exemple pour les estimations des pointes de demande (Page, 2007), ce n'est pas l'objectif premier de MEDUS dans cette phase de développement.

Concernant l'infiltration due aux ouvertures des fenêtres et la prise en compte des déperditions associées (voir les travaux de Rijal et al. (2007); Haldi and Robinson (2008); Zhang and Barrett (2012)), le système MEDUS majore l'infiltration de base pour prendre en compte ce phénomène de façon aléatoire. Là encore, la structure de MEDUS permet l'ajout de sous-modèles spécifiques si l'objectif de modélisation le requiert.

Une autre alternative (non explorée dans le cadre de ce travail) consisterait à exploiter la base de données de population de l'INSEE qui rassemble des données concernant l'emploi, le niveau d'études des occupants, le pourcentage des H/F, la tranche d'âge des ménages, la présence et le nombre de voitures etc., qui peuvent être traitées afin de fournir des informations spécifiques à la modélisation énergétique (corrélations, modélisations parallèles...). Le recoupement des bases de données LOGEMT et POPULATION représentent une capacité évolutive du système non négligeable, si les objectifs de la simulation imposent la nécessité de faire évoluer les profils existants. Les hypothèses de MEDUS pour les apports des occupants liés à leur métabolisme et à l'utilisation des appareils, sont décrites ci-après.

2.7.1 Apports gratuits des occupants du logements⁴.

Une procédure similaire à celle utilisée pour la définition du taux d'infiltration est appliquée pour la modélisation des apports gratuits des occupants. Le nombre des occupants pour chaque logement est obtenu directement de la base de données de l'INSEE (variable INPER, voir tableau 2.1). Cette valeur est multipliée par un facteur d'apports gratuits des occupants (voir table 2.7) et ensuite multipliée directement par une courbe de probabilité d'occupation selon le jour de la semaine (voir figure 2.13).

4. Il est important de noter que lorsqu'on parle d'occupation, on se réfère plutôt aux apports gratuits dus aux occupants et non pas à leurs comportements, pourtant loin d'être déconnectés de la «performance énergétique du bâtiment».

Malheureusement, cela conduit à un profil d'occupation identique pour tous les logements de la zone à traiter, ce qui n'est pas réaliste. Une multiplication par une valeur aléatoire pourrait effectivement être une solution valable ; elle est intégrée au système MEDUS.

2.7.2 Les apports des équipements.

Les apports gratuits dus aux équipements sont pris en compte dans MEDUS par un coefficient de correction qui est apporté au profil des apports gratuits des occupants. De cette façon les apports gratuits des occupants sont multipliés par ce coefficient de correction (<1). Le surplus produit de cette multiplication représente les apports des produits électroménagers.

Le mode de sélection de ce coefficient est une distribution aléatoire des apports gratuits des équipements électroménagers. Cette distribution utilise un ratio des apports gratuits des équipements électroménagers (en kWh/m²/occupant), la valeur d'INPER (occupants) de la base de données INSEE, qui est redistribuée de façon aléatoire dans un intervalle prédéfini, puis est intégrée à la courbe de probabilité d'occupation utilisée également pour les apports gratuits des occupants. (voir figure 2.13).

Concernant l'information relative aux équipements, outre l'utilisation de ratios, on peut imaginer établir des relations entre les données issues de la base de données population de l'INSEE et l'incidence des équipements électroménagers, ce qui représente une voie pour l'avenir du système MEDUS.

2.7.3 La définition de la température de consigne.

La température de consigne joue un rôle important dans les variations des besoins en énergie dans les bâtiments. Elle est également une forte source d'incertitudes dans les résultats de la simulation même. La difficulté de modéliser un profil de comportement de la température de consigne est mise en évidence par [Haldi and Robinson](#). Dans le modèle MEDUS la température de consigne est modélisée de façon aléatoire, indépendante pour chacun des logements qui composent chaque typologie (et inclus ceux qui ne sont pas prises en compte dans les résultats). Donc, une fonction aléatoire normale avec un intervalle entre 19 et 23 ° C est prise en compte.

2.8 Conclusions.

Dans ce chapitre les diverses briques qui composent le système de modélisation à l'échelle urbaine MEDUS (dans sa phase initiale de développement) ont été établies. Les divers principes de fonctionnement ont été développés en prenant en compte l'expérience des divers outils existants de modélisation et inspirés d'un concept de modélisation bien résumé dans les figures 2.12, 2.1 et 2.2. Ce travail illustre l'importance du recensement de la

population dans l'approche. L'importance de cette source d'information n'est pas propre à la France et constitue une ressource importante dans beaucoup de pays.

Dans cette première approche MEDUS modélise le parc des bâtiments selon une approche patrimoniale où les bâtiments sont modélisés de façon indépendante de leur localisation avec un modèle thermique dynamique usuel.

Une première présentation de l'approche typologique a permis d'en identifier les avantages et les limites. Trois typologies ont été définies sur la base d'une analyse du parc de bâtiments français et en prenant en compte les apports de la base de données de l'INSEE. Nous avons également établi certaines règles lorsque l'information directe n'est pas disponible (ex : les caractéristiques thermiques des diverses typologies comme une fonction de l'âge du bâtiment).

Une étude plus détaillée des éléments de définition des typologies est nécessaire. Il est notamment important de pouvoir identifier les paramètres importants dans les outils de modélisation dynamique des bâtiments, afin d'identifier les facteurs discriminants dans la définition des typologies.

Pour cela, l'analyse de sensibilité semble une approche intéressante puisqu'elle doit pouvoir aider à cette identification. C'est d'ailleurs une approche qui a également été mise en œuvre par [Firth et al. \(2010\)](#) dans la conception des systèmes de modélisation aux échelles plus larges que celle du bâtiment.

A l'échelle même du bâtiment, l'analyse de sensibilité est un outil performant pour établir le degré d'incertitudes lié à la méconnaissance des propriétés thermiques des matériaux [Macdonald and Strachan \(2001\)](#).

Dans la suite de ce travail (chapitres 3 et 4) nous allons nous pencher sur les méthodes d'analyse de sensibilité avec un modèle dynamique de bâtiment dans une optique de développement de l'outil MEDUS. Cette travaux visent comme potentiel la réflexion sur l'intégration des outils d'analyse de sensibilité pour la modélisation de la demande d'énergie à l'échelle du quartier.

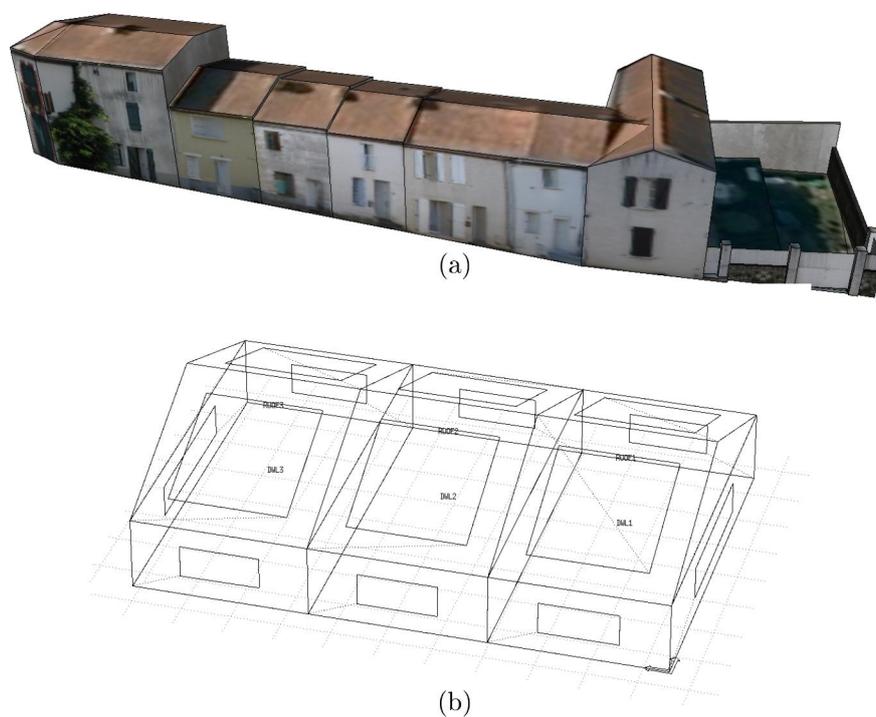


FIGURE 2.10 – Maisons mitoyennes (typologie B) : (a) Exemples. Maisons sur les Bords de la Sèvre Nantaise, Quartier Le Chêne à Vertou. Source : cao2ni, dans <http://bit.ly/yVEDQN>. (b) Représentation simplifiée dans le modèle MEDUS.

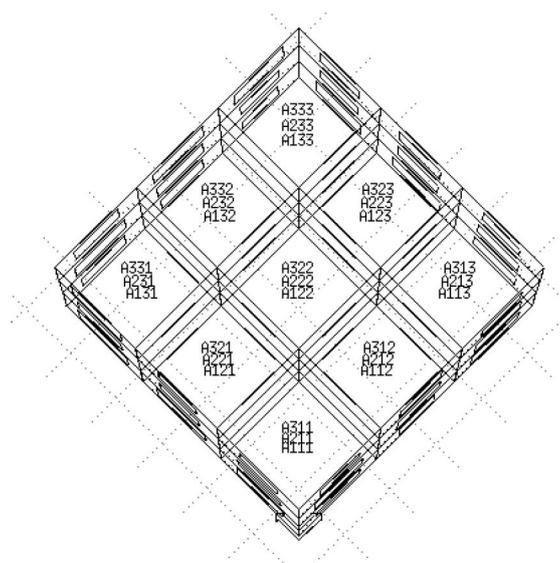


FIGURE 2.11 – Immeuble collectif (Typologie C) : représentation du bâtiment type modélisé sous ESP-r avec ses 27 zones thermiques.

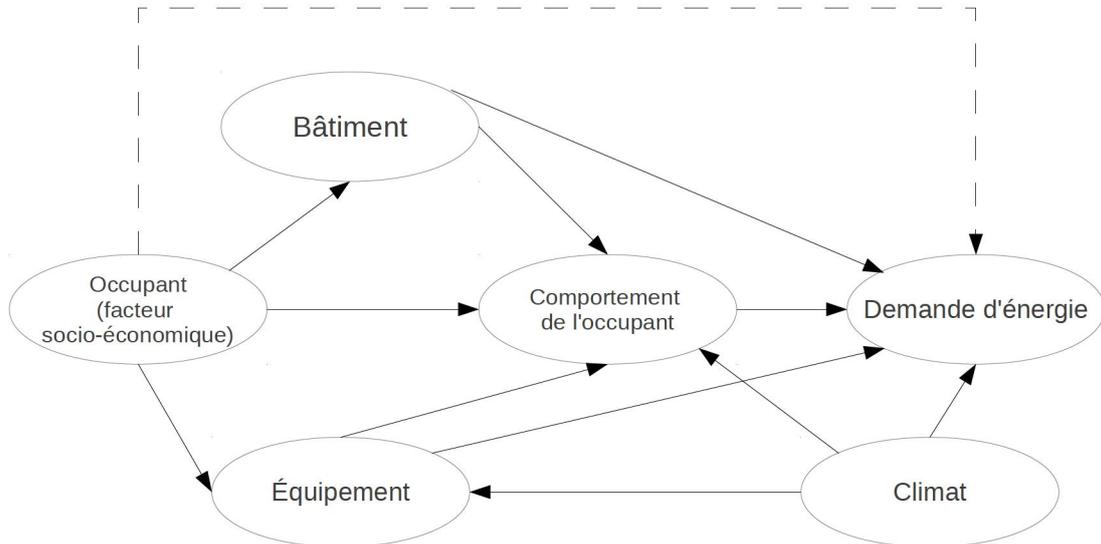


FIGURE 2.12 – Représentation graphique des liens entre les divers facteurs qui influencent la modélisation d'énergie au niveau urbain (selon Steemers and Yun (2009))

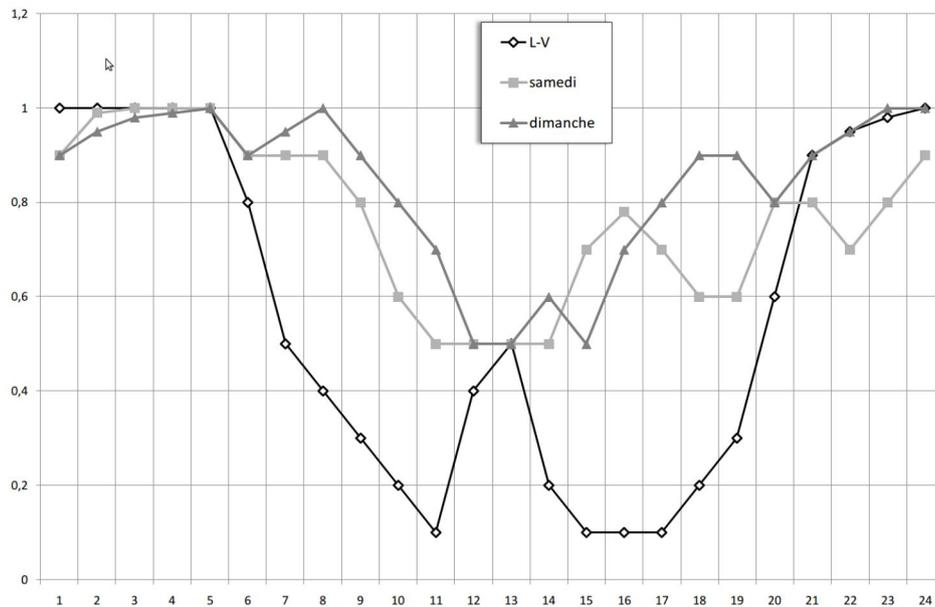


FIGURE 2.13 – Courbes de probabilité de l'occupation selon les jours de la semaine (du lundi à vendredi, samedi et dimanche) implémentées dans le modèle MEDUS.

Chapitre 3

La théorie de l'analyse de sensibilité

Comme évoqué dans le chapitre 1, les modèles ascendants (bottom-up) pour la modélisation de la demande d'énergie aux échelles urbaines peuvent être divisés en deux grandes classes : les méthodes statistiques et les méthodes d'ingénierie [Swan and Ugursal \(2009\)](#). Nous avons choisi de nous concentrer sur les méthodes d'ingénierie. La principale particularité de ces méthodes est de s'appuyer sur un modèle physique des échanges thermiques dans le bâtiment, généralement sous la forme d'un modèle thermique dynamique. La simulation sur une période de temps (une année par exemple) va permettre d'évaluer les besoins en énergie pour le chauffage et la climatisation en fonction de séquences de données climatiques et de scénarios d'occupation.

Mais simuler les milliers de bâtiments d'une ville ou d'un quartier avec de tels modèles n'est guère envisageable, à la fois à cause du temps de calcul qui serait exigé, et à cause de l'impossibilité de rassembler toutes les données détaillées nécessaires. On devra donc se contenter d'un échantillon représentatif de bâtiments, par exemple à partir de bâtiments types, dont les résultats seront ensuite extrapolés à la ville ou au quartier.

Une des options pour simplifier des modèles complexes se trouve dans le classement des paramètres par ordre d'importance. En divisant les paramètres d'entrée avec, d'un côté les plus influents sur le résultat final et de l'autre les moins influents, nous pouvons envisager de réduire la complexité de faire varier un trop grand nombre de données d'entrée dans un modèle.

Dans ce chapitre, nous présentons la définition de l'analyse de sensibilité et diverses méthodes issues de la littérature que nous considérons pertinentes et applicables à la thématique de la thermique du bâtiment. Ce chapitre est exclusivement consacré à la présentation des principes théoriques de ces méthodes et aux programmes informatiques qui ont été préparés pour les exploiter. Les applications et leurs résultats seront vus au chapitre suivant (chapitre 4), notamment une approche pour étendre cet outil à la création de typologies des bâtiments.

La première section est consacrée à une méthodologie globale basée sur le calcul des “quasi-dérivées numériques” proposée par Morris (1991) sous le nom de méthode des effets élémentaires. Une extension de cette méthodologie qui permet une analyse de ces “dérivées numériques” à des ordres supérieurs est également présentée, implémentée et discutée. Les deux méthodes sont comparées avec les méthodes d'analyse de sensibilité basées sur l'analyse des variances. La pertinence des deux méthodes est discutée dans la section suivante, ainsi qu'une comparaison avec d'autres méthodologies d'analyse de sensibilité telle que celle de Sobol'.

Notations :

Dans ce chapitre on définit un modèle F (équation 3.1) sous une forme assez générale, qui associe à un ensemble de n variables d'entrée réelles, un ensemble de n_o variables de sortie (ou réponses, réelles également). On définit donc l'Analyse de sensibilité comme la quantification et l'analyse d'une relation entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie associés au modèle F .

$$F : \Omega_i \subset \mathbb{R}^{n_i} \rightarrow \Omega_o \subset \mathbb{R}^{n_o} \quad (3.1)$$

3.1 Les méthodes d'analyse de sensibilité et leur utilisations.

L'analyse de sensibilité consiste à classer, sur une base quantitative ou qualitative, les variations de la réponse d'un modèle en fonction des variations d'un ou plusieurs paramètres d'entrée, souvent à partir d'un plan d'expérience bien défini. Cette analyse de sensibilité peut être locale si elle est réalisée sur un domaine de variation des paramètres assez restreint ou globale si ce domaine est élargi de façon à prendre en compte toutes les possibilités du modèle, associées notamment à un objectif d'utilisation particulier de ce modèle.

Les diverses méthodes d'analyse de sensibilité ont été étudiées par de nombreux auteurs dans les dernières décennies, ces méthodes ont démontré leur force dans de nombreux secteurs. Tout au long de cette période, de nouvelles méthodes et des améliorations ont été développés, offrant des solutions différentes en fonction de l'objectif de l'analyse. Hamby (Hamby, 1994) a proposé un classement des techniques pour l'analyse de sensibilité des paramètres qu'il divise en trois catégories :

- Méthodes d'analyse de sensibilité avec le but d'évaluer l'influence de paramètres individuels. Il s'agit notamment de l'analyse de sensibilité différentielle, des méthodes du type « un facteur à la fois », des plans factoriels et de l'analyse de sensibilité subjective.
- Analyse de sensibilité des paramètres qui utilisent des méthodes d'échantillonnage aléatoire (échantillonnage aléatoire simple, Monte-Carlo, hypercube latin). Dans ce groupe figurent les méthodes suivantes : Les nuages de points, l'indice d'importance, le «Ratio écart relatif», le coefficient de corrélation r de Pearson, la transformation Rang, le facteur de Spearman ρ , le coefficient de corrélation partielle, et les techniques de régression et de régression standardisée.

- Les tests de sensibilité impliquant des distributions d'entrée segmentées : le test de Smirnov, le test de Cramer Von Mises, le test de Mann-Whitney, et le test-squared rang.

L'auteur a ensuite appliqué ces différentes méthodes pour une étude de cas liée à l'industrie nucléaire, afin de les comparer en termes de fiabilité, d'exigences de calcul et de facilité de mise en œuvre (Hamby, 1995). L'étude a identifié les méthodes du type « one-factor-at-a-time » comme les méthodes les plus simples à implémenter, mais l'auteur a également souligné qu'elles deviennent moins performantes en termes du temps du calcul avec un grand nombre de paramètres.

Saltelli et al. (Saltelli et al., 2008) décrivent aussi les différentes techniques d'analyse de sensibilité. Pour ces auteurs, les techniques peuvent être divisées entre les méthodes globales et locales. Les méthodes locales sont généralement basées sur l'estimation des dérivées partielles en vue d'obtenir une analyse qualitative de l'importance de chaque facteur sur la réponse de sortie pour quelques valeurs ou sous-ensemble de valeurs limitées des variables d'entrée. Les méthodes globales font varier tous les paramètres et essaient d'obtenir des informations pour un sous-ensemble de variables d'entrée dans un domaine plus large. Les méthodes globales peuvent également être divisées en techniques quantitatives et qualitatives. Santner et al. (Santner et al., 2003) a développé le parallèle entre les expériences expérimentales et le concept d'expériences numériques tel qu'il est appliqué dans le présent travail. En particulier, ces auteurs ont décrit la valeur ajoutée de l'analyse de sensibilité dans l'analyse de telles expériences. Cela a été repris par Saltelli et al. (Saltelli et al., 2008) qui a présenté l'échantillonnage « one-factor-at-a-time » pour l'analyse de sensibilité avec des paramètres d'entrée multiples.

Nous avons choisi de nous concentrer dans un premier temps sur la méthode des effets élémentaires, dite de Morris. Celle-ci présente l'avantage de rester relativement simple et proche des méthodes les plus intuitives (« Un-facteur-à-la-fois »); mais c'est malgré tout une méthode globale, apte à fournir de l'information sur la sensibilité d'un modèle simultanément à ses différentes entrées et sur tout un domaine de variation potentielle. En outre, elle est capable, comme nous le verrons, de prendre en compte un grand nombre de variables d'entrée pour un coût calcul tout à fait acceptable (proportionnel au nombre de variables). De ce point de vue, la méthode de Morris est considérée dans de nombreuses situations comme un bon compromis entre précision et efficacité Kucherenko et al. (2009). Par ailleurs, nous nous sommes intéressés également aux méthodes basées sur la variance et notamment aux indices de Sobol qui proposent des indicateurs de sensibilité d'un modèle, plus coûteux à calculer mais qui constituent des indicateurs de référence ayant une base théorique solide.

3.2 La méthode de Morris ou méthode des effets élémentaires.

3.2.1 Principes et utilisations.

La méthode, proposée et décrite en détail par (Morris, 1991) est une démarche très efficace pour identifier les sous-ensembles de paramètres importants parmi un grand nombre de

paramètres d'entrée dans un modèle. La méthode est une variante de l'approche classique d'analyse « un facteur à la fois »¹ où la sensibilité du modèle est évaluée à travers ses dérivées du premier ordre. La méthode de Morris caractérise la sensibilité d'une fonction par rapport à ses différentes variables d'entrée sous la forme des « effets élémentaires », approximations des dérivées premières de la fonction ou « quasi-dérivées » numériques. Les sorties d'un modèle numérique type « boîte-noire » sont assimilées à des fonctions de plusieurs variables.

Cependant, chaque effet élémentaire ne fournit qu'une mesure de sensibilité locale en un point particulier de l'espace des variables d'entrée. Pour permettre une mesure de sensibilité globale, les effets élémentaires sont estimés en différents points du domaine de variation de la fonction F . Une des originalités de la méthode de Morris est de proposer un plan d'échantillonnage particulier avec un tirage aléatoire des valeurs des variables d'entrée sur une grille discretisée. Les valeurs de ces effets élémentaires pour chaque paramètre d'entrée font ensuite l'objet d'un traitement statistique simple : l'écart-type et la moyenne. A partir d'un graphique présentant simultanément les deux statistiques, la méthode de Morris permet d'identifier avec une incertitude raisonnable les paramètres d'entrée ayant des effets qui sont : 1. Négligeables ; 2. Linéaires et additifs ; 3. Non-linéaires ou impliqués dans des interactions avec d'autres paramètres du modèle.

Pour les paramètres d'entrée correspondant au cas 3 défini ci-dessus, une étape ultérieure peut être nécessaire. Pour cela, [Campolongo and Braddock \(1999\)](#) ont proposé une extension de la méthode de Morris, qui permet le calcul des ordres supérieurs, et donc des interactions, avec un coût raisonnable de calcul. Cette méthode est expliquée plus tard dans ce chapitre.

En dépit de l'excellent compromis entre l'exactitude, l'efficacité et sa facile implémentation, la méthode de Morris n'est pas encore bien exploitée dans la communauté scientifique. Seules certaines applications sont trouvées dans la littérature, notamment dans la modélisation des phénomènes de l'environnement, [Richter et al. \(2010\)](#); [Thorsen and Höglind \(2010\)](#); [Wang et al. \(2006\)](#); [Francos et al. \(2003\)](#); [Pauw et al. \(2008\)](#), la biophysique ([Cooling et al., 2007](#)), les sciences atmosphériques ([Demael, 2007](#)), l'ingénierie nucléaire ([Mohanty et al., 1999](#)), la physique de l'état solide ([Matsuka et al., 2007](#)), la chimie ([Liu et al., 2007](#); [Zador et al., 2006](#)) et la science militaire ([Alan et al., 2004](#)).

Dans la modélisation de la demande d'énergie et la thermique du bâtiment nous pouvons trouver des expériences dans : l'évaluation des modèles de thermique du bâtiment ([de Witt, 1997](#); [Brohus et al., 2009](#); [Corrado and Mechri, 2009](#); [eddine Mechri and Corrado, 2010](#)), l'analyse de la ventilation naturelle nocturne ([Breesch and Janssens, 2004](#)), la conception des bâtiments durables ([Heiselberg et al., 2009](#); [Brohus et al., 2009](#)) et l'efficacité énergétique au niveau d'un parc des logements ([Firth et al., 2010](#)). Certaines de ces applications seront évoquées de façon plus spécifique dans le chapitre suivant.

En dépit des avantages de l'analyse des interactions supérieures et de la mise en œuvre relativement facile de la méthode de Campolongo et al., très peu d'applications de cette méthodologie ont été réalisées [Mullins et al. \(2004\)](#); [Whitcombe et al. \(2006\)](#); [Mayra and](#)

1. Une méthode où un facteur est évalué après l'autre se définit dans le jargon des spécialistes comme OAT (One factor-At-a-Time)

Leiviska (2009). En particulier, il n'existe pas d'application de l'extension de la méthode de Morris deuxième ordre de Campolongo pour la simulation thermique des bâtiments.

3.2.2 Description détaillée de la méthode de Morris.

Pour expliquer la méthodologie, nous considérons une fonction de n variables réelles (équation 3.2) définie dans l'hypercube unitaire H^n ($0 \leq x_i \leq 1$, $i = 1, \dots, n$) avec la mesure de Lebesgue $dx = dx_1 \dots dx_n$. La fonction est supposée de carré intégrable et peut être également une sortie (scalaire) d'un modèle type « boîte-noire » et pas nécessairement une expression analytique.

$$f(\vec{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = Y \quad (3.2)$$

Pour une variable d'entrée x_i définie sur un intervalle $[x_{min}, x_{max}]$ la transformation affine $x'_i = \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{min} - x_{max}}$ permet d'obtenir une variable d'entrée dans l'intervalle $[0;1]$. Chaque variable d'entrée est discrétisée sur une grille de p -valeurs entre 0 et 1, soit les valeurs $[0, 1/(p-1), 2/(p-1), \dots, 1]$. Le vecteur \vec{x} converti sous une forme « discrétisée » est transposé dans l'espace discret Ω_w , appelé « la région d'expérimentation » et défini comme une grille à n dimensions et p -niveaux, (voir figure 3.1).

On définit dans l'hypercube H^n une trajectoire comme un ensemble de $(n + 1)$ points (ou vecteurs) successifs. Chaque point ne diffère du précédent que par une seule coordonnée (fig 3.1). Dans une trajectoire, chacune des n composantes change de valeur une fois et une seule, avec un pas pré-défini Δ , multiple de $1/(p - 1)$. La fonction f est évaluée sur chacun des $(n + 1)$ points de la trajectoire. Une trajectoire permet ainsi une estimation de l'effet élémentaire de chaque variable d'entrée x_i , calculé entre les deux points de la trajectoire où cette variable x_i a été modifiée.

$$EE_i = \frac{f(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta) - f(\vec{x})}{\Delta} \quad (3.3)$$

Le vecteur \vec{e}_i a toutes les coordonnées nulles, à l'exception de sa coordonnée i , qui est égale à $+1$ ou -1 .

Morris suggère de prendre un nombre de niveaux p pair et un pas Δ .

$$\Delta = \frac{p}{2(p - 1)} \quad (3.4)$$

Ce choix garantit une probabilité égale pour tous les points de l'espace Ω_w

L'effet élémentaire EE_i est égal à la dérivée partielle, df/dx_i de la fonction f si f est fonction affine de x_i . Dans le cas contraire (f non-linéaire), c'est une approximation, parfois très grossière, de cette dérivée partielle

L'objectif principal de la méthode de Morris est d'obtenir de l'information sur l'influence de chaque élément du vecteur \vec{x} dans le résultat final de la fonction $f(\vec{x})$. Une trajectoire ne fournit qu'une seule valeur de chaque effet élémentaire des variables d'entrée. Plusieurs

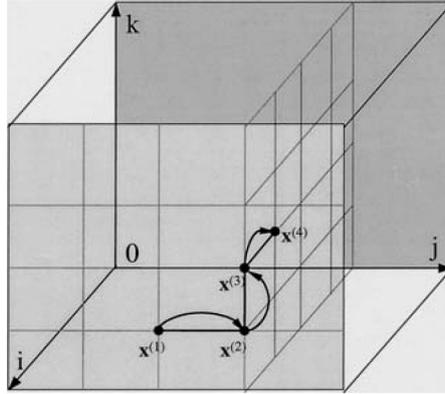


FIGURE 3.1 – Exemple d'un vecteur de trajectoire \vec{x} de dans l'espace des paramètres Ω_w où $\vec{x} \in \Omega_w$ et $n = 3$. Source de l'image : [Saltelli et al. \(2004\)](#)

trajectoires doivent donc être explorées dans différentes zones de l'hypercube H^n , en permutant le vecteur d'entrée \vec{x} parmi les différentes valeurs du nouvel espace Ω_w . On notera que, du fait de la discrétisation des variables en p niveaux, nous pouvons avoir $p^{n-1} [p - \Delta(p - 1)]$ valeurs différentes des effets élémentaires associées à l'élément x_i $i = 1, \dots, n$ où n est le nombre total de composantes de \vec{x} .

Si k trajectoires sont réalisées, on peut noter $EE_i^{(t)}$ l'effet élémentaire de la variable i estimé dans la trajectoire t ($1 \leq t \leq k$)

A *posteriori*, ces effets élémentaires peuvent être traités statistiquement si au moins deux valeurs des EE par facteur sont créées (soit deux trajectoires ou plus). La moyenne classique et l'écart-type pour chaque EE sont calculés, à partir des équations 3.5 et 3.6.

$$\mu_i = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k EE_i^{(t)} \quad (3.5)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{t=1}^k \left(EE_i^{(t)} - \mu_i \right)^2} \quad (3.6)$$

Sur la base de ces deux statistiques nous pouvons déduire si la variable d'entrée x_i a un effet :

1. Négligeable (faible μ et faible σ).
2. Linéaire et additif (faible σ et une valeur élevée de μ).
3. Non-linéaire ou impliqué dans des interactions avec d'autres paramètres d'entrée (valeur élevée de σ).

Par ailleurs l'utilisation de la moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires (notée μ_i^*) selon l'équation 3.7, a été proposée par Campolongo.

$$\mu_i^* = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k | EE_i^{(t)} | \quad (3.7)$$

Campolongo base sa recommandation sur le fait que des effets élémentaires peuvent «s'éliminer les uns les autres» lors de l'utilisation de fonctions non-monotones ou de modèles fortement instables ; cette utilisation est discutée dans la section 3.5.2 de ce chapitre.

Le nombre d'évaluations numériques pour calculer la totalité des effets élémentaires d'un modèle comportant n paramètres d'entrée dépend de la taille de l'échantillon des effets élémentaires et donc du nombre des trajectoires que nous voulons avoir (cette taille est notée k) .

Avec le plan d'expériences numériques proposé par Morris, le nombre d'évaluations de la fonction f (c'est à dire le nombre de simulations) est $k(n + 1)$. En l'absence de ce plan, à raison de deux simulations pour estimer un effet élémentaire le coût de calcul serait $2nk$.

3.2.3 La création du plan d'expérience de Morris.

Pour mieux expliquer ce plan d'expérience numérique, nous prendrons le cas où $\Delta = p / [2(p - 1)]$ et p pair.

La première étape est la création d'un vecteur $\vec{x}_o \in \Omega_w$, où n est le nombre de paramètres d'entrée de la fonction $f(\vec{x})$. Le vecteur est obtenu par tirage aléatoire équiprobable dans Ω_w . L'analyse peut également se faire sur un sous-ensemble de n en fonction des besoins. Ensuite, un second vecteur composé également de n -éléments, $\vec{x}_1 \in \Omega_w$, est défini en augmentant ou diminuant d'une valeur Δ une composante et une seule du vecteur \vec{x}_o , choisie au hasard parmi n , avec la même probabilité d'occurrence .

La troisième étape est de définir un vecteur $\vec{x}_2 \in \Omega_w$ qui diffère de \vec{x}_1 de manière similaire par une seule composante modifiée de $\pm\Delta$ et ainsi de suite jusqu'au vecteur \vec{x}_n . A chaque étape $j + 1$ un nouveau vecteur \vec{x}_j est créé. Ce vecteur ne diffère du vecteur \vec{x}_{j-1} que par une seule composante ($\pm\Delta$). Mais chaque composante est modifiée une fois et une seule dans une même trajectoire.

Pour calculer les effets élémentaires, à l'étape $(j + 1)$ si la composante i du vecteur \vec{x}_{j-1} est modifiée pour créer le vecteur \vec{x}_j , l'effet élémentaire de la variable d'entrée i est : (dans le cas où la variable i varie de $+\Delta$).

$$EE_i = [f(\vec{x}_j) - f(\vec{x}_{j-1})] / \Delta \quad (3.8)$$

Cette équation est équivalente à l'équation 3.3. Si la valeur initiale de la composante x_i modifiée est inférieure à 0,5, la valeur finale est $(x_i + \Delta)$ pour rester dans l'intervalle $[0, 1]$. Au contraire, si la valeur initiale est supérieure à 0,5, la valeur finale est $(x_i - \Delta)$

Les étapes peuvent être répétées jusqu'à l'étape $n+1$, avec à chaque fois, un choix aléatoire de la composante i à modifier.

Les vecteurs $[\vec{x}_o, \vec{x}_1 \dots \vec{x}_n]$ sont collectés dans une matrice nommé «matrice d'orientation d'échantillonnage aléatoire» \mathbf{B}^* . Morris (1991) a également proposé une formulation matricielle pour générer cette matrice \mathbf{B}^* :

$$\mathbf{B}^* = (\mathbf{J}_{n+1,1}\vec{x} + (\Delta/2) [(2\mathbf{B} - \mathbf{J}_{n+1,n})\mathbf{D}^* + \mathbf{J}_{n+1,n}])\mathbf{P}^* \quad (3.9)$$

où \mathbf{B} est la matrice triangulaire inférieure de taille $(n + 1, n)$ composée de 1 et de 0 (équation 3.10)

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$\mathbf{J}_{n+1,n}$ est une matrice $(n + 1, n)$ composée de 1 (idem pour $\mathbf{J}_{n+1,1}$ matrice $(n+1,1)$),

\vec{x} est un vecteur de base à n éléments, choisi aléatoirement sur une partie du domaine Ω_w (uniquement pour les valeurs inférieures à $0,5 : 0, 1/p-1, 2/p-1, \dots; 1-\Delta$),

\mathbf{D}^* est une matrice diagonale n,n , dont les termes sont $+1$ ou -1 , là encore avec tirage aléatoire équiprobable,

\mathbf{P}^* est une matrice de permutation aléatoire n,n . Les éléments de cette matrice sont 0 ou 1. Chaque colonne et chaque ligne comportent un élément et un seul égal à 1,

\mathbf{B}^* fournit l'ensemble des valeurs d'entrée de la fonction f pour les $(n + 1)$ simulations d'une trajectoire. La matrice \mathbf{B}^* permet donc ensuite d'évaluer une valeur d'effet élémentaire pour chaque variable d'entrée x_i .

Il est possible d'attribuer à chaque variable d'entrée i une valeur spécifique de p_i et $\Delta_i = p_i / [2(p_i - 1)]$.

Un échantillon de k effets élémentaires pour chaque paramètre nécessite k matrices de permutations similaires (correspondant à k tirages aléatoires de \vec{x} , \mathbf{D}^* et \mathbf{P}^*) ces matrices peuvent être concaténées pour former la matrice totale du plan d'expériences ²

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^* \\ \mathbf{B}_2^* \\ \vdots \\ \mathbf{B}_k^* \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Morris recommande de faire une représentation graphique de l'écart-type σ en fonction de la moyenne μ . Nous verrons plus loin, au chapitre 4, des exemples et comment cette représentation graphique peut être interprétée.

2. Le nombre de trajectoires devrait être suffisant pour calculer la moyenne et l'écart-type d'une façon appropriée. Déjà deux trajectoires donnent une estimation informative car elles sont construites avec deux valeurs de chaque effet (comme une analyse simple type OAT peut le faire). Normalement, entre quatre et dix effets élémentaires par facteur sont recommandés par la littérature.

3.3 Mesure d'importance et décomposition de la variance fonctionnelle : Les indices de Sobol.

Nous présentons ici une autre approche d'analyse de sensibilité, due pour ses développements récents au mathématicien russe I. Sobol. Elle définit une mesure de l'importance de chaque variable d'entrée en s'appuyant sur la décomposition de la variance de la fonction sortie calculée. Elle est de ce fait beaucoup plus générale que l'approche de Morris et fournit des indicateurs de référence plus généraux, mettant notamment en évidence l'influence des interactions entre variables, malheureusement au prix d'un nombre de calculs beaucoup plus importants.

3.3.1 Principes des méthodes.

Nous supposons comme dans la section précédente que le modèle utilisé est décrit par la fonction 3.12,

$$Y = f(\vec{x}), \quad \vec{x} = (x_1, \dots, x_n) \quad (3.12)$$

où \vec{x} est un vecteur dans un hypercube unité H^n à n dimensions et y est une sortie scalaire du modèle. Comme précédemment la fonction $f(\vec{x})$ peut être également un modèle type « boîte-noire » et pas nécessairement une expression analytique.

Sobol ([Sobol' and Kucherenko, 2010](#)) propose ce qu'il appelle la « décomposition ANOVA » de la fonction $f(x)$ (équation 3.12), qui sera, par la suite la base de la décomposition de la variance fonctionnelle.

$$f(\vec{x}) = f_o + \sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} f_{i_1, \dots, i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) \quad (3.13)$$

L'équation 3.13 peut être développée sous la forme (équation 3.14).

$$f(\vec{x}) = f_o + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{i,j}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.14)$$

Il est important de noter que cette décomposition n'est pas une décomposition en série car elle comporte un nombre fini de termes d'expansion. Sur les 2^n termes de l'équation, un est constant (f_o), n sont des fonctions d'une variable, $\binom{n}{2}$ fonctions de 2 variables, et ainsi de suite.

Chaque terme de cette équation est une fonction d'intégrale nulle sur H^n ,

$$\int_{H^n} f_{i_1, \dots, i_s} dx_{i_1} \dots dx_{i_s} = 0 \quad (3.15)$$

sauf le terme constant $f_o = \int_{H^n} f(\vec{x}) d\vec{x}$. En outre, toutes les fonctions termes de la décomposition 3.14 sont orthogonales deux à deux : l'intégrale de leur produit sur H^n est nulle (orthogonalité).

En résumé, il s'agit de décomposer la fonction f de n variables en une somme de fonctions de 1, 2, 3... n variables, toutes ces fonctions étant d'intégrale nulle et orthogonales entre elles sur H^n

Dans l'hypothèse où les variables d'entrée x_i sont des variables aléatoires indépendantes, de probabilité uniforme sur $[0;1]$ (c'est à dire que \vec{x} est un point aléatoire uniformément distribué sur l'hypercube H^n), alors la décomposition de Sobol de la fonction $f(x)$ peut s'interpréter comme suit : la fonction f est décomposée en une somme de fonctions d'espérance nulle et non corrélées entre elles, fonctions respectivement à 1, 2... et n variables. La constante f_o est l'espérance mathématique de la fonction $f(\vec{x})$ sur H^n .

Nous pouvons poursuivre le raisonnement probabiliste en introduisant la variance totale de $f(\vec{x})$ (équation 3.16).

$$D = \int_{H^n} f^2(\vec{x}) dx - f_o^2 \quad (3.16)$$

Les variances des fonctions de la décomposition de Sobol sont appelées les variances partielles.

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int_{H^n} f_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1, \dots, i_s}) d\vec{x} \quad (3.17)$$

En combinant les deux équations précédentes (variance totale et variances partielles) avec la décomposition de Sobol, on obtient (compte tenu des propriétés des termes de la décomposition de Sobol), l'équation de décomposition de la variance totale,

$$D = \sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} D_{i_1, \dots, i_s} \quad (3.18)$$

On peut interpréter les fonctions $f_{i_1, \dots, i_s}(x_{i_1, \dots, i_s})$ de la décomposition de Sobol comme les espérances conditionnelles de la fonction $f(\vec{x}) - f_o$, selon les sous-ensembles de variables x_{i_1}, \dots, x_{i_s} . Ainsi par exemple.

$$f_o = E(Y) \quad (3.19)$$

$$f_i(x_i) = E(Y | x_i) - E(Y) \quad (3.20)$$

$$f_{ij}(x_i, x_j) = E(Y | x_i, x_j) - f_i(x_i) - f_j(x_j) - E(Y) \quad (3.21)$$

Les variances partielles sont les variances de ces espérances conditionnelles.

3.3. *Mesure d'importance et décomposition de la variance fonctionnelle : Les indices de Sobol.*

$$D_{i_1 \dots i_s} = V(E(Y | x_{i_1}, \dots, x_{i_s})) = V[f(x_{i_1}, \dots, x_{i_s})] \quad (3.22)$$

L'espérance conditionnelle $E(Y | x_{i_1}, \dots, x_{i_s})$ peut être calculée de manière empirique par la coupe du domaine de x_{i_1}, \dots, x_{i_s} en « tranches » en faisant la moyenne des valeurs de y pour chaque « tranche » x_{i_1}, \dots, x_{i_s} . La variance de l'espérance conditionnelle peut être considérée comme une mesure globale de sensibilité. Sobol a proposé de définir les indices de sensibilité partielle.

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1 \dots i_s}}{D} \quad (3.23)$$

Ces indices sont positifs, inférieurs à 1 et liés par l'équation (déduite immédiatement de la relation de décomposition de la variance) :

$$\sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} S_{i_1, \dots, i_s} = 1 \quad (3.24)$$

Si on considère une des variables d'entrée x_i isolément, on peut définir son **indice de sensibilité simple** (ou indice de sensibilité du 1er ordre) qui ne prend en compte que la variance de la fonction $f_i(x_i)$ (d'une seule variable) de la décomposition de Sobol, mais pas les interactions entre x_i et les autres variables d'entrée.

$$S_i = D_i / D \quad (3.25)$$

Pour estimer l'influence totale du facteur x_i (en incluant ces interactions), la variance totale associée à la variable x_i est introduite

$$D_i^{tot} = \sum_{\langle i \rangle} D_{i_1, \dots, i_s} \quad (3.26)$$

La sommation s'étend sur tous les groupes d'indices incluant la variable i . **L'indice de sensibilité totale** de la variable x_i (incluant l'ensemble des fonctions de la décomposition de Sobol comprenant la variable x_i) est défini comme

$$S_i^{tot} = \frac{D_i^{tot}}{D} \quad (3.27)$$

De manière générale $0 \leq S_i \leq S_i^{tot} \leq 1$. Les indices de sensibilité totale S_i^{tot} des variables x_i peuvent être utilisés pour le classement de l'importance des variables x_i . En particulier, si S_i^{tot} est proche de zéro, on peut identifier les facteurs sans importance. Ces facteurs peuvent être fixés à une valeur donnée dans leur intervalle d'incertitude sans affecter de manière significative les résultats du modèle (Saltelli and Tarantola, 2002).

Deux cas particuliers sont à mentionner : D'abord si $S_i = S_i^{tot}$ toute la sensibilité relative à la variable x_i peut être attribuée à cette variable et elle n'est pas impliquée dans des interactions avec les autres paramètres. La variable i n'apparaît dans aucune fonction de

la décomposition de Sobol en dehors de $f_i(x_i)$. La variable x_i a un effet additif sur la fonction $f(x)$.

Autre cas, si $S_i = 0$, alors la fonction $f_i(x_i)$ est nulle et la variable x_i n'a pas d'influence directe mais seulement par l'intermédiaire de ses interactions avec les autres variables

3.3.2 Implémentation numérique de la méthode de Sobol (Version Saltelli 2002)

La méthode expliquée ici est attribuable à Saltelli (2002) et est une extension de l'approche originale fourni par IM Sobol [Sobol' and Kucherenko \(2009\)](#) . Elle est recommandée comme une méthode plus économique en termes de calculs que la précédente développé par Homma et Saltelli. La mise en oeuvre des expériences du chapitre 4 utilisant la méthode de Sobol a été faite avec une version numérique de cet algorithme de la méthode de Sobol, version Saltelli, réalisée par Gilles Pujol [Pujol \(2008\)](#) dans le langage de programmation statistique R.

La première étape de cette méthodologie est de générer deux matrices de nombres aléatoires \mathbf{A} et \mathbf{B} qui représentent un choix aléatoire des paramètres d'entrée dans un modèle. Ces matrices sont de taille (N,n) où n est le nombre de paramètres analysés et N est défini comme un « échantillon de base » et représente les nombres de points aléatoires dont les valeurs des paramètres d'entrée sont explorées pour le calcul de la fonction f . La précision de la méthode dépend fortement de la valeur de N et la plupart des auteurs de la littérature recommandent une valeur de 1000 [Saltelli et al. \(2004\)](#); [Kucherenko et al. \(2009\)](#), mais il peut varier de quelques centaines à des milliers selon la complexité du modèle analysé.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \cdots & x_i^{(1)} & \cdots & x_n^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \cdots & x_i^{(2)} & \cdots & x_n^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{(N-1)} & x_2^{(N-1)} & \cdots & x_i^{(N-1)} & \cdots & x_n^{(N-1)} \\ x_1^{(N)} & x_2^{(N)} & \cdots & x_i^{(N)} & \cdots & x_n^{(N)} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Dans la matrice \mathbf{B} , x^* représente un deuxième ensemble de valeurs aléatoires.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^{*(1)} & x_2^{*(1)} & \cdots & x_i^{*(1)} & \cdots & x_n^{*(1)} \\ x_1^{*(2)} & x_2^{*(2)} & \cdots & x_i^{*(2)} & \cdots & x_n^{*(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{*(N-1)} & x_2^{*(N-1)} & \cdots & x_i^{*(N-1)} & \cdots & x_n^{*(N-1)} \\ x_1^{*(N)} & x_2^{*(N)} & \cdots & x_i^{*(N)} & \cdots & x_n^{*(N)} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Avec les matrices \mathbf{A} et \mathbf{B} , une matrice nommée \mathbf{C}_i est construite; \mathbf{C}_i est formée à partir des colonnes de la matrice \mathbf{B} , à l'exception de la i -ème colonne qui est extraite de la matrice \mathbf{A} .

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} x_{*1}^{(1)} & x_{*2}^{(1)} & \cdots & x_i^{(1)} & \cdots & x_{*n}^{(1)} \\ x_{*1}^{(2)} & x_{*2}^{(2)} & \cdots & x_i^{(2)} & \cdots & x_{*n}^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{*1}^{(N-1)} & x_{*2}^{(N-1)} & \cdots & x_i^{(N-1)} & \cdots & x_{*n}^{(N-1)} \\ x_{*1}^{(N)} & x_{*2}^{(N)} & \cdots & x_i^{(N)} & \cdots & x_{*n}^{(N)} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

A partir de ces matrices aléatoires de valeurs d'entrée, nous définissons y_A , y_B et y_{C_i} comme les vecteurs (à N composantes) de la réponse du modèle à ces matrices d'entrée respectives. L'indice de sensibilité du premier ordre S_i de la variable x_i est évalué à partir de :

$$S_i = \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N \left(y_A^{(j)}\right)^2 - f_0^2} = \frac{V[E(Y | X_i)]}{V(Y)} \quad (3.31)$$

Où f_0^2 est défini comme,

$$f_0^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} \right)^2 \quad (3.32)$$

L'indice de sensibilité totale de Sobol³ S_i^{tot} est calculé avec les mêmes ensembles de matrices aléatoires et les résultats vectoriels

$$S_i^{tot} = 1 - \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N \left(y_A^{(j)}\right)^2 - f_0^2} = \frac{V[E(Y | X_{\sim i})]}{V(Y)} \quad (3.33)$$

Le coût total du plan d'expériences de Sobol avec les indices du premier-ordre et les indices totaux est de

$$N(n + 2) \quad (3.34)$$

Nous verrons à la section 3.4, le lien qui peut être établi entre les indices de Sobol et les effets élémentaires de Morris.

3.3.3 Estimations des indices de sensibilité par quasi-Monte Carlo.

La méthode de Quasi-Monte Carlo est une méthode alternative à la méthode de Monte Carlo pour l'estimation des indices de Sobol. Elle ressemble à celle de Monte Carlo à la

3. Nous nous référons à des indices totaux, car ils prennent en compte les effets de premier-ordre et tous les autres effets (de deuxième ordre, troisième ordre et jusqu'à l'ordre n ou n est le nombre total des paramètres du modèle).

différence que la méthode de quasi-Monte Carlo utilise les séquences quasi-aléatoires ou « séquences à faible discrédance »⁴ au lieu des nombres aléatoires dont se sert la méthode de Monte Carlo pour la création des matrices d'entrées aléatoires (voir l'équation 3.28). Ce sont des séquences déterministes de valeurs, conçues pour couvrir un certain domaine ainsi uniformément que possible, quelle que soit la taille de l'échantillon généré.

Un exemple d'application de la méthode de quasi Monte Carlo peut se trouver dans l'algorithme des séquences à faible discrédance imaginé par Sobol' (1967) et implémenté par Stephen Joe et Frances Y. Kuo, nommé algorithme 659. Bratley and Fox (1988) figure 3.2.

Une comparaison entre les méthodes de Morris, Monte Carlo et Quasi-Monte Carlo a été présentée dans les travaux de Kucherenko et al. (2009). En utilisant le même principe mais avec un échantillonnage Quasi Monte Carlo, Kucherenko démontre de façon expérimentale une meilleure convergence en comparaison avec l'échantillonnage MC pour six fonctions évaluées.

Pour l'analyse de sensibilité, d'après Kucherenko Kucherenko et al. (2009) la méthode de Quasi-Monte Carlo est la plus appropriée en termes d'efficacité. Elle permet l'amélioration de la précision des estimations des indices de Sobol et/ou permet la réduction du nombre des simulations.. En fait les séquences à faible discrédance (Quasi-Monte Carlo) et les séquences type grille (Méthode de Morris) ont le même objectif qui est de couvrir la plus grande partie de la zone de l'expérience numérique avec la moindre quantité de points d'évaluation.

Une explication possible de la meilleure efficacité de la méthode de quasi-Monte Carlo par rapport aux méthodes de Monte Carlo et Morris Kucherenko et al. (2009) peut provenir du fait que cette méthode se trouve juste au milieu des deux approches. En effet la discrédance permet d'établir un plan d'expériences « optimisé » dans le sens que les points couvrent d'une façon plus efficace l'espace de l'analyse (voir la figure 3.2 pour un exemple d'un plan d'expérience avec l'algorithme 659 avec différents nombres d'évaluations). Malheureusement nous n'avons pas eu de temps pour implémenter et tester cette approche QMC.

3.4 Relations entre la méthode de Morris et les méthodes de décomposition de la variance.

3.4.1 Quelques éléments théoriques et pratiques de comparaison.

Dans la méthode de Morris comme nous l'avons indiqué précédemment, l'utilisation de la moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires pour une variable x_i , (μ_i^*) , a été suggérée comme un indicateur unique de classement de l'importance des variables d'entrée.

4. L'expression originale « low discrepancy sequences » est traduite sous ces deux formes dans des documents en français : « Séquences quasi-aléatoires ». Racicot and Théoret (2006). « Séquences à faible discrédance » Tuffin (2006); Coulibaly (1997) Le mot « discrédance » n'est pas un néologisme ou un anglicisme mais un mot français tiré de l'oubli à l'occasion.

3.4. Relations entre la méthode de Morris et les méthodes de décomposition de la variance.

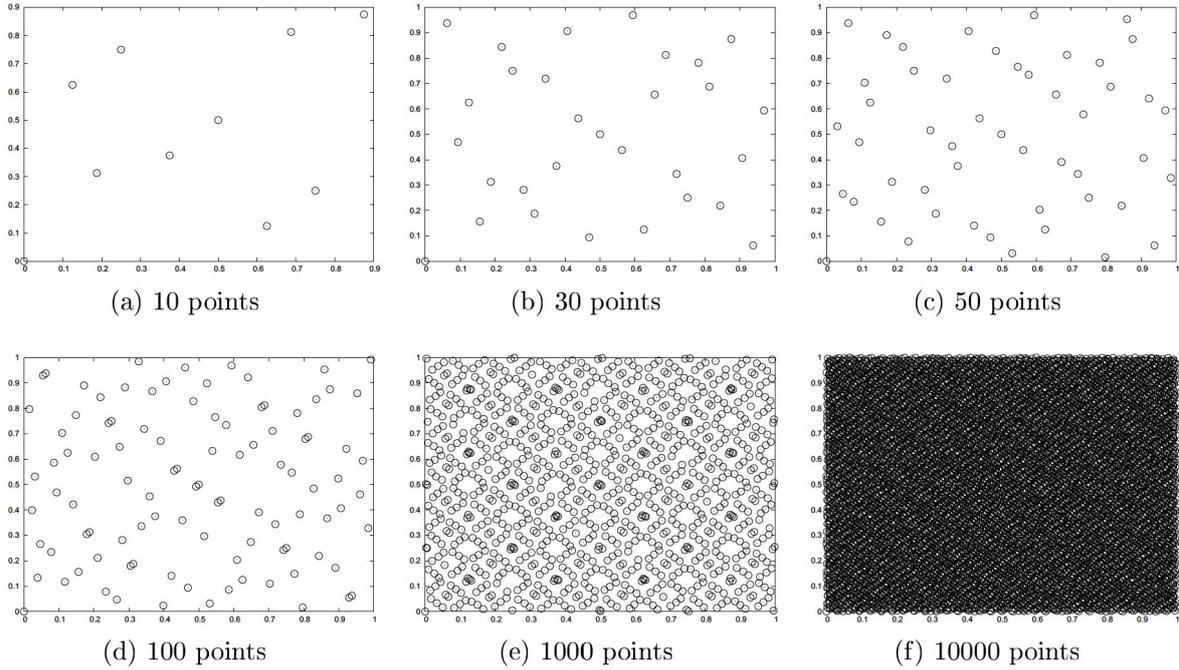


FIGURE 3.2 – Plan d’expériences de l’algorithme de quasi Monte Carlo proposé par Sobol et implémenté par Stephen Joe et Frances Y. Kuo, pour différentes tailles d’échantillon et deux variables d’entrée. Source : David Garcia, avec l’algorithme 659.

Lorsque l’information sur le signe de l’influence est importante, l’utilisation simultanée des moyennes μ_i^* et μ_i est recommandée (ou au minimum l’information sur le signe de μ_i).

Nous avons évoqué le fait que les effets élémentaires sont des approximations (très grossières) des dérivées premières de la fonction $f(\vec{x})$. Le prolongement du raisonnement permet alors de considérer μ_i^* comme une approximation (sans doute grossière aussi) de l’espérance des valeurs absolues des dérivées premières :

$$(\mu_i^*)' = \int_{H^n} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| dx \quad (3.35)$$

Par ailleurs, Sobol et Kucherenko ont proposé une relation entre les mesures de sensibilité basées sur la dérivée et l’indice de sensibilité totale de Sobol (défini à la section 3.3.1 et équation 3.27).

$$S_i^{tot} \approx \frac{1}{12D} \int_{H^n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 dx \quad (3.36)$$

Malheureusement, aucune estimation de l’erreur de cette approximation n’est donnée ; Sobol et Kucherenko recommandent de l’utiliser quand on suppose que les dérivées secondes sont négligeables.

On peut, à travers de ces deux relations imaginer une relation entre μ_i^* et S_i^{tot} ou au moins penser que μ_i^* puisse être utilisé en remplacement de S_i^{tot} pour classer les variables

par ordre d'importance. Les indices de Sobol totaux constituent en effet des indicateurs intrinsèques d'importance de différentes variables d'entrée et sont donc des références exactes. Lorsque la fonction f est analytique, dans certains cas, les indices de Sobol peuvent d'ailleurs être calculés analytiquement. Le principal inconvénient des indices de Sobol est le coût de calcul de l'analyse pour les évaluer avec suffisamment de précision, lorsque le calcul analytique n'est pas possible. Avec la méthode de Saltelli par exemple, le nombre nécessaire de simulations du modèle pour obtenir un ensemble complet des valeurs de S_i et de S_i^{tot} est donné par la formule 3.34, en prenant $N = 1000$ pour un modèle de 12 facteurs donc 14 000 simulations sont nécessaires. Le même modèle avec la méthode de Morris fonctionne en utilisant seulement 10 trajectoires soit 130 simulations avec une précision suffisante.⁵

3.4.2 Comparaison Morris et Sobol sur des fonctions test.

Nous rapportons ci-dessous deux exemples de comparaison directes des deux méthodes, à travers les indices μ_i, μ_i^* (Morris) et S_i^{tot} (Sobol), appliqués à deux fonctions tests analytiques et fortement non-linéaires. La première fonction test est une fonction à 20 variables proposée par Morris dans son article original Morris (1991), pour laquelle la comparaison des indices de Sobol et de Morris a été analysée par Campolongo Campolongo et al. (2007).

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^{20} \beta_i \omega_i + \sum_{i<j}^{20} \beta_{i,j} \omega_i \omega_j + \sum_{i<j<l}^{20} \beta_{i,j,l} \omega_i \omega_j \omega_l + \sum_{i<j<l<s}^{20} \beta_{i,j,l,s} \omega_i \omega_j \omega_l \omega_s \quad (3.37)$$

Chaque ω_i est une fonction d'une variable d'entrée x_i , $x_i \in [0, 1]$ $\omega_i = 2(x_i - \frac{1}{2})$ sauf pour $i = 3, 5$ et 7 , où $\omega_i = 2[1.1x_i / (x_i - 0.1) - \frac{1}{2}]$. Par ailleurs, les valeurs des paramètres β de la fonction sont les suivantes (comme proposé par Morris Morris (1991))

$$\begin{aligned} \beta_i &= +20, & i &= 1, \dots, 10, \\ \beta_{i,j} &= -15, & i, j &= 1, \dots, 6, \\ \beta_{i,j,l} &= -10, & i, j, l &= 1, \dots, 5, \\ \beta_{i,j,l,s} &= +5, & i, j, l, s &= 1, \dots, 4, \end{aligned} \quad (3.38)$$

Le reste des coefficients du premier et du second ordre sont générés aléatoirement selon la loi normale centrée réduite. Le reste des coefficients du troisième et du quatrième ordre sont nuls. Les indices totaux de Sobol sont évalués par méthode de Monte Carlo avec la version de Saltelli (2002).

Campolongo et al. ont comparé graphiquement les valeurs de la méthode de Morris μ et μ^* avec les indices totaux de Sobol S_i^{tot} . (voir figure 3.3). Ils concluent que l'utilisation de la moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires produits par la méthode de Morris (μ^*) produit des résultats plus cohérents avec les indices totaux de Sobol S_i^{tot} que la moyenne ordinaire μ_i .

5. Selon les expériences précédentes faites par Campolongo et Saltelli le choix de 10 trajectoires produit des résultats acceptables

3.4. Relations entre la méthode de Morris et les méthodes de décomposition de la variance.

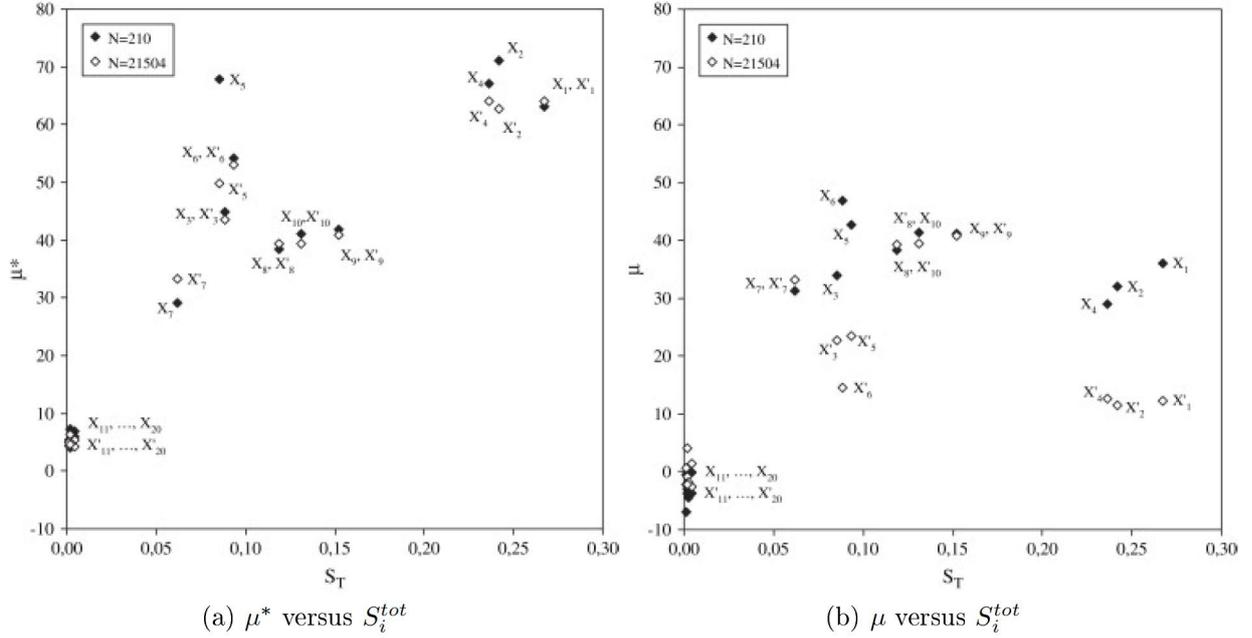


FIGURE 3.3 – Indices de Sensibilité de Morris (μ^* et μ) vs les indices de Sobol totaux évalués pour la fonction test de Morris. Les indices de Sobol sont estimés pour un coût de calcul $N = 21\ 504$, alors que les effets élémentaires de Morris sont calculées pour deux coûts différents de calcul ($N = 21504$ et $N = 210$). Source de l'image : (Campolongo et al., 2007)

Une concordance similaire est trouvé aussi par Campolongo et al. sur une autre fonction test analytique, la fonction-g de Sobol (Sobol 1990) (voir figure 3.4)

$$Y = \prod_{i=1}^k g_i(x_i) \quad (3.39)$$

Où

$$g_i(x_i) = \frac{|4x_i - 2| + a_i}{1 + a_i} \quad (3.40)$$

et a_i sont des paramètres dont les valeurs sont données dans le tableau 3.1.

Ces résultats fournissent de bons arguments en faveur de l'utilisation de la méthode de Morris. Tout d'abord ils constituent une démonstration empirique que les effets élémentaires de Morris μ^* sont une approximation acceptable des indices de sensibilité totale de Sobol S_i^{tot} . L'avantage de la méthode de Morris en termes de coût de calcul est spectaculaire avec un gain d'un facteur 10 à 100.

Les principales questions concernant la méthode de Morris ont été présentées. Leur rapport avec des indices de sensibilité plus complexes comme ceux de Sobol montre clairement que la méthode de Morris est un bon outil pour effectuer des analyses de sensibilité à

Facteur	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
a_i	0,001	89,9	5,54	42,10	0,78	1,26	0,04	0,79	74,51	4,32	82,51	41,62

TABLE 3.1 – Valeurs utilisées dans le calcul de la fonction-g de Sobol par Campolongo et al.

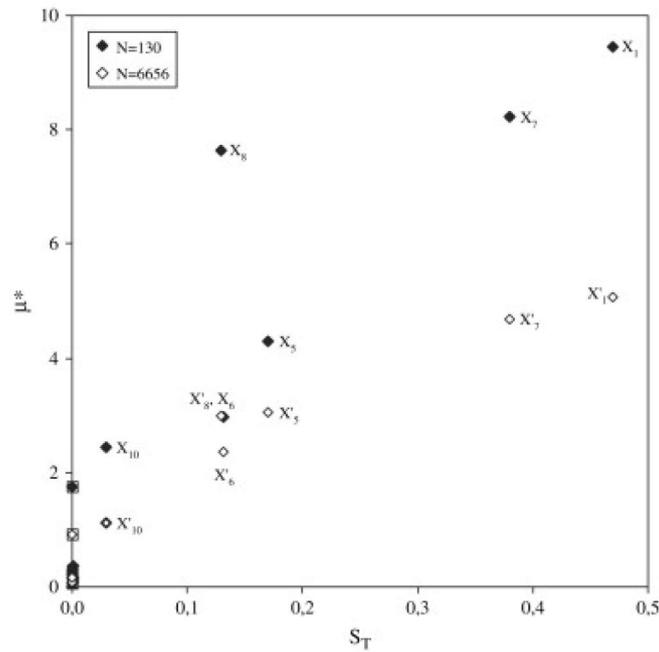


FIGURE 3.4 – Graphique de μ^* versus S_T^{tot} pour la fonction g . Les indices de Sobol sont estimés pour un coût de calcul de $N = 6656$, tandis que les valeurs des effets élémentaires de Morris sont calculés pour deux coûts différents de calcul ($N = 6656$, , et $N = 130$). source de l'image : (Campolongo et al., 2007)

un coût de calcul faible. Cependant, un des inconvénients de la méthode de Morris est qu'elle ne permet pas de distinguer les effets de non-linéarité pure d'une variable ou de courbure par rapport aux effets de ses interactions avec les autres variables. Les indices de Sobol, en définissant l'indice de premier ordre S_i et l'indice de Sobol total S_i^{tot} permettent de distinguer les deux : S_i correspond à la fraction de la variance de la réponse liée aux non-linéarités pures de la variable i (hors interactions). Dans la prochaine section, une extension de la méthode de Morris permettant l'analyse des interactions de second-ordre et des ordres supérieurs est expliquée.

3.5 Une extension de la méthode de Morris pour l'analyse des interactions entre variables d'entrée.

3.5.1 Les principes.

En plus de l'analyse de sensibilité du premier ordre par la méthode de Morris, une analyse des interactions entre les différentes variables d'entrée a été proposée par [Campolongo and Braddock \(1999\)](#).

Les deux principaux indicateurs de sensibilité dans la méthode de Morris, μ^* et σ , respectivement moyenne absolue et écart-type des effets élémentaires, montrent l'importance de chaque paramètre globalement et les effets des interactions et/ou les effets non-linéaires. En fait, la méthode de Morris du premier ordre fournit déjà des indications sur l'existence d'effets d'ordres supérieurs (non-linéaire ou interactions entre variables) quand elle retourne un écart-type des effets élémentaires non nul pour une variable d'entrée testée.

Nous supposons les mêmes propriétés de la fonction f qu'auparavant, comme indiqué dans la section 3.2.2. La méthode du deuxième ordre de Morris est également une méthode basée sur les dérivées. Comme les effets élémentaires du 1er ordre étaient des approximations des dérivées premières ($\partial f / \partial x_i$) de la fonction $f(x)$, les effets du deuxième ordre sont des approximations (toujours grossières compte tenu du pas de calcul utilisé) des dérivées partielles, $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$.

Comme dans l'analyse de Morris originale (1er ordre), ces effets sont évalués en différents points de l'hypercube H^n , en s'appuyant sur un plan d'expériences adéquat, comportant une part aléatoire. Comme précédemment, ces différentes estimations des effets élémentaires du 2^{ème} ordre font l'objet d'un traitement statistique (moyenne écart-type, et moyenne des valeurs absolues).

Nous pouvons écrire l'équation de calcul de ces effets du deuxième ordre

$$EE_{ij} = [f(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta_i + \vec{e}_j \Delta_j) - f(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta_i) - f(\vec{x} + \vec{e}_j \Delta_j) + f(\vec{x})] / \Delta_i \Delta_j \quad (3.41)$$

Nous utilisons les mêmes définitions que dans la section 3.2.2. Le vecteur \vec{e}_j est défini comme un vecteur de coordonnées nulles à l'exception du j -ème élément, égal à ± 1 ; de même pour le vecteur \vec{e}_i avec l' i -ème élément égal à ± 1 .

L'équation 3.41 peut être écrite sous une forme qui fait apparaître les effets élémentaires du premier ordre des variables i et j , EE_i et EE_j .

$$EE_{ij} = SEE_{ij} - [EE_i/\Delta_j] - [EE_j/\Delta_i] \quad (3.42)$$

Où SEE_{ij} est défini comme l'effet élémentaire de deuxième ordre attribué à la paire de paramètres d'entrée x_i et x_j ($1 \leq i < j \leq n$).

$$SEE_{ij} = (f(x + \vec{e}_i\Delta_i + \vec{e}_j\Delta_j) - f(\vec{x}))/\Delta_i\Delta_j \quad (3.43)$$

Rappelons que les effets élémentaires du premier ordre i et j sont (voir également l'équation 3.3).

$$EE_i = \frac{f(\vec{x} + \vec{e}_i\Delta_i) - f(\vec{x})}{\Delta_i} \quad (3.44)$$

$$EE_j = \frac{f(\vec{x} + \vec{e}_j\Delta_j) - f(\vec{x})}{\Delta_j} \quad (3.45)$$

Pour évaluer une valeur de chaque effet du deuxième ordre EE_{ij} soit $\frac{n(n-1)}{2}$ valeurs, Campolongo et Braddock proposent une trajectoire de $(k^2 - n + 2)$ simulations grâce à un plan d'expériences numériques adapté qui sera décrit à la section suivante.

Le plan d'expériences numériques proposé utilise la solution mathématique du problème associé à la théorie des graphes connu sous le nom des : « prisonniers menottés » (hand-cuffed prisoners), ainsi que la proposition des “cycles de Hamilton”⁶ pour optimiser le nombre de simulations nécessaires pour analyser ces interactions du deuxième ordre. Ce plan d'expériences est détaillé dans la section suivante. La possibilité d'obtenir des informations sur les effets supérieurs à deux (c'est à dire les interactions entre 3 variables ou plus) avec cette même méthodologie est discutée dans les travaux de [Campolongo and Braddock \(1999\)](#) mais elle n'a pas été testée.

Plusieurs trajectoires sont définies aléatoirement dans l'espace Ω_w pour évaluer plusieurs valeurs des effets EE_{ij} . La moyenne de la distribution des EE_{ij} obtenues par cet échantillonnage du vecteur \vec{x} dans l'espace de paramètres Ω_w [Cropp and Braddock \(2002\)](#); [Campolongo and Braddock \(1999\)](#), ainsi que leur écart-type sont les deux statistiques usuelles pour caractériser les interactions d'ordre deux entre les variables d'entrée x_i et x_j .

6. La solution du problème des « prisonniers menottés » est utilisée quand le total nombre des paramètres est pair et les cycles de Hamilton sont utilisés dans le cas où le nombre total des paramètres est impair. L'explication de l'expression « prisonniers menottés » est fournie à la section suivante.

3.5.2 La création d'un plan d'expériences efficace selon Campolongo et Braddock

En regardant l'équation 3.41, il est évident que le nombre d'évaluations de la fonction f nécessaires pour obtenir une valeur d'effet élémentaire du deuxième ordre est 4; (1) au point initial \vec{x} , les autres aux points $\vec{x} + \vec{e}_i\Delta_i$, $\vec{x} + \vec{e}_j\Delta_j$, $\vec{x} + \vec{e}_i\Delta_i + \vec{e}_j\Delta_j$. Campolongo et Braddock ont créé une stratégie d'échantillonnage afin de minimiser le nombre de simulations nécessaires pour évaluer un effet élémentaire de deuxième ordre [Campolongo and Braddock \(1999\)](#). Cette stratégie présente de fortes analogies avec le plan décrit par Morris pour les effets du premier ordre. Comme dans la méthode de Morris du premier ordre, le principal objectif de la stratégie est de définir une matrice d'expérience \mathbf{X} (équation 3.11 situé dans la section 3.2.2). (N, n) comportant pour chaque ligne, les n valeurs des variables d'entrée nécessaires à l'évaluation de la fonction $f(\vec{x})$. Le nombre des interactions de deuxième ordre ij , $i < j$ d'un modèle avec n paramètres d'entrée est,

$$\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3.46)$$

Pour simplifier la présentation nous nous limiterons ici au cas où n est pair. La matrice triangulaire basse \mathbf{B} utilisée dans la méthode de Morris a été introduite précédemment (eq. 3.10) et elle est rappelée ici

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Cette matrice \mathbf{B} caractérise la succession de points d'une trajectoire de Morris pour passer du point initial x_0 (représenté ici par la première ligne composée exclusivement de zéros) au point final x_n (la dernière ligne, uniquement composée de 1) avec la modification à chaque étape d'une coordonnée et d'une seule d'une quantité $\pm\Delta$. Ce changement de coordonnée concerne la variable i à la ligne $(i + 1)$, pour laquelle le coefficient de la matrice \mathbf{B} , $b(i + 1, i)$ passe de 0 à 1.⁷ La matrice \mathbf{B} permet ainsi d'estimer une valeur pour chaque effet élémentaire EE_i à partir de la différence des valeurs de la fonction f évaluées pour deux lignes successives de la matrice \mathbf{B} (les lignes i et $i - 1$). Mais cette matrice \mathbf{B} permet en outre le calcul de $(n - 1)$ effets élémentaires de deuxième ordre SEE_{ij} selon l'équation 3.43 : ils concernent le couple de variables (1, 2) (par différence des valeurs de la fonction f évaluées à partir des coordonnées des lignes 3 et 1), le couple (2, 3) (par différence des valeurs de la fonction f aux lignes 4 et 2), et ainsi de suite jusqu'à $(n - 1, n)$ (différence de f entre les lignes $n + 1$ et $n - 1$). La matrice \mathbf{B} définit

7. La matrice d'expérience \mathbf{B}^* est ensuite créée à partir de \mathbf{B} en générant de manière aléatoire les coordonnées du point initial et du point final ainsi que l'ordre de changement des coordonnées, correspondant à des permutations de colonnes de la matrice \mathbf{B} (cf. section 3.2.3 équation 3.9)

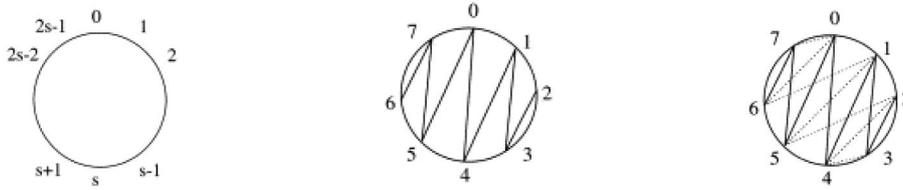


FIGURE 3.5 – Représentation graphique du problème des prisonniers menottés. De gauche à droite, une trajectoire générale, au milieu le premier pas avec $k = 8(s = 4)$ et finalement le deuxième pas avec $k = 8(s = 4)$, Source : [Campolongo and Braddock \(1999\)](#).

ainsi un chemin $(1;2;3;4;\dots;n-1;n)$ de modifications successives des variables à partir du point x_0 : ce chemin permet les évaluations des n effets élémentaires du premier ordre et de $(n - 1)$ effets élémentaires du 2ème ordre pour les couples de variables se suivant sur le chemin (par ex, pour la variable 3, sont prises en compte ses interactions avec les variables 4 et 2 qui, respectivement, la suivent et la précèdent sur le chemin). Un autre chemin, obtenu par n'importe quelle permutation des variables, se traduit par une nouvelle matrice \mathbf{B} où les colonnes sont soumises à la même permutation. Cette matrice permet elle aussi une estimation des n effets élémentaires du premier ordre (avec une trajectoire où les changements successifs de coordonnées ont lieu dans un ordre différent) et de $(n-1)$ effets élémentaires du 2ème ordre. Par exemple le chemin commençant par $(5,2,4,1,\dots)$ permet le calcul des effets élémentaires du deuxième ordre entre les couples de variables $(2,5);(2,4);(1,4)$

Si n est pair, [Campolongo and Braddock \(1999\)](#) ont démontré qu'on peut déterminer $n/2$ chemins différents (et $n/2$ matrices correspondant à autant de permutations des colonnes de la matrice \mathbf{B}) permettant une estimation de chacun des $n \times (n-1)/2$ effets élémentaires du 2ème ordre SEE_{ij} . Ces chemins solutions du problème sont liés à la solution mathématique du problème des prisonniers menottés traité par [Hung and Mendelsohn \(1977\)](#). Dans ce problème, il s'agit de trouver une solution pour que chacun des n prisonniers menottés en chaîne lors de leur promenade quotidienne ne se retrouve jamais menottés deux fois avec le même prisonnier au cours d'une période donnée. La chaîne de prisonniers menottés correspond à un chemin de n variables dans notre cas.

Hung et Mendelshon ont proposé une solution sous forme d'un chemin de base (avec $s = n/2$ et des éléments numérotés de 0 à $2s - 1$)

$$\langle \dots s + 2, 2s - 1, s + 1, 0, s, 1, s - 1, 2, s - 2, \dots \rangle \tag{3.48}$$

dont les permutations successives sont obtenues par rotation horaire d'une, deux, trois, ... positions (Figure 3.5). La séquence suivante convient également comme chemin initial

$$\langle \dots s + 1, 2s - 1, s, 0, s - 1, 1, s - 2, 2, s - 3, \dots \rangle \tag{3.49}$$

Ce qui donne avec des variables numérotées de 1 à $n=2s$

$$\langle \dots, s + 2, 2s, s + 1, 1, s, 2, s - 1, 3, s - 2, s - 2 \dots \rangle \quad (3.50)$$

L'empilement de ces $n/2$ matrices \mathbf{B}_k permet de définir la matrice d'expérience d'une trajectoire de Morris généralisée au deuxième ordre. Celle ci doit cependant être complétée par des lignes supplémentaires pour estimer certains effets élémentaires du premier ordre encore manquants, nécessaires à l'évaluation des effets d'interaction du deuxième ordre EE_{ij} (équation 3.42)⁸. Cette matrice d'expérience suppose au total $n^2 - 2 + 2$ simulations de la fonction f . Comme pour la méthode de Morris originale, plusieurs trajectoires sont générées aléatoirement avec un point initial et un ordre des variables tirés au hasard.

Dans le cas où le nombre de paramètres d'entrée n de la fonction f est impair, ce sont au total $(n+1)/2$ matrices d'orientation similaires à \mathbf{B}_k qui doivent être générées et la solution repose sur les cycles de Hamilton en théorie des graphes [Campolongo and Braddock \(1999\)](#). Cette situation est moins « économique » que le cas n pair car $(n^2 - n/2 + 2, 5)$ simulations de la fonction f sont nécessaires par trajectoire d'après [Campolongo and Braddock \(1999\)](#).

3.5.3 Le calcul des effets d'ordres supérieurs à deux.

Campolongo a proposé le calcul des effets élémentaires d'ordre supérieur à deux via le changement de plusieurs paramètres à la fois pour pouvoir estimer leur effet dans le résultat final. Par exemple, pour des effets élémentaires d'ordre m .

$$f(\vec{x} + \Delta_1 \vec{e}_1 + \Delta_2 \vec{e}_2 + \Delta_i \vec{e}_i + \dots + \Delta_m \vec{e}_m) - f(\vec{x}) \quad (3.51)$$

Donc il est possible d'utiliser la matrice \mathbf{B} pour l'estimation des $(k - (m - 1))$ effets élémentaires d'ordre m . Une procédure de génération de matrices similaires à la matrice \mathbf{B} par permutation de colonnes est envisagée pour créer une matrice d'expériences. Cependant, il est important de noter que le coût de calcul de cette méthodologie est de $\binom{k}{m}$ ce qui rend l'estimation en pratique irréaliste en termes de temps de calcul.

On se contentera donc, pour avoir une idée d'éventuels effets de 3ème ordre ou supérieurs de l'information fournie par l'écart-type des effets du second ordre, comme suggéré par ([Cropp and Braddock, 2002](#)). Une forte valeur de cet écart-type est le signe probable d'interactions d'ordre 3 ou supérieur avec d'autres variables d'entrée.

8. Par exemple, pour estimer une valeur de l'interaction du deuxième ordre EE_{12} , en plus des trois premières lignes de la matrice \mathbf{B} (eqn 3.54) il faut disposer de la simulation de la fonction f pour le point $(0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots)$ pour avoir l'effet élémentaire de la variable 2 dans des conditions comparables à l'effet élémentaire de la variable 1, c'est à dire pour la valeur 0 des variables 3, 4, 5, \dots , n .

3.6 Implémentation des codes de calcul d'analyse de sensibilité

Nous décrivons dans cette section les principales routines de calcul que nous avons implémentées et utilisées pour mettre en œuvre les méthodes d'analyse de sensibilité et algorithmes abordés dans ce chapitre. Les principales méthodes implémentées sont la méthode de Morris originale (premier ordre) [Morris \(1991\)](#) et son extension au deuxième ordre par Campolongo [Campolongo and Braddock \(1999\)](#); elles ont été appliquées à différents codes de calcul, notamment pour la simulation thermique dynamique de bâtiments

Pour évaluer les indices de sensibilité du 1er ordre de la méthode de Morris, nous utilisons le code de calcul original développé par F. Campolongo et J. Cariboni au Centre Commun de Recherche Européen (Joint Research Centre) à Ispra. La dernière version de ce code a été modifiée en Novembre 2005 par J. Cariboni et elle est disponible en ligne sur le site du JRC⁹

Le code est un ensemble de trois programmes Matlab

1. `Sampling_Function.m` cette routine crée la matrice d'expérience \mathbf{M} correspondant à l'équation 3.9 de la section 3.2.2. Les arguments d'entrée sont (1) nombre de paramètres n ; (2) nombre de niveaux p ; (3) le nombre des trajectoires r ; (4) un vecteur contenant les valeurs des bornes supérieures des n variables d'entrée x_1, \dots, x_n ; (5) un vecteur similaire pour les bornes inférieures; (6) Une matrice utilisée seulement dans le cas où une analyse par groupe de variables est mise en œuvre (voir [Campolongo and Braddock \(1999\)](#)).
2. `Morris_Measured_Groups.m` Cette routine utilise comme arguments les résultats de la routine précédente (la matrice d'expérience) ainsi que certains arguments d'entrée communs : (1) nombre de paramètres n ; (2) la matrice d'expérience \mathbf{M} ; (3) un vecteur de résultats de la fonction ou du modèle analysé (correspondant aux valeurs des variables d'entrées de la matrice d'expérience); (4) nombre de niveaux p ; (5) une matrice utilisée seulement dans le cas où une analyse par groupe de variables est mise en œuvre. La routine crée une matrice $n \times 3$ de résultats des indices de sensibilité de Morris pour chacune des variables d'entrée (μ , μ^* and σ).
3. `Optimized_Groups.m` Cette routine optimise le choix des trajectoires des variables d'entrée au sein de l'hypercube H^n de manière à maximiser la couverture de cet espace, selon une approche proposée par Campolongo. Elle utilise comme argument d'entrée la matrice d'expérience \mathbf{M} produite par la routine `Sampling_Function_2.m`. Il faut noter que cette routine n'est pas utilisée au cours de cette thèse.

Ces routines ont été transposées dans l'environnement Octave, environnement open-source très proche de Matlab, pour une exploitation complète sous Linux. On trouvera en annexe les versions complètes, Matlab et Octave, de ces routines

9. <http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu/software/Screening.zip>

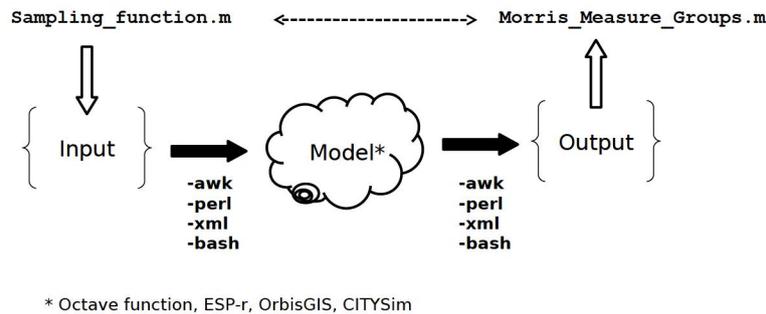


FIGURE 3.6 – Schéma des échanges de données entre routines de calcul pour évaluer les effets élémentaires sur un modèle ou une fonction.

Par contre, il n'existe pas de code source pour l'analyse des effets élémentaires du second ordre telle qu'elle a été proposée par Campolongo et Braddock [Campolongo and Braddock \(1999\)](#). Nous avons donc du développer nous-mêmes les routines correspondantes.

Un module d'échantillonnage a d'abord été mis au point pour la création de la matrice d'expérience de l'analyse des effets élémentaires du deuxième ordre. Nous nous sommes appuyés sur la structure du module `Sampling_Function.m` destiné à l'analyse du premier ordre. Nous l'avons complété et adapté, notamment en intégrant en sous-programme la génération de trajectoires selon l'algorithme des « prisonniers menottés »

Une deuxième routine effectue l'appel aux évaluations de la fonction ou du modèle « boîte-noire » à analyser, selon les valeurs de la matrice d'expérience, et réalise le calcul des effets élémentaires du deuxième ordre et leur post-traitement statistique (module équivalent au module `morris_measure_group.m` de l'analyse du premier ordre).

Une technique de découpage des simulations en sous-ensembles a été appliquée pour limiter le nombre de simulations lancées en une seule fois et réduire les risques de pertes de données.

En fait, en raison de la modularité du code de calcul Octave, on dispose d'une grande souplesse quant aux modules de calcul qui peuvent être appelés pour représenter la fonction $f(x)$ à analyser (modèle thermique dynamique ou autre). Tout programme Octave ou programme exécutable batch peut représenter cette fonction. L'application de l'analyse de sensibilité de Morris (1er ou 2ème ordre) à toute fonction ou programme « boîte-noire »¹⁰ peut ainsi en général être mise en œuvre de manière très simple. L'inconvénient principal peut évidemment être le temps calcul si l'évaluation de la fonction est longue car cette fonction est appelée, au minimum, plusieurs dizaines et plus généralement plusieurs centaines de fois.

A contrario, le programme ESP-r de simulation thermique dynamique, que nous avons utilisé comme cœur de calcul pour les applications présentées au chapitre suivant, a été plus difficile à coupler avec les routines d'analyse de sensibilité de Morris. Cela est dû

10. A la condition que les opérations d'entrées-sorties soient réalisées via des fichiers texte. Les fichiers de données d'entrée sont générés par un script en octave, qui peut aussi réaliser le post-traitement des fichiers de sortie

notamment à la structure complexe des fichiers texte d'entrée des données alimentant le logiciel ESP-r.

Chapitre 4

Application de l'analyse de sensibilité à la modélisation thermique des bâtiments

Une partie du travail lié à ce chapitre a été présenté lors de la Conférence CISBAT tenue à Lausanne (CH) en septembre 2011 [Garcia-Sanchez et al. \(2011\)](#) et accepté pour publication dans le journal Energy and Buildings.

Ce chapitre vise à illustrer l'application à un bâtiment test de certaines des techniques d'analyse de sensibilité, présentée précédemment. Il présente également l'utilité d'un couplage entre une analyse de sensibilité de premier ordre [Morris \(1991\)](#) et du deuxième ordre [Campolongo and Braddock \(1999\)](#), pour l'évaluation des résultats des modèles énergétiques du bâtiment. Ces approches ont été expliquées dans le chapitre précédent. Le modèle thermique dynamique utilisé pour cette analyse est ESP-r ([Strachan et al. \(2008\)](#)) et plusieurs sorties sur les besoins annuels de chauffage, le confort thermique, la puissance délivrée, ont été analysées.

4.1 Objectifs de l'analyse.

4.1.1 Objectifs généraux.

De nombreux outils ont été développés pour modéliser la consommation énergétique dans les bâtiments (EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, etc), en particulier pour les utilisations finales telles que le chauffage et le refroidissement, la ventilation et l'éclairage. Dans la

plupart des cas, ces modèles prennent en compte le couplage entre les phénomènes (par exemple les interactions entre l'occupation, le microclimat, l'enveloppe et les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air) à travers le couplage de différents sous-modèles spécialisés et en utilisant un grand nombre de variables d'entrée.

Dans ce domaine, comme dans d'autres, l'analyse de sensibilité peut aider à comprendre l'influence relative des paramètres d'entrée sur la sortie du modèle (Lomas and Eppel, 1992). Elle permet de classer les paramètres d'entrée (ou familles de paramètres), pour ensuite choisir les paramètres les plus appropriés à prendre en considération en fonction de l'objectif de la modélisation. Ceci est particulièrement intéressant lorsque, par exemple, l'objectif de la modélisation est lié à la conception du bâtiment ou de définir des typologies pour la modélisation d'un ensemble de bâtiments pour lesquels les informations sont difficiles à obtenir (dans la rénovation à grande échelle, par exemple). Une autre application correspond à la phase de développement des outils de modélisation, et plus précisément l'exploration des solutions de simplification des modèles ou la justification des choix des paramètres d'entrée qui doivent être considérés. Dans ces cas, et en fonction des objectifs de l'outil développé, certains sous-modèles (et les données d'entrée correspondantes) peuvent devenir secondaires. Une solution consiste à utiliser un modèle détaillé dans l'étape en amont, combiné avec une analyse de sensibilité afin de classer l'ensemble des paramètres et de déterminer le couplage entre eux. Puis, la sélection des variables les plus importantes contribue à définir la structure du modèle simplifié.

4.1.2 Les expériences de l'utilisation de la méthode de Morris dans l'analyse des simulations de thermique du bâtiment

Dans les simulations énergétiques pour les bâtiments, certaines études ont déjà été menées et ont testé les avantages de la méthode de Morris. Breesch and Janssens (2004) utilisent la méthode de Morris afin d'identifier les paramètres les plus importants, causes d'incertitude sur les performances prédites de la ventilation naturelle nocturne. Ils utilisent un modèle à deux zones thermiques avec un couplage entre le moteur de simulation thermique dynamique TRNSYS et le modèle d'infiltration COMIS . Cette analyse a révélé que les gains de chaleur internes, la température extérieure, et le coefficient de transfert de chaleur par convection dans la journée sont les paramètres ayant un impact important sur le confort thermique.

Brohus et al. (2009) appliquent la méthodologie pour réduire un ensemble initial de 75 paramètres d'entrée, afin d'obtenir une distribution précise de la consommation d'énergie. La méthode de Morris est également utilisée en tant que première indication des effets de corrélation ou non linéarités entre les paramètres et est comparée avec la méthode d'analyse de sensibilité FAST. Les résultats des deux analyses ont aidé à la création d'un facteur de sécurité à appliquer aux consommations d'énergie annuelles simulées pour avoir une idée de la consommation annuelle maximale au stade de la conception. Ceci assure que la consommation d'énergie maximale permise par la réglementation thermique ne sera pas dépassée.

de Witt (1997) compare la méthode de Morris avec la technique de bifurcation séquentielle en utilisant comme modèle un bureau mono-zone de 81 paramètres. Les deux techniques

ont trouvé le même ensemble de 12 paramètres importants qui expliquent 94% de la variabilité de la sortie du modèle : le nombre d'heures de surchauffe.

Corrado and Mechri (2009) ont analysé avec la méthode de Morris les besoins de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment de type « maison individuelle », à deux étages, située à Turin, pour calculer les incertitudes du diagnostic de performance énergétique du bâtiment. L'analyse de sensibilité montre que seulement 5 des 129 facteurs sont responsables de la plupart des incertitudes du DPE : la température intérieure, le taux de renouvellement d'air, le nombre d'occupants, le métabolisme et les gains de chaleur dus aux équipements.

Heiselberg et al. (2009) identifient les paramètres de conception les plus importants par rapport à la performance du bâtiment, en mettant l'accent sur une optimisation des bâtiments durables. Ils ont constaté que le taux de ventilation mécanique en hiver et le contrôle de l'éclairage sont les paramètres les plus influents, après avoir étudié un immeuble de bureaux de 7 étages.

Si différents travaux ont été réalisés en utilisant la méthode de Morris au premier ordre, son extension au deuxième ordre n'a, à ce jour, pas encore été appliquée dans le domaine de la simulation énergétique des bâtiments.

4.2 Description du bâtiment collectif test

Afin d'explorer le potentiel de la méthode des effets élémentaires, un bâtiment complexe multi-zone a été choisi comme un cas de test. Le choix d'un bâtiment de type collectif avec un fort niveau de détails est dû à la forte difficulté à modéliser les bâtiments de type collectif dans le parc de bâtiments. Ces types de bâtiments présentent, entre autres, des géométries complexes et des zonages fortement difficiles à déduire sans une enquête préalable de terrain. En raison de cela nous avons décidé de modéliser un bâtiment de type collectif très ressemblant aux bâtiments situés dans le quartier Saint Félix à Nantes (voir chapitre 5 pour plus d'information concernant la composition du quartier). Un des objectifs de cette analyse est de pouvoir en tirer plus d'information concernant l'influence des divers paramètres dans le résultat final. Cette analyse servira donc à pouvoir compléter notre choix de typologies pour le système MEDUS.

Ce bâtiment est un immeuble d'habitation de sept étages avec 32 logements et une population de 70 habitants (figure 4.1). Sa superficie au sol est de 3500 m². Les besoins énergétiques annuels moyens de chauffage sont de l'ordre de 67,59 kWh/m². Les informations concernant les caractéristiques thermiques des parois sont : surface vitrée de 40% composée principalement de double-vitrage (avec un coefficient U de 2,8 W/m²K), âge du bâtiment estimé à 10 ans et une paroi avec isolation extérieure (coefficient U pour les parois extérieures fixé à 0,47 W/m²K). Les valeurs du coefficient U de parois intérieures et les pertes par le sol ont été fixées à 4,4 W/m²K et 0,887 W/m²K, respectivement. Les obstructions lointaines ne sont pas prises en compte.

Concernant les données climatiques, ESP-r requiert un fichier de valeurs spécifiques horaires : éclairement solaire diffus sur le plan horizontal (W/m²), température de l'air

extérieur (degrés C x 10), l'éclairement solaire direct en incidence normale (W/m²), vitesse du vent (m/s x 10), direction du vent et humidité relative. L'année, la latitude et la longitude sont également nécessaires. Les données météo utilisées correspondent à une année type reconstituée.

Le bâtiment a été modélisé à l'aide du code de calcul ESP-r. Il est divisé en 24 zones thermiques (deux zones chauffées et une non-chauffée par niveau). Pour les données relatives aux matériaux de construction utilisés dans le bâtiment, un choix arbitraire a été fait pour la plupart des caractéristiques de matériaux (on rappelle que ce bâtiment n'est qu'un bâtiment test). L'approximation de ces caractéristiques thermiques a été faite selon l'approche décrite dans le chapitre 2 (regroupement de différentes sources : réglementation, traditions constructives...).

Par souci de simplification, le bâtiment est modélisé avec une représentation géométrique où les balcons sont traités comme des espaces fermés de l'enveloppe (voir figure 4.1). Les valeurs de rayonnement solaire diffus et direct ont été diminués de 60% pour tenir compte de manière forfaitaire des masques et de la présence de volets et de voilages.

4.3 Application de la méthode de Morris au bâtiment test

Pour modéliser le bâtiment en accord avec les changements induits par la méthode de Morris à chaque itération, un programme de conversion a été développé pour préparer les fichiers d'entrée ESP-r en fonction de l'échantillonnage de Morris. Les fichiers sont simulés avec un processus de récupération de données par lots pour plusieurs résultats : les charges de chauffage, les températures internes, le nombre total d'heures de chauffage. Puis les indices de Morris sont traités via un script octave. La grille p -dimensionnelle a été définie avec un valeur $p = 10$ pour toutes les expériences.

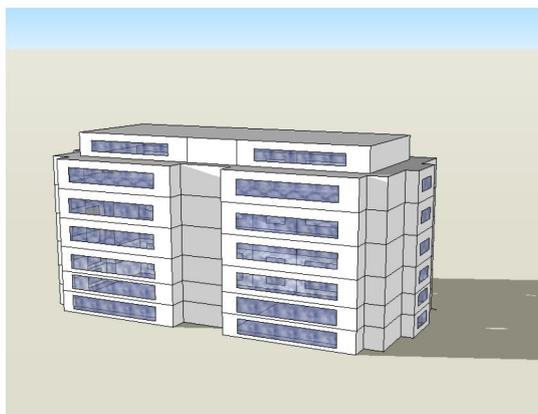


Figure 4.1: Bâtiment collectif esquissé avec Google Sketchup

4.3.1 Présentation des expériences numériques

Les expériences numériques ont été classées en deux ensembles différents (A, B) sur la base du nombre de paramètres intervenant dans l'analyse (voir le tableau 4.1 pour la définition de toutes les variables d'entrée et de leur intervalles).

Dans la série d'expériences (A), une analyse de sensibilité du premier ordre des effets, a été réalisée avec 24 paramètres. Certains de ces paramètres représentent des choix différents dans la conception du bâtiment : corrections pour la hauteur du bâtiment (entrée 1), la largeur (2) et la longueur (3), la rotation du bâtiment (24), épaisseur d'isolation (23) et rapports de vitrage sur les 4 façades (12-15).

Plusieurs paramètres caractérisent l'environnement du bâtiment : albédo été et hiver (16- et 17), facteur de vue du ciel (18). Des variables supplémentaires ont été introduites comme première tentative de quantification de l'effet (variable) des paramètres de microclimat local. Ces variables ont été traitées comme des termes correctifs multiplicatifs appliqués respectivement au rayonnement diffus (19) et direct (21), à la température de l'air (20) et à la vitesse du vent (22).

Enfin, plusieurs paramètres représentent l'influence –en tout ou partie- du comportement des occupants. Pour ces paramètres liés aux comportements, des valeurs communes pour toutes les zones chauffées, sauf une, ont été prises : les gains de chaleur dus aux occupants (8), la température de consigne (4), le taux de ventilation (10) et la différence de la température de consigne entre le jour et la nuit (6). L'objectif était de voir l'influence de ces paramètres communs par rapport aux facteurs climatiques et aux caractéristiques du bâtiment qui influent également sur l'ensemble du bâtiment. En outre, afin de déterminer l'influence relative de ces paramètres dans une seule zone thermique, l'appartement E42 (situé au quatrième étage) a été choisi arbitrairement pour modifier les paramètres uniquement dans cette zone spécifique¹. Cependant, les résultats spécifiques de cet appartement ne sont pas présentés ici, car ils n'affectent pas les résultats pour le bâtiment dans son ensemble (paramètres 5-7-9-11).

Pour la première expérience numérique (A), des intervalles assez larges ont été choisis pour toutes les variables d'entrée, ce qui représente la diversité des caractéristiques des immeubles d'habitation dans un contexte urbain à grande échelle (par exemple au niveau national), en ce qui concerne la taille, le ratio de vitrage, l'épaisseur de l'isolant et la ventilation. De la même manière, de grands intervalles ont été pris pour les variables relatives à l'environnement du bâtiment (notamment le climat) et l'occupation. Néanmoins, les valeurs adoptées demeurent représentatives des variations ou des incertitudes habituellement considérées. C'était un choix délibéré de commencer avec un tel scénario de «maximum de variabilité» afin d'être représentatif des immeubles d'habitation au niveau national, dans une approche plutôt exploratoire. Une application possible pourrait

1. Une expérience préliminaire d'application de la méthode de Morris (non rapportée ici) avait été réalisée sur la base de 82 variables (dont certaines variables de comportement définies par zone). Elle a permis d'établir les bases des expériences numériques A et B et nous a notamment incité à séparer une zone témoin et toutes les autres zones.

N	Paramètre	Intervalles		
		1 (large)	2 (petit)	Experience
1	Taille du bâtiment: correction de hauteur [%]	50-150	A1	
2	Taille du bâtiment: correction de largeur [%]	50-150	A1,B1,B2	90-100 B3,B4
3	Taille du bâtiment: correction de longueur [%]	50-150	A1,B1,B2	90-100 B3,B4
4	Température de consigne pour tous les appartements sauf Apt.E42 [C]	17-24	A1,B1,B2	20-22 B3,B4
5	Température de consigne pour l'appartement E42 [C]	17-24	A1,B1,B2	20-22 B3,B4
6	Différence de temp. consigne jour/nuit pour tous les Appartements sauf E42 [C]	0-8	A1,B1,B2	0-1 B3,B4
7	Différence de temp. de consigne jour/nuit pour l'appartement E42 [C]	0-8	A1	
8	Occupants de tous les appartement sauf Apt. E42 [occ/app]	1-8	A1,B1,B2	3-4 B3,B4
9	Occupants de l'appartement. E42 [occ/app]	1-8	A1	
10	Taux de ventilation de tous les appartements sauf Apt. E42 [%]	40-100	A1,B1,B2	80-90 B3,B4
11	Taux de ventilation de l'appartement E42 [%]	40-100	A1	
12	Taux de vitrage sur la façade A [%]	5-50	A1,B1,B2	45-50 B3,B4
13	Taux de vitrage sur la façade B [%]	5-50	A1	
14	Taux de vitrage sur la façade C [%]	5-50	A1	
15	Taux de vitrage sur la façade D [%]	5-50	A1	
16	Reflectivité du sol [%]	20- 30	A1	
17	Reflectivité du sol en hiver [%]	30-50	A1	
18	Facteur du vue du ciel [%]	30-40	A1	
19	Sensibilité climatique: correction pour le rayonnement diffus [-]	0.2-1	A1,B1,B2	0.9-1 B3,B4
20	Sensibilité climatique: correction pour la température extérieure [-]	0.2-1	A1	
21	Sensibilité climatique: correction pour le rayonnement normal direct [-]	0.2-1	A1,B1,B2	0.2-1 B3,B4
22	Sensibilité climatique: correction pour la vitesse de l'air [-]	0.5-1	A1	
23	Epaisseur de l'isolant [mm]	5-100	A1,B1,B2	90-100 B3,B4
24	Rotation du bâtiment [degrés]	0-180	A1,B1,B2	0-10 B3,B4

Table 4.1: Intervalles de variation des paramètres utilisés dans les expériences de Morris réalisées (premier et second ordre).

consister à identifier les données à collecter en priorité pour une bonne description du parc immobilier dans une région ou un pays.

Dans les expériences de second ordre de Morris (série B), seulement 12 des 24 paramètres de l'expérience précédente ont été sélectionnés. Ce choix a été fait principalement en raison du coût élevé de calcul de l'analyse du deuxième ordre, et sera détaillé plus loin.

4.3.2 Le choix des intervalles pour les paramètres d'entrée utilisés dans l'analyse de sensibilité.

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 3, le choix de l'intervalle de chaque paramètre est une étape importante pour l'analyse de sensibilité. Comme dans la sélection des paramètres d'entrée, la sélection des intervalles des différents paramètres est dépendant des objectifs de l'analyse. Nous avons choisi de traiter deux cas : un cas avec de grands intervalles et un cas avec de petits intervalles, les deux cas répondent à des objectifs différents et le choix des paramètres a été fait également pour répondre à diverses questions concernant individuellement chaque paramètre, mais avec l'objectif primordial de tester la puissance des méthodes de Morris.

4.3.2.1 Hypothèses prises pour les petits intervalles.

Le petit intervalle a été choisi pour représenter un cas d'analyse des incertitudes. Ces incertitudes sont associées à des incertitudes de mesures, de mode constructif, des propriétés thermiques ou physiques des matériaux utilisés dans la construction ou à des incertitudes liées au comportement des usagers et aux paramètres associés, parmi d'autres. Pour les corrections de la taille du bâtiment (largeur et longueur), une fourchette de $\pm 5\%$ a été utilisée, pour représenter l'incertitude liée à l'absence des plans du bâtiment évalué, ce qui est une réalité dans bien des situations de modélisation des bâtiments existants.

Les paramètres fortement liées au comportement des usagers du bâtiment comme la température de consigne, la différence entre le jour et la nuit, et l'occupation sont des paramètres à forte variabilité et avec une tendance stochastique. Nous avons choisi un scénario idéal, supposant ces paramètres relativement bien connus : $\pm 1\text{ C}^\circ$ pour la température de consigne, $\pm 0.5\text{ C}^\circ$ pour le ralenti de nuit, ± 0.5 personne/appartement pour les apports gratuits des occupants. Dans une situation d'audit réel, il est probable que les incertitudes de comportements sont beaucoup plus importantes, notamment pour ce qui concerne les apports gratuits liés aux occupants et aux équipements, sans compter bien sûr la méconnaissance des profils temporels.

Le renouvellement d'air est une source importante de déperditions d'énergie dans le bâtiment. Il est soumis à une contrainte forte au niveau réglementaire pour garantir le confort et l'état de santé du logement. Nous nous sommes placés là aussi dans une situation idéale où le taux de renouvellement d'air est supposé connu assez précisément (± 0.05 volume/heure), suite à des mesures in situ spécifiques.

En termes de caractéristiques du bâtiment, on a retenu une configuration de bâtiment plutôt récent, assez bien isolé (90-100 mm d'isolant), associée à un taux de vitrage assez élevé (45 à 50%, cadre inclus), avec peu d'incertitudes.

4.3.2.2 Hypothèses prises pour les intervalles larges.

Pour le grand intervalle, l'objectif principal de l'analyse de sensibilité est le test de tout l'espace des possibilités dans le choix des paramètres. Pour les paramètres de taille du bâtiment (facteur de correction pour la hauteur, la largeur et la longueur du bâtiment) l'objectif d'un intervalle assez large ($\pm 50\%$) était de tester des variantes de morphologies et de tailles assez diverses. La variation de la hauteur peut représenter aussi bien une variation de la hauteur sous plafond que, de manière indirecte, une modification du nombre d'étages.

Les taux de vitrage des 4 faces du bâtiment et leurs orientations ont été établies également pour explorer une diversité de bâtiments. L'épaisseur d'isolant couvre toutes les situations depuis un bâtiment dépourvu d'isolation jusqu'au bâtiment bien isolé (5 à 100 mm d'isolant). Idem pour la ventilation avec un taux de renouvellement d'air entre 0,4 et 1 volume/heure.

Ces choix peuvent correspondre à deux problématiques assez différentes mais conduisant à des choix d'intervalles assez similaires. Dans une perspective d'exploration de solutions au niveau de la conception, on peut souhaiter avoir la vision la plus large a priori des possibilités, y compris de choix manifestement absurdes, compte tenu notamment du contexte réglementaire. Dans ce cas, la plupart des variables d'entrée précédentes correspondent à des variables de décision pour le concepteur. Dans une perspective d'analyse du parc de bâtiments réels à l'échelle d'un pays ou d'une région, on retrouve une variabilité similaire mais les intervalles choisis correspondent davantage (très grossièrement) à la dispersion statistique de ces paramètres à l'intérieur du parc. Aller plus loin dans l'analyse d'incertitudes à l'échelle d'un parc nécessiterait de préciser ces distributions statistiques par des travaux complémentaires d'enquête. En tout état de cause, l'analyse de sensibilité peut fournir des indications intéressantes sur les paramètres à privilégier pour de telles enquêtes.

Pour les paramètres liés aux comportements des occupants (températures de consigne et apports gratuits), des intervalles très larges ont aussi été adoptés (17 à 24 °C pour la température de consigne jour ; 0 à 8°C pour le ralenti nocturne ; 1 à 8 équivalents-occupants par appartement). Dans une perspective d'analyse d'incertitude, ils traduisent le large degré d'imprécision sur ces paramètres, même si le choix des intervalles retenus comporte ici aussi une part d'arbitraire.

4.3.2.3 Présentation des résultats

Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés sous forme de nuages de points, avec un point pour chaque variable d'entrée i : l'axe x représente la moyenne absolue (μ_i^*) et l'axe y représente l'écart-type des effets élémentaires (σ_i) (voir les figures 4.3 à 4.6, par exemple).

La moyenne absolue (μ_i^*) a été introduite au chapitre 3 comme une mesure d'importance du paramètre d'entrée i . Cette information peut être complétée par le rapport (σ_i/μ_i^*) comme un indicateur de la linéarité (ou de la non linéarité), ainsi que justifié ci-dessous.

Faisons, tout d'abord, une remarque préliminaire en regardant une variable d'entrée i : si toutes les estimations EE_{it} des effets élémentaires ont le même signe, on peut dire que ce paramètre d'entrée i a un effet monotone sur la réponse y , qui augmente ou diminue en fonction du signe des effets élémentaires. Dans ce cas, μ_i^* est égal à la valeur absolue de μ_i . L'inverse est également vrai : si $\mu_i^* = \text{abs}(\mu_i)$, l'effet du paramètre d'entrée i est monotone.

En utilisant des propriétés statistiques connues, si la distribution des effets est supposée normale, 95% des estimations des effets élémentaires se situent dans l'intervalle $(\mu_i \pm 1.96 \sigma_i)$. En conséquence, si σ_i/μ_i est inférieure à 0,10, la plupart des effets élémentaires (95%) sont dans un intervalle de $\pm 20\%$ autour de μ_i : les effets élémentaires sont presque constants et la variable d'entrée i a un effet pratiquement linéaire sur le modèle. Une réponse parfaitement linéaire de la fonction f vis à vis de la variable i correspond à $\sigma_i/\mu_i = 0$.

Si le rapport σ_i/μ_i est inférieur à 0,5, la plupart des effets élémentaires (95% avec l'hypothèse normale) ont le même signe et la réponse du modèle peut être considérée comme monotone par rapport au facteur d'entrée i . En outre, dans ce cas, on peut considérer que $\mu_i \approx \text{abs}(\mu_i)$ et $\sigma_i/\mu_i^* \approx \sigma_i/\text{abs}(\mu_i)$. Ce fait justifie d'utiliser le rapport σ_i/μ_i^* comme un indicateur de quasi linéarité (si $< 0,1$) ou de variation monotone (si $< 0,5$).

Comme la distribution des effets élémentaires peut être assez éloignée de la normale, une autre justification est présentée dans la figure 4.2 avec un nuage de points de (σ_i/μ_i^*) vs $\sigma_i/\text{abs}(\mu_i)$ pour toutes les analyses de premier ordre effectuées dans le présent travail (séries A1 et B1, B2). Ce diagramme montre que, pour $\sigma_i/\text{abs}(\mu_i)$ inférieur à un, la plupart des points sont sur la bissectrice $(\sigma_i/\mu_i^*) = \sigma_i/\text{abs}(\mu_i)$, indiquant un comportement monotone (ou quasi monotone) dans un intervalle plus large que prévu (et pas seulement $< 0,5$). Pour des effets élémentaires très dispersés ($\sigma_i/\text{abs}(\mu_i) > 1$), un comportement non-monotone est clairement établie et dans ce cas (σ_i/μ_i^*) reste dans l'intervalle entre 1 et 2. La moyenne des valeurs absolues μ_i^* est très différente de la valeur absolue de la moyenne $\text{abs}(\mu_i)$ et plus influencée par l'écart-type σ_i .

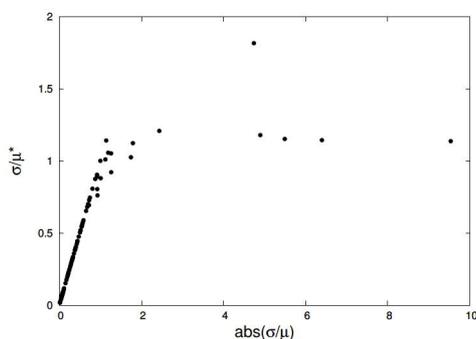
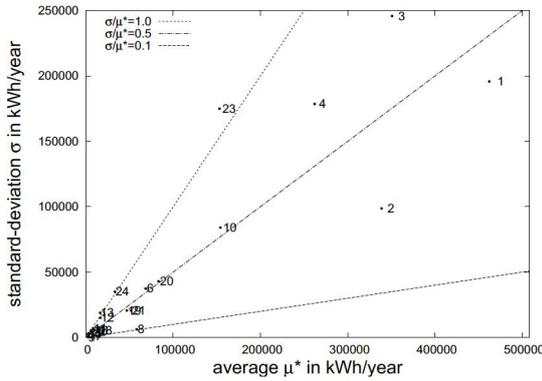
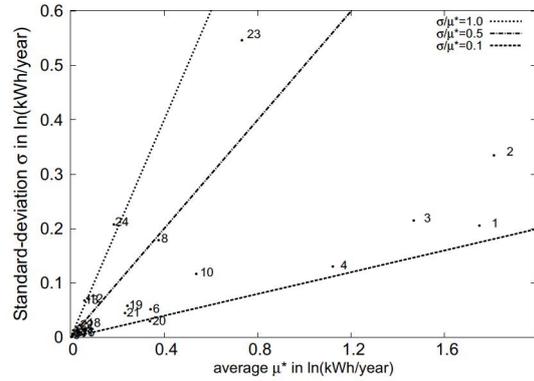


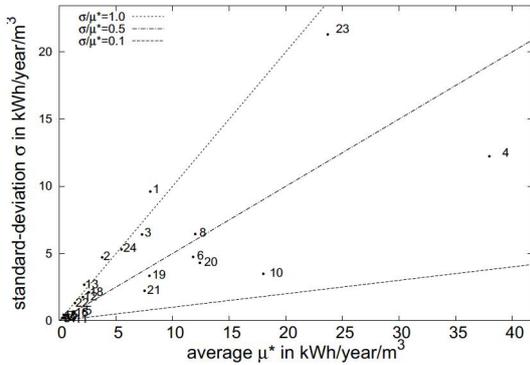
Figure 4.2: Nuage de points de (σ_i/μ_i^*) vs $\sigma_i/\text{abs}(\mu_i)$ pour toutes les analyses de premier ordre effectuées dans le présent travail (séries A1 et B1, B2).



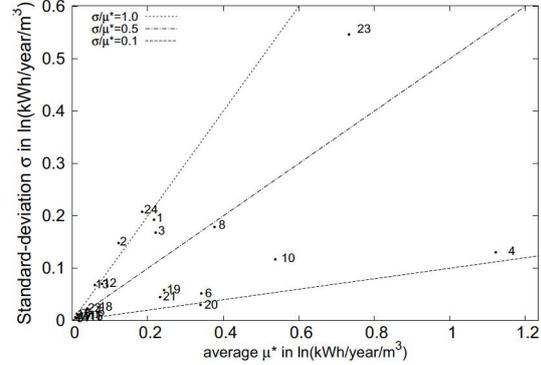
(a) Analyse des effets élémentaires liés aux besoins annuels en chauffage avec un grand intervalle et $r = 10$.



(b) Analyse des effets élémentaires liés au logarithme népérien des besoins annuels en chauffage avec un grand intervalle et $r = 10$.



(c) Analyse des effets élémentaires liés aux besoins annuels en chauffage par mètre cube avec un grand intervalle et $r = 10$.



(d) Analyse des effets élémentaires liés au logarithme népérien des besoins annuels en chauffage par mètre cube avec un grand intervalle et $r = 10$.

Figure 4.3: Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier ordre des besoins de chauffage du bâtiment collectif test simulés par ESP-r (grands intervalles de variation des paramètres, expérience A1).

Ainsi, en traçant trois lignes droites de pentes $\sigma/\mu^* = 0,1, 0,5$ et 1 respectivement, nous pouvons identifier dans le diagramme de dispersion des effets élémentaires, les facteurs qui sont quasi linéaires (en dessous de la ligne $\sigma/\mu^* = 0,1$), monotones ($0,5 > \sigma/\mu^* > 0,1$) ou presque monotone ($1 > \sigma/\mu^* > 0,5$), et les facteurs avec une forte tendance non-monotone et non-linéaire ou avec des interactions avec des autres paramètres d'entrée ($\sigma/\mu^* > 1$).

La définition de ces quatre zones fournit également un moyen de vérifier les résultats de l'analyse de sensibilité si les résultats sont contradictoires avec ce qui peut être « logique » du point de vue physique.

Pour quelques-unes des figures ci-dessous (Fig. 4.5c, 4.5d, 4.6c et 4.6d, par exemple), une présentation légèrement différente des données a été utilisée, avec le rapport σ_i/μ_i^* sur

l'axe vertical (les différents domaines définis ci-dessus comme linéaire, monotone et fortement non-linéaire se distinguant par des lignes horizontales). Cette présentation fournit exactement la même information par rapport au format présenté précédemment, mais il est parfois plus facile à lire car elle permet de mieux séparer les différents points et faciliter leur lecture.

4.3.3 Résultat de l'expérience numérique A (premier ordre)

Pour la première série d'expériences numériques (ensemble A), plusieurs caractéristiques des résultats de sortie ont été examinées à l'aide de l'analyse des effets élémentaires du premier ordre : la charge de chauffage annuelle (Fig. 4.3a), ainsi que trois sorties dérivées de cette dernière (la charge de chauffage par m^3 ; transformation logarithmique) (Fig. 4.3b - 4.3d), la distribution de puissance de chauffage (avec l'exemple de la puissance dépassée pendant 1000 heures / an) (Fig. 4.4b) et le facteur de confort d'été, en utilisant la température interne moyenne en Juillet-Août (Fig. 4.4a).

Avant de présenter les résultats, il est important de rappeler la définition des effets élémentaires : une valeur de l'effet élémentaire pour la variable d'entrée i correspond à une variation de la sortie lorsque l'entrée i varie entre le minimum (0) et le maximum (1). Par exemple, dans la figure 4.3a, l'effet moyen élémentaire pour la hauteur du bâtiment (entrée 1) a une valeur de 470 000 kWh/an. C'est l'influence moyenne d'une modification de la hauteur du bâtiment de 9 m à 27 m (hauteur nominale est de 18 m, corrigée de $\pm 50\%$). Pour le bâtiment analysé et les grands intervalles pris pour les paramètres d'entrée, les besoins en énergie annuels sont dans la gamme de 57 587 kWh/an à 788 894 kWh / an.

La première analyse, basée sur la charge de chauffage annuelle (Fig. 4.3a) met en évidence les paramètres dimensionnels (numérotés 1, 2 et 3), indiquant un effet de taille typique : la taille du bâtiment est l'influence majeure sur la demande de chauffage. Ensuite, un deuxième groupe de paramètres d'entrée s'affiche avec une influence significative : température de consigne (4), le taux de ventilation (10) et épaisseur de l'isolant (23). Les autres paramètres peuvent être classés comme moins importants, quoique non négligeables pour un certain nombre d'entre eux (6, 8, 12, 13, 19, 20, 21, 24) et seront discutés ci-dessous dans cette section. Un seul paramètre a un effet presque linéaire (gains de chaleur des occupants, 8) avec σ/μ^* proche de 0,1. Tous les autres paramètres montrent une influence non-linéaire et / ou des interactions avec d'autres paramètres ($\sigma/\mu^* > 0,5$ pour beaucoup d'entre eux). Néanmoins, ils restent généralement dans la zone monotone ($\sigma/\mu^* < 1$) à l'exception notable de l'épaisseur d'isolation (23).

Une tentative d'éliminer l'effet de taille est faite à travers l'analyse de la charge de chauffage annuelle par mètre cube, la charge divisée par le produit des 3 paramètres dimensionnels (Fig. 4.3c). Le deuxième groupe de paramètres identifiés dans le premier cas (4, 10 et 23) devient maintenant prédominant, avec un comportement plus proche du linéaire pour la température de consigne (4) et le taux de ventilation (10) (σ/μ^* de 0,3 et 0,2, respectivement).

Un troisième groupe de paramètres est souligné par cette présentation, comprenant les facteurs liés aux occupants (les gains de chaleur, 8, et le réglage de la température de nuit, 6), aux gains solaires (diffus, 19, et direct, 21, le potentiel de rayonnement; la rotation du

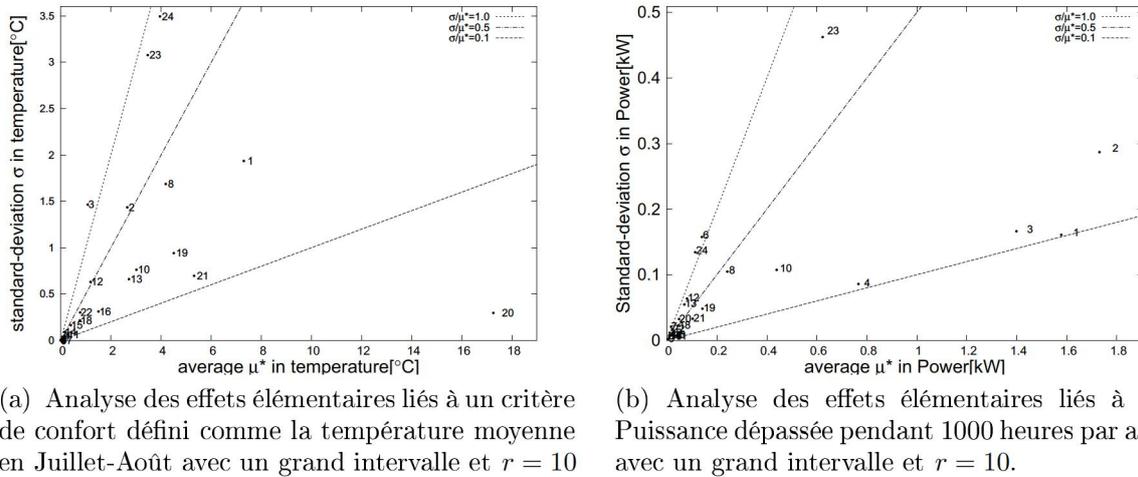


Figure 4.4: Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier ordre sur le bâtiment collectif test pour deux critères thermiques complémentaires simulés par ESP-r (grands intervalles de variation des paramètres, expérience A1).

bâtiment, 24; le ratio de vitrage sur les façades principales, 12 et 13) et à la sensibilité climatique liée à l'environnement du bâtiment (température extérieure, 20). Par rapport à la figure 4.3a, tous ces paramètres coïncident avec ceux déjà identifiés comme secondaires mais non négligeables.

L'importance de paramètres dimensionnels (1, 2 et 3) est nettement réduite, mais ils restent parmi les variables non-négligeables et contribuent à une forte non-linearité du modèle (σ/μ^* proche de 1).

Une transformation logarithmique est appliquée aux besoins de chauffage pour identifier les interactions possibles causées par les effets multiplicatifs (Figure 4.3b pour la charge de chauffage annuelle et 4.3d pour la charge de chauffage par mètre cube). La transformation logarithmique est souvent utilisée pour l'analyse statistique des variables positives avec des variations de plusieurs ordres de grandeur ou lorsque des phénomènes multiplicatifs peuvent être supposés. Si la fonction réponse peut être exprimée comme une fonction multiplicative de diverses entrées $x_1, x_2, x_3 \dots y(x) = f_1(x_1) \times f_2(x_2) \times f_3(x_3) \dots$, les effets élémentaires de y par rapport aux variables d'entrée $x_1, x_2, x_3 \dots$ sont fortement influencés par les interactions entre $x_1, x_2, x_3 \dots$ et les écarts-types respectifs de leurs effets élémentaires peuvent prendre des valeurs élevées. Le logarithme de $y(x)$ sépare les termes $\ln(y(x)) = \ln(f_1) + \ln(f_2) + \ln(f_3) \dots$ et élimine les interactions : pour la sortie logarithme, l'écart-type de l'EE ne dépend que de la courbure des fonctions $\ln(f_1), \ln(f_2), \ln(f_3) \dots$. Un autre avantage de la transformation logarithmique naturelle est l'interprétation des effets élémentaires comme des taux de variation de la sortie, tout au moins lorsque la valeur reste faible (typiquement $<0,5$). Par exemple, en ce qui concerne «la différence de température de consigne entre le jour et la nuit», la variable d'entrée (6), l'effet moyen élémentaire (exprimé en logarithme) est de 0,35 (ici une diminution, soit de -0,35)(figure

4.3d). Cela signifie qu'une modification sur toute l'échelle de cette entrée (de 0 K à 8 K) conduit à une variation de 35% dans le chauffage des locaux, en moyenne.

La transformation logarithmique fournit des résultats cohérents avec les précédents : les mêmes paramètres d'entrée sont considérés comme importants et non-importants avec environ le même classement et des groupements similaires. L'utilisation d'une transformation logarithmique met en évidence certains facteurs ayant des effets multiplicatifs partiels, principalement pour les paramètres liés à la température : la température de consigne (4), la réduction de la consigne entre le jour et la nuit (6) et la température extérieure (20). Leurs ratios σ/μ^* sont tous à la fois réduits de manière significative en comparaison avec la figure 4.3a et 4.3b, et sont proches de 0,1.

D'autres paramètres restent non linéaires avec la transformation logarithmique, tels que les paramètres liés au rapport de vitrage (12, 13), la rotation (24) et l'épaisseur de l'isolant (23). On peut noter que les deux présentations (Fig. 4.3b et 4.3d) dans la transformation logarithmique donnent exactement les mêmes coordonnées pour tous les paramètres d'entrée, sauf pour les paramètres dimensionnels (1, 2 et 3).

On peut déjà conclure à ce stade que toutes les présentations montrent des résultats cohérents en termes de paramètres prédominants. La forte variabilité de la quasi-totalité des paramètres encourage l'utilisation d'une méthodologie pour analyser les effets des interactions et des non-linéarités. Il est à noter que les paramètres les plus importants dans l'analyse (la température et la température de consigne) sont conformes à une analyse similaire effectuée par Brohus et al. [Brohus et al. \(2009\)](#) pour un modèle de maison unifamiliale isolée faisant varier 71 paramètres d'entrée.

Par contre, d'après nos analyses, le ratio de vitrage semble être moins important pour la sortie du modèle de la demande d'énergie pour le chauffage. Des conclusions similaires ont également été signalées par Gasparella et al. ([Gasparella et al., 2011](#)) qui ont fait une analyse de différents types de vitrage dans un immeuble de grande taille isolé avec un pourcentage élevé de double vitrage.

La méthode d'analyse de sensibilité de Morris a été également appliquée à la température interne moyenne durant les mois de Juillet et Août (Figure 4.4a) et à une caractéristique de la distribution de puissance appelée, la puissance dépassée pendant 1000 heures (Figure 4.4b). L'objectif était de montrer l'applicabilité de cette méthode pour différents types de sortie. En comparant les figures 4.3b et 4.4b, nous pouvons conclure qu'il existe une forte relation entre la sortie des besoins de chauffage en $\ln(\text{kWh/an})$ et la courbe monotone de puissance. Seule la différence de température de consigne entre la nuit et le jour (6) devient moins importante en termes d'effets élémentaires moyen, mais avec un écart-type plus élevé. Au contraire, le critère de confort (Figure 4.4a) montre un comportement très différent. Le paramètre d'entrée le plus important est la température extérieure avec un effet très linéaire. Les paramètres importants suivants (avec une valeur élevée μ_i^*) sont liés à l'environnement ou la géométrie du bâtiment. Selon la figure 4.4a, le rapport du vitrage de la face B (paramètre 13) semble avoir plus d'importance dans la variabilité de la température moyenne intérieure par rapport aux autres faces (paramètres 12, 14 et 15). Cela implique que le paramètre 13 pourrait avoir un impact majeur sur le niveau de confort du bâtiment. Les mêmes conclusions peuvent être faites par l'analyse des paramètres géométriques (1, 2 et 3). Ainsi, la méthode de Morris pourrait également servir comme

outil de diagnostic pour aider les concepteurs à évaluer l'impact du bâtiment sur un niveau de confort et à analyser plus en profondeur la sensibilité du bâtiment en termes de gains solaires.

4.3.4 Résultats de l'expérience numérique B (2eme ordre)

Pour compléter l'analyse effectuée avec l'approche de Morris du premier ordre A, les expériences B1 à B4 ont été réalisées en se concentrant sur l'étude des interactions du second ordre. En raison du coût élevé de calcul de l'analyse du second ordre (5760 simulations avec une valeur k de 10), un sous-ensemble de seulement 12 paramètres, à partir des 24 paramètres d'entrée initiaux, a été sélectionné (voir le tableau 4.1). Les paramètres ayant une influence négligeable ont été omis (et fixés à une valeur normale) et les paramètres importants (à partir de l'expérience A) ont été conservés avec des exceptions pour certains paramètres qui jouent des rôles similaires : parmi les paramètres liés à la taille (1, 2, 3), la hauteur a été omise et parmi les ratios de vitrage des façades (11, 12, 13, 14), seule une façade (11) a été maintenue. En outre, l'analyse a été effectuée pour deux tailles d'intervalle pour les paramètres : un grand (le même que celui utilisé précédemment pour l'expérience du premier ordre) et un petit (Tableau 4.1). Ces petits intervalles peuvent être considérés comme représentatifs du niveau de connaissances ou des incertitudes des principaux paramètres de la situation d'un audit énergétique détaillé (avec des mesures effectuées à l'intérieur du bâtiment). Les petits intervalles peuvent être considérés pour des paramètres connus approximativement alors que de grands intervalles peuvent être utilisés pour des paramètres totalement inconnus.

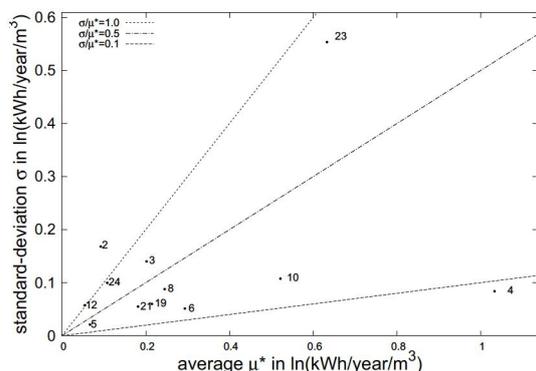
Deux sorties différentes sont présentées : les besoins annuels de chauffage et le logarithme naturel de besoins annuels de chauffage par mètre cube. Avant de lancer l'expérience du second ordre, une analyse de premier ordre est faite, limitée aux 12 variables d'entrée sélectionnées. Donc, l'expérience B intègre en fait 4 expériences numériques : B1 (1er ordre, grand intervalle, le même intervalle que l'expérience A), B2 (2ème ordre, grand intervalle), B3 (1er ordre, petit intervalle) et B4 (2ème ordre, petit intervalle).

4.3.4.1 Premier ordre - grands intervalles (B1)

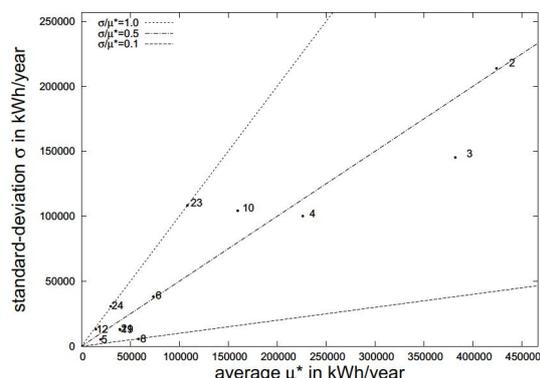
Une comparaison entre les deux expériences de premier ordre B1 (12 paramètres : Fig. 4.5a et 4.5b) et A (24 paramètres : la figure 4.3a. Et 4.3d) montre que la diminution ou l'augmentation du nombre de paramètres intervenant dans l'analyse de sensibilité n'affecte pas significativement le classement entre les paramètres. Lorsque l'on compare les deux séries de résultats, il faut garder à l'esprit que les différences peuvent provenir de deux sources :

1. La méthode de Morris est essentiellement une méthode de Monte Carlo avec une étape de génération aléatoire, les changements peuvent provenir de différences d'échantillonnage,

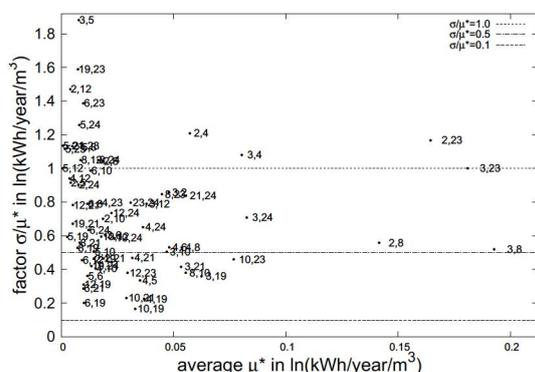
4.3. Application de la méthode de Morris au bâtiment test



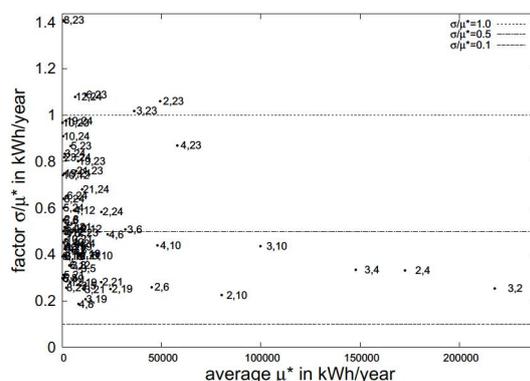
(a) Analyse des effets élémentaires de premier ordre liés au logarithme népérien des besoins de chauffage par mètre cube avec un grand intervalle et $r = 10$.



(b) Analyse des effets élémentaires de premier ordre liés aux besoins annuels en chauffage avec un grand intervalle et $r = 10$.



(c) Analyse des effets élémentaires de second ordre liés au logarithme népérien des besoins de chauffage par mètre cube avec un grand intervalle et $r = 10$.



(d) Analyse des effets élémentaires de second ordre liés aux besoins annuels en chauffage avec un grand intervalle et $r = 10$.

Figure 4.5: Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier et du deuxième ordres des besoins de chauffage du bâtiment collectif test simulés par ESP-r (grands intervalles de variation des paramètres, expériences B1 et B2).

2. Réduire le nombre de variables (avec des intervalles inchangés) implique moins d'interactions entre les variables d'entrée, de sorte qu'un écart-type plus faible des effets élémentaires peut être attendu. Cette tendance est effectivement observée pour la plupart des variables pour les deux réponses considérées, mais avec une diminution limitée de l'écart-type.

4.3.4.2 Second ordre grands intervalles (B2)

Pour l'analyse de second ordre (expérience B2, figures 4.5c et 4.5d), nous pouvons observer en comparant l'axe x des figures 4.5a et 4.5c que les influences de second ordre ne sont pas négligeables. La figure 4.5c (avec la réponse logarithmique) montre que la moyenne de l'effet élémentaire du second ordre de l'interaction la plus élevée (3, 8) est presque

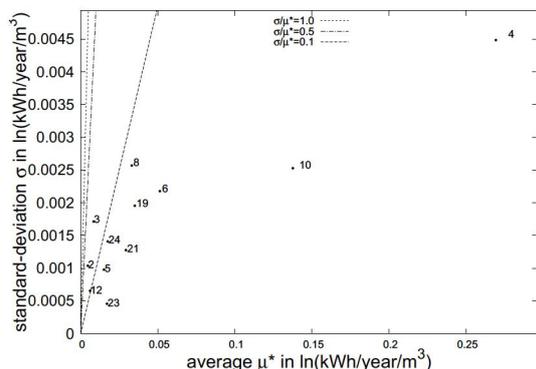
0.2, supérieure à la plupart des influences significatives du premier ordre (par exemple 2 et 24) (figure 4.5a). Cette influence est encore plus évidente dans l'analyse des besoins annuels de chauffage en kWh (Figures 4.5b et 4.5d). La moyenne de l'effet élémentaire du second ordre à la plus grande influence (3,2) dépasse les moyennes des effets élémentaires du premier ordre de tous les paramètres à l'exception des paramètres 2, 3, et 4.

Les paramètres de taille sont la principale source d'interactions; la largeur (2) et la longueur (3) sont inclus dans les cinq plus forts effets élémentaires de second ordre dans les deux présentations. Pour la charge de chauffage annuelle (Fig. 4.5d), l'interaction des deux paramètres cités (2-3) est la principale, suivie par leur interaction avec la température de consigne (4) et le taux de ventilation (10). Ces résultats sont pleinement compatibles avec l'analyse du premier ordre (Fig. 4.5b) qui met en évidence les paramètres 2, 3, 4, 10 et 23 (isolant) comme les plus fortes influences et avec des effets élémentaires très dispersés. Dans la transformation logarithmique, l'épaisseur de l'isolant est clairement le facteur avec les plus hautes valeurs de sigma (effets élémentaires très dispersés). Il n'est donc pas surprenant de voir les interactions avec les paramètres de taille parmi les principales interactions de second ordre. Les interactions élevées des apports gratuits, dus aux occupants (8) dans les effets (3, 8) et (2, 8), sont plus surprenantes. Une interprétation possible pourrait être que les gains de chaleur ont une influence presque additive sur la charge de chauffage, illustrée par le fait que le paramètre 8 est le seul dans la zone linéaire pour l'analyse de premier ordre (figs. 4.3a et 4.5b). La division par le volume du bâtiment cause des interactions élevées avec les paramètres de taille tandis que la transformation logarithmique introduit une non-linéarité pour de tels phénomènes additifs : avec les différentes transformations (fig. 4.3b, 4.3c et 4.3d) le paramètre 8 n'est plus dans la zone linéaire. Et aucun autre facteur n'est impliqué dans des effets de second ordre avec les apports gratuits des occupants. Tenant compte de l'effet de taille des occupants, nous suggérons d'utiliser les occupants par m^3 (ou les occupants par m^2 de la zone à analyser) comme paramètre d'entrée au lieu des occupants directement.

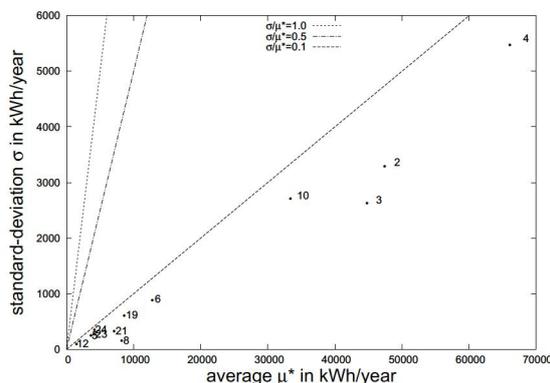
En ce qui concerne la possible linéarité des effets de second ordre, aucune couple de paramètres dans les figures 4.5c et 4.5d n'apparaît dans la zone linéaire ($\sigma/\mu^* < 0,1$), ce qui signifie que toutes les paires de paramètres ont des effets non linéaires ou sont combinées avec d'autres paramètres dans des interactions d'ordre supérieur. Ceci peut être comparé à l'analyse du premier ordre pour laquelle seul le paramètre 4 (température de consigne) tombe dans la zone presque linéaire (Fig. 4.5a). Poursuivant l'analyse du paramètre 4, la figure 4.5c met l'accent sur les fortes interactions de ce paramètre avec la taille de l'immeuble (paramètres 2 et 3). Ces interactions restent importantes, même si l'effet de taille est réduit en tenant compte des besoins en chauffage par mètre cube comme sortie. Le paramètre 23 (épaisseur de l'isolant des murs extérieurs) apparaît dans toutes les expériences (figure 4.5) avec une forte variabilité dans le premier ordre ainsi que dans le second ordre. L'influence non-linéaire de l'épaisseur d'isolation peut expliquer cette forte variabilité.

En revanche, l'effet élémentaire de premier ordre de la température de consigne (4) (non-monotone pour les besoins annuels de chauffage) se déplace vers la zone linéaire après la transformation logarithmique par mètre cube, et présente la plus grande influence. L'écart-type reste non négligeable si on le compare avec d'autres facteurs et une interaction de second ordre avec des paramètres de taille apparaît même avec le logarithme, mais les

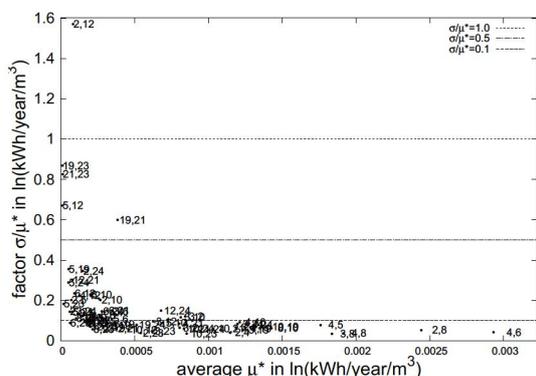
4.3. Application de la méthode de Morris au bâtiment test



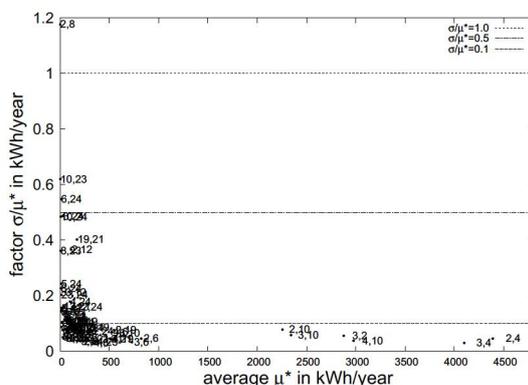
(a) Analyse des effets élémentaires de premier ordre liés au logarithme népérien des besoins de chauffage par mètre cube avec un petit intervalle et $r = 10$.



(b) Analyse des effets élémentaires de premier ordre liés aux besoins annuels en chauffage avec un petit intervalle et $r = 10$.



(c) Analyse des effets élémentaires de second ordre liés au logarithme népérien des besoins de chauffage par mètre cube avec un petit intervalle et $r = 10$.



(d) Analyse des effets élémentaires de second ordre liés aux besoins annuels en chauffage avec un petit intervalle et $r = 10$.

Figure 4.6: Résultats de l'analyse des effets élémentaires du premier et du deuxième ordre des besoins de chauffage du bâtiment collectif test simulés par ESP-r (petits intervalles de variation des paramètres, expériences B3 et B4).

autres interactions sont limitées.

4.3.4.3 Premier ordre - petits intervalles (B3)

La figure 4.6 présente les résultats relatifs au petit intervalle (B3 et B4) sous une forme analogue à la figure 4.5 pour le grand intervalle. La principale conséquence de la réduction de la taille de l'intervalle des paramètres (par un facteur 10 pour la plupart des paramètres d'entrée), est que presque tous les paramètres sont maintenant dans la zone linéaire pour le premier et le second ordre. La température de consigne est de nouveau le paramètre

le plus important dans cette expérience avec les plus hautes valeurs à la fois pour la moyenne et l'écart-type des effets élémentaires de premier ordre (toutes les sorties dans la figure 4.6). L'importance de la température de consigne est expliquée en partie par le fait que son intervalle de variation est maintenu assez large dans l'expérience (réduction d'un facteur 4 par rapport à l'intervalle de grande taille). À l'inverse, l'épaisseur de l'isolant n'a presque plus aucune influence sur la sortie, en raison du choix d'un mur plutôt bien isolé (entre 9 et 10 cm), dont l'épaisseur précise est de peu d'importance.

4.3.4.4 Second ordre - petits intervalles (B4).

Comme les résultats de l'analyse de premier ordre ont un comportement quasi linéaire pour la plupart des paramètres d'entrée, l'analyse de second ordre pourrait être considérée comme de peu d'intérêt. Effectivement les ordres de grandeur des résultats sont clairement du « deuxième ordre » : les moyennes des effets élémentaires de second ordre sont plus petites que 0,3% dans la sortie logarithmique, par exemple. En outre, ils sont proches des écarts-types obtenus dans l'analyse de premier ordre, dans les deux présentations : kWh ou $\ln(\text{kWh}/\text{m}^3)$, montrant que la dispersion des effets élémentaires de premier ordre est principalement causée par des interactions entre les paramètres d'entrée et non par des influences quadratiques ou non-linéaires. Concernant la production d'énergie annuelle (kWh; Fig 4.6d.), les quatre facteurs qui dominent l'analyse du premier ordre (2, 3, 4 et 10) apparaissent à nouveau : les six principaux effets élémentaires du second ordre correspondent à leurs six paires d'interactions, les interactions entre les paramètres de taille (2, 3) et de consigne (4) ont les plus grandes valeurs. Dans la sortie logarithmique (Fig. 4.6c), les interactions entre les paramètres de taille (2, 3) et les apports de chaleur par les occupants (8), analysés dans la section 4.3.3 pour le grand intervalle, se manifestent à nouveau. Les paramètres de taille ne sont pas impliqués dans d'autres interactions significatives. Mais des interactions impliquant la température de consigne (4), le paramètre le plus influent, sont également identifiées avec la réduction de la consigne entre le jour et la nuit (6) et les gains de chaleur des occupants (8). Pour la première fois dans notre analyse, les paramètres d'entrée liés à une zone spécifique thermique du bâtiment apparaissent comme non-négligeables, avec une interaction entre la température de consigne dans tout le bâtiment (4) et dans cette zone spécifique (5). Le transfert de chaleur entre zones pourrait expliquer ce phénomène, ceci pourrait devenir significatif dans les situations où les caractéristiques du bâtiment sont connues avec précision et des incertitudes importantes pourraient être liées à la dispersion des comportements des occupants dans les différentes zones du bâtiment. Les écarts-types des effets élémentaires du second ordre (dans la sortie logarithmique) sont toujours inférieurs à 0,02%, l'analyse du troisième ou des ordres supérieurs n'apportera aucune information utile.

4.4 Conclusions sur les applications de la méthode de Morris.

Dans ce travail, les analyses de sensibilité du premier et de second ordre ont été combinées. La méthode de Morris et son extension du second ordre ont été appliquées à un bâtiment

test dans un cas d'étude thermique, en utilisant ESP-r pour calculer les diverses sorties analysées. Parmi les résultats de cette approche, l'analyse du premier ordre a démontré que, même si un classement précis entre les paramètres d'entrée n'est pas pertinent, ils peuvent être classés en différentes familles afin de discuter leur importance. Cette analyse de premier ordre permet d'identifier les éventuels cas de non-linéarité ou les interactions d'ordres plus élevés.

L'utilité dans l'analyse de diverses options pour la sortie du modèle (kWh/an, en kWh/an m³, ln (kWh / an m³)) a été explorée, en particulier avec l'objectif de réduire le nombre de variables touchées par ces non-linéarités ou interactions. Par exemple, les valeurs spécifiques par m³ (ou par m²) réduisent largement l'influence des paramètres liés à la taille. En outre, l'utilisation de la fonction logarithmique de la sortie permet d'identifier l'origine d'une partie des non-linéarités. Il est intéressant de noter que l'analyse de diverses sorties du modèle ne nécessite pas de simulations supplémentaires : le même ensemble de trajectoires de simulation est utilisé et seul un post-traitement complémentaire est nécessaire. Cette remarque peut être étendue à toute sortie transformée calculée à partir de sorties du modèle et variables d'entrée.

Pour les paramètres ayant un écart-type élevé des effets élémentaires, il a été démontré à quel point la mise en œuvre de l'analyse de sensibilité de second ordre peut être utile pour trier les variables et pour préciser leur interaction par paires. Il a été montré également comment l'utilité de l'analyse des ordres supérieurs est amplifiée lorsqu'elle est combinée avec les différentes formes de sortie.

Une nouvelle façon de présenter les résultats de la méthode de Morris a été proposée pour classer les paramètres (ou les couples de paramètres dans le cas de l'analyse de second ordre) en fonction de leur sensibilité : linéaire, monotone, presque monotone ou fortement non-linéaire/ou avec interactions d'ordre supérieur). La valeur de l'analyse de sensibilité en utilisant la méthode des effets élémentaires a été clairement établie.

Un des désavantages de la méthode de Morris est qu'elle ne donne pas une distribution globale des résultats ne permettant donc pas de prédire de façon plus précise les besoins en énergie. Cependant, pour un bâtiment donné simulé avec un outil de modélisation spécifique, aucune règle générale en termes de sensibilité ne peut être dérivée : les résultats dépendent des paramètres d'entrée choisis, qu'il aient des valeurs fixes ou variables (et pour ces dernières, leur intervalle de variation). Ainsi, l'analyse de sensibilité doit être effectuée pour chaque situation particulière, par rapport aux objectifs de modélisation, avec un choix judicieux des intervalles de variation. Ses conclusions ne sont valables que pour cette situation particulière.

Le choix de l'intervalle de variation pour chaque paramètre d'entrée doit être lié soit à des contraintes pour des variables de décision soit à un domaine d'incertitude pour les variables exogènes. La connaissance des interactions entre les différents paramètres et l'importance de ces paramètres dans le premier ordre et dans les ordres supérieures permettent une connaissance non seulement des modèles physiques qui englobent la modélisation, mais aussi des modèles thermiques qui créent ces résultats. Dans une approche systémique, l'utilisation des effets élémentaires peut servir pour la mise en place de méta-modèles

Chapitre 5

Modélisation énergétique d'un quartier : application et test de MEDUS sur le quartier Saint-Félix à Nantes

L'objectif de ce chapitre est une première mise en œuvre de l'outil MEDUS sur un cas concret, avec la volonté de tester certaines des hypothèses et certains choix faits dans les données d'entrée. Ce chapitre propose également des pistes d'exploitation des résultats fournis par MEDUS, afin de montrer le potentiel de l'approche de modélisation développée. Pour ce faire, le choix s'est porté sur le quartier de Saint Félix qui correspond à un quartier principalement résidentiel, de la ville de Nantes. Les principales données d'entrée sont tirées de l'enquête logements de l'INSEE, ces données peuvent être complétées par une enquête rapide de terrain pour une meilleure connaissance des bâtiments du quartier. Les résultats sont d'abord analysés pour chaque typologie de bâtiments (définies au chapitre 2), puis pour l'ensemble du quartier Saint-Félix pour vérifier la pertinence des résultats du modèle proposé.

5.1 Les caractéristiques du quartier St-Félix

Le quartier de Saint Félix a été choisi suite au travail de [Monteil \(2010\)](#). En effet, ce quartier correspond à l'IRIS¹ le plus proche de l'IRIS moyen de la ville de Nantes, au sens de la répartition des logements par période de construction, du nombre de personnes moyen par logements et de la surface moyenne des logements.

La figure 5.1 montre les limites géographiques de cet IRIS qui est constitué de 76% de maisons individuelles et 24% d'immeubles collectifs.

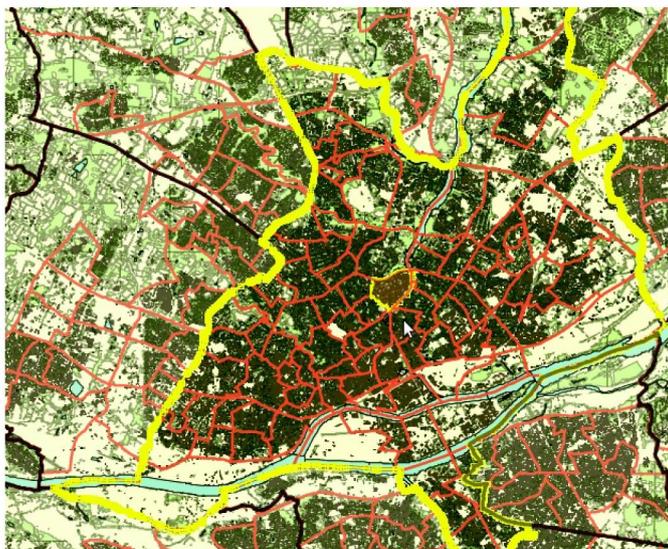


FIGURE 5.1 – Localisation du quartier Saint Félix dans la commune de Nantes (les lignes intérieures jaunes représentent l'IRIS Saint Félix et les extérieures la commune de Nantes).

5.1.1 La population du quartier Saint-Félix

Le quartier Saint Félix est un quartier localisé majoritairement dans la partie centre nord de Nantes, à côté de la rivière Erdre (Figure 5.1, Figures 5.4). Il correspond à l'IRIS no. 441090409 de l'INSEE, référencement utilisé notamment pour le recensement de la population. Ce quartier a une composition de 849 bâtiments selon la base de données cadastrale de l'Institut Géographique National (2008). Ces bâtiments sont décomposés en 2015 logements, pour une population de 3245 habitants (soit en moyenne 1610 habitant par logement et 3,8 par bâtiment). Ce quartier est localisé juste au sud de la zone de l'Université de Nantes et est desservi par une ligne du tramway nantais, ce qui explique en partie le profil de population du quartier (majoritairement jeune) comme le montre la Figure 5.2.

Comme cela a déjà été mentionné l'outil MEDUS exploite la richesse de la base de données INSEE. Cela permet potentiellement de modéliser l'impact de l'évolution du quartier, puisque la base de données de l'INSEE est mise à jour de façon régulière.

5.1.2 Description spatiale du quartier Saint-Félix

La figure 5.3 montre la répartition spatiale des bâtiment. Les données représentées sur cette figure, sont issues de la base de données cadastrale de l'IGN et permettent de plus

1. Dans ce chapitre les termes d'IRIS et de Quartier seront utilisés indifféremment pour désigner le même objet

5.1. Les caractéristiques du quartier St-Félix

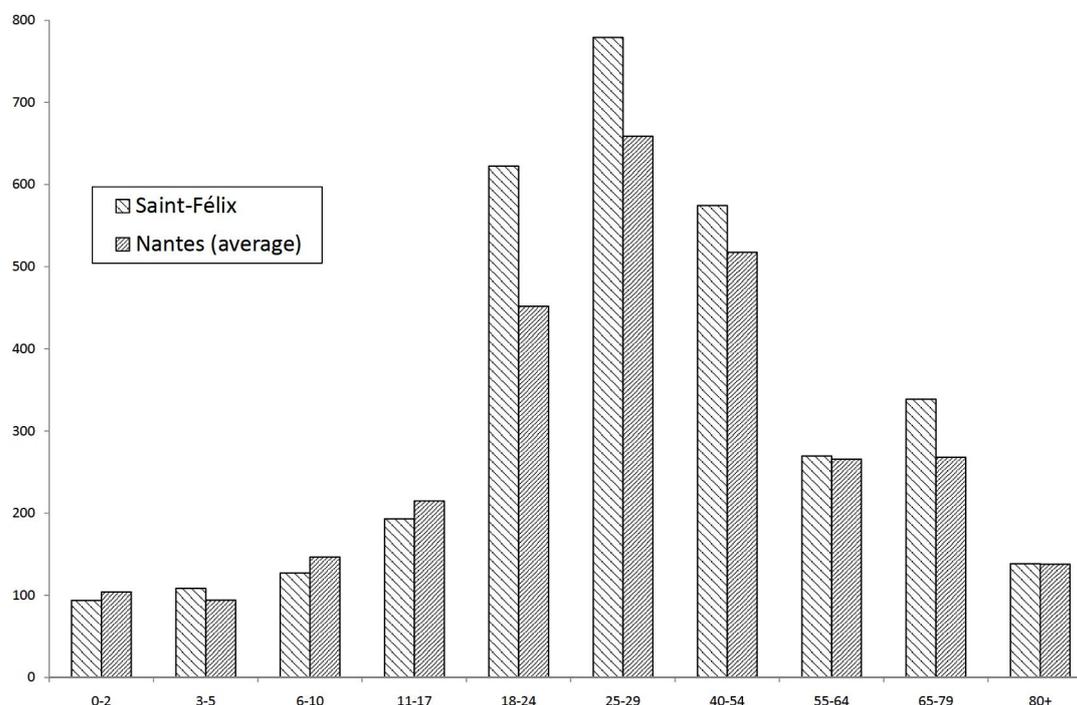


Figure 5.2: Profil de population de la commune de Nantes comparé à celui de l'IRIS Saint Félix (source : INSEE, recensement 2007.)

d'identifier la hauteur des bâtiments. Cette information est importante dans la mesure où elle permet potentiellement : d'identifier la répartition des immeubles collectifs et des maisons individuelles, et d'analyser l'orientation des bâtiments telle qu'elle a été définie dans le chapitre 2. A ce stade du projet, les paramètres spatiaux tels que hauteur, largeur et longueur ne sont pas pris en compte, mais ils seront intégrés dans des stades plus avancés de ce projet.

Les images de la figure 5.4, montrent l'évolution d'une partie du quartier de Saint Félix en dix ans. Cette comparaison permet de constater, qualitativement du moins, la diminution des zones vertes ainsi que le développement d'immeubles (densification urbaine). Au passage, cette illustration montre bien l'importance de la dimension locale de la planification urbaine et des outils nécessaires à la prise de décision de tels projets d'évolution qui induisent des changements au delà de la simple construction/démolition des bâtiments (mise en place des services comme l'eau potable, le transport et l'énergie par exemple).

5.1.3 Caractérisation du parc de bâtiments dans le quartier Saint-Félix



FIGURE 5.3 – Positionnement et hauteur des bâtiments de l'IRIS de Saint Felix Source : [Monteil \(2010\)](#), d'après données IGN.

La Figure 5.5 montre la répartition des logements du quartier de Saint Félix en termes de période de construction et de type de logement (individuel/collectif). Comme il a été déjà évoqué, on constate que la grande majorité des logements du quartier sont des logements collectifs. La grande majorité d'entre eux ont été construits après-guerre ou au cours des deux dernières décennies. Cette forte proportion de logements collectifs est un défi pour la modélisation, puisque, comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2, les bâtiments collectifs sont plus difficiles à regrouper au sein d'une seule typologie, on rappelle d'ailleurs que plusieurs modèles à l'échelle urbaine se contentent de les traiter à partir de simple ratios de consommation ou les ignorent tout simplement [Swan \(2010\)](#).

La Figure 5.6, issue de la base de données IGN (BD parcellaire) montre le degré de mitoyenneté des bâtiments (en donnant le nombre de contacts mitoyens par bâtiments). Cette information est également potentiellement riche dans la mesure où, comme il a été présenté dans le chapitre 2, une des trois typologies, considérées dans ce travail, correspond aux maisons individuelles mitoyennes. On constate sur cette figure que, pour le cas du Quartier de Saint Félix, le nombre de bâtiments concernés est très important (ce qui est logique puisque le quartier en question est un quartier plutôt de centre ville que de type pavillonnaire de banlieue).

5.1. Les caractéristiques du quartier St-Félix



(a) 2000-2005



(b) 2011

Figure 5.4: Photos aériennes du secteur sud du quartier Saint Félix, à proximité du Pont de la Motte-Rouge (IRIS :44109-0409) : évolution entre 2000-2005, et 2011, Source IGN Geoportail. (voir comme référence le pont).

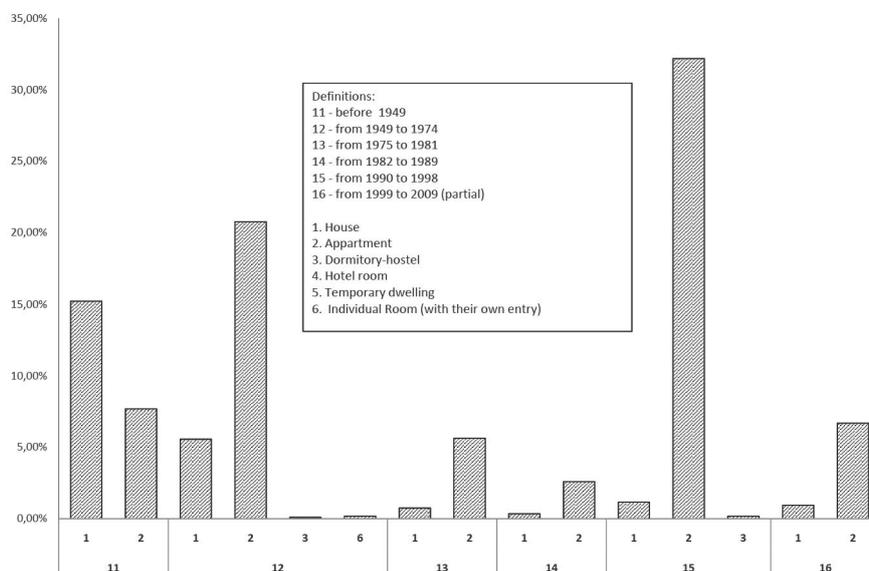


FIGURE 5.5 – Distribution des logements dans le quartier Saint Félix, par période de construction et par type de logement.(d'après données INSEE)

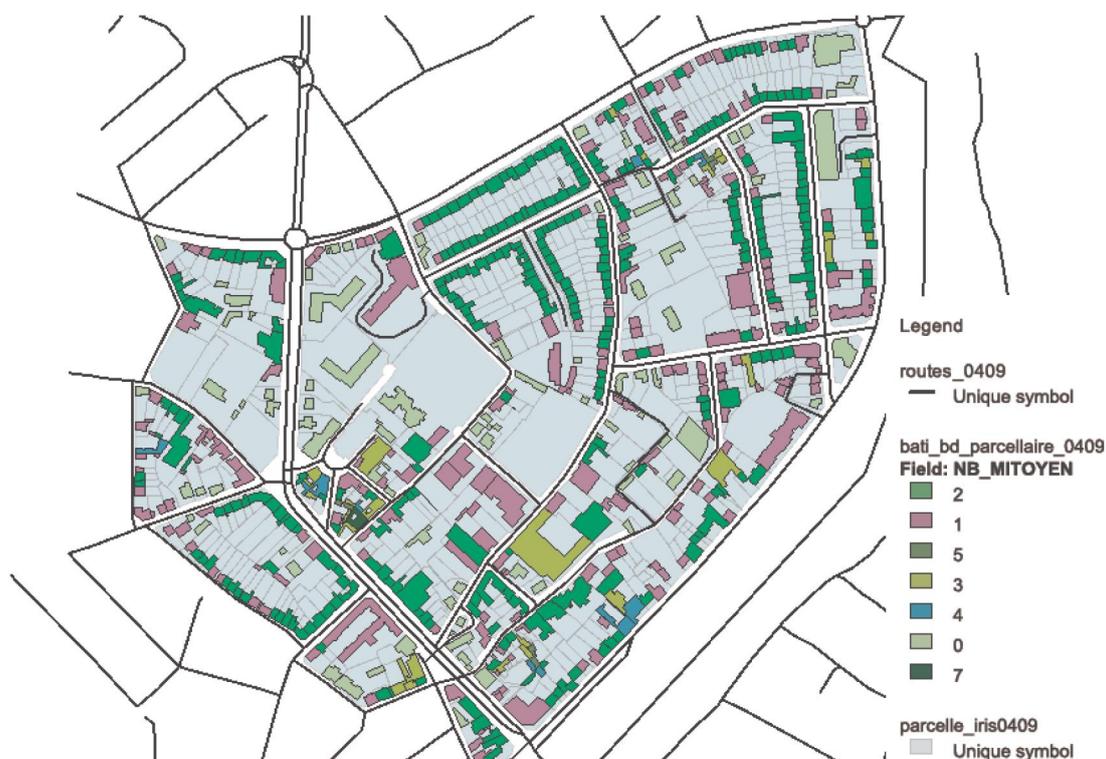


FIGURE 5.6 – Localisation des bâtiments présentant divers degrés de mitoyenneté, Source : Monteil (2010), d'après BD Parcellaire IGN.

5.2 Simulation et test des typologies

Sur la base des données recueillies à la section précédente, nous passons à l'étape du test du logiciel MEDUS. Nous abordons d'abord les hypothèses prises pour la modélisation du quartier Saint Félix, en complément de celles déjà évoquées dans la description du modèle (chapitre 2)

5.2.1 Hypothèses, choix des paramètres et récupération des résultats

Dans un premier temps, nous ne prenons comme données d'entrée que des informations issues de la base de données de l'INSEE². Certains paramètres de la simulation thermique de chaque logement sont déduits directement des données INSEE, les autres paramètres sont tirés au hasard.

Les paramètres d'entrée provenant de la base de données de l'INSEE sont présentés dans la table 5.1. Pour certains d'entre eux (5.1), le tirage au hasard se fait dans les intervalles de variation de l'INSEE (c'est le cas notamment de la surface du logement, qui est tirée au hasard à l'intérieur de l'intervalle défini par l'INSEE dans le classement des surfaces de logement).

Code INSEE	Définition et utilisation.
TYPC	Trois types de logements (maison individuelle, maison mitoyenne et logement collectif)
ACHL	Classes d'âge (voir tableau 2.1, chapitre 2)
SURF	Classes de surfaces des logements (idem).
IPONDL	Coefficient de pondération de chaque logement pour un post-traitement qui permettra évaluer la consommation de tout le quartier.
INPER	Nombre d'occupants par logement.

TABLE 5.1 – Paramètres utilisés dans le cas de modélisation du quartier Saint-Félix.

2. Même si nous gardons les paramètres cités dans le tableau 2.1 du chapitre 2.

Paramètre	Description.	Distribution	Intervalle
Taux d'infiltration moyen.	En fonction du paramètre ACHL	uniforme	[50%-100%]
Taux d'infiltration (pas horaire)	Tiré au hasard $\pm 20\%$	uniforme	$\pm 20\%$
Apports des occupants.	Majorés $\pm 20\%$ du paramètre INPER	uniforme	$\pm 20\%$
Température de consigne	Tiré au hasard	uniforme	[19-22 °C]
Ralenti de nuit (T. consigne)	Tiré au hasard et soustrait à la T.C.	uniforme	[1-5 °C]
Taux de vitrage	Tiré au hasard pour chaque côte du typologie	uniforme	[20-40%]
Type de vitrage	En fonction du paramètre ACHL (voir n.b.4)	discrète	[S.V. - D.V.]
Surface	Tiré au hasard en fonction du paramètre SURF	uniforme	selon intervalle SURF
Logement typologie B.	Tiré au hasard lors la récupération de résultats	uniforme	voir section 5.2.1.1
Logement typologie C.	Tiré au hasard lors la récupération de résultats	uniforme	voir section 5.2.1.1

TABLE 5.2 – Liste des paramètres tirés au hasard lors de la modélisation du quartier Saint Félix.

Il est important de noter que les assignations aléatoires du tableau 5.2 sont faites pour toutes les zones thermiques qui composent une typologie et de façon indépendante^{3 4}. C'est à dire que, par exemple, dans le cas de la typologie A qui comporte une zone thermique chauffée seulement, un tirage aléatoire est fait pour la température de consigne et le ralenti de nuit. Dans le cas de la typologie B qui comporte 3 zones thermiques (le logement à étudier et les deux logements voisins), trois tirages au sort sont faits pour la définition de la température de consigne, et 27 pour l'immeuble collectif etc. Cela avec l'objectif de reproduire une dispersion réaliste de tous les phénomènes liés au comportement, la diversité de systèmes et la diversité des apports gratuits des occupants. Le taux de vitrage est également traité de manière aléatoire. Ces tirages aléatoires permettent de représenter la diversité des interactions et des échanges thermiques dans l'immeuble collectif (typologie C) et l'immeuble mitoyen (typologie B) qui ressemble à la réalité. Le tirage aléatoire pour l'apport gratuit des occupants est fait dans un intervalle réduit (20%) pour également prendre en compte une diversité des activités, du métabolisme et d'âge des occupants qui ressemble à la réalité. Cette quantité peut être majorée pour tenir compte également de la diversité dans l'utilisation des appareils électroménagers (pas encore intégrée dans cette première étude). Pour l'implémentation, tous les paramètres liés à la température de consigne, aux infiltrations et aux vitrages sont tirés au hasard en dehors de la modélisation MEDUS et conservés dans trois fichiers contenant les matrices aléatoires pour une récupération, après modélisation.

5.2.1.1 Récupération des résultats

Pour les trois typologies une récupération aléatoire des résultats est mise en place, pour représenter la diversité des situations d'un logement à l'intérieur d'un bâtiment. Pour

3. Sauf le cas de la surface (SURF) qui reste la même pour tous les zones thermiques de la typologie.

4. Le taux de vitrage est également choisi au hasard parmi le simple et le double vitrage : la première classe d'âge utilise un simple vitrage dans 100% des logements. Les deux classes suivantes sont tirées au hasard avec une probabilité égale pour le simple vitrage et le double vitrage. Finalement les classes d'âges les plus récents présentent une probabilité de 90% de tomber sur le double vitrage et de 10% sur le simple vitrage.

la typologie A, cette récupération est directe, car seule une zone thermique est affectée. Pour la typologie B, la récupération se fait sur une loi de probabilité donnant 80% de probabilité au logement situé juste au milieu (voir Figure 2.10 dans le chapitre 2). Pour les zones thermiques de la typologie C une distribution est appliquée de la même façon avec 60% de probabilité de tomber dans les logements au niveau intermédiaire (voir la Figure 2.11 dans le chapitre 2) par rapport aux logements localisés au rez-de-chaussée ou au dernier étage. Ceci correspond à une hypothèse d'immeubles collectifs de logements de 5 niveaux (4 étages) en moyenne.

Il est important de remarquer que pour des questions de simplicité et d'utilisation optimale des ressources, dans ce cas MEDUS fait une récupération minimale des résultats issus d'un post traitement du fichier de résultats d'ESP-r. Cela nous donne un dossier de résultats sous forme d'un fichier texte de 66 megabytes (1025 modélisations) pour l'ensemble du quartier saint Félix. Mais ce fichier provient d'un post traitement du fichier binaire de résultats ESP-r (qui est en moyenne de l'ordre de 200 megabytes par typologie). Ce fichier binaire contient une information complète sur les températures des surfaces, la température à l'intérieur des différentes zones thermiques, les gains solaires entre autres. Mais la question de l'espace de stockage de données sur le disque dur reste un fort inconvénient pour conserver les fichiers binaires ESP-r de sortie. Dans notre cas, un stockage de 170 gigabytes serait nécessaire pour l'analyse du quartier Saint Félix ; si nous ajoutons le test des divers scénarios, la sauvegarde devient donc prohibitive. Pour le moment nous sommes resté prudent sur le choix des sorties avec l'objectif de nous limiter à des sorties relativement simples pour tester le système et ses avantages comme cœur de calcul.

Finalement, on voit au passage une autre piste de flexibilité du système MEDUS pour l'exploitation de données de sortie variées, répondant à des situations et objectifs plus spécifiques. Cela peut concerner des variables particulières, comme l'analyse des besoins de climatisation ou la température intérieure à l'échelle du quartier dans une période particulière comme un épisode de canicule. Cet avantage provient directement de l'utilisation d'un modèle thermique dynamique mais découle aussi de la conception du modèle MEDUS en lui-même.

5.2.1.2 Pondération statistique des résultats de simulation

Dans les communes de plus de 10000 habitants, depuis le début des années 2000, le recensement n'est plus réellement un recensement complet de la population. C'est en réalité un sondage de grande taille portant sur environ un tiers des habitants et étalé sur plusieurs années. Seules certaines catégories sont recensées de manière exhaustive. De ce fait chaque logement du fichier INSEE est affecté d'un poids, (variable IPONDL), représentant l'inverse du taux de sondage de sa catégorie (INSEE, 2009). Ces coefficients de pondération (leur valeur varie de 1,02 à 3,91 sur l'IRIS St-Félix) sont appliqués aux besoins énergétiques de chaque logement (annuels ou horaires) pour reconstituer les besoins du quartier ou d'une catégorie particulière de logements. Les 700 logements de l'échantillon INSEE de l'IRIS St-Félix représentent en réalité une population de 2008 logements (somme des coefficients de pondération sur l'échantillon). Travailler sur un échantillon d'environ un tiers des logements présente un avantage du point de vue du temps calcul pour une simulation MEDUS.

5.2.2 Résultats par typologie

Nous nous consacrerons dans cette sous-section à une analyse des résultats issus du logiciel MEDUS. Ces résultats ont été obtenus par analyse des différentes consommations de trois typologies utilisées dans la modélisation du quartier Saint Félix. Grâce à la comparaison de ces trois typologies, des conclusions concernant la modélisation et la pertinence des résultats pourront être tirées. Par la suite, dans la sous-section 5.2.3 nous comparerons ces trois typologies avec d'autres études réalisées en France.

TYP/AGE	Avant 1949	1949-1974	1975-1981	1982-1989	Après 1990	Total
1	185	184	-	-	70	172
2	177	161	-	-	81	168
3	126	144	126	116	99	119
Total	170	153	129	116	97	138

Table 5.3: Consommations unitaires (kWh/m²) par classe d'âge et typologie de logement, corrigées par les surfaces pondérées. On n'a pas fait figurer les catégories qui représentent 2 logements ou moins dans l'échantillon.

D'après la figure 5.7 qui nous montre l'histogramme des consommations par m² et par type de logements, nous pouvons remarquer l'importante consommation d'énergie de certains logements collectifs. Bien que, dans la majorité des cas, les logements collectifs soient moins énergivores que les maisons, ce cas particulier nous montre déjà une capacité du système MEDUS à pouvoir détecter l'existence de logements collectifs pouvant être de bons candidats à la mise en place de travaux de rénovation.

Dans le tableau 5.4, nous faisons la comparaison de trois typologies en utilisant différentes statistiques. Le regroupement des typologies A et B a été fait pour pouvoir réaliser une comparaison directe des maisons et appartements. D'après la moyenne obtenue, nous pouvons observer une consommation légèrement plus élevée pour des maisons isolées (typologie A) en comparaison aux maisons mitoyennes (typologie B) qui nous montre clairement la réduction des déperditions associées aux surfaces adjacentes. Ces effets importants peuvent aussi expliquer le faible écart type des maisons mitoyennes par rapport aux maisons isolées. Il est important de remarquer que dans la conception du système MEDUS la morphologie des maisons mitoyennes n'est pas si différente de celle des maisons isolées. Finalement, nous pouvons dire que la comparaison statistique des typologies A et B se résume à une comparaison de l'effet de mitoyenneté des surfaces, qui n'est pas négligeable quand on modélise à l'échelle urbaine.

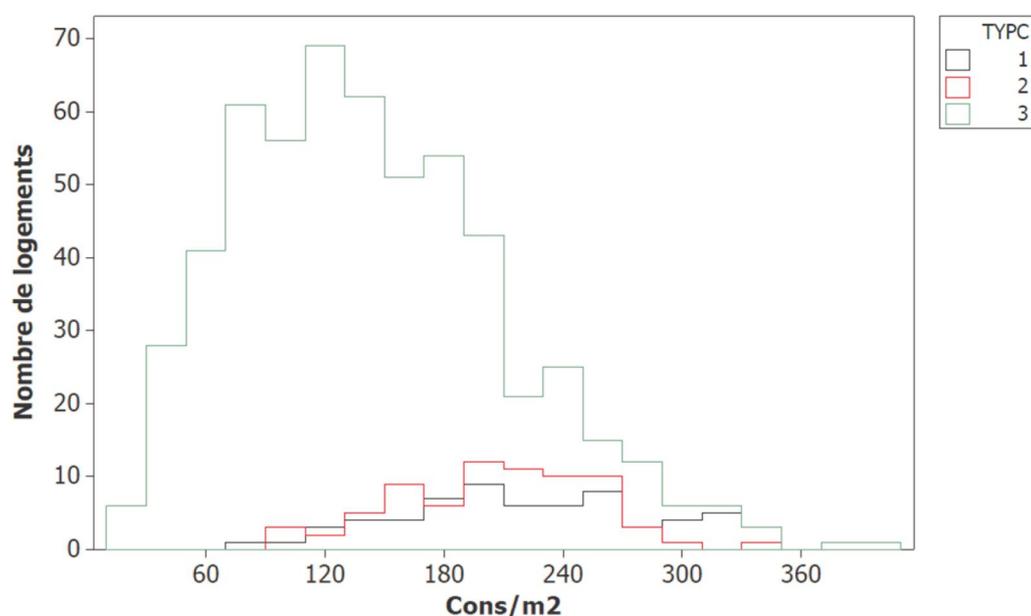


FIGURE 5.7 – Histogramme des besoins en chauffage par typologie : A (maisons isolées, 1) B (maisons mitoyennes, 2);C (appartements, 3). Le nombre de logements correspond aux logements de l'échantillon simulé.

Besoins unitaires (kWh/m ²) : statistiques sur les logements de l'échantillon IRIS Saint Félix				
	Maison isolée	Maison Mitoyenne	Maisons	Appartements
Moyenne	175,6	168,7	172,0	117,7
Variance	3514,0	2436,6	2929,8	3603,1
Ecart-type	59,3	49,4	54,1	60,0
Minimum	45,7	45,1	45,1	5,2
Maximum	286,2	271,6	286,2	311,2

TABLE 5.4 – Statistiques sur les besoins unitaires (kWh/m²) par typologie pour le quartier St-Félix. Les résultats ne sont pas corrigés par les surfaces pondérées (chaque logement de l'échantillon a un poids égal), ce qui explique les moyennes un peu différentes de la table 5.3

5.2.3 Comparaison avec des ratios de consommations

Dans une première validation externe des résultats obtenus, nous faisons la comparaison de la consommation des bâtiments types du quartier Saint Félix avec diverses études déjà réalisées en France. Ces études ont été faites en utilisant d'autres méthodes de calcul, hypothèses et paramètres d'entrée. Mais certains de ces modèles ont des classes d'âge et des typologies similaires.

Une première étude exploitée est celle de l'APUR [Atelier parisien d'urbanisme \(2007\)](#) et concerne les immeubles collectifs situés dans la ville de Paris. Ces immeubles sont classés selon différentes typologies en fonction de leur période de construction, leurs besoins de chauffage sont calculés à l'aide d'une méthode de calcul simplifiée. Par ailleurs des données statistiques de ratios de consommations rassemblés dans une étude du PREBAT [Braye \(2012\)](#) ont également été utilisées. Dans les deux cas, il s'agit –comme pour Medus– de besoins de chauffage, tenant compte seulement des caractéristiques des enveloppes, sans intégrer le rendement du système de chauffage.

Une comparaison des besoins estimés par MEDUS avec les études de l'APUR et du PREBAT a été faite; elle est résumée dans la figure 5.8 pour les logements collectifs et la figure 5.9 pour les logements individuels. Dans cette analyse, la comparaison par classes d'âge de bâtiments donne des ordres de grandeur assez proches, à l'exception de certaines catégories de maisons individuelles.

Néanmoins, ces estimations statistiques et comparaisons avec d'autres études sont une première confirmation des expériences de MEDUS. Un processus plus rigoureux de validation des résultats est nécessaire pour les prochaines versions du logiciel. Cependant les premiers résultats du modèle et leur comparaison avec ces études sont encourageants. Diverses voies d'amélioration doivent être explorées (évoquées dans la section 5.4).

5.3 Simulation des besoins énergétiques du quartier

Dans ce paragraphe, une première analyse de la consommation de l'ensemble du quartier est faite pour Saint Félix. Les grandeurs temporelles fournies par l'outil sont étudiées, à l'exclusion des valeurs estivales (on suppose un arrêt des systèmes de chauffage durant cette période).

Les différentes sorties étudiées sont :

- Les consommations horaires par typologie et pour l'ensemble du quartier
- Les courbes monotones par typologie et pour l'ensemble du quartier
- Les consommations annuelles en kWh

Ces résultats et plus particulièrement les résultats issus de notre analyse (les besoins en chauffage) offrent la possibilité d'aller au-delà d'une simple estimation des besoins du quartier. Ainsi, par exemple, à partir des courbes monotones de puissance, le dimensionnement de systèmes alternatifs de chauffage collectif peut être envisagé.

5.3. Simulation des besoins énergétiques du quartier

Etude APUR			PREBAT		Quartier St Félix (Résultats MEDUS)		
Période	Exemples	Besoins Chauff. (kWh/m ² /an)	Période	Besoins Chauff. (kWh/m ² /an)	Période	Exemples	Besoins Chauff. (kWh/m ² /an)
Avant 1949		130	Avant 1975	143	Avant 1949		126
	1945-1967						
1976-1981		90	1975-1989	105	1975-1989		121
1982-1989		77					
1990-1998		39	1990-2000	74	1990-1998		99
					1999-		

FIGURE 5.8 – Comparaison des valeurs calculées par MEDUS pour les besoins en chauffage par m² avec les moyennes de deux autres études pour les logements collectifs (APUR [Atelier parisien d'urbanisme \(2007\)](#) et PREBAT [Braye \(2012\)](#)). Images de bâtiments types du quartier Saint Félix extraites de [Monteil \(2010\)](#)

PREBAT		Quartier St Félix (Résultats MEDUS)		
Période	Besoins Chauff. (kWh/m ² /an)	Période	Exemples	Besoins Chauff. (kWh/m ² /an)
Avant 1975	314	1949-1974		178
1975-1989	160	1975-1989		136
1990-2000	131	1990-actuel		74

FIGURE 5.9 – Comparaison des valeurs des besoins de chauffage par mètre carré, calculées par MEDUS, avec les moyennes de l'étude PREBAT pour les logements individuels. Images de bâtiments types du quartier Saint Félix extraites de [Monteil \(2010\)](#)

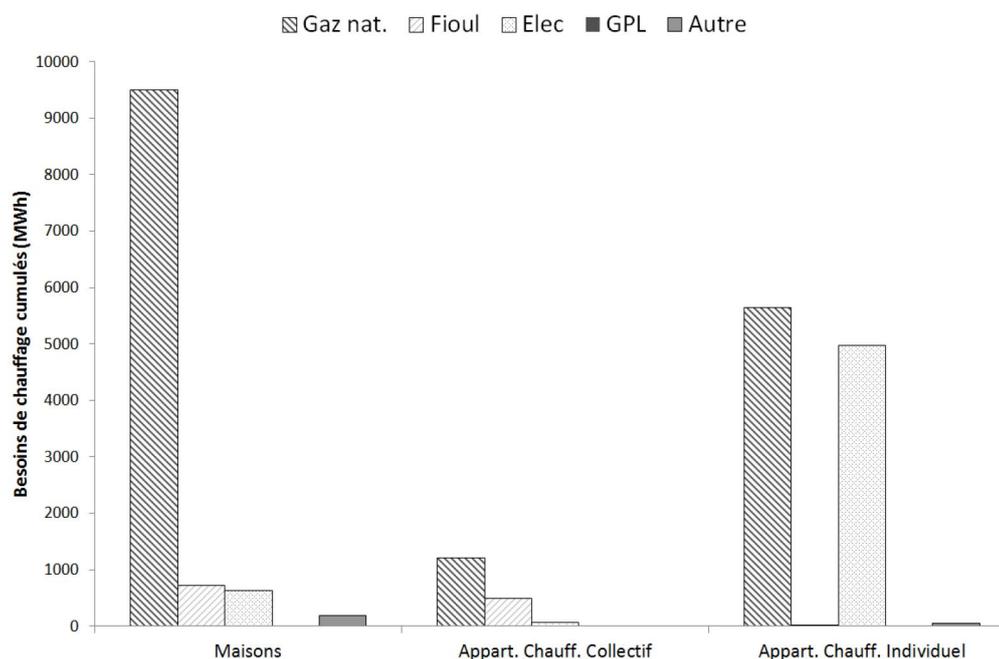


FIGURE 5.10 – Besoins de chauffage cumulés de l’IRIS Saint Félix, selon le type de logement et l’énergie de chauffage (données 2006). Valeurs extrapolées à l’IRIS en fonction des taux de sondage INSEE

5.3.1 Besoins annuels, par source d’énergie

En regardant les figures 5.10 et 5.12, nous pouvons voir une forte prévalence des chauffages à gaz dans les logements individuels. Concernant les logements collectifs cette prévalence est presque égale pour le type d’énergie utilisée pour le chauffage. Donc la consommation d’énergie finale pour le chauffage dans les maisons dépendra fortement du rendement des diverses chaudières installées pour le chauffage. La prévalence des chauffages à gaz pour les logements individuels est mis en évidence également dans la figure 5.12

5.3.2 Distribution temporelle des besoins

Les résultats représentés sur la figure 5.14 obtenus avec MEDUS permettent d’observer l’influence de la température extérieure sur les besoins de chauffage. Ces résultats sont

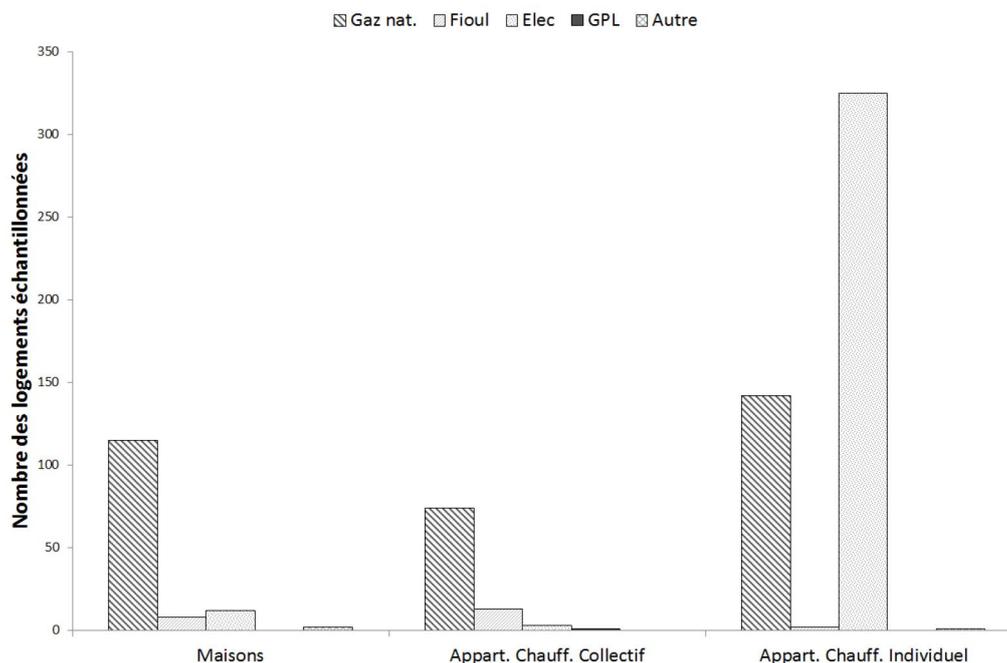


FIGURE 5.11 – Répartition du type d'énergie de chauffage dans l'IRIS Saint Félix Nantes (nombre de logements échantillonnés par catégorie ; données INSEE 2006) ; en moyenne seulement environ un logement sur trois à été enquêté.

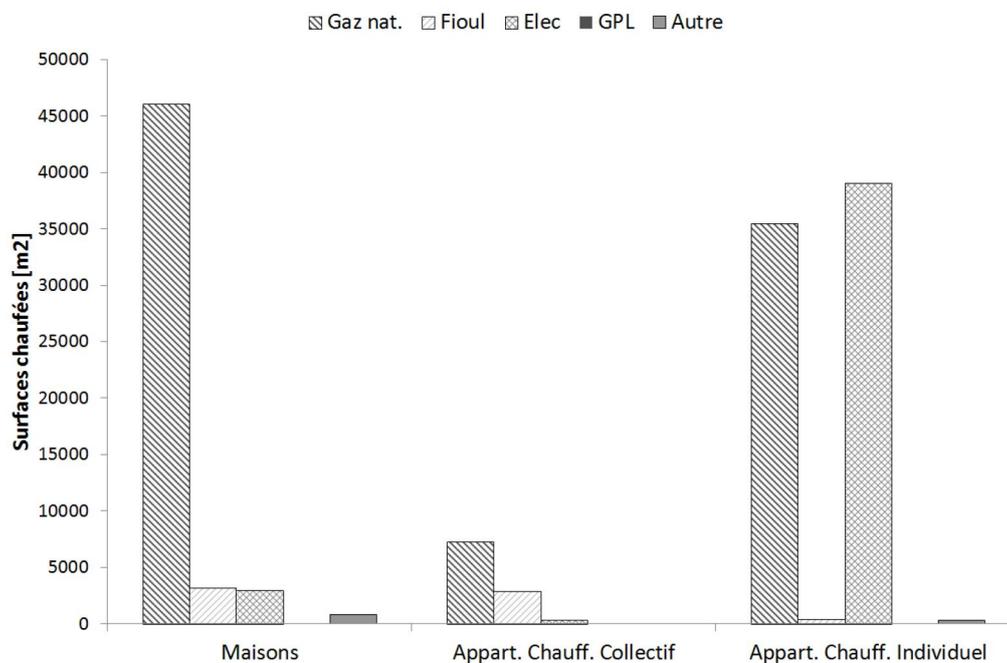


FIGURE 5.12 – Répartition du type d'énergie de chauffage dans l'IRIS Saint Félix Nantes (surfaces chauffées par catégorie données IRIS 2006, valeurs extrapolées à l'IRIS en fonction des taux de sondage INSEE).

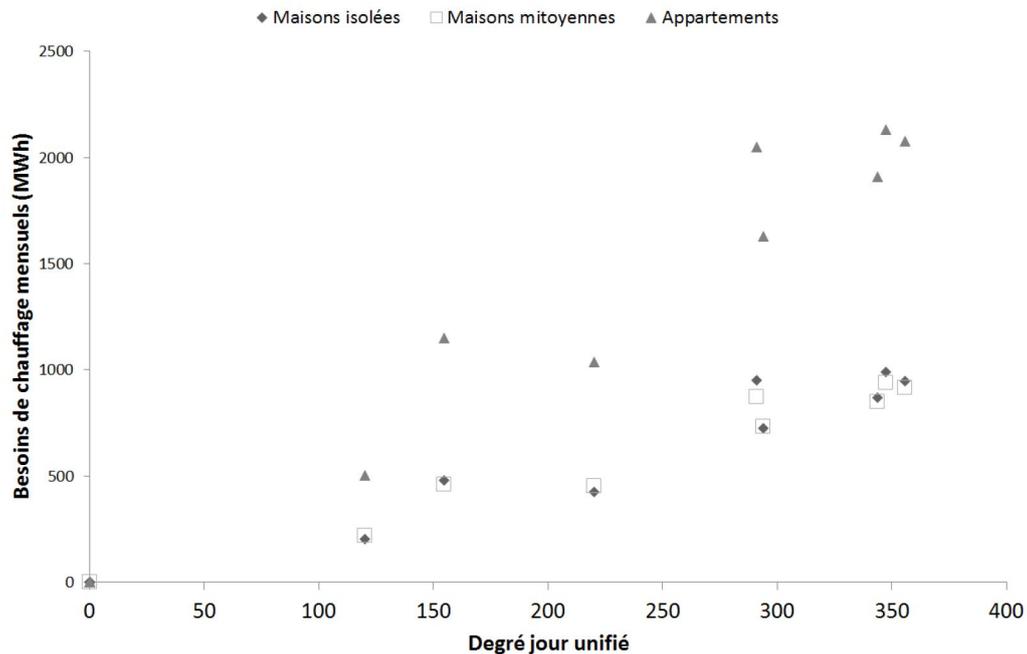


FIGURE 5.13 – Signature énergétique mensuelle du quartier Saint Félix par typologie de bâtiment. Le graphique représente pour chaque typologie et chaque mois, les besoins de chauffage cumulés en fonction des degrés-jours unifiés du mois.

exprimés en besoins en chauffage. Nous considérons sur la base du graphique 5.14 qu'il sera nécessaire de commencer la période de chauffage en hiver plus tôt, afin d'éviter le pic de demande de démarrage. Cette réflexion nous donne déjà une des applications de la simulation thermique dynamique au niveau du quartier. Pouvoir en tirer des conclusions sur la base des profils temporels et non pas simplement des ratios de consommation par mètre carré.

Le profil monotone (figure 5.15) peut également servir pour le dimensionnement des systèmes de chauffage collectifs au niveau urbaine pour analyser de façon plus approfondie les diverses options concernant les sources énergétique du quartier. La courbe monotone donne une information valorisable pour ces systèmes en fournissant le nombre des heures d'une puissance est appelée.

5.3.3 Illustration dans un contexte opérationnel : Rénovation

Dans cette section, une première analyse de l'utilisation de l'outil MEDUS est réalisée dans le cas d'une rénovation à grande échelle des logements d'un quartier (Saint Félix). Les scénarios de rénovation envisagés sont relativement simple :

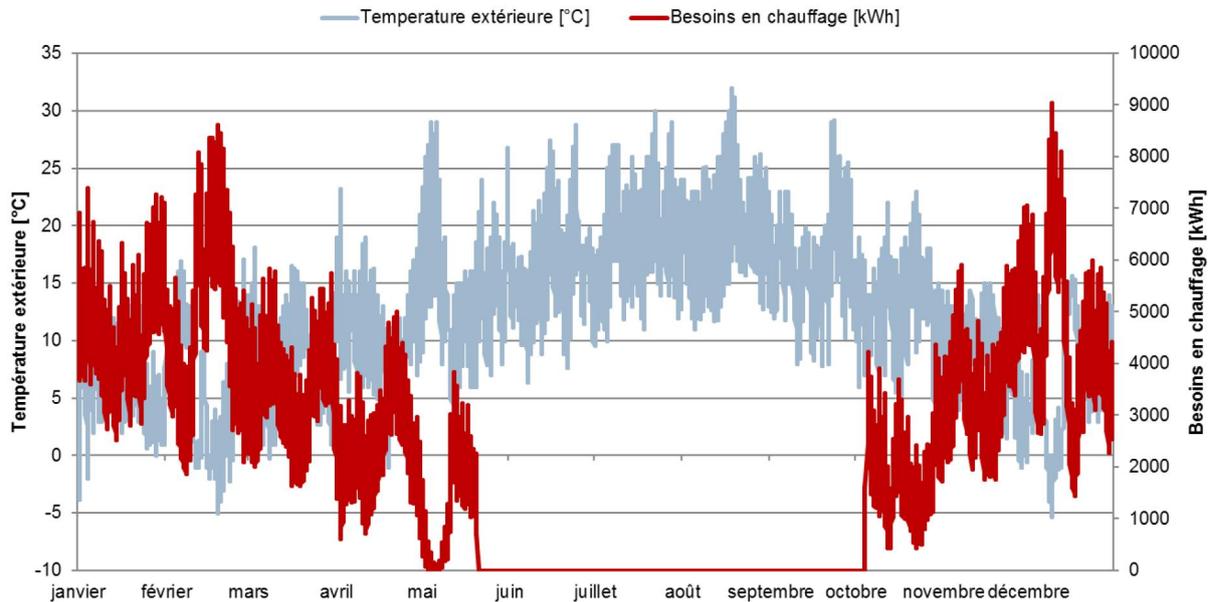


FIGURE 5.14 – Profil temporel des besoins horaires totaux de chauffage simulés pour le quartier Saint Félix (courbe rouge) et de la température extérieure de Nantes (courbe grise), pour l'année type IWEC.

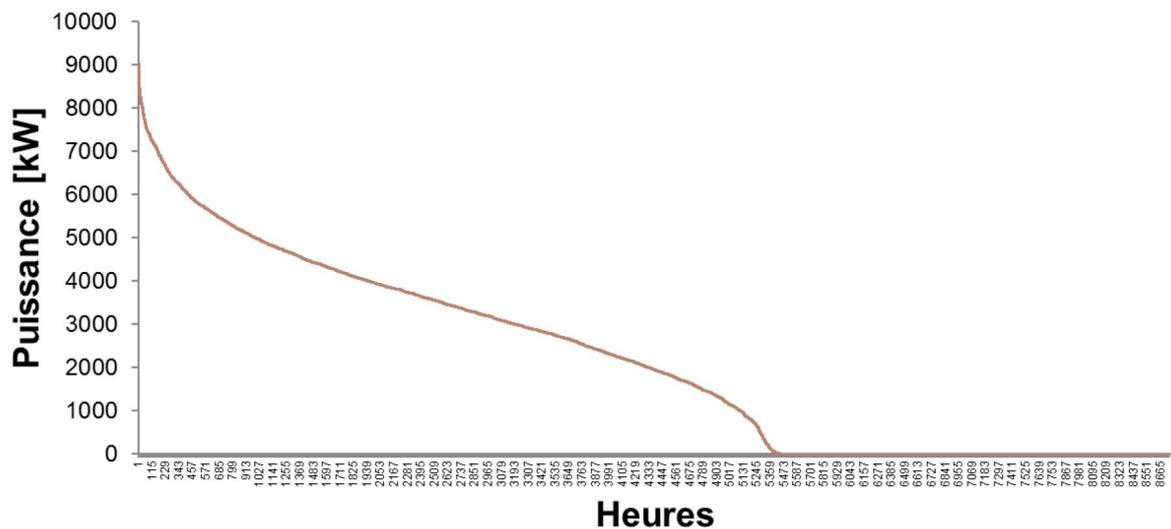


FIGURE 5.15 – Courbe monotone des puissances de chauffage pour l'ensemble du quartier St-Félix. La figure donne pour chaque valeur d'un seuil de puissance lue sur l'axe vertical, le nombre d'heures (sur l'axe horizontal) où une puissance égale ou supérieure au seuil a été appelée..

1. Mise en place de matériaux plus performants (diminution du coefficient U du bâtiment de l'ordre de 1,8) pour les maisons construites avant 1975.
2. Mise en place de double vitrage pour les maisons et appartements construits avant 1975.

Avec ce scénario, une réduction des besoins en chauffage de l'ordre de 4 % est observée. Elle peut être considérée comme une économie convenable si nous prenons en compte la faible quantité de logements individuels situés dans l'IRIS Saint Félix, ainsi que la faible quantité de logements collectifs construits avant 1975 dans le quartier

Mais plus qu'une rénovation thermique de l'enveloppe, les résultats du logiciel MEDUS peuvent orienter vers la préconisation d'autres solutions à l'échelle du quartier :

- Solutions centralisées pour le quartier (réseaux de chaleur) grâce à l'obtention également des profils temporels qui peuvent aider à évaluer le système le plus approprié pour répondre à ces besoins.
- Solutions décentralisées, avec la mise en place de systèmes de chauffage plus performants.

5.4 **Développements et améliorations à venir**

Nous avons décidé pour la présentation de cette section d'indiquer les différents développements requis pour l'amélioration de l'outil MEDUS. Ces voies d'amélioration sont abordées par groupements de paramètres d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle : données d'entrées géométriques, caractéristiques thermiques de l'enveloppe, systèmes de chauffage et production d'énergie, données climatiques, environnement urbain, occupants. Il faut prendre en compte que toutes les observations, hypothèses et recommandations écrites dans cette section éloignent notamment du « cas idéal » où tous les données du bâtiment sont connus.

5.4.1 **Morphologie de l'enveloppe**

Dans sa version actuelle, les diverses caractéristiques géométriques de l'enveloppe de l'outil MEDUS sont principalement issues de la base de données de l'INSEE et de la définition des trois typologies. Il existe cependant d'autres alternatives pour recueillir ces caractéristiques des bâtiments, ainsi d'ailleurs que d'autres caractéristiques géométriques qui ne sont, pour l'instant, pas prises en compte dans MEDUS.

Concernant les caractéristiques de taille de l'enveloppe (hauteur, largeur et longueur), MEDUS utilise un facteur de forme de l'empreinte au sol (largeur vs longueur) de 1 ou 2 pour les logements individuels et les maisons mitoyennes. Pour les logements collectifs, la modélisation se fait sur une structure type cube. Cela peut paraître simpliste, mais tout changement de ce rapport largeur vs longueur doit être bien justifié en raison d'une incidence directe de ce paramètre avec la compacité du bâtiment. L'utilisation des données SIG, et plus particulièrement la base de données cadastrale pour analyser des valeurs moyennes de ce paramètre est une des voies à étudier. Une enquête de terrain peut également être envisagée, mais cela peut devenir vite coûteux.

Pour la hauteur du bâtiment MEDUS utilise une valeur standard de 2,5 m. Cette valeur doit être affinée compte tenu de sa forte influence sur les résultats de consommation finale (chapitre 4). Il existe de nombreuses façons d'obtenir une valeur plus réaliste de la hauteur de chaque bâtiment. On peut imaginer une enquête de terrain avec les mêmes limites en terme de couts (ce qui est envisageable à l'échelle d'un quartier type Saint Felix ne l'est plus à l'échelle d'une ville). On peut également imaginer exploiter la base de données TOPO. En effet, cette base de données donne une information sur la « hauteur » du bâtiment. Une première exploitation possible est la simple division de cette hauteur par une hauteur d'étage fixe a priori et une correction après arrondi du nombre d'étages : si la valeur standard est de 2,5 m par étage, et si la base de donnée TOPO de l'IGN donne une hauteur de bâtiment de 11,4 m, on peut déduire en première approximation qu'on a affaire à un bâtiment de 4 étages de 2.875m de haut ou à un bâtiment de 5 étages de 2.28m de haut.

Concernant les données relatives au taux de vitrage d'un bâtiment, là encore une solution pour obtenir d'obtention une information (partielle et approximative) consiste à se déplacer, avec toutes les limites déjà évoquées de l'enquête de terrain (ans compter que toutes les façades ne sont pas nécessairement accessibles). Une voie à explorer est l'analyse numérique des images prises des façades. Cette alternatives nécessite de combiner une source d'information pertinente en termes d'images ainsi que le développement des codes de traitements.

5.4.2 Caractéristiques thermiques de l'enveloppe.

Les caractéristiques thermiques de l'enveloppe sont un des facteurs qui ont une forte influence dans les besoins de chauffage. La liaison entre l'âge et ces caractéristiques dans MEDUS semble correcte. Une division plus fine des classes d'âge peut servir à affiner les résultats si une période semble particulièrement intéressante au modélisateur. Des analyses de sensibilité concernant les diverses typologies de bâtiment et classes d'âges utilisées dans MEDUS peuvent être une solution pour pouvoir simplifier les diverses hypothèses des classes d'âge que nous avons pris dans cette version du logiciel.

Permettre au système MEDUS de pouvoir utiliser la valeur U des parois au lieu des caractéristiques thermiques des matériaux est une voie indispensable pour augmenter leur degré de flexibilité. Pour cela, des hypothèses concernant l'isolant et les matériaux types doivent être faites. D'autres sources comme une analyse des images satellites doivent également être intégrées à MEDUS.

5.4.3 Systèmes de chauffage et production de l'énergie

L'intégration des systèmes de chauffage est une évolution logique de Medus. Un des avantages de l'exploitation de la base de données de l'INSEE est la possibilité de liée des informations concernant le type de fuel utilisé pour le chauffage des maisons, à des modèles prédéfinis (plus ou moins détaillés) de systèmes de chauffage. Une autre alternative est l'utilisation de rendements globaux (système, réseau, émission).

Par ailleurs, nous pouvons intégrer aux diverses typologies de bâtiment, diverses typologies de systèmes de chauffage pour évaluer de façon plus fine les besoins et la consommation pour le chauffage au niveau résidentiel (c'est l'approche suivie par l'APUR [Atelier parisien d'urbanisme](#) (2007) pour passer des besoins de chauffage aux consommations). Pour cela une étude plus approfondie concernant les divers types de systèmes de chauffage dans le secteur résidentiel en France (individuels et collectifs) est nécessaire, et des informations plus précises concernant le rendement de ces systèmes sont nécessaires.

5.4.4 **Données climatiques et environnement urbain.**

Les masques proches dus à l'environnement urbain et aux bâtiments voisins sont à l'origine des variabilités dans la consommation en chauffage. D'après [Nikoofard et al. \(2011\)](#), cette variabilité peut varier de 10 à 90 % d'impact sur les besoins en chauffage et climatisation. L'implémentation des masques sous ESP-r est une voie de développement à mettre en place. Ceci est particulièrement difficile du fait de la forte relation entre les phénomènes de masques proches, orientation et distance entre objets. Une spatialisation des bâtiments sur une cartographie cadastrale et une approximation des masques serait sans doute la voie la plus intéressante à développer dans MEDUS. Dans d'autres cas, des typologies des masques peuvent être une option à ces travaux

5.4.5 **Occupants**

Dans cette première version de MEDUS la modélisation des apports gratuits dus aux occupants et à leurs comportements, repose sur la définition d'un profil d'occupation, choisi statique (voir chapitre 2). Un profil statique des apports gratuits donne des résultats approximatifs de la réalité. La modélisation de l'occupation et des comportements est une chose déjà complexe à l'échelle d'un bâtiment. Les difficultés augmentent lorsqu'on change d'échelle et que l'on considère un ensemble de bâtiments, un quartier ou une ville.

Une approche possible pour surmonter cette difficulté consiste en une combinaison des informations statistiques disponibles (données INSEE, enquête ménage) et d'une approche par typologie. La définition de profils types d'occupation n'est cependant pas immédiate car elle regroupe plusieurs critères tels que la composition des ménages, la catégorie socioprofessionnelle de ce ménage, le taux d'équipements, le niveau de vie... Se sont autant d'indicateurs (quantitatifs et/ou qualitatifs) qui nécessiteraient une analyse de sensibilité (analogue à celle menée dans ce travail sur les données d'entrées des modèles physiques) afin d'identifier les paramètres principaux et de définir éventuellement des modèles simplifiés. Enfin, la difficulté, une fois l'occupation « modélisée », serait d'intégrer les comportements qui, surtout lorsqu'on parle de bâtiments à haute performance énergétique, ne sont plus du deuxième ordre dans les résultats de consommation des bâtiments.

5.4.6 **Temps d'exécution du calcul**

Le temps d'exécution de MEDUS est une difficulté importante dans la conception de ce genre de modèle. Une modélisation complète du quartier Saint Félix, avec la version

actuelle de MEDUS, prend en moyenne 7 heures avec un processeur à double-coeur et une mémoire ram modeste. Ce temps de calcul peut être divisé par deux ou trois en augmentant la puissance du processeur et l'espace mémoire.

La principale raison de ce coût en temps de calcul est, d'abord, que tous les logements contenus dans la base de donnée de l'INSEE sont modélisés un par un. Une autre étape « gourmande » en temps de calcul est le transfert des informations dans l'architecture générale. De plus, concernant la typologie collective, la modélisation de tels bâtiments se fait en tirant au sort les résultats pour un logements de la typologie C dans 27 zones thermiques (voir chapitre 2). Cela signifie que nous modélisons 27 logements pour récupérer un seul résultat. Dans un premier temps nous avons conservé cette méthode gourmande de génération des résultats, mais il peut être possible de réduire le temps du calcul 10 fois en faisant un tirage au sort collectif de génération des résultat. De cette façon, le résultat de 22 logements collectifs peuvent être récupérés par une modélisation de la typologie C. Ainsi, une modélisation avec l'outil MEDUS, peut potentiellement être réduite à 1 heure, ce qui devient intéressant en terme de temps de calcul au regard des résultats.

Une autre voie de réduction du temps de calcul est liée à la connaissance apriori des objectifs de modélisation et de profiter de la flexibilité de l'outil (cf chapitre 1) en substituant à ESP-r une autre alternative de calcul thermique des bâtiments. En effet, le choix d'un outil aussi complet qu'ESP-r était délibéré (et souhaitable) dans notre problématique de développement, mais il est évidant que plusieurs solutions alternatives existent : Modèle RC (à l'image de CitySim [Robinson et al. \(2009\)](#)), méthodes de réduction de modèles, modèles de bilans grossiers...

5.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons testé la capacité du système MEDUS à analyser les besoins en chauffage de l'IRIS Saint Félix. Les premiers éléments de comparaison (valeurs des besoins par m²) fournis par le modèle sont cohérents avec les divers ordres de grandeur des études recensées. Bien entendu, un travail de validation rigoureux reste à faire, en y intégrant notamment les résultats temporels de l'outil.

Il sera également intéressant de comparer les résultats à ceux fournis par un autre modèle énergétique à cette échelle. Cela ouvrant la voie à de multiples collaborations sur le sujet (que se soit sur les aspects validation ou les développements de sous modèles) qui est un des objectifs de la démarche de ce travail (cf chapitre 1).

Malgré les résultats encourageants, plusieurs pistes ont été ouvertes pour poursuivre le développement de MEDUS. En particulier, comme cela a été démontré pour les modèles thermique et abordé pour les modèles de comportements, les hypothèses faites (notamment en terme de données d'entrée) dans les divers sous-modèles ont une forte influence sur le résultat final. Pour pouvoir étudier cette influence il conviendra de mener le même type d'analyses de sensibilités que celles réalisées dans ce travail en développant les méthodologies d'exploitation pour définir les typologies des différentes variables nécessaires aux divers modèles.

5.5. *Conclusions*

Enfin, en complément du potentiel qu'offre les données spatiales pour alimenter les sous modèles, l'exploitation de ces bases de données via les Systèmes d'Information Géographiques apparaît comme une suite logique du développement de MEDUS.

Chapitre 6

Conclusion générale

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de la modélisation de la demande énergétique à l'échelle du quartier et de la ville.

Nous avons tout d'abord fourni une analyse du contexte et des enjeux concernant la modélisation à l'échelle de la ville. Après avoir présenté les différentes alternatives de modélisation à cette échelle, une analyse des modèles du type bottom-up a également été proposée, du fait de leur pertinence dans cette problématique. Cela a permis de présenter les principales contraintes de construction de ce type de modèle.

Sur la base de ces réflexions, nous avons proposé une méthodologie d'approche flexible de la modélisation énergétique d'un quartier. Une première étape de développement d'un tel modèle a été proposée à travers l'outil MEDUS. Cette étape a permis de recenser les différentes alternatives en termes de sources de données d'entrée mobilisables, ainsi que les solutions des différents sous-modèles.

Afin d'assurer le passage de l'échelle du bâtiment à celle d'un quartier, s'est naturellement posée la question de la diminution du nombre des données à mobiliser en entrée des sous-modèles. Cette réflexion a également été menée pour ouvrir la voie de la réflexion sur les modèles simplifiés ou réduits. Les méthodes d'analyse de sensibilité se sont vite avérées intéressantes pour atteindre de tels objectifs. Une étude générale de ces méthodes, et plus spécifiquement de la méthode de Morris et des indices de sensibilité totale de Sobol, a été proposée, en mettant en évidence les similarités entre les indicateurs fournis par ces deux types d'approches. Dans cette présentation nous avons insisté sur les différents temps de calcul que fournissent les deux méthodes.

Nous avons ensuite présenté un cas test de la méthode de Morris de premier et second ordre, appliqué à différentes sorties de besoins en chauffage d'un bâtiment collectif. Nous avons notamment mis en évidence la possibilité d'un couplage des indices de sensibilité de Morris pour le premier et deuxième ordre afin d'expliquer l'influence des divers paramètres dans la sortie du modèle.

Enfin, nous avons testé le modèle MEDUS dans un cas applicatif pour un quartier de la ville de Nantes. Les résultats de cette analyse montrent des premiers éléments encourageants en termes de besoins de chauffage. Une première présentation du potentiel d'utilisation de cet outil a également été proposée.

Sur la base de ce premier retour, nous avons proposé des pistes d'amélioration du modèle MEDUS qui pourront offrir plus de flexibilité au logiciel, notamment en prenant en compte d'autres sources de données.

La flexibilité des sources de données ainsi que des sous-modèles est une caractéristique indispensable dans la problématique de modélisation à l'échelle du quartier. Comme cela a été évoqué dans le chapitre 1, le but n'est pas de développer un outil universel, mais bien de permettre la mise en œuvre de la solution la plus adaptée au regard des objectifs de modélisation. Cela est d'autant plus important que ces objectifs sont variables selon les acteurs intéressés par la question énergétique à ces échelles.

Cette démarche ouvre de plus de nombreuses perspectives de développement de MEDUS en fonction des opportunités de cas d'études à venir. Cela ouvre également la porte à toute contribution scientifique en termes de sous-modèles par exemple, ou de partage de réflexion sur les aspects méthodologiques d'appréhension de ces échelles.

Bibliographie

ADEME, 2012. Site web.

URL www.pcet-ademe.fr

Alan, F. M., McNaught, K. R., Ringrose, T. J., 2004. Using morris' randomized oat design as a factor screening method for developing simulation metamodels. In : Proceedings of the 2004 winter simulation conference. pp. 949–957.

URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1161926>

Anderson, B., Chapman, P., Cutland, N., Dickson, C., Doran, S., Henderson, G., al et., 2002. BREDEM-8-model description : 2001 Update. BRE.

APEC, 1967. HCC-Heating/Cooling Load Calculation Program. Automated Procedures for Engineering Consultant, Inc. Dayton, Ohio.

Armstrong, M. M., Swintona, M. C., Ribberinkb, H., Beausoleil-Morrison, I., Milletted, J., 2009. Synthetically derived profiles for representing occupant-driven electric loads in canadian housing. Journal of Building Performance Simulation 2, 15–30.

URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19401490802706653>

ASHRAE, Mars 2001. International Weather for Energy Calculations Manual.

URL <http://www.gard.com/ml/bldg-sim-archive/pdfc3r1TMS8rv.pdf>

Atelier parisien d'urbanisme, 2007. Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes. Tech. rep.

Aydinalp, M., Ugursal, V., Fung, A., 2002. Modeling of the appliance, lighting, and space cooling energy consumption in the residential sector using neural networks. Applied Energy 2, 87–110.

Baker, N., Steemers, K., 1996. Lt method 3.0 – a strategic energy-design tool for southern europe. Energy and Buildings 23 (3), 251 – 256, pLEA '94 International Conference.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778895009507>

Baker, N., Steemers, K., 2005. Energy and Environment in Architecture. Taylor and Francis.

URL <http://www.amazon.co.uk/Energy-Environment-Architecture-Nick-Baker/dp/0419227709>

BLAST Support Office, 1992. BLAST 3.0 User's Manual. University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Bolton, R., 1911. Heating requirements in new york weather. The metal worker, plumber and steam fitter 8, 1–10.
- Bouyer, J., Musy, M., Huang, Y., Athamena, K., 2009. Mitigating urban heat island effect by urban design : Forms and materials. In : Fifth Urban Research Symposium 2009 "Cities and Climate Change : Responding to an Urgent Agenda". Marseille, 28-30 juin 2009. Pas de note.
- Bratley, P., Fox, B. L., 1988. Algorithm 659 : Implementing sobol's quasirandom sequence generator. ACM Transactions on Mathematical Software 14, 89–100.
URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=214372>
- Braye, D., 2012. Plateforme de recherche et d' experimentation sur l' energie dans le bati- ment prebat. site web :.
URL <http://www.prebat.net>
- Breesch, H., Janssens, A., 2004. Uncertainty and sensitivity analysis of the performances of natural night ventilation. In : Conference on air distribution in rooms.
URL http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0115_122.pdf
- Briskin, W., Reque, S., 1956. Heat load calculations by thermal response. ASHRAE Transactions 62.
- Brohus, H., Heiselberg, P., Hesselholt, A., Rasmussen, H., 2009. Application of partial safety factors in building energy performance assessment. In : Eleventh International IBPSA Conference.
URL http://vbn.aau.dk/files/19107006/Application_of_Partial_Safety_Factorsin_Building_Energy_Performance_Assessment
- Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., Britter, R., 2011a. Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model. Boundary-Layer Meteorology 140, 471–489.
URL <http://architecture.mit.edu/sites/all/files/attachments/project/BuenoetalBLM2011.pdf>
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L. K., Zibouche, K., 2011b. Development and evaluation of a building energy model integrated in the teb scheme. Geosci. Model Dev. Discuss. 4, 2973–3011.
URL <http://www.geosci-model-dev-discuss.net/4/2973/2011/>
- Buhl, F., 1979-2003. Doe-2.x supplement (lbl-8607, lbl-34947, lblnl). Tech. rep., Laurence Berkeley National Laboratory.
- Building Research Establishment, 1998. The goverment standard assessment procedure sap. Tech. rep.
- Campolongo, F., Braddock, R., 1999. The use of graph theory in the sensitivity analysis of the model output : a second order screening method. Reliability Engineering & System Safety 64 (1), 1 – 12.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832098000088>

- Campolongo, F., Cariboni, J., Saltelli, A., 2007. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software* 22 (10), 1509 – 1518, modelling, computer-assisted simulations, and mapping of dangerous phenomena for hazard assessment.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815206002805>
- Cantin, R., Burgholzer, J., Guarracino, G., Moujalled, B., Tamelikecht, S., Royet, B., 2010. Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in france. *Building and Environment* 45 (2), 473 – 484, <ce :title>1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings</ce :title>.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309001711>
- Caouris, Y., Kittas, C., Santamouris, M., 1989. Regional monthly estimation of greenhouse energy consumption—application to greece. *Solar & Wind Technology* 6 (3), 225 – 233.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0741983X89900738>
- Capasso, A., Grattied, G., Insignia, W., Invenizzi, F., Lamedica, A., Prudenzi, A., 1993. Validation test and applications of a model for demand-side management studies in residential load areas. 12th International conference on electricity distribution IEEE Conference Publication 373.
- Chan, W. R., Nazaroff, W. W., Price, P. N., Sohn, M. D., Gadgil, A. J., 2005. Analyzing a database of residential air leakage in the united states. *Atmospheric Environment* 39 (19), 3445 – 3455.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231005002116>
- Churchill, R., 1958. Operational thermodynamics. McGraw Hill.
- Clarke, J., 1977. Environmental systems performance. Ph.D. thesis, University of Strathclyde.
- Clarke, J., 1985. Energy simulation in building design. ButterWorth-Heinemann.
- Clarke, J., Gauri, S., Johnstone, C., Tim, J., Tuohy, P., 2008. The edem methodology for housing upgrade analysis, carbon and energy labelling at national policy develo. In : IBPSA Canada Esim Conference.
- Convention des maires, 2012. Site web.
URL <http://www.eumayors.eu>
- Cooling, M., Hunter, P., Crampin, E. J., 2007. Modeling hypertrophic ip3 transients in the cardiac myocyte. *Biophysical Journal* 93 (10), 3421 – 3433.
URL [http://www.cell.com/biophysj/abstract/S0006-3495\(07\)71595-3](http://www.cell.com/biophysj/abstract/S0006-3495(07)71595-3)
- Corrado, V., Mechri, H. E., 2009. Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating. *Journal of Building Physics* 33 (2), 125–156.
URL <http://jen.sagepub.com/content/33/2/125.short?rss=1&ssource=mfc>
- Coulibaly, I., 1997. Contributions à l’analyse numérique des méthodes quasi-monte carlo. Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier-Grenoble 1.
URL <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00004933/en/>

- Crawley, D. B., Pedersen, C. O., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., 2000. Energyplus : Energy simulation program. ASHRAE Journal 42, 49.
URL <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=52608370&Fmt=7&clientId=23693&RQT=309&VName=PQD>
- Cropp, R. A., Braddock, R. D., 2002. The new morris method : an efficient second-order screening method. Reliability Engineering & System Safety 78 (1), 77 – 83.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832002001096>
- de Witt, M., 1997. Identification of the important parameters in thermal building simulation models. J. Statist. Comput. Simul 57, 305–320.
URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00949659708811814>
- Demaël, E., 2007. Modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu complexe et incertitudes associées. Ph.D. thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Déqué, F., Ollivier, F., Poblador, A., 2000. Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters. Energy and Buildings 31 (1), 29 – 35.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778898000747>
- Duchêne, C., Bard, S., Barillot, X., Ruas, A., Trévisan, J., Holzapfel, F., 2003. Quantitative and qualitative description of building orientation. Institute Géographique National.
- Dutt, G., Fels, M., Goldberg, M., Stram, D., 1982. The scorekeeping model for residential energy consumption : procedures and problems. Abstract in ACEEE 1982 study proceedings.
- eddine Mechri, H., Corrado, V., 2010. Practical applications of uncertainty and sensitivity techniques in building energy simulation. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2 (6), 7708 – 7709, sixth International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810013315>
- Enerdata, 2012. Site web.
URL <http://www.enerdata.net/>
- Enertech, 2012. Site web.
URL <http://www.enertech.fr/>
- Erell, E., Pearlmutter., D., Williamson, T., 2011. Urban Microclimate : Designing the Spaces Between Buildings. Earthscan.
- Farreny, R., Gabarrell, X., Rieradevall, J., 2008. Energy intensity and greenhouse gas emission of a purchase in the retail park service sector : An integrative approach. Energy Policy 36 (6), 1957 – 1968.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508000888>

- Fels, M. F., 1986. Prism : An introduction. *Energy and Buildings* 9 (1-2), 5 – 18.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778886900034>
- Firth, S., Lomas, K., Wright, A., 2010. Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Building Research and Information* 38 (1), 25–41.
URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613210903236706>
- Francos, A., Elorza, F. J., Bouraoui, F., Bidoglio, G., Galbiati, L., 2003. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models : understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale. *Reliability Engineering & System Safety* 79 (2), 205 – 218.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832002002314>
- Fung, A. S., Guler, B., Aydinalp, M., Ugursal, I., 2000. Development of canadian residential energy end-use and emission model (creem). Tech. rep., CREEDAC, Dalhousie University.
- Garcia-Sanchez, D., Bourges, B., Lacarriere, B., Musy, M., 2009. The use of sensitivity analysis in building energy simulations. In : *CISBAT International Conference 2009*.
- Garcia-Sanchez, D., Lacarrier, B., Bourges, B., Musy, M., 2012. The application of sensitivity analysis in building energy simulations : combining first and second order elementary effects method. *Energy and Buildings*.
- Garcia-Sanchez, D., Lacarriere, B., Bourges, B., Musy, M., 2011. The application of sensitivity analysis in building energy simulations. In : *CISBAT International conference proceedings, Lausanne, Switzerland*.
- Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., Baggio, P., 2011. Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings* 43 (4), 1030 – 1037.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811000053>
- Goldberg, M., 1982. A geometrical approach to non-differentiable regression models as related to methods for assessing residential energy consumption. Ph.D. thesis, Princeton University.
- Grau, K., 2001. Bsim user's guide 6,9,10,13. Tech. rep., Danish Building Research Institute, Aalborg University.
- Graven, R., Hirsch, P., 1977. CAL-ERDA user's manual.
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Bohnenstengel, S. I., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M. L., Hamdi, R., Hendry, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E. S., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Shashua-Bar, L., Steeneveld, G.-J., Tombrou, M., Voogt, J., Young, D., Zhang, N., 2010. The international urban energy balance models comparison project : First results from phase 1. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 49 (6), 1268–1292.
URL <http://dx.doi.org/10.1175/2010JAMC2354.1>

- Haas, R., Auer, H., Biermayr, P., 1998. The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating. *Energy and Buildings* 27 (2), 195 – 205.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778897000340>
- Haldi, F., 2010. Towards a unified model of occupants behaviour and comfort for building energy simulation. Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Haldi, F., Robinson, D., 2008. On the behaviour and adaptation of office occupants. *Building and Environment* 43 (12), 2163 – 2177.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308000024>
- Hamby, D., 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment* 32 (2), 135–154.
- Hamby, D., February 1995. A comparison of sensitivity analysis techniques. *Health Physics* 68 (2), 195–204.
- Hand, J., 2010. Esp-r cookbook. Tech. rep., University of Strachclyde.
- Harman, I., 2003. The energy balance of urban areas. Ph.D. thesis, The University of Reading.
URL <http://www.met.rdg.ac.uk/phdtheses/The%20energy%20balance%20of%20urban%20areas.pdf>
- Hartman, R., Werth, A., 1979. Short-run residential demand for fuels : a disaggregated approach. Tech. rep., MIT Energy Laboratory.
- Heiple, S., Sailor, D. J., 2008. Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. *Energy and Buildings* 40 (8), 1426 – 1436.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808000200>
- Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E., Thomas, S., 2009. Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. *Renewable Energy* 34 (9), 2030 – 2036, special Issue : Building and Urban Sustainability.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000640>
- Henninger, R., 1975. NECAP, NASA's Energy-Cost Analysis Program. National Aeronautics and Space Administration.
- Hill, P., 1957. A method of computing the transient temperature of thick walls from arbitrary variation of adiabatic-wall. temperature and heat transfer coefficient, technical note 4105. Tech. rep., National Advisory Committee of Aeronautics.
- Hirst, E., Lin, W., Cope, J., 1977. Simulation model of household fuel uses. *Appl. Math. Modeling* 1.
- Hittle, D., 1981. Calculating building heating and cooling loads using the frequency response of multi layered slabs. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Huang, Y., Akbari, H., Rainer, L., Ritschard, R., 1991. 481 prototypical commercial buildings for 20 urban market areas. Tech. rep., Lawrence Berkeley Laboratory.
- Huang, Y. J., Brodderick, J., 2000. A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire u.s. building stock. 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings,.
- Hung, S. H. Y., Mendelsohn, N. S., 1977. Handcuffed designs. *Discrete Mathematics* 18 (1), 23 – 33.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012365X77900036>
- INSEE, 2006. Documentation en detail du fichier logements. Tech. rep.
URL http://www.recensement-2006.insee.fr/telechargement/fichiers-detail/documentation/DOC_FD_LOGEMT_2006.pdf
- Institut Géographique National, 2012. Site Web.
URL <http://recherche.ign.fr/>
- Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, 2012.
URL <http://www.insee.fr/fr/>
- Integrated Environmental Solutions, 2012. Site web.
URL <http://iesve.com/>
- Inventaire Forestier National, 2012. Inventaire forestier national.
URL <http://www.ifn.fr/spip/>
- IPCC, 2007. Climate change 2007 : The physical science basis : contribution of working group I to the fourth assessment. Cambridge University Press.
- Iwashita, G., Akasaka, H., 1997. The effects of human behavior on natural ventilation rate and indoor air environment in summer — a field study in southern japan. *Energy and Buildings* 25 (3), 195 – 205.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778896009942>
- Izquierdo, S., Rodrigues, M., Fueyo, N., 2008. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy* 82 (10), 929 – 939.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000625>
- Johnsen, K., 1995. General shading model for solar building design. *A S H R A E Technical Data Bulletin* 11 (3), 100–112.
- Jones, P., Patterson, J., Lannon, S., 2007. Modelling the built environment at an urban scale—energy and health impacts in relation to housing. *Landscape and Urban Planning* 83 (1), 39 – 49, cities and Sustainability.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V91-4P83CYG-1/2/446c0fc87bbab82c93da5de0dce094d8>
- Klein, S., 2006. TRNSYS 16 A transient system simulation program. Univer.

- Klein, S., 2011. TRYNSYS Manual ver. 17. University of Wisconsin, Madison.
- Klein, S. A., 1976. A design procedure for solar heating systems. Ph.D. thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Kämpf, J. H., December 2009. On the modelling and optimisation of urban energy fluxes. Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
URL http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2009/4548/EPFL_TH4548.pdf
- Kämpf, J. H., Robinson, D., 2007. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Buildings* 39 (4), 445 – 453.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806002192>
- Kucherenko, S., Rodriguez-Fernandez, M., Pantelides, C., Shah, N., 2009. Monte carlo evaluation of derivative-based global sensitivity measures. *Reliability Engineering & System Safety* 94 (7), 1135 – 1148, special Issue on Sensitivity Analysis.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183200800152X>
- Kusuda, T., 1971. Computer program for heating and cooling loads in buildings. National Bureau of Standards.
- Kusuda, T., 1974. Computer program for heating and cooling loads in buildings nbsld. Tech. rep., National Bureau of Standards.
- LaFrance, G., Perron, G., 1994. Evolution of residential electricity demand by end-use in quebec 1979-1989 : A conditional demand analysis. *Energy Studies Review* 6.
- Lawrence Berkeley Laboratory, 1997. Cal/con program. Tech. rep.
- Laurent, M. H., Cattier, F., Osso, D., Pourouchottamin, P., 2011. Scénarios de la demande en énergie : une rétrospective critique. *Futuribles* (376), 5–28.
- Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005. equest user manual. Tech. rep.
- Lecote, F., 2010. Validation empirique du logiciel pleiades+comfie dans le cas de bâtiments passifs, étude préliminaire analyses d'incertitudes et de sensibilité. Master's thesis, Ecole Centrale de Nantes - Ecole des Mines de Paris - IRSTV.
- Leighton, G., 1978. Doe-1.x fixes and improvements. Tech. rep., Lawrence Berkeley Laboratory.
- Liu, H.-L., Yang, F.-C., Huang, C.-H., Fang, H.-W., Cheng, Y.-C., 2007. Sensitivity analysis of the semiempirical model for the growth of the indigenous acidithiobacillus thiooxidans. *Chemical Engineering Journal* 129 (1-3), 105 – 112.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894706004438>
- Lockmanhekim, M., 1971. Computer program for analysis of energy utilisation in postal facilities,. Vol. I, II and III. presented at the U.S. Postal Service Symposium in Washington, D.C.

- Lokmanhekim, M., 1969. Procedures for simulating the performance of components and system for energy calculations. ASHRAE.
- Lomas, K. J., Eppel, H., 1992. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings* 19, 21–44.
- Lorenz, F., Masy, G., 1982. Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments. traitement par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps. Tech. rep., Université de Liège.
- Macdonald, I., Strachan, P., 2001. Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings* 33 (3), 219 – 227.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800000852>
- Marguerite, C., 2010. Analyse de sensibilité de l'outil citysim. Master's thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne - Ecole des Mines de Nantes.
- Mathworks, 2012. Site web.
URL <http://www.mathworks.fr/products/matlab/>
- Matsuka, M., Braddock, R., Agranovski, I., 2007. Numerical study of hydrogen permeation flux in srce0.95yb0.05o3-[alpha] and srce0.95tm0.05o3-[alpha]. *Solid State Ionics* 178 (13-14), 1011 – 1019.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167273807001452>
- Mavrogianni, A., Davies, M., Kolokotroni, M., Hamilton, I., 2009. A gis-based bottom-up space heating demand model of the london domestic stock. Building simulation 2009 IBPSA Conference Glasgow, Scotland.
- Mayra, O., Leiviska, K., 2009. Modelling in methanol synthesis. *Chemical Engineering Transactions* 17, 1413–1418.
- Mersserli, M., 2009. Analyse des difficultés de modéliser la consommation énergétique à l'échelle d'un quartier. Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Nantes.
- Meteonorm, 2012. Site web.
URL <http://meteonorm.com/>
- Michalik, G., Khan, M. E., Bonwick, W. J., Mielczarski, W., 1997a. Structural modelling of energy demand in the residential sector : 1. development of structural models. *Energy* 22 (10), 937 – 947.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544297000297>
- Michalik, G., Khan, M. E., Bonwick, W. J., Mielczarski, W., 1997b. Structural modelling of energy demand in the residential sector : 2. the use of linguistic variables to include uncertainty of customers' behaviour. *Energy* 22 (10), 949 – 958.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544297000303>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., 2002. On the energy consumption in residential buildings. *Energy and Buildings* 34 (7), 727 – 736.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801001372>

- Ministere du developpement durable, 2012. Projet batan site web :
URL <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-recherche-batan-a519.html>
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2009. Chiffres clés de l'énergie. Tech. rep., Commissariat Général au developpement durable, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Repere.pdf>.
- Mitalas, G., 1965. An assessment of common assumptions in estimating cooling loads and space temperatures. *ASHRAE Transactions* 75, 72–80.
- Mitalas, G., 1969. An experimental check on the weighting factor of calculating room cooling load. *ASHRAE Transactions* 75.
- Mitalas, G., Stephenson, D., 1966. Fortran iv programs to calculate radiant energy interchange factors. Tech. rep., Division of Building Research, National Research Council.
- Mitalas, G., Stephenson, D., 1967. Room thermal response factors. *ASHRAE Transactions* 73, 1–10.
- Mitalas, G. P., Stephenson, D., Baxter, D., 1960. Use of an analog computer for room air-conditioning calculations. *Proceedings of the Second Conference of the Computing and Data Processing Society of Canada*, 175–192.
- Mohanty, S., Lu, Y., Menchaca, J., 1999. Preliminary analysis of the morris method for identifying influential parameters. *Transactions of the American Nuclear Society* 81, 55–56.
URL http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=20005731
- Monteil, A., 2010. Analyse de sensibilité pour la modélisation du comportement thermique d'un quartier par approche typologique, lors de la phase de reconstitution. Master's thesis, Ecole des Mines de Nantes - Ecole Centrale de Nantes.
URL <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/docs/00/56/49/65/PDF/MONTEIL2010.pdf>
- Morris, M. D., May 1991. Factorial samplings plans for preliminary computational experiments. *Technometrics* 33 (2), 161–174.
URL <http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu/tutorial/Morris.pdf>
- Mullins, B. J., Agranovski, I. E., Braddock, R. D., Ho, C. M., 2004. Effect of fiber orientation on fiber wetting processes. *Journal of Colloid and Interface Science* 269 (2), 449 – 458.
- Musy, M., 1999. Génération automatique de modèles zonaux pour l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments. Ph.D. thesis, Université de La Rochelle, La Rochelle, science pour l'Ingénieur : Spécialité Génie Civil.
- Musy, M., 2007. Demande d'habilitation à diriger des recherches : Du microclimat au bâtiment concevoir en milieu urbain :prise en compte des interactions bâti-environnement urbain. Ph.D. thesis, Université de Nantes, Nantes, pas de note.

- Natarajan, S., Levermore, G. J., 2007. Predicting future uk housing stock and carbon emissions. *Energy Policy* 35 (11), 5719 – 5727.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421507002194>
- Natural Resources Canada, 1998. Hot200 program user manual. Tech. rep.
- Natural Resources Canada, 2005. Survey of household energy use (sheu), summary report. Tech. rep.
URL <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistics/sheu-summary/pdf/sheu-summary.pdf>
- Natural Resources Canada, 2011. Hot300 user's manual. Tech. rep.
- Nessi, A., Nisolle, L., 1925. Régimes variables de fonctionnement dans les installations de chauffage central. DUNOD.
- Nielsen, T. R., 2005. Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. *Solar Energy* 78 (1), 73 – 83.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04001550>
- Nikoofard, S., Ugursal, V. I., Beausoleil-Morrison, I., 2011. Effect of external shading on household energy requirement for heating and cooling in canada. *Energy and Buildings* 43 (7), 1627 – 1635.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811000788>
- Oke, T., 1987. *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- O'Neal, D. L., Hirst, E., 1980. An energy use model of the residential sector. *IEEE Transactions on systems, manufactory and cybernetics* 10, 749–755.
- OpenJump GIS Software, 2012. Site web.
URL <http://www.openjump.org/>
- OpenStreetMap, 2012. Site web.
URL <http://www.osm-3d.org/>
- Page, J., 2007. Simulating occupant presence and behaviour in buildings. Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Page, J., Robinson, D., Morel, N., Scartezzini, J.-L., 2008. A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings* 40 (2), 83 – 98.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880700031X>
- Pauw, D. J. D., Steppe, K., Baets, B. D., 2008. Unravelling the output uncertainty of a tree water flow and storage model using several global sensitivity analysis methods. *Biosystems Engineering* 101 (1), 87 – 99.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511008001554>
- Pearce, J. M., Johnson, S. J., Grant, G. B., 2007. 3d-mapping optimization of embodied energy of transportation. *Resources, Conservation and Recycling* 51 (2), 435 – 453.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344906002503>

- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44 (5), 271 – 289.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9090055H>
- Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40 (3), 394 – 398.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001016>
- Pinter, L., D.Cressman, Zahedi, K., 1999. Capacity building for integrated environmental assessment and reporting : Training manuell. Tech. rep., United Nations Environment Programme (UNEP).
- Projet Alpage - Institut Geographique National, 2012. Site web morphal.
URL <http://alpage.tge-adonis.fr/documents/ressources/MorphAL-0.1.zip>
- Projet Tabula, 2012. Site web :.
URL <http://www.building-typology.eu/>
- Projets concerto, 2012. Site web :.
URL <http://concerto.eu>
- Pujol, G., June 2008. R-project package 'sensitivity' version 1.4. Tech. Rep. 1.4, Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- Racicot, F., Théoret, R., 2006. Finance computationnelle et gestion des risques. Presses de l'Université de Quebec.
- Ratti, C., Baker, N., Steemers, K., 2005. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings* 37 (7), 762 – 776.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-4F8TKB9-1/2/754f17848b02f8f766319c2419337b15>
- Ratti, C., Robinson, D., Backer, N., Steemers, K., 2000. Lt-urban, the energy modelling of urban form. The Martin Centre, Cambridge University.
- Richter, G., Acutis, M., Trevisiol, P., Latiri, K., Confalonieri, R., 2010. Sensitivity analysis for a complex crop model applied to durum wheat in the mediterranean. *European Journal of Agronomy* 32 (2), 127 – 136.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030109000896>
- Rijal, H., Tuohy, P., Humphreys, M., Nicol, J., Samuel, A., Clarke, J., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings* 39 (7), 823 – 836, <ce :title>Comfort and Energy Use in Buildings - Getting Them Right</ce :title>.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000400>
- Rio World Earth Summit Agenda 21, 2012. website :.
URL <http://www.un.org/french/ga/special/sids/agenda21/>

- Robinson, D., 2011. Computer Modelling for sustainable urban design. Earthscan.
- Robinson, D., Baker, N., 2000. Simplified modelling recent developments in the It method. *Building Performance* 3, 14–19.
- Robinson, D., Campbell, N., Gaiser, W., Kabel, K., Le-Mouel, A., Morel, N., Page, J., Stankovic, S., Stone, A., 2007. Suntool - a new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy* 81 (9), 1196 – 1211, cISBAT 2005.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0700120X>
- Robinson, D., Haldi, F., Kampf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., U, W., July 2009. Citysim :comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In : Eleventh International IBPSA Conference Proceedings. pp. 1083–1090.
URL http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1083_1090.pdf
- Robinson, D., Stankovic, S., Morel, N., Deque, F., Rylatt, M., Kabele, K., Manolakaki, E., Nieminen, J., 2003. Integrated resource flow modelling of urban neighbourhoods : Project suntool. In : In : Proc. Building Simulation 2003, Eindhoven.
- Robinson, D., Stone, A., 2005. A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research and Technology* 26 (4), 271–284.
- Rode, C., Grau, K., 2003. Whole-building hygrothermal simulation model. *ASHRAE Transactions*.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S., 2008. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley and Sons.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., Ratto, M., 2004. *Sensitivity analysis in practice*. Wiley and Sons.
- Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 2001. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. Earthscan.
- Santamouris, M., Lefas, C. C., 1986. Thermal analysis and computer control of hybrid greenhouses with subsurface heat storage. *Energy in Agriculture* 5 (2), 161 – 173.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167582686900161>
- Santner, T., Williams, B., Notz, W., 2003. *Design and Analysis of Computer Experiments*. Springer-Verlag.
- Shimoda, Y., Asahi, T., Taniguchi, A., Mizuno, M., 2007. Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy* 32 (9), 1617 – 1633.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544207000217>
- Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., Mizuno, M., 2004. Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment* 39 (8), 959 – 967, building Simulation for Better Building Design.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304000319>

- Shimoda, Y., Okamura, T., Yamaguchi, Y., Yamaguchi, Y., Taniguchi, A., Morikawa, T., 2010a. City-level energy and co2 reduction effect by introducing new residential water heaters. *Energy* 35 (12), 4880 – 4891, the 3rd International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection, SEEP 2009.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210004792>
- Shimoda, Y., Yamaguchi, Y., Okamura, T., Taniguchi, A., Yamaguchi, Y., 2010b. Prediction of greenhouse gas reduction potential in japanese residential sector by residential energy end-use model. *Applied Energy* 87 (6), 1944 – 1952.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909004656>
- Shorrock, L., Dunster, J., 1997. The physically-based model brehomes and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the uk housing stock. *Energy Policy* 25 (12), 1027 – 1037.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421597001304>
- Shorrock, L., MacMillan, S., Clark, J., Moore, G., 1991. Bredem 8, a monthly calculation method for energy use in dwellings : testing and development. *Proceedings of the building environmental performance '91*.
- Sénat Republique Francaise, 2012. Villes du futur, futur des villes : quel avenir pour les villes du monde ? (enjeux) - rapport parlementaire. Tech. rep., Rapport Parlementaire du Sénat de la République Francaise, <http://www.senat.fr/rap/r10-594-1/r10-594-14.html>.
- Sobol', I., 1967. On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals. *USSR computational matematics and mathematical physics* 7, 86–112.
- Sobol', I., Kucherenko, S., 2009. Derivative based global sensitivity measures and their link with global sensitivity indices. *Mathematics and Computers in Simulation* 79 (10), 3009 – 3017.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V0T-4VK6N9F-2/2/657130c86920ba2e4d6827e16cc67249>
- Sobol', I., Kucherenko, S., 2010. A new derivative based importance criterion for groups of variables and its link with the global sensitivity indices. *Computer Physics Communications* 181 (7), 1212 – 1217.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TJ5-4YK7J5W-3/2/54a3bb9b9c7704f1c346fcb2cb1eab83>
- Stemers, K., Yun, G. Y., 2009. Household energy consumption a study of the role of occupants. *Building Research & Information* 37, 625–637.
- Stephenson, D., Mitalas, G., 1967. Cooling loads calculations by thermal response factor metho. *ASHRAE Transactions* 73, 1–7.
- Stephenson, D., Mitalas, G., 1971. Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs. *ASHRAE Transactions* 77, 117–126.

- Stoecker, F., 1971. Procedures for simulating the performance of components and systems for energy calculations. ASHRAE.
- Strachan, P., Kokogiannakis, G., Macdonald, I., 2008. History and development of validation with the esp-r simulation program. *Building and Environment* 43 (4), 601 – 609, part Special : Building Performance Simulation.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003313>
- Swan, L., Ugursal, I., Beausoleil-Morrison, I., 2009. Implementation of a canadian residential energy end-use model for assessing new technology impacts. *IBPSA 11th Conference Proc.*, 1429–1436.
- Swan, L. G., 2010. Residential sector energy and ghg emissions model for the assessment of new technologies. Ph.D. thesis, Dalhousie University.
URL <http://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/12998>
- Swan, L. G., Ugursal, V. I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector : A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1819 – 1835.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VMY-4VBC3X3-2/2/338f45a5b335f8a8ee44523322033fd1>
- The Tyndall Centre for Climate Change Research, 2004. Modelling energy use in the global building stock : a pilot survey to identify available data sources. Tech. rep.
- Thorsen, S. M., Höglind, M., 2010. Modelling cold hardening and dehardening in timothy. sensitivity analysis and bayesian model comparison. *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (12), 1529 – 1542.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310002017>
- Tittlein, P., 2008. Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique. Ph.D. thesis, Université de Savoie.
- Tomizuka, A., 2010. Estimation of the power of greenhouse gases on the basis of absorption spectra. *American Journal of Physics* 78(4), 359–366.
- Tuffin, B., 2006. Modélisation mathématique pour la conception, l'analyse quantitative et le contrôle de la qualité de service des systèmes. mémoire d'hdr. Ph.D. thesis, Université de Rennes 1, IFSIC.
URL http://www.irisa.fr/dionysos/pages_perso/tuffin/Publis/hdr.pdf
- Tustin, A., 1947. A method of analyzing the behavior of linear systems in terms of time series. *J. Inst. Elec. Engineers.* 94, 130–142.
- Typologie Approach for Building Stock Energy Assessment : Tabula, 2012. First activites rapport : Use of building typologies for energy performance assessment of national building stocks. existent experiences in european countries and common approach. Tech. rep., Intelligent Energy Europe.
URL http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_SR1.pdf

- Uglow, C., 1980. A study of the effects of thermal capacity on domestic heating energy requirements. *Building Services Engineering Research and Technology* 1, 123–127.
- Uglow, C., 1981. The calculation of energy use in buildings. *Building Services Engineering Research and Technology* 2, 1–14.
- United Nations Settlements Programme, 2011. *Cities and Climate Change, Global Report on Human Settlements 2011*. United Nations.
- US Department of Energy, 2012. Residential energy consumption survey. Tech. rep. URL <http://www.eia.gov/consumption/residential/>
- Wang, X., Potter, S., J.R., W., Atwood, J., Pitts, T., May 2006. Sensitivity analysis of apex for national assessment. *Transactions of the ASABE* 49 (3), 679–688. URL ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NHQ/nri/ceap/sensitivity_analysis_apex.pdf
- Whitcombe, J., Cropp, R., Braddock, R., Agranovski, I., 2006. The use of sensitivity analysis and genetic algorithms for the management of catalyst emissions from oil refineries. *Mathematical and Computer Modelling* 44 (5–6), 430 – 438, <ce :title>Application of Natural Computing Methods to Water Resources and Environmental Modelling</ce :title> <xocs :full-name>Application of Natural Computing (Computational Intelligence) Methods to Water Resources and Environmental Modelling</xocs :full-name>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717706000045>
- Zador, J., Zselya, I., Turanyia, T., 2006. Local and global uncertainty next term analysis of previous termcomplex chemical kinetic systems. *Reliability Engineering & System Safety* 91, 1232–1240.
- Zhang, Y., Barrett, P., 2012. Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. *Building and Environment* 50 (0), 125 – 134. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311003672>

Deuxième partie

Annexes

Annexe A

Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

(nous évitons la mise en place de tout le codage en annexe pour question d'espace)

A.1 Code principal (MEDUS.exe).

```
#!/bin/bash
# MEDUS beta 1.0 DGS

#1.NOMB 2.COMMUNE 3.TRIRIS 4.IRIS 5.CATIRIS 6.ACHL 7.
  AEMM 8.ANEM 9.ASCEN 10.CATL 11.CHFL 12.CMBL 13.DIPLM
  14.EMPLM 15.GARL 16.HLML 17.INPER 18.INPER1 19.
  INPER2 20.IPONDL 21.NBPI 22.REGION 23.STOCD 24.SURF
  25.TYPC 26.TYPL 27.VOIT 28.DEPA***

awk -F";" '{printf "%i%i%i%i%s%i%i%i%i%i%i%i%i
  %s%i%i%i%i%5.6f%i%i%i%i%i%i%i%i%s\n" , $1, $2
  , $3, $4, $5, $6, $7, $8, $9, $10, $11, $12, $13, $14, $15
  , $16, $17, $18, $19, $20, $21, $22, $23, $24, $25, $26,
  $27, $28}' FD_LOGEMT_2007_iris_441090409.csv > R2.txt #
  @@@ Here we defined the input list.

#reprint to R3.txt
sed "s/^_*$//;s/_*$//;s/_\{1,\}/_/g" R2.txt > R3.txt

# We need to "clean" R1.txt first 1 lines in R1.txt should be
  removed (commentaries text) - Its not so necessary since
  the IF procedure.
```


A.1. Code principal (MEDUS.exe).

```
$42, $43, $44, $45, $46, $47, $48, $49, $50, $51, $52, $53
, $54, $55, $56, $57, $58, $59, $60, $61, $62}'
matrixtemperature.csv > T2.txt # @@@ Here we defined the
input list.

sed "s/^\s*//;s/\s*$//;s/\s*\{1,\}/\s/g" T2.txt > T1.txt

printf "Assigning\sinput\smatrix\sdwelling\svalues...\s\n";
# ----- Main FOR Procedure
-----
for ((LINE=1 ; LINE<=$Nnumber ; LINE++))
do
#----- Main variable discriminant
-----
M1='echo | awk 'NR==$LINE' {print $1 ;exit}' R1.txt'; #
  Pointer
M25='echo | awk 'NR==$LINE' {print $25 ;exit}' R1.txt'; # %
  TYPC - Typologie
# ----- Input data from INSEE Database
-----
M6='echo | awk 'NR==$LINE' {print $6 ;exit}' R1.txt'; # %
  ACHL - Age of construction
M17='echo | awk 'NR==$LINE' {print $17 ;exit}' R1.txt'; # %
  INPER - Occupants
M24='echo | awk 'NR==$LINE' {print $24 ;exit}' R1.txt'; # %
  SURF - Surface area
M28='echo | awk 'NR==$LINE' {print $28 ;exit}' R1.txt'; # %
  DEPA Collective
#+++++++ Another randomly selected procedures
+++++++
# glazing ($108 variables)
G1='echo | awk 'NR==$LINE' {print $1 ;exit}' G1.txt';
G2='echo | awk 'NR==$LINE' {print $2 ;exit}' G1.txt';
G3='echo | awk 'NR==$LINE' {print $3 ;exit}' G1.txt';
G4='echo | awk 'NR==$LINE' {print $4 ;exit}' G1.txt';
G5='echo | awk 'NR==$LINE' {print $5 ;exit}' G1.txt';
G6='echo | awk 'NR==$LINE' {print $6 ;exit}' G1.txt';
G7='echo | awk 'NR==$LINE' {print $7 ;exit}' G1.txt';
G8='echo | awk 'NR==$LINE' {print $8 ;exit}' G1.txt';
G9='echo | awk 'NR==$LINE' {print $9 ;exit}' G1.txt';
G10='echo | awk 'NR==$LINE' {print $10 ;exit}' G1.txt';
G11='echo | awk 'NR==$LINE' {print $11 ;exit}' G1.txt';
G12='echo | awk 'NR==$LINE' {print $12 ;exit}' G1.txt';
G13='echo | awk 'NR==$LINE' {print $13 ;exit}' G1.txt';
```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```
G14='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $14 ;exit}' G1.txt';
G15='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $15 ;exit}' G1.txt';
G16='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $16 ;exit}' G1.txt';
G17='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $17 ;exit}' G1.txt';
G18='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $18 ;exit}' G1.txt';
G19='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $19 ;exit}' G1.txt';
G20='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $20 ;exit}' G1.txt';
G21='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $21 ;exit}' G1.txt';
G22='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $22 ;exit}' G1.txt';
G23='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $23 ;exit}' G1.txt';
G24='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $24 ;exit}' G1.txt';
G25='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $25 ;exit}' G1.txt';
G26='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $26 ;exit}' G1.txt';
G27='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $27 ;exit}' G1.txt';
G28='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $28 ;exit}' G1.txt';
G29='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $29 ;exit}' G1.txt';
G30='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $30 ;exit}' G1.txt';
G31='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $31 ;exit}' G1.txt';
G32='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $32 ;exit}' G1.txt';
G33='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $33 ;exit}' G1.txt';
G34='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $34 ;exit}' G1.txt';
G35='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $35 ;exit}' G1.txt';
G36='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $36 ;exit}' G1.txt';
G37='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $37 ;exit}' G1.txt';
G38='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $38 ;exit}' G1.txt';
G39='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $39 ;exit}' G1.txt';
G40='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $40 ;exit}' G1.txt';
G41='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $41 ;exit}' G1.txt';
G42='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $42 ;exit}' G1.txt';
G43='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $43 ;exit}' G1.txt';
G44='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $44 ;exit}' G1.txt';
G45='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $45 ;exit}' G1.txt';
G46='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $46 ;exit}' G1.txt';
G47='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $47 ;exit}' G1.txt';
G48='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $48 ;exit}' G1.txt';
G49='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $49 ;exit}' G1.txt';
G50='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $50 ;exit}' G1.txt';
G51='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $51 ;exit}' G1.txt';
G52='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $52 ;exit}' G1.txt';
G53='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $53 ;exit}' G1.txt';
G54='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $54 ;exit}' G1.txt';
G55='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $55 ;exit}' G1.txt';
G56='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $56 ;exit}' G1.txt';
G57='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $57 ;exit}' G1.txt';
G58='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $58 ;exit}' G1.txt';
G59='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $59 ;exit}' G1.txt';
```

A.1. Code principal (MEDUS.exe).

```
G60='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $60 ;exit}' G1.txt';
G61='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $61 ;exit}' G1.txt';
G62='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $62 ;exit}' G1.txt';
G63='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $63 ;exit}' G1.txt';
G64='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $64 ;exit}' G1.txt';
G65='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $65 ;exit}' G1.txt';
G66='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $66 ;exit}' G1.txt';
G67='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $67 ;exit}' G1.txt';
G68='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $68 ;exit}' G1.txt';
G69='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $69 ;exit}' G1.txt';
G70='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $70 ;exit}' G1.txt';
G71='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $71 ;exit}' G1.txt';
G72='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $72 ;exit}' G1.txt';
G73='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $73 ;exit}' G1.txt';
G74='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $74 ;exit}' G1.txt';
G75='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $75 ;exit}' G1.txt';
G76='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $76 ;exit}' G1.txt';
G77='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $77 ;exit}' G1.txt';
G78='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $78 ;exit}' G1.txt';
G79='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $79 ;exit}' G1.txt';
G80='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $80 ;exit}' G1.txt';
G81='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $81 ;exit}' G1.txt';
G82='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $82 ;exit}' G1.txt';
G83='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $83 ;exit}' G1.txt';
G84='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $84 ;exit}' G1.txt';
G85='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $85 ;exit}' G1.txt';
G86='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $86 ;exit}' G1.txt';
G87='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $87 ;exit}' G1.txt';
G88='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $88 ;exit}' G1.txt';
G89='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $89 ;exit}' G1.txt';
G90='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $90 ;exit}' G1.txt';
G91='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $91 ;exit}' G1.txt';
G92='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $92 ;exit}' G1.txt';
G93='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $93 ;exit}' G1.txt';
G94='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $94 ;exit}' G1.txt';
G95='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $95 ;exit}' G1.txt';
G96='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $96 ;exit}' G1.txt';
G97='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $97 ;exit}' G1.txt';
G98='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $98 ;exit}' G1.txt';
G99='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $99 ;exit}' G1.txt';
G100='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $100 ;exit}' G1.txt';
G101='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $101 ;exit}' G1.txt';
G102='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $102 ;exit}' G1.txt';
G103='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $103 ;exit}' G1.txt';
G104='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $104 ;exit}' G1.txt';
G105='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $105 ;exit}' G1.txt';
```

```
G106='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $106 ;exit}' G1.txt';
G107='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $107 ;exit}' G1.txt';
G108='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $108 ;exit}' G1.txt';
```

```
#INFILTRATION 62 variables.
```

```
I1='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $1 ;exit}' I1.txt';
I2='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $2 ;exit}' I1.txt';
I3='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $3 ;exit}' I1.txt';
I4='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $4 ;exit}' I1.txt';
I5='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $5 ;exit}' I1.txt';
I6='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $6 ;exit}' I1.txt';
I7='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $7 ;exit}' I1.txt';
I8='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $8 ;exit}' I1.txt';
I9='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $9 ;exit}' I1.txt';
I10='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $10 ;exit}' I1.txt';
I11='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $11 ;exit}' I1.txt';
I12='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $12 ;exit}' I1.txt';
I13='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $13 ;exit}' I1.txt';
I14='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $14 ;exit}' I1.txt';
I15='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $15 ;exit}' I1.txt';
I16='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $16 ;exit}' I1.txt';
I17='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $17 ;exit}' I1.txt';
I18='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $18 ;exit}' I1.txt';
I19='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $19 ;exit}' I1.txt';
I20='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $20 ;exit}' I1.txt';
I21='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $21 ;exit}' I1.txt';
I22='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $22 ;exit}' I1.txt';
I23='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $23 ;exit}' I1.txt';
I24='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $24 ;exit}' I1.txt';
I25='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $25 ;exit}' I1.txt';
I26='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $26 ;exit}' I1.txt';
I27='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $27 ;exit}' I1.txt';
I28='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $28 ;exit}' I1.txt';
I29='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $29 ;exit}' I1.txt';
I30='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $30 ;exit}' I1.txt';
I31='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $31 ;exit}' I1.txt';
I32='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $32 ;exit}' I1.txt';
I33='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $33 ;exit}' I1.txt';
I34='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $34 ;exit}' I1.txt';
I35='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $35 ;exit}' I1.txt';
I36='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $36 ;exit}' I1.txt';
I37='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $37 ;exit}' I1.txt';
I38='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $38 ;exit}' I1.txt';
I39='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $39 ;exit}' I1.txt';
I40='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $40 ;exit}' I1.txt';
```

A.1. Code principal (MEDUS.exe).

```
I41='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $41 ;exit}' I1.txt';
I42='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $42 ;exit}' I1.txt';
I43='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $43 ;exit}' I1.txt';
I44='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $44 ;exit}' I1.txt';
I45='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $45 ;exit}' I1.txt';
I46='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $46 ;exit}' I1.txt';
I47='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $47 ;exit}' I1.txt';
I48='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $48 ;exit}' I1.txt';
I49='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $49 ;exit}' I1.txt';
I50='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $50 ;exit}' I1.txt';
I51='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $51 ;exit}' I1.txt';
I52='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $52 ;exit}' I1.txt';
I53='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $53 ;exit}' I1.txt';
I54='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $54 ;exit}' I1.txt';
I55='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $55 ;exit}' I1.txt';
I56='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $56 ;exit}' I1.txt';
I57='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $57 ;exit}' I1.txt';
I58='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $58 ;exit}' I1.txt';
I59='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $59 ;exit}' I1.txt';
I60='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $60 ;exit}' I1.txt';
I61='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $61 ;exit}' I1.txt';
I62='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $62 ;exit}' I1.txt';
```

TEMPERATURE 62 VARIABLES.

```
T1='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $1 ;exit}' T1.txt';
T2='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $2 ;exit}' T1.txt';
T3='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $3 ;exit}' T1.txt';
T4='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $4 ;exit}' T1.txt';
T5='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $5 ;exit}' T1.txt';
T6='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $6 ;exit}' T1.txt';
T7='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $7 ;exit}' T1.txt';
T8='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $8 ;exit}' T1.txt';
T9='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $9 ;exit}' T1.txt';
T10='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $10 ;exit}' T1.txt';
T11='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $11 ;exit}' T1.txt';
T12='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $12 ;exit}' T1.txt';
T13='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $13 ;exit}' T1.txt';
T14='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $14 ;exit}' T1.txt';
T15='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $15 ;exit}' T1.txt';
T16='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $16 ;exit}' T1.txt';
T17='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $17 ;exit}' T1.txt';
T18='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $18 ;exit}' T1.txt';
T19='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $19 ;exit}' T1.txt';
T20='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $20 ;exit}' T1.txt';
T21='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $21 ;exit}' T1.txt';
```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```
T22='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $22 ;exit}' T1.txt';
T23='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $23 ;exit}' T1.txt';
T24='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $24 ;exit}' T1.txt';
T25='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $25 ;exit}' T1.txt';
T26='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $26 ;exit}' T1.txt';
T27='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $27 ;exit}' T1.txt';
T28='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $28 ;exit}' T1.txt';
T29='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $29 ;exit}' T1.txt';
T30='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $30 ;exit}' T1.txt';
T31='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $31 ;exit}' T1.txt';
T32='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $32 ;exit}' T1.txt';
T33='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $33 ;exit}' T1.txt';
T34='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $34 ;exit}' T1.txt';
T35='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $35 ;exit}' T1.txt';
T36='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $36 ;exit}' T1.txt';
T37='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $37 ;exit}' T1.txt';
T38='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $38 ;exit}' T1.txt';
T39='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $39 ;exit}' T1.txt';
T40='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $40 ;exit}' T1.txt';
T41='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $41 ;exit}' T1.txt';
T42='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $42 ;exit}' T1.txt';
T43='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $43 ;exit}' T1.txt';
T44='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $44 ;exit}' T1.txt';
T45='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $45 ;exit}' T1.txt';
T46='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $46 ;exit}' T1.txt';
T47='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $47 ;exit}' T1.txt';
T48='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $48 ;exit}' T1.txt';
T49='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $49 ;exit}' T1.txt';
T50='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $50 ;exit}' T1.txt';
T51='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $51 ;exit}' T1.txt';
T52='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $52 ;exit}' T1.txt';
T53='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $53 ;exit}' T1.txt';
T54='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $54 ;exit}' T1.txt';
T55='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $55 ;exit}' T1.txt';
T56='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $56 ;exit}' T1.txt';
T57='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $57 ;exit}' T1.txt';
T58='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $58 ;exit}' T1.txt';
T59='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $59 ;exit}' T1.txt';
T60='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $60 ;exit}' T1.txt';
T61='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $61 ;exit}' T1.txt';
T62='echo | awk 'NR=='$LINE' {print $62 ;exit}' T1.txt';
```

```
#+++++ Another randomly selected procedures
+++++
```

A.1. Code principal (MEDUS.exe).

```
printf "POINTER_=$M1_-TYPC_=$M25_--ACHL_=$M6_-INPER_=$M17_-SURF_=$M24_\n"

##### ISOLATED HOUSE PROCEDURE
#####
    printf "$LINE_@@@_$M25_\n"

    if [ "${M25}" -eq "1" ]
    then
        printf "$LINE_-->_$M25_\n"
    printf "_\n"
    printf "AN_ISOLATED_HOUSE_FOUND_IN_INSEE_DB_\n"
    printf "_\n"

        cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/A_SURF/
        ./A_change_surf.sh $M24 $LINE"
        _ISO_HOUSE.srf"
        cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/A_INPER/
        ./change_opr_inper_typl1_bash.sh $M17
        $I1 $I2
        cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/A_GLAZING/
        ./A_change_glazing.sh $G1 $G2 $G3 $G4
        $G5 $G6 $G7 $G8
        cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/A_CTL/
        ./change_ctl_A.pl TYPL1.ct1 $T1 $T2
        mv *.ctl /home/dgarcia08/Bureau/
        MEDUSPROGRAM/TYPL1/ctl/
        cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/A_ACHL/
        ./A_change_achl.sh $M6

# Move the House with the changes into a Folder
cp -r /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1 /home/dgarcia08
/Bureau/MEDUSPROGRAM/ISO_HOUSES/$LINE"_ISO_HOUSE"

#----- START the simulation of the
isolated house -----
        cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /RESULTS/
        ./espr2excel.sh $LINE'
        _result_ISO_HOUSE'
```

```
printf "Analyze heating needs of the type of building\n"

heating='echo | awk '/All/ {print $2 "\n"}' /home/dgarci08/
Bureau/MEDUSPROGRAM/RESULTS/$LINE'_result_ISO_HOUSE.annuel
.txt';
printf "The heating for the choice is $heating kWhrs\n"

awk '/All/ {printf "%5.2f\n",$2}' /home/dgarci08/Bureau/
MEDUSPROGRAM/RESULTS/$LINE'_result_ISO_HOUSE.annuel.txt' >
$LINE.rat
# ----- END Simulation of
isolated house -----

        cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/
##### ISOLATED HOUSE
PROCEDURE END #####

##### SEMIDETACHED HOUSE PROCEDURE
START #####
    elif [ "${M25}" -eq "2" ]
    then
        printf "$LINE --> $M25\n"

    printf "\n"
    printf "A DETACHED HOUSE FOUND IN INSEE DB\n"
    printf "\n"

        cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/B_SURF/
        ./B_change_surf.sh $M24 $LINE"
        _SD_HOUSE.srf"
        cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/B_INPER/
./change_opr_inper_typl2_bash.sh $M17 $I3 $I6 $M17 $I4 $I7
    $M17 $I5 $I8 1 $I3 $I6 1 $I4 $I7 1 $I5 $I8
        cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/B_GLAZING/
        ./B_change_glazing.sh $G9 $G10 $G11
        $G12 $G13 $G14 $G15 $G16 $G17 $G18
        $G19 $G20 $G21 $G22 $G23 $G24
        $G25 $G26 $G27 $G28 $G29 $G30 $G31
        $G32 $G33 $G34 $G35 $G36
        cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
        /CENTRALFILES/B_CTL/
        ./change_ctl_B.pl TYPL2.ct1 $T3 $T4
        $T5 $T6 $T7 $T8
mv *.ctl /home/dgarci08/Bureau/
MEDUSPROGRAM/TYPL2/ctl/
```

A.1. Code principal (MEDUS.exe).

```

                                cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
                                /CENTRALFILES/B_ACHL/
                                ./B_change_achl.sh $M6
# Move the House with the changes into a Folder
cp -r /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL2 /home/dgarcia08
  /Bureau/MEDUSPROGRAM/SD_HOUSES/$LINE"_SD_HOUSE"

#----- START the simulation of the
  isolated house -----
                                cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
                                /RESULTS/
                                ./espr2excelsd.sh $LINE'
                                _result_SD_HOUSE'

printf "Analyze_heatings_needs_of_the_type_of_building\n"

heating='echo | awk '/All/ {print $2 "\n"}' /home/dgarcia08/
  Bureau/MEDUSPROGRAM/RESULTS/$LINE'_result_SD_HOUSE.annuel.
  txt'`;
printf "The_heating_for_the_choice_is_$heating_kWhrs\n"

awk '/All/ {printf "%5.2f\n", $2}' /home/dgarcia08/Bureau/
  MEDUSPROGRAM/RESULTS/$LINE'_result_SD_HOUSE.annuel.txt' >
  $LINE.rat
# ----- END Simulation of
  isolated house -----

                                cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
                                /
#@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@ SEMIDETACHED HOUSE
  PROCEDURE END @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@

#@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@ COLLECTIVE HOUSE
  PROCEDURE START @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
    elif [ "${M25}" -eq "3" ]
    then
                                printf "$LINE-->$M25\n"

printf "\n"
printf "A_COLLECTIVE_DWELLING_FOUND_IN_INSEE_DB\n"
printf "\n"

                                cd /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM
                                /CENTRALFILES/C_SURF/
                                ./C_change_surf.sh $M24 $LINE"
                                _COL_HOUSE.srf"
```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```
#+++++ occupancy model START ++++++
cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
/CENTRALFILES/C_INPER/
#./change_opr_inper_typm3_bash.sh
  A111 ocA111 infMA111 DeltainfA111
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A111
  $M17 $I9 $I36
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A121
  $M17 $I10 $I37
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A112
  $M17 $I11 $I38
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A122
  $M17 $I12 $I39
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A211
  $M17 $I13 $I40
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A221
  $M17 $I14 $I41
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A212
  $M17 $I15 $I42
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A222
  $M17 $I16 $I43
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A311
  $M17 $I17 $I44
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A312
  $M17 $I18 $I45
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A321
  $M17 $I19 $I46
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A322
  $M17 $I20 $I47
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A131
  $M17 $I21 $I48
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A132
  $M17 $I22 $I49
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A321
  $M17 $I23 $I50
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A232
  $M17 $I24 $I51
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A331
  $M17 $I25 $I52
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A332
  $M17 $I26 $I53
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A113
  $M17 $I27 $I54
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A123
  $M17 $I28 $I55
```

A.1. Code principal (MEDUS.exe).

```
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A133
    $M17 $I29 $I56
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A213
    $M17 $I30 $I57
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A223
    $M17 $I31 $I58
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A233
    $M17 $I32 $I59
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A313
    $M17 $I33 $I60
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A323
    $M17 $I34 $I61
./change_opr_inper_typl3_bash.sh A333
    $M17 $I35 $I62

#+++++ occupancy model END ++++++
cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
/CENTRALFILES/C_GLAZING/
./C_change_glazing.sh $G37 $G38 $G39
    $G40 $G41 $G42 $G43 $G44 $G45 $G46
    $G47 $G48 $G49 $G50 $G51 $G52
    $G53 $G54 $G55 $G56 $G57 $G58 $G59
    $G60 $G61 $G62 $G63 $G64 $G65
    $G66 $G67 $G68 $G69 $G70 $G71 $G72
    $G73 $G74 $G75 $G76 $G77 $G78
    $G79 $G80 $G81 $G82 $G83 $G84 $G85
    $G86 $G87 $G88 $G89 $G90 $G91
    $G92 $G93 $G94 $G95 $G96 $G97 $G98
    $G99 $G100 $G101 $G102 $G103
    $G104 $G105 $G106 $G107 $G108
cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
/CENTRALFILES/C_CTL/
./change_ctl_C.pl TYPL3.ctl $T9 $T10
    $T11 $T12 $T13 $T14 $T15 $T16 $T17
    $T18 $T19 $T20 $T21 $T22 $T23
    $T24 $T25 $T26 $T27 $T28 $T29 $T30
    $T31 $T32 $T33 $T34 $T35 $T36
    $T37 $T38 $T39 $T40 $T41 $T42 $T43
    $T44 $T45 $T46 $T47 $T48 $T49
    $T50 $T51 $T52 $T53 $T54 $T55 $T56
    $T57 $T58 $T59 $T60 $T61 $T62
mv *.ctl /home/dgarci08/Bureau/
MEDUSPROGRAM/TYPL3/ctl/
cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
/CENTRALFILES/C_ACHL/
./C_change_achl.sh $M6
```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```
# Move the collective house with the changes into a Folder
cp -r /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL3 /home/dgarci08
  /Bureau/MEDUSPROGRAM/COL_HOUSES/$LINE"_COL_HOUSE"

#----- START the simulation of the
  collective house -----

                                cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
                                /RESULTS/
                                ./espr2excelcol.sh $LINE'
                                _result_COL_HOUSE' $LINE

printf "Analyze_heatings_needs_of_the_type_of_building\n"

heating='echo | awk '/All/ {print $2 "\n"}' /home/dgarci08/
  Bureau/MEDUSPROGRAM/RESULTS/$LINE'_result_COL_HOUSE.annuel
  .txt'`;
printf "The_heating_for_the_choice_is_$heating_kWhrs\n"

#WARNING
awk '/All/ {printf "%5.2f\n", $2}' /home/dgarci08/Bureau/
  MEDUSPROGRAM/RESULTS/$LINE'_result_COL_HOUSE.annuel.txt' >
  $LINE.rat
# ----- END Simulation of
  isolated house -----
                                # IMPORTANT YOU NEED TO CAME AGAIN INTO MAIN
                                FOLDER!!!
                                cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM
                                /

##### COLLECTIVE HOUSE
  PROCEDURE END #####
    else
                                printf "House_not_located\n"
    fi

cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/

done
```

A.2 Procédure type pour le changement des caractéristiques des matériaux

```
#!/bin/bash -fb
#This procedure change the material for each external walls
  of the single house model (Two-thermal-zones)
#Is part from the MEDUSPROGRAM CENTRAL. last update
  17/09/2011

#Normal use
# ./A_change_achl.sh m m

d1=$1

#c1=$2 #Input material from external walls in isolate house.
#c2=$3 #Input material from external walls of ROOF
#INSEEE                                     Value in database
      U value
#      1900-1945  --> m
      2.093/2.234/1.932
#      1949-1974  --> n
      2.867/3.139/2.574
#      1975-1981  --> p
      2.03/2.106/1.88
#      1982-1989  --> q
      1.46/1.52/1.38
#      1990-1998  --> r
      0.75/0.804/0.761

      if [ $d1 -eq 11 ]
      then
          c1=n; #External walls isolate house
          c2=n; #External walls roof
      elif [ $d1 -eq 12 ]
      then
          c1=p; #External walls isolate house
          c2=p; #External walls roof
      elif [ $d1 -eq 13 ]
      then
          c1=p; #External walls isolate house
          c2=p; #External walls roof
      elif [ $d1 -eq 14 ]
      then
          c1=q; #External walls isolate house
          c2=q; #External walls roof
```

```
    elif [ $d1 -eq 15 ]
    then
        c1=r; #External walls isolate house
        c2=r; #External walls roof
    else
        c1=r; #External walls isolate house
        c2=r; #External walls roof
    fi

printf "Delete□previous□glazing...□\n"
/opt/esru/esp-r/bin/prj -file /home/dgarci08/Bureau/
    MEDUSPROGRAM/TYPL1/cfg/TYPL1.cfg -mode text <<YYY
m #browe
c #composition
a #geometry and attribution
a #DWL
f #surface attributes
* # attribute many
b # composition
$c1
- #exit selection
a #wall1
b #wall2
c #wall3
d #wall4
- # exit selection
y #update zones tmc
- #exit surfaces
- #exit menu
y #update again --> geometry and attribution
b # ROOF Selection
f #surf attrib
* #attribute many
b #composition
$c2
- #exit selection
a
c
d
e
- #exit select
y #update tmc
- #exit
- #exit menu
y #update yes
```

```
- #exit menu geom and att
- #exit composition
- #exit browse/edit sim
- #exit model management
YYY

printf "Done... \n"
#export PATH=$PATH:/opt/esru/bin:/opt/esru/esp-r/bin
#prj -file /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/cfg/TYPL1
    .cfg
```

A.3 Procédure type pour le changement des caractéristiques des vitrages

```
#!/bin/bash -fb
#Normal use
# ./A_change_glazing.sh 15 15 15 15 b b b b (depending on
    glazing)

# a is single-glazing
# b is double-glazing

# INPUT - Percentage of glazing in each surface
p1=$1
p2=$2
p3=$3
p4=$4

# INPUT - Type of glazing in each surface
tg1=$5
tg2=$6
tg3=$7
tg4=$8

#use
#./change_glazing_maison.sh 10 10 20 20 30 30
#common use
#./change_glazing_maison.sh

printf "Delete previous glazing... \n"
/opt/esru/esp-r/bin/prj -file /home/dgarci08/Bureau/
    MEDUSPROGRAM/TYPL1/cfg/TYPL1.cfg -mode text <<YYY
m #browe
c #composition
a #geometry and attribution
```

```
a #DWL
e #surface list and edges
* #delete surf
j #p4
*
i #p3
*
h #p2
*
g #p1
- #exit menu
- #exit menu
y #save composition?
y #update
- #exit
- #exit
- #exit
- #exit pj
YYY

printf "reconstruct □glazing...□\n"
/opt/esru/esp-r/bin/prj -file /home/dgarci08/Bureau/
  MEDUSPROGRAM/TYPL1/cfg/TYPL1.cfg -mode text <<ZZZ
m #browse
c #comp
a #geometry and attrib
a #DWL1
f #surf attrib
a #wall1
+ #add glz
c #percentage
$p1
P1
$tg1
- #exit dbl
b #wall2
+
c
$p2
P2
$tg2
-
c
+
c
$p3
```

A.4. Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants

```
P3
$tg3
-
d #wall4
+
c
$p4
P4
$tg4
-
- #exit surf attr
- #exit geometry
y #save chngs
y #tmc
- # exit geom and at
- #exit zones comp
- # exit brows edit sim
- # exit modl mngm
ZZZ

printf "Done..._\n"
#export PATH=$PATH:/opt/esru/bin:/opt/esru/esp-r/bin
#prj -file /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/cfg/TYPL1
    .cfg
```

A.4 Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants

```
#!/bin/bash
#----- Este programa esta hecho por tu papi
#-----

#use
#./change_opr_inper_bash.sh ocDWL1 infMDWL1 DeltainfDWL1
#normaluse
#./change_opr_inper_bash.sh 4 80 0

ocDWL1=$1

infM_DWL1=$2

DeltaDWL1=$3

# Default scale used by float functions.
```

```
float_scale=2
#
#####

#
#####

# Evaluate a floating point number expression.

function float_eval()
{
    local stat=0
    local result=0.0
    if [[ $# -gt 0 ]]; then
        result=$(echo "scale=$float_scale;_$_*" | bc -q 2>/dev
            /null)
        stat=$?
        if [[ $stat -eq 0 && -z "$result" ]]; then stat=1;
            fi
        fi
    echo $result
    return $stat
}

#
#####

# Evaluate a floating point number conditional expression.

function float_cond()
{
    local cond=0
    if [[ $# -gt 0 ]]; then
        cond=$(echo "$*" | bc -q 2>/dev/null)
        if [[ -z "$cond" ]]; then cond=0; fi
        if [[ "$cond" != 0 && "$cond" != 1 ]]; then cond=0;
            fi
        fi
    fi
    local stat=$((cond == 0))
    return $stat
}
#code

infmini_DWL1=$(float_eval "$infM_DWL1_-$DeltaDWL1");
```



```
$OC_sd[$i]=ceil($P_matrix[$i]*$c1);
$OC_dd[$i]=ceil($P_matrix[$i]*$c1);

}
#end for occupation

#reference http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites
  /07-08/Home_entertainment/sephee_dem.html

#####
#random aleatory (for Infiltration)
# reference http://perlmeme.org/howtos/perlfunc/rand_function
  .html
#define variables
@Inf=();

$minimum = $a1;
$maximum = $b1;
$range = $maximum - $minimum;

#for aleatory infiltration
for ($i = 0; $i <= 71; $i++) {
$Inf[$i]=(int(rand($range)) + $minimum)/100;
}
#end aleatory infiltration
#####

# Parse the perl sign pound (# and @)
$val = "#";
$arro = "@";

# open up MYFILE for writing
open(MYFILE,">$file.opr");

#or die "Can't open up myfile: $file\n"; if we want the file
  to be readed!

# now this line format will automatically apply to MYFILE
format MYFILE =
*Operations 2.0
*date Fri Apr 8 16:21:12 2011 # latest file modification
@<operations of @<<< defined in:
$val,          $file
@<../zones/@<<<.opr
$val,          $file
```

A.4. Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants

nothing happens in this zone in terms of occupants lights and small power. There is not infiltration or ventilation.

@<control(no control of air flow), low mid & high setpoints

\$val

0 0.000 0.000 0.000

24 # number of flow periods in day type: weekdays

@<start, stop, infil, ventil, source, data

\$val

0, 1, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[0]

1, 2, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[1]

2, 3, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[2]

3, 4, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[3]

4, 5, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[4]

5, 6, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[5]

6, 7, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[6]

7, 8, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[7]

8, 9, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[8]

9, 10, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[9]

10, 11, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[10]

11, 12, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[11]

12, 13, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[12]

13, 14, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[13]

14, 15, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[14]

15, 16, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[15]

16, 17, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[16]

17, 18, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[17]

18, 19, @###.### 0.000 0 0.000

\$Inf[18]

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```

19, 20, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [19]
20, 21, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [20]
21, 22, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [21]
22, 23, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [22]
23, 24, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [23]
    24 # number of flow periods in day type: saturday
@<start, stop, infil, ventil, source, data
$val
  0, 1, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [24]
  1, 2, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [25]
  2, 3, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [26]
  3, 4, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [27]
  4, 5, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [28]
  5, 6, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [29]
  6, 7, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [30]
  7, 8, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [31]
  8, 9, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [32]
  9, 10, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [33]
 10, 11, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [34]
 11, 12, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [35]
 12, 13, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [36]
 13, 14, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [37]
 14, 15, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [38]
 15, 16, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [39]
 16, 17, @###.### 0.000 0 0.000

```

A.4. Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants

```

    $Inf [40]
17, 18, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [41]
18, 19, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [42]
19, 20, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [43]
20, 21, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [44]
21, 22, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [45]
22, 23, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [46]
23, 24, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [47]
    24 # number of flow periods in day type: sunday
@<start, stop, infil, ventil, source, data
$val
    0, 1, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [48]
    1, 2, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [49]
    2, 3, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [50]
    3, 4, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [51]
    4, 5, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [52]
    5, 6, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [53]
    6, 7, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [54]
    7, 8, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [55]
    8, 9, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [56]
    9, 10, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [57]
    10, 11, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [58]
    11, 12, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [59]
    12, 13, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [60]
    13, 14, @###.### 0.000 0 0.000
    $Inf [61]

```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```

14, 15, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [62]
15, 16, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [63]
16, 17, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [64]
17, 18, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [65]
18, 19, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [66]
19, 20, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [67]
20, 21, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [68]
21, 22, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [69]
22, 23, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [70]
23, 24, @###.### 0.000 0 0.000
        $Inf [71]
26 # number of casual gains in day type: weekdays
@<type, start, stop, sens, latent, rad_frac, conv_frac
$val
1, 0, 1, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [0]*$Csen , $OC_wd [0]*$Clat
1, 1, 2, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [1]*$Csen , $OC_wd [1]*$Clat
1, 2, 3, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [2]*$Csen , $OC_wd [2]*$Clat
1, 3, 4, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [3]*$Csen , $OC_wd [3]*$Clat
1, 4, 5, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [4]*$Csen , $OC_wd [4]*$Clat
1, 5, 6, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [5]*$Csen , $OC_wd [5]*$Clat
1, 6, 7, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [6]*$Csen , $OC_wd [6]*$Clat
1, 7, 8, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [7]*$Csen , $OC_wd [7]*$Clat
1, 8, 9, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [8]*$Csen , $OC_wd [8]*$Clat
1, 9, 10, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [9]*$Csen , $OC_wd [9]*$Clat
1, 10, 11, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
        $OC_wd [10]*$Csen , $OC_wd [10]*$Clat
1, 11, 12, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500

```

A.4. Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants

```

    $OC_wd[11]*$Csen , $OC_wd[11]*$Clat
1, 12, 13, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[12]*$Csen , $OC_wd[12]*$Clat
1, 13, 14, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[13]*$Csen , $OC_wd[13]*$Clat
1, 14, 15, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[14]*$Csen , $OC_wd[14]*$Clat
1, 15, 16, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[15]*$Csen , $OC_wd[15]*$Clat
1, 16, 17, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[16]*$Csen , $OC_wd[16]*$Clat
1, 17, 18, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[17]*$Csen , $OC_wd[17]*$Clat
1, 18, 19, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[18]*$Csen , $OC_wd[18]*$Clat
1, 19, 20, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[19]*$Csen , $OC_wd[19]*$Clat
1, 20, 21, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[20]*$Csen , $OC_wd[20]*$Clat
1, 21, 22, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[21]*$Csen , $OC_wd[21]*$Clat
1, 22, 23, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[22]*$Csen , $OC_wd[22]*$Clat
1, 23, 24, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_wd[23]*$Csen , $OC_wd[23]*$Clat
2, 0, 24, 0.0, 0.0, 0.500, 0.500
3, 0, 24, 0.0, 0.0, 0.500, 0.500
26 # number of casual gains in day type: saturday
@<type, start, stop, sens, latent, rad_frac, conv_frac
$val
1, 0, 1, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[0]*$Csen , $OC_sd[0]*$Clat
1, 1, 2, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[1]*$Csen , $OC_sd[1]*$Clat
1, 2, 3, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[2]*$Csen , $OC_sd[2]*$Clat
1, 3, 4, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[3]*$Csen , $OC_sd[3]*$Clat
1, 4, 5, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[4]*$Csen , $OC_sd[4]*$Clat
1, 5, 6, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[5]*$Csen , $OC_sd[5]*$Clat
1, 6, 7, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[6]*$Csen , $OC_sd[6]*$Clat
1, 7, 8, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
    $OC_sd[7]*$Csen , $OC_sd[7]*$Clat

```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```

1, 8, 9, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[8]*$Csen , $OC_sd[8]*$Clat
1, 9, 10, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[9]*$Csen , $OC_sd[9]*$Clat
1, 10, 11, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[10]*$Csen , $OC_sd[10]*$Clat
1, 11, 12, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[11]*$Csen , $OC_sd[11]*$Clat
1, 12, 13, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[12]*$Csen , $OC_sd[12]*$Clat
1, 13, 14, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[13]*$Csen , $OC_sd[13]*$Clat
1, 14, 15, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[14]*$Csen , $OC_sd[14]*$Clat
1, 15, 16, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[15]*$Csen , $OC_sd[15]*$Clat
1, 16, 17, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[16]*$Csen , $OC_sd[16]*$Clat
1, 17, 18, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[17]*$Csen , $OC_sd[17]*$Clat
1, 18, 19, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[18]*$Csen , $OC_sd[18]*$Clat
1, 19, 20, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[19]*$Csen , $OC_sd[19]*$Clat
1, 20, 21, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[20]*$Csen , $OC_sd[20]*$Clat
1, 21, 22, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[21]*$Csen , $OC_sd[21]*$Clat
1, 22, 23, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[22]*$Csen , $OC_sd[22]*$Clat
1, 23, 24, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_sd[23]*$Csen , $OC_sd[23]*$Clat
2, 0, 24, 0.0, 0.0, 0.500, 0.500
3, 0, 24, 0.0, 0.0, 0.500, 0.500
26 # number of casual gains in day type: sunday
@<type, start, stop, sens, latent, rad_frac, conv_frac
$val
1, 0, 1, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_dd[0]*$Csen , $OC_dd[0]*$Clat
1, 1, 2, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_dd[1]*$Csen , $OC_dd[1]*$Clat
1, 2, 3, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_dd[2]*$Csen , $OC_dd[2]*$Clat
1, 3, 4, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500
      $OC_dd[3]*$Csen , $OC_dd[3]*$Clat
1, 4, 5, @####.#, @####.#, 0.500, 0.500

```

A.4. Procédure type pour le changement des caractéristiques des occupants

```

        $OC_dd[4]*$Csen    , $OC_dd[4]*$Clat
1,    5,    6,    @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[5]*$Csen    , $OC_dd[5]*$Clat
1,    6,    7,    @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[6]*$Csen    , $OC_dd[6]*$Clat
1,    7,    8,    @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[7]*$Csen    , $OC_dd[7]*$Clat
1,    8,    9,    @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[8]*$Csen    , $OC_dd[8]*$Clat
1,    9,    10,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[9]*$Csen    , $OC_dd[9]*$Clat
1,    10,   11,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[10]*$Csen    , $OC_dd[10]*$Clat
1,    11,   12,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[11]*$Csen    , $OC_dd[11]*$Clat
1,    12,   13,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[12]*$Csen    , $OC_dd[12]*$Clat
1,    13,   14,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[13]*$Csen    , $OC_dd[13]*$Clat
1,    14,   15,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[14]*$Csen    , $OC_dd[14]*$Clat
1,    15,   16,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[15]*$Csen    , $OC_dd[15]*$Clat
1,    16,   17,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[16]*$Csen    , $OC_dd[16]*$Clat
1,    17,   18,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[17]*$Csen    , $OC_dd[17]*$Clat
1,    18,   19,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[18]*$Csen    , $OC_dd[18]*$Clat
1,    19,   20,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[19]*$Csen    , $OC_dd[19]*$Clat
1,    20,   21,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[20]*$Csen    , $OC_dd[20]*$Clat
1,    21,   22,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[21]*$Csen    , $OC_dd[21]*$Clat
1,    22,   23,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[22]*$Csen    , $OC_dd[22]*$Clat
1,    23,   24,   @####.#,    @####.#,    0.500,    0.500
        $OC_dd[23]*$Csen    , $OC_dd[23]*$Clat
2,    0,    24,    0.0,    0.0,    0.500,    0.500
3,    0,    24,    0.0,    0.0,    0.500,    0.500
@<Labels for gain types
$val
  Occupt Lights Equipt
.
write MYFILE

```

A.5 Procédure pour le changement des caractéristiques des surfaces

```
#!/bin/bash
# Normal use:
# A_change_surf.sh 1 1 1

#-----
M24=$1
FILE=$2

# Default scale used by float functions.
float_scale=2
#
#####

#
#####

# Evaluate a floating point number expression.

function float_eval()
{
    local stat=0
    local result=0.0
    if [[ $# -gt 0 ]]; then
        result=$(echo "scale=$float_scale;_$_*" | bc -q 2>/dev
            /null)
        stat=$?
        if [[ $stat -eq 0 && -z "$result" ]]; then stat=1;
            fi
        fi
    echo $result
    return $stat
}
#
#####

# Evaluate a floating point number conditional expression.

function float_cond()
{
    local cond=0
    if [[ $# -gt 0 ]]; then
        cond=$(echo "$*" | bc -q 2>/dev/null)
    fi
}
```

A.5. Procédure pour le changement des caractéristiques des surfaces

```
        if [[ -z "$cond" ]]; then cond=0; fi
        if [[ "$cond" != 0 && "$cond" != 1 ]]; then cond=0;
            fi
    fi
    local stat=$((cond == 0))
    return $stat
}
#code
#
-----

#----- Function parse octave aleatory
# numbers variable SURF -----
# --- This function "parse" the mscript function in octave
# into two files take the results into a
# --- variable and delete the tmp files. Res.txt and Res1.txt

#----- if for differentiate
# surfaces -----
if [ "${M24}" -eq "1" ]
then
minima=10;
maxima=25;
elif [ "${M24}" -eq "2" ]
then
minima=25;
maxima=40;
elif [ "${M24}" -eq "3" ]
then
minima=40;
maxima=70;
elif [ "${M24}" -eq "4" ]
then
minima=70;
maxima=100;
elif [ "${M24}" -eq "5" ]
then
minima=100;
maxima=150;
elif [ "${M24}" -eq "6" ]
then
minima=150;
maxima=200;
else
printf "WARNING: a Data can be wrong\n";
fi
```


A.5. Procédure pour le changement des caractéristiques des surfaces

```
#
-----

#----- Parse function to get sqrt
-----
mscript="
uuuuuuuuRes=sqrt("$Dperc");
uuuuuuuuu save_sqrt.txt Res;"
echo "${mscript}" | octave --silent

# We need to "clean" R1.txt first 3 lines in R1.txt should be
  removed (commentaries text)
awk 'FNR>3' sqrt.txt > sqrt1.txt

#Now we recover the value
alpha='echo | awk 'NR==1 {print $1 ;exit}' sqrt1.txt'; #
  <----THIS IS THE VALUE TO ADD
alpha2='echo | awk 'NR==1 {print $1 ;exit}' sqrt1.txt'; #
  <----THIS IS THE VALUE TO ADD

#Delete temporary
rm sqrt.txt
rm sqrt1.txt

#alpha3=$3 # alto
alpha3=1; # alto lo dejamos por el momento en 1

#code
cd zones_base/
printf "Changing geo_attribute_files...\n"

awk 'NR==1,NR==4' DWL1.geo > DWL1_1.txt
awk 'NR==1,NR==4' ROOF.geo > ROOF_1.txt

awk 'NR==5,NR==28' DWL1.geo > DWL1.txt
awk 'NR==5,NR==10' ROOF.geo > ROOF.txt

awk '{printf "uuuuuu%2.5fuuuuuu%2.5fuuuuuu%2.5fuu%su%suuuu%su\n"
  , $1*'$alpha', $2*'$alpha2', $3*'$alpha3', $4, $5, $6}' DWL1.
  txt > DWL1_2.txt
awk '{printf "uuuuuu%2.5fuuuuuu%2.5fuuuuuu%2.5fuu%su%suuuu%su\n"
  , $1*'$alpha', $2*'$alpha2', $3*'$alpha3', $4, $5, $6}' ROOF.
  txt > ROOF_2.txt
```

```
awk 'NR==29,NR==58' DWL1.geo > DWL1_3.txt
awk 'NR==11,NR==30' ROOF.geo > ROOF_3.txt

awk 'NR==59 {printf "%s%s%s%s%s%s%5.2f%s\n" , $1
, $2, $3, $4, $5, $6, $7*'$alpha'*'$alpha2', $8}' DWL1.geo
> DWL1_4.txt
awk 'NR==31 {printf "%s%s%s%s%s%s%5.2f%s\n" , $1
, $2, $3, $4, $5, $6, $7*'$alpha'*'$alpha2', $8}' ROOF.geo
> ROOF_4.txt

cat DWL1_1.txt DWL1_2.txt DWL1_3.txt DWL1_4.txt > DWL1_tot.
txt
cat ROOF_1.txt ROOF_2.txt ROOF_3.txt ROOF_4.txt > ROOF_tot.
txt

#Copyresult file in the model folder
cp DWL1_tot.txt /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/
zones
cp ROOF_tot.txt /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/
zones

cd /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/zones/

printf "$alpha$surf" > DEBUG14.TXT

mv DWL1.geo DWL1.geo.backup
mv ROOF.geo ROOF.geo.backup

mv DWL1_tot.txt DWL1.geo
mv ROOF_tot.txt ROOF.geo

printf "surface$surf$SURF...\n"
printf "surface$surf$SURF...\n"
printf "surface$surf$SURF...\n"
printf "surface$surf$SURF...\n"

printf "Done$for$the$procedure$A_change_surf.sh...\n"
#export PATH=$PATH:/opt/esru/bin:/opt/esru/esp-r/bin
#prj -file /home/dgarci08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/cfg/TYPL1
.cfg
```

A.6 Procédure pour le changement des caractéristiques des systèmes de control

```
#!/bin/bash
```

A.6. Procédure pour le changement des caractéristiques des systèmes de control

```
# DGS 2012 --- hecho por tu papi.
#common use
#./change_ctl_A_bash.sh 19 22 1 5 FOR_files

minimaT=$1
maximaT=$2
minimaD=$3
maximaD=$4
Numero=$5

#----- Aleatory for T consigne
-----
#calls octave function for the aleatory values.
mscript="
uuuuuuuuuuRes="$minimaT"+round(rand(1)*("$maximaT"-"$minimaT"
)+1));
uuuuuuuuuu save Res.txt Res;"
echo "${mscript}" | octave --silent

# We need to "clean" R1.txt first 3 lines in R1.txt should be
removed (commentaries text)
awk 'FNR>3' Res.txt > $Numero.tco

#Now we recover the value
T01='echo | awk 'NR==1 {print $1 ;exit}' $Numero'.tco''; #
<----THIS IS THE ALEATORY VALUE FOR SURFACE

#Delete temporary
rm Res.txt
#----- Aleatory for DT nuit
-----
#calls octave function for the aleatory values.
mscript="
uuuuuuuuuuRes="$minimaD"+round(rand(1)*("$maximaD"-"$minimaD"
)+1));
uuuuuuuuuu save Res.txt Res;"
echo "${mscript}" | octave --silent

# We need to "clean" R1.txt first 3 lines in R1.txt should be
removed (commentaries text)
awk 'FNR>3' Res.txt > $Numero.dtc

#Now we recover the value
DT01='echo | awk 'NR==1 {print $1 ;exit}' $Numero'.dtc''; #
<----THIS IS THE ALEATORY VALUE FOR SURFACE
```

```
#Delete temporary
rm Res.txt

#
-----

./change_ctl_A.pl TYPL1.ctl $T01 $DT01

# por el momento no gracias.
#mv *.ctl /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM/TYPL1/ctl/
#mv *.tco /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM/RESULTS/
#mv *.tco /home/dgarcia08/Bureau/MEDUSPROGRAM/RESULTS/

#!/usr/bin/perl
#DGS 2012 1 sep 00:09
#PROGRAMA HECHO POR TU PAPI

#use
#change_ctl_A.pl TYPL1.ctl @TC $deltaT zone01
#common use
#./change_ctl_minerva2.pl minerva.ctl 20 5
#Other arguments
$file = $ARGV[0];
$a0 = 0; #debug control purposes... bem erg... mistake :)
$a1 = $ARGV[1];

$b0 = 0; #debug error.
$b1 = $ARGV[2];

#Potencia maxima
$c1 = 1000000;
$zero = 0;

@Tcon =($a0,$a1);

#in Case DeltaTfixe...
@DeltaT =($b0,$b1);
@Pmax =($c1,$c1);

# Parse the perl sign pound (#)
$val = "#";
$arro = "@";
```

A.6. Procédure pour le changement des caractéristiques des systèmes de control

```
# open up MYFILE for writing
open(MYFILE,">$file");

#or die "Can't open up myfile: $file\n"; if we want the file
  to be readed!

# now this line format will automatically apply to MYFILE
format MYFILE =
no overall control description supplied
* Building
no zone control description supplied
  1 # No. of functions
* Control function      1
@<senses the temperature of the current zone.
$val
  0    0    0    0 # sensor data
@<actuates the air point of the current zone.
$val
  1    0    0 # actuator data
  3 # No. day types
  1 141 # valid Thu-01-Jan - Thu-21-May
  3 # No. of periods in day: weekdays
  0    1    0.000 # ctl type, law (basic control), start @<
                                     $arro

  7. # No. of data items
@#####.### 0.000 100000.000 0.000@##.### 54.000 0.000
  $Pmax[1]                                     , $Tcon[1] - $DeltaT[1]
  0    1    7.000 # ctl type, law (basic control), start @<
                                     $arro

  7. # No. of data items
@#####.### 0.000 100000.000 0.000@##.### 54.000 0.000
  $Pmax[1]                                     , $Tcon[1]
  0    1    22.000 # ctl type, law (basic control), start @<
                                     $arro

  7. # No. of data items
@#####.### 0.000 100000.000 0.000@##.### 54.000 0.000
  $Pmax[1]                                     , $Tcon[1] - $DeltaT[1]
  142 278 # valid Fri-22-May - Mon-05-Oct
  1 # No. of periods in day: saturday
  0    2    0.000 # ctl type, law (free floating), start @<
                                     ,
                                     $arro

  0. # No. of data items
  279 365 # valid Tue-06-Oct - Thu-31-Dec
  3 # No. of periods in day: sunday
```

Annexe A. Exemple du codage type pour le MEDUS Program.

```
0 1 0.000 # ctl type, law (basic control), start @<
',
$arro

7. # No. of data items
@#####.### 0.000 100000.000 0.000@##.### 54.000 0.000
$Pmax[1] , $Tcon[1] - $DeltaT[1]
0 1 7.000 # ctl type, law (basic control), start @<
',
$arro

7. # No. of data items
@#####.### 0.000 100000.000 0.000@##.### 54.000 0.000
$Pmax[1] , $Tcon[1]
0 1 22.000 # ctl type, law (basic control), start @<
',
$arro

7. # No. of data items
@#####.### 0.000 100000.000 0.000@##.### 54.000 0.000
$Pmax[1] , $Tcon[1] - $DeltaT[1]
@<Function:Zone links
$val
1,0
.
write MYFILE
```

Annexe B

Code de Campolongo pour l'évaluation des effets élémentaires.

B.1 Fonction de sampling.

```
function [Outmatrix, OutFact] = Sampling_Function_2(p, k, r,
    UB, LB, GroupMat)
%[Outmatrix, OutFact] = Sampling_Function_2(p, k, r, UB, LB,
    GroupMat)
%      Inputs: k (1,1)                := number of
factors examined or number of groups examined.
%
%                                In case the
groups are chosen the number of factors is stores in
NumFact and
%
%                                sizea becomes the
number of created groups.
%      NumFact (1,1)                := number of factors
examined in the case when groups are chosen
%      r (1,1)                      := sample size
%      p (1,1)                      := number of
intervals considered in [0, 1]
%      UB(sizea,1)                  := Upper Bound for
each factor
%      LB(sizea,1)                  := Lower Bound for
each factor
%      GroupNumber(1,1)             := Number of groups
(eventually 0)
%      GroupMat(NumFact,GroupNumber):= Matrix which
describes the chosen groups. Each column represents a
group and its elements
%
%                                are set to 1 in
correspondence of the factors that belong to the fixed
group. All
```

```

%
%                                     the other
elements are zero.
% Local Variables:
%         sizeb (1,1)                 := sizea+1
%         sizec (1,1)                 := 1
%         randmult (sizea,1)         := vector of random +1 and -1
%         perm_e(1,sizea)            := vector of sizea random
permutated indeces
%         fact(sizea)                 := vector containing the
factor varied within each traj
%         DDo(sizea,sizea)           := D*           in Morris,
1991
%         A(sizeb,sizea)             := Jk+1,k       in Morris,
1991
%         B(sizeb,sizea)             := B           in Morris,
1991
%         Po(sizea,sizea)            := P*           in Morris,
1991
%         Bo(sizeb,sizea)            := B*           in Morris, 1991
%         Ao(sizeb,sizec)            := Jk+1,1       in Morris,
1991
%         xo(sizec,sizea)            := x*           in Morris,
1991 (starting point for the trajectory)
%         In(sizeb,sizea)            := for each loop orientation
matrix. It corresponds to a trajectory
%                                     of k step in the parameter
space and it provides a single elementary
%                                     effect per factor
%         MyInt()
%         Fact(sizea,1)              := for each loop vector
indicating which factor or group of factors has been
changed
%                                     in each step of the
trajectory
%         AuxMat(sizeb,sizea) := Delta*0.5*((2*B - A) * DDO
+ A) in Morris, 1991. The AuxMat is used as in Morris
design
%                                     for single factor analysis
, while it constitutes an intermediate step for the group
analysis.
%
%         Output: Outmatrix(sizeb*r, sizea) := for the entire
sample size computed In(i,j) matrices
%         OutFact(sizea*r,1)         := for the entire
sample size computed Fact(i,1) vectors
%

```

B.1. Fonction de sampling.

```
% Note: B0 is constructed as in Morris design when groups
% are not considered. When groups are considered the routine
% follows the following steps:
% 1- Creation of P0 and DD0 matrices defined in
% Morris for the groups. This means that the dimensions of
% these
% 2 matrices are (GroupNumber,GroupNumber).
% 2- Creation of AuxMat matrix with (GroupNumber+1,
% GroupNumber) elements.
% 3- Definition of GroupB0 starting from AuxMat,
% GroupMat and P0.
% 4- The final B0 for groups is obtained as [ones(
% sizeb,1)*x0' + GroupB0]. The P0 permutation is present in
% GroupB0
% and it's not necessary to permute the matrix (
% ones(sizeb,1)*x0') because it's already randomly created.
% Reference:
% A. Saltelli, K. Chan, E.M. Scott, "Sensitivity Analysis"
% on page 68 ss
%
% F. Campolongo, J. Cariboni, JRC - IPSC Ispra, Varese, IT
% Last Update: 15 November 2005 by J.Cariboni
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Parameters and initialisation of the output matrix
sizea = k;
Delta = p/(2*p-2);
%Delta = 1/3
NumFact = sizea;
GroupNumber = size(GroupMat,2);

if GroupNumber ~ 0;
    sizea = size(GroupMat,2);
end

sizeb = sizea + 1;
sizec = 1;
Outmatrix = [];
OutFact = [];

% For each i generate a trajectory
for i=1:r
```

```
% Construct DDO - OLD VERSION - it does not need
  communication toolbox
% RAND(N,M) is an NXM matrix with random entries, chosen
  from a uniform distribution on the interval (0.0,1.0).
% Note that DDO tells if the factor have to be increased
  or ddecreased
% by Delta.
randmult = ones(k,1);
v = rand(k,1);
randmult (find(v < 0.5))=-1;
randmult = repmat(randmult,1,k);
DDO = randmult .* eye(k);

% Construct DDO - NEW VERSION - it needs communication
  toolbox
% randsrc(m) generates an m-by-m matrix, each of whose
  entries independently takes the value -1 with
  probability 1/2,
% and 1 with probability 1/2.
% DDO = randsrc(NumFact) .* eye(NumFact);

% Construct B (lower triangular)
B = ones(sizeb,sizea);
for j = 1:sizea
    B(1:j,j)=0;
end

% Construct A0, A
A0 = ones(sizeb,1);
A = ones(sizeb,NumFact);

% Construct the permutation matrix P0. In each column of
  P0 one randomly chosen element equals 1
% while all the others equal zero.
% P0 tells the order in which order factors are changed
  in each
% trajectory. P0 is created as it follows:
% 1) All the elements of P0 are set equal to zero ==> P0
  = zeros (sizea, sizea);
% 2) The function randperm create a random permutation of
  integer 1:sizea, without repetitions ==> perm_e;
% 3) In each column of P0 the element indicated in perm_e
  is set equal to one.
% Note that P0 is then used reading it by rows.
P0 = zeros (sizea, sizea);
```

B.1. Fonction de sampling.

```
perm_e = randperm(sizea); % RANDPERM(n) is
    a random permutation of the integers from 1 to n.
for j = 1:sizea
    P0(perm_e(j),j) = 1;
end

% When groups are present the random permutation is done
% only on B. The effect is the same since
% the added part (A0*x0') is completely random.
if GroupNumber ~ 0
    B = B * (GroupMat*P0')';
end

% Compute AuxMat both for single factors and groups
% analysis. For Single factors analysis
% AuxMat is added to (A0*X0) and then permuted through
% P0. When groups are active AuxMat is
% used to build GroupB0. AuxMat is created considering
% DDO. If the element on DDO diagonal
% is 1 then AuxMat will start with zero and add Delta. If
% the element on DDO diagonal is -1
% then DDO will start Delta and goes to zero.
AuxMat = Delta*0.5*((2*B - A) * DDO + A);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% a --> Define the random vector x0 for the factors. Note
% that x0 takes value in the hypercube
% [0,...,1-Delta]*[0,...,1-Delta]*[0,...,1-Delta
% ]*[0,...,1-Delta]
MyInt = repmat([0:(1/(p-1)):(1-Delta)],NumFact,1); %
    Construct all possible values of the factors

% OLD VERSION - it needs communication toolbox
% w = randint(NumFact,1,[1,size(MyInt,2)]);

% NEW VERSION - construct a version of random integers
% 1) create a vector of random integers
% 2) divide [0,1] into the needed steps
% 3) check in which interval the random numbers fall
% 4) generate the corresponding integer
v = repmat(rand(NumFact,1),1,size(MyInt,2)+1); % 1)
IntUsed = repmat([0:1/size(MyInt,2):1],NumFact,1); % 2)
DiffAuxVec = IntUsed - v; % 3)

for ii = 1:size(DiffAuxVec,1)
```

```

        w(1,ii) = max(find(DiffAuxVec(ii,:) < 0));           % 4)
    end
    x0 = MyInt(1,w)';                                       %
        Define x0
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% b --> Compute the matrix B*, here indicated as B0. Each
        row in B0 is a
% trajectory for Morris Calculations. The dimension of B0
        is (Numfactors+1,Numfactors)
    if GroupNumber ~ 0
        B0 = (A0*x0' + AuxMat);
    else
        B0 = (A0*x0' + AuxMat)*P0;
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% c --> Compute values in the original intervals
% B0 has values x(i,j) in [0, 1/(p -1), 2/(p -1), ... ,
        1].
% To obtain values in the original intervals [LB, UB] we
        compute
% LB(j) + x(i,j)*(UB(j)-LB(j))
    In = repmat(LB,1,sizeb)' + B0 .* repmat((UB-LB),1,sizeb)
        ';

% Create the Factor vector. Each component of this vector
        indicate which factor or group of factor
% has been changed in each step of the trajectory.
    for j=1:sizea
        Fact(1,j) = find(P0(j,:));
    end
    Fact(1,sizea+1) = 0;

    Outmatrix = [Outmatrix; In];
    OutFact = [OutFact; Fact'];

end

```

B.2 Fonction de mesure des effets élémentaires.

```

function [SAmear, OutMatrix] = Morris_Measure_Groups(NumFact,
        Sample, Output, p, Group)

```

B.2. Fonction de mesure des effets élémentaires.

```
% [SAmeas, OutMatrix] = Morris_Measure_Groups(NumFact, Sample
, Output, p, Group)
%
% Given the Morris sample matrix, the output values and the
% group matrix compute the Morris measures
%
-----

% INPUTS
%
-----

% Group [NumFactor, NumGroups] := Matrix describing the
% groups.
% Each column represents one group.
% The element of each column are zero if the factor is not in
% the
% group. Otherwise it is 1.

% Sample := Matrix of the Morris sampled trajectories

% Output := Matrix of the output(s) values in correspondence
% of each point
% of each trajectory

% k = Number of factors
%
-----

% OUTPUTS
% OutMatrix (NumFactor*NumOutputs, 3)= [Mu*, Mu, StDev]
% for each output it gives the three measures of each factor
%
-----

if nargin==0,
    disp(' ')
    disp('[SAmeas, OutMatrix] = Morris_Measure_Groups(NumFact,
        Sample, Output, p, Group);')
    return
end

OutMatrix=[];
if nargin < 5, Group=[]; end
```

```
NumGroups = size(Group,2);
if nargin < 4 | isempty(p),
    p = 4;
end
Delt = p/(2*p-2);

if NumGroups ~ 0
    sizea = NumGroups;          % Number of groups
    GroupMat=Group;
    GroupMat = GroupMat';
else
    sizea = NumFact;
end
r=size(Sample,1)/(sizea+1);    % Number of trajectories

% For Each Output
for k=1:size(Output,2)

    OutValues=Output(:,k);

    % For each r trajectory
    for i=1:r

        % For each step j in the trajectory
        % Read the orientation matrix fact for the r-th
        sampling
        % Read the corresponding output values
        Single_Sample = Sample(i+(i-1)*sizea:i+(i-1)*sizea+
            sizea,:);
        Single_OutValues = OutValues(i+(i-1)*sizea:i+(i-1)*
            sizea+sizea,:);
        A = (Single_Sample(2:sizea+1,:)-Single_Sample(1:sizea
            ,:))';
        Delta = A(find(A));

        % For each point of the fixed trajectory compute the
        values of the Morris function. The function
        % is partitioned in four parts, from order zero to
        order 4th.
        for j=1:sizea % For each point in the trajectory i.
            e for each factor
                % matrix of factor which changes
                if NumGroups ~ 0;
                    AuxFind(:,1) = A(:,j);
                    AuxFind(find(A(:,j)),1)=1;
                end
            end
        end
    end
end
```

B.2. Fonction de mesure des effets élémentaires.

```
%          Pippo = sum((Group - repmat(AuxFind,1,
NumGroups)),1);
%          Change_factor(j,i) = find(Pippo==0);
%          Change_factor = find(abs(AuxFind)>1e-010);
%          % If we deal with groups we can only estimate
%          the new mu*
%          % measure since factors in the same groups
%          can move in
%          % opposite direction and the definition of
%          the standard
%          % Morris mu cannot be applied.
%          % In the new version the elementary effect is
%          defined with
%          % the absolute value.
%          %SAm meas(find(GroupMat(Change_factor(j,i),:)),
%          i) = abs((Single_OutValues(j) -
%          Single_OutValues(j+1))/Delt); %(2/3));
%          SAm meas(i,Change_factor') = abs((
%          Single_OutValues(j) - Single_OutValues(j
%          +1))/Delt);
else
Change_factor(j,i) = find(Single_Sample(j
+1,:)-Single_Sample(j,:));
%          % If no groups --> we compute both the
%          original and
%          % modified measure
if Delta(j) > 0
%=> +Delta
SAm meas(Change_factor(j,i),i) = (
Single_OutValues(j+1) -
Single_OutValues(j))/Delt; %(2/3);
else
%=> -Delta
SAm meas(Change_factor(j,i),i) = (
Single_OutValues(j) - Single_OutValues
(j+1))/Delt; %(2/3);
end
end
end %for j=1:sizea

end %for i=1:r

if NumGroups ~ 0
SAm meas = SAm meas';
end
```

```
% Compute Mu AbsMu and StDev
if any(any(isnan(SAmeas)))
    for j=1:NumFact,
        SAm = SAmeas(j,:);
        SAm = SAm(find(~isnan(SAm)));
        rr=length(SAm);
        AbsMu(j,1) = sum(abs(SAm),2)/rr;
        if NumGroups == 0
            Mu(j,1) = sum(SAm,2)/rr;
            StDev(j,1) = sum((SAm - repmat(Mu(j),1,rr)).^2/(rr*(
                rr-1)),2).^0.5;
        end
    end
else
    AbsMu = sum(abs(SAmeas),2)/r;
    if NumGroups == 0
        Mu = sum(SAmeas,2)/r;
        StDev = sum((SAmeas - repmat(Mu,1,r)).^2/(r*(r-1)),2)
            .^0.5;
    end
end

% Define the output Matrix - if we have groups we cannot
% define the old
% measure mu, only mu* makes sense
if NumGroups > 0
    OutMatrix = [OutMatrix; AbsMu];
else
    OutMatrix = [OutMatrix; AbsMu, Mu, StDev];
end
end % For Each Output
```

Annexe C

Code de pour l'évaluation des effets élémentaires deuxième ordre.

C.1 Fonction de sampling.

```
function [SAmeas, OutMatrix] = mmg(NumFact, Sample, Output, p
    , Group)

if nargin==0,
    disp("_")
    disp("[SAmeas, OutMatrix] = mmg(NumFact, Sample, Output, p, Group);")
    return
endif

OutMatrix=[];
if nargin < 5, Group=[]; endif

NumGroups = size(Group,2);
if nargin < 4 | isempty(p),
    p = 4;
endif
#Delt = p/(2*p-2);
Delt=1/3;
if NumGroups ~ 0
    sizea = NumGroups;          # Number of groups
    GroupMat=Group;
    GroupMat = GroupMat';
else
    sizea = NumFact;
    #sizea = NumGroups;          # Number of groups
```

```
#GroupMat=Group;
#GroupMat = GroupMat';
endif
arriba = size(Sample,1);
abajo = (sizea+1);

r=size(Sample,1)/(sizea+1);    # Number of trajectories

# For Each Output
for k=1:size(Output,2)

    OutValues=Output(:,k);

    # For each r trajectory
    for i=1:r

        # For each step j in the trajectory
        # Read the orientation matrix fact for the r-th
        # sampling
        # Read the corresponding output values
        Single_Sample = Sample(i+(i-1)*sizea:i+(i-1)*sizea+
            sizea,:);
        Single_OutValues = OutValues(i+(i-1)*sizea:i+(i-1)*
            sizea+sizea,:);
        A = (Single_Sample(2:sizea+1,:)-Single_Sample(1:sizea
            ,:))';
        Delta = A(find(A));

        # For each point of the fixed trajectory compute the
        # values of the Morris function. The function
        # is partitioned in four parts, from order zero to
        # order 4th.
        for j=1:sizea    # For each point in the trajectory i.
            e for each factor
                # matrix of factor which changes
                # if NumGroups ~ 0;
                # AuxFind(:,1) = A(:,j);
                # AuxFind(find(A(:,j)),1)=1;
                # Pippo = sum((Group - repmat(AuxFind,1,
                NumGroups)),1);
                # Change_factor(j,i) = find(Pippo==0);
                # Change_factor = find(abs(AuxFind)>1e-010);
                # If we deal with groups we can only estimate
                the new mu*
```

```

# measure since factors in the same groups
# can move in
# opposite direction and the definition of
# the standard
# Morris mu cannot be applied.
# In the new version the elementary effect is
# defined with
# the absolute value.
#SAm meas(find(GroupMat(Change_factor(j,i),:)),
# i) = abs((Single_OutValues(j) -
# Single_OutValues(j+1) )/Delt); #(2/3));
# SAm meas(i,Change_factor') = abs((
# Single_OutValues(j) - Single_OutValues(j+1) )/
# Delt);
#else
Change_factor(j,i) = find(Single_Sample(j
+1,:)-Single_Sample(j,:));
# If no groups --> we compute both the
# original and
# modified measure
if Delta(j) > 0
#=> +Delta
SAm meas(Change_factor(j,i),i) = (
Single_OutValues(j+1) -
Single_OutValues(j) )/Delt; #(2/3);
else
#=> -Delta
SAm meas(Change_factor(j,i),i) = (
Single_OutValues(j) - Single_OutValues
(j+1) )/Delt; #(2/3);
endif
#endif
endfor #for j=1:sizea

endfor #for i=1:r

if NumGroups ~ 0
SAm meas = SAm meas';
endif

# Compute Mu AbsMu and StDev
if any(any(isnan(SAm meas)))
for j=1:NumFact
SAm = SAm meas(j,:);
SAm = SAm(find(~isnan(SAm)));
rr=length(SAm);

```

```
        AbsMu(j,1) = sum(abs(SAm),2)/rr;
#   if NumGroups == 0
        Mu(j,1) = sum(SAm,2)/rr;
        StDev(j,1) = sum((SAm - repmat(Mu(j),1,rr)).^2/((rr
            -1)),2).^0.5;
#   endif
endfor
else
    AbsMu = sum(abs(SAmeas),2)/r;
#   if NumGroups == 0
        Mu = sum(SAmeas,2)/r;
        StDev = sum((SAmeas - repmat(Mu,1,r)).^2/((r-1)),2)
            .^0.5;
#   endif
endif

# Define the output Matrix - if we have groups we cannot
# define the old
# measure mu, only mu* makes sense
# if NumGroups > 0
#     OutMatrix = [OutMatrix; AbsMu];
# else
        OutMatrix = [OutMatrix; AbsMu, Mu, StDev];
#endif
endfor      # For Each Output
endfunction
```

C.2 Fonction de mesure des effets élémentaires.

```
function [OutMatrix] = Morris_measure_double(NumFact, Sample,
    Output, p);

Delt = p/(2*p-2)
#Delt = 1/5;
sizea=NumFact;

#The number of single trayectoires in MT required to compute
# a complete EEij
#Analysis is given by the formula r=k/2

totalT=size(Sample,1)/((2*sizea)*(sizea/2));

r=sizea/2;

# We use g as a index total index of runs.
g=0;
```

C.2. Fonction de mesure des effets élémentaires.

```
#we start a loop for the TOTAL number of trayectoires (shared
as RBIG)
for i=1:totalT

    # We take a single MT (k+1)+(k-1)-by-k matrix of sample
    values and
    # their respectives results

    #
    stepa=((2*sizea)*(sizea/2))-2;
    stepb=((2*sizea)*(sizea/2))-1;

    #####!!!!!! this should be updated and erased shortly just
    for debug
    #####purposes

    aa = i+(i-1)*(stepa+1);
    bb = i+(i-1)*stepb+stepb;

    Single_Sample = Sample(aa:bb,:);
    Single_OutValues = Output(aa:bb,:);

    ##### Maybe we will erase this code
    # Is important to know the Delta and if the delta was
    added or
    # decreased so we create a Matrix
    # A= (Single_Sample(2:(2*sizea*(sizea/2)),:)-
    Single_Sample(1:(2*sizea*(sizea/2))-1,:))
    # Here we create
    #Delta = A(find(A));

    for j=1:sizea/2; #loop for k/2 number of B* necessary to
    compute EEij

        sizemt=(2*sizea)-1;

        A = Single_Sample(j+(j-1)*sizemt:j+(j-1)*sizemt+
        sizemt,:);
        R = Single_OutValues(j+(j-1)*sizemt:j+(j-1)*sizemt+
        sizemt,:);
```

```
#         if i==1
#             debud=1;
#         end
H = handcuffed(sizea ,j);

Change_factor = zeros(sizea-1,2);

for k=1:sizea-1

    if H(k)<H(k+1)
        Change_factor(k,1:2) = [H(k) H(k+1)] ;
    else
        Change_factor(k,1:2) = [H(k+1) H(k)] ;
    endif

    # A dangerous loop that should be removed if an
    # option is found.
    # it counts the total number of times the for is
    # run and is
    # equivalent to j+k+R
    g=g+1;

    SAmear(g,1)=Change_factor(k,1);
    SAmear(g,2)= Change_factor(k,2);

    #debug
    SAmearsd(g,1)=Change_factor(k,1);
    SAmearsd(g,2)= Change_factor(k,2);
    #
    #####

    #we still dont know wich is EEi and which is EEj
    ... we will

    EE1=A(k,:);
    EE2=A(k+1,:); #i matrix
    EE3=A(k+(sizea+1),:); #j matrix

    VER1(g,:)=EE1-EE2;
    VER2(g,:)=EE1-EE3;

    EEi=(R(k+1)-R(k))/Delt;
    EEj=(R(k+(sizea+1))-R(k))/Delt;
```

```

#
#####

SEEij=(R(k+2)-R(k));
SAmeasd(g,3:5)= [SEEij EEi EEj];

#SAmeas(g,3)=abs(SEEij-abs(EEi)-abs(EEj));

#SAmeas = EEij - EEi - EEj + Alpha

SAmeas(g,3) = abs((R(k+2) - R(k+1) - R(k+(sizea
+1)) +R(k)) /(Delt*Delt));
endfor

endfor

endfor

VER1;
VER2;
SAmeas;
SAmeasd;
#REV=[TFE, SAmeas]

# Because we doesn't have a permutation matrix PO who change
the order of
# the interactions ij we should have a matrix SAmeas composed
of (k 2) =
# k(k-1)/2 interactions ij so depending of the number of
trayectories r we
# should have (k 2)*r interactions in SA meas with SAmeas
(1:2,:) number of
# factors.which i<j.

Nint = (sizea*(sizea-1))/2;
SAmeasN = sortrows(SAmeas,[1 2]);

Tbass=totalT-1;

for y=1:Nint
a = y+(y-1)*Tbass;
b = y+((y-1)*Tbass)+Tbass;
Mut(y) = sum(abs(SAmeasN(a:b,3)))/totalT;

```

```
#StDev(y) = sum((SAmeasN(a:b,3) - Mu(y)).^2/(totalT*(totalT
-1))).^0.5;
StDevt(y) = ((sum((SAmeasN(a:b,3) - Mut(y)).^2))*(1/(totalT
-1))).^0.5;
endfor

Mu=Mut '
StDev=StDevt ' ;
Factors1=SAmeas(1:Nint,1:2);
Factors=sortrows(Factors1);

Factors

OutMatrix=([Factors, Mu, StDev]);

endfunction
# we need to know where EEij are taking place so we maybe
reuse the function
# handcuffed.
function [a] = handcuffed(sizea, n)
# Hand-cuffed series a series of blocks are obtained such as
# a <...s+2,2s-1,s+1,0,s,1,s-1,2,s-2...> are obtained
# Mendelshon NS. Handcuffed designs. discrete mathematics
1977.
# NOTE: that sizea = k (number of factor) and not s=k/2

sf=sizea;
j=1;
k=0;
kk=0;
for s=1:sf;
    if mod(s,2) == 0
        #number if even
        a(s)=a(s-1)-1;
    else
        #number is odd
        a(s)=(sizea-1)-j;
        j=j+1;
    endif
endfor

for s=1:sf
    if mod(s,2)==0
        #even
        a(sizea-k)=(a(sf))-kk;
        k=k+2;
```

```
        kk=kk+1;
    endif
endfor
a(2)=sizea-1;

# This indicate the rotation of handcuffed if is necessary

if n>1
    for t=1:n-1
        for j=1:sizea
            a(j)=a(j)+1;
        endfor
        [C,I]=max(a);
        a(I)=C-sizea;
    endfor
endif

#this add the real values to matrix a

for i=1:k
    a(i)=a(i)+1;
endfor

endfunction

#endfunction
```


Annexe D

Analyse bibliographique de modèles

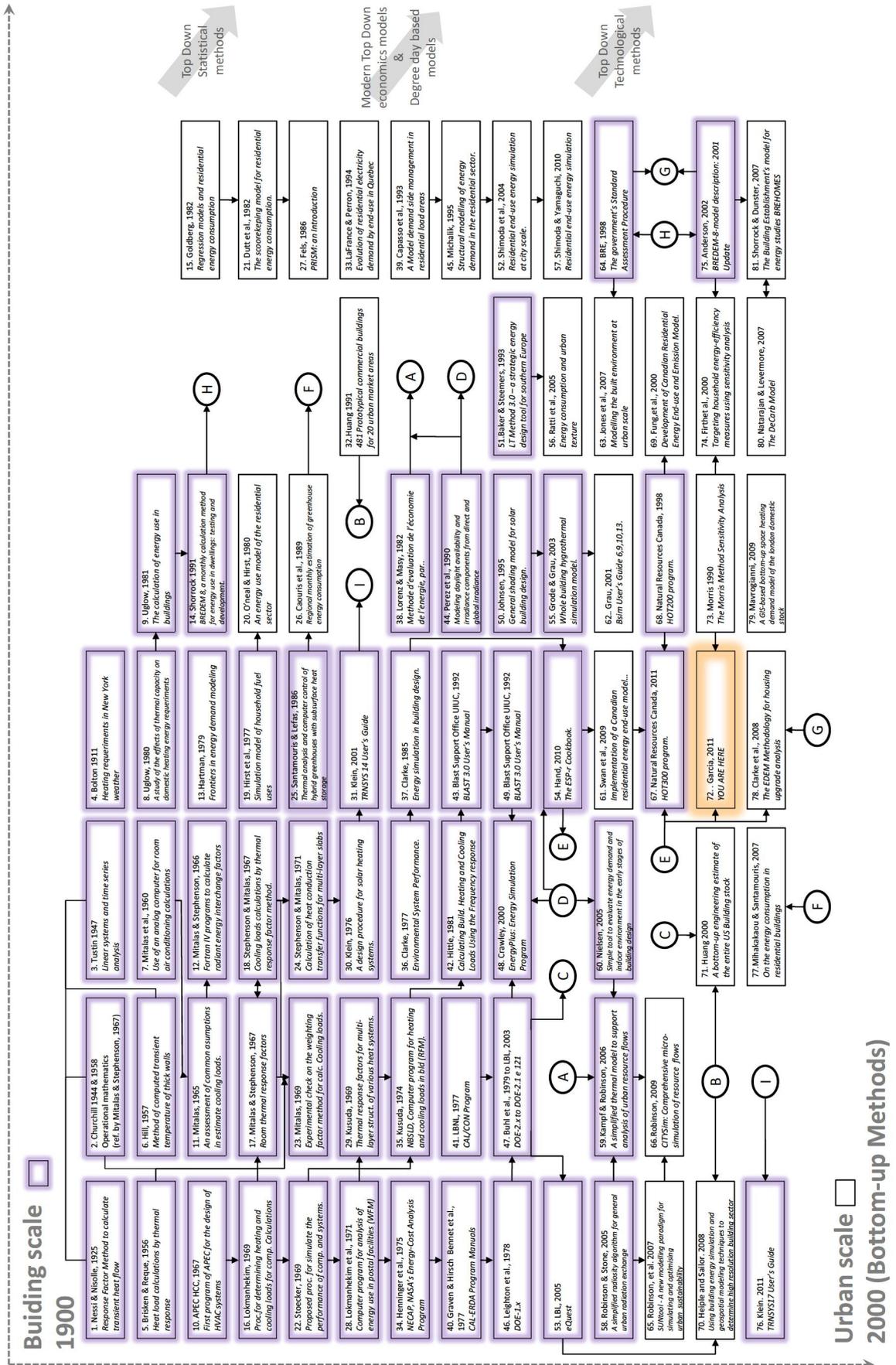


Figure D.1: Evolution des modèles énergétiques du bâtiment à l'échelle urbaine ; les liens vers les publications respectives sont dans le tableau D.1

1.Nessi and Nisolle (1925) ; 2.Churchill (1958) 3.Tustin (1947) 4.Bolton (1911) 5.Brisken and Reque (1956) 6.Hill (1957) 7. Mitalas et al. (1960); 8.Uglow (1980); 9.Uglow (1981); 10. APEC (1967); 11.Mitalas (1965); 12.Mitalas and Stephenson (1966); 13. Hartman and Werth (1979); 14.Shorroch et al. (1991); 15.Goldberg (1982); 16.Lokmanhekim (1969); 17. Mitalas and Stephenson (1967); 18. Stephenson and Mitalas (1967); 19.Hirst et al. (1977); 20.O’Neal and Hirst (1980); 21.Dutt et al. (1982); 22.Stoecker (1971); 23. Mitalas (1969); 24. Stephenson and Mitalas (1971); 25. Santamouris and Lefas (1986); 26.Caouris et al. (1989); 27. Fels (1986); 28. Lockmanhekim (1971); 29.Kusuda (1971); 30. Klein (1976); 31.Klein (2006); 32. Huang et al. (1991); 33. LaFrance and Perron (1994); 34. Henninger (1975); 35. Kusuda (1974); 36. Clarke (1977); 37. Clarke (1985); 38. Lorenz and Masy (1982); 39. Capasso et al. (1993); 40. Graven and Hirsch (1977); 41.Laurence Berkeley Laboratory (1997); 42.Hittle (1981); 43.BLAST Support Office (1992); 44.Perez et al. (1990); 45. Michalik et al. (1997a,b); 46. Leighton (1978); 47.Buhl (1979-2003); 48.Crawley et al. (2000); 49.BLAST Support Office (1992); 50.Johnsen (1995); 51.Baker and Steemers (1996); 52.Shimoda et al. (2004); 53.Lawrence Berkeley National Laboratory (2005); 54.Hand (2010); 55.Rode and Grau (2003); 56. Ratti et al. (2005); 57.Shimoda et al. (2010b,a); 58.Robinson and Stone (2005); 59. Kämpf and Robinson (2007); 60.Nielsen (2005); 61.Swan et al. (2009); Swan (2010); 62. Grau (2001); 63. Jones et al. (2007); 64. Building Research Establishment (1998); 65. Robinson et al. (2003); 66.Robinson et al. (2009); 67.Natural Resources Canada (2011); 68. Natural Resources Canada (1998); 69. Fung et al. (2000); 70.Heiple and Sailor (2008); 71. Huang and Broderrick (2000); 72. Garcia-Sanchez et al. (2009); 73. Morris (1991); 74. Firth et al. (2010); 75. Anderson et al. (2002); 76. Klein (2011); 77. Mihalakakou et al. (2002); 78. Clarke et al. (2008); 79. Mavrogianni et al. (2009); 80. Natarajan and Levermore (2007); 81. Shorroch and Dunster (1997)

Table D.1: References of the figure [D.1](#)

Annexe E

Schéma générale du système MEDUS.

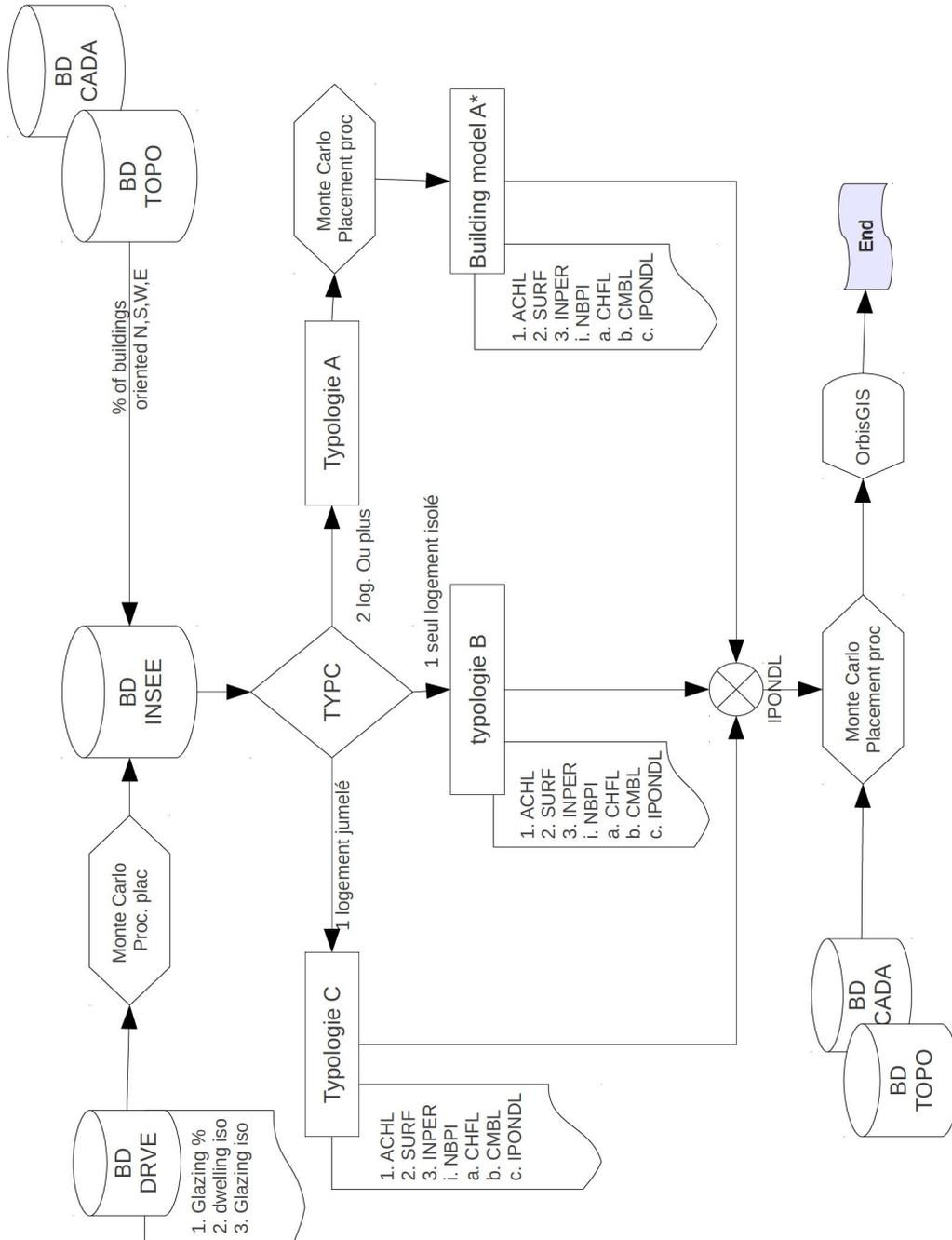


Figure E.1: Schéma général du système MEDUS ; avec trois typologies alimentées par la base de donnée de population et logements de l'INSEE. Des sources d'information complémentaires peuvent être ajoutées, telles que base de donnée topographique, cadastrale, ou enquête du terrain. Cette figure reprend plus en détail la figure 2.2 du chapitre 2.

David Garcia Sanchez

Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine Modelling energy demand of buildings at urban scale.

Résumé

Pour répondre aux enjeux énergétiques et climatiques, une des échelles d'action pertinentes est désormais celle du quartier ou de la ville. Des besoins de connaissance, d'outils d'aide à la décision et d'évaluation à cette échelle se manifestent de plus en plus. Un des volets concerne la modélisation de la demande d'énergie des bâtiments résidentiels, préalable à la mise en place d'actions de rénovation de l'existant ou à la valorisation de sources d'énergie locales. La diversité de situations de terrains, d'objectifs d'acteurs et de contextes de disponibilité de données incitent à rechercher des modèles flexibles, aptes à produire de l'information pour différentes applications, à partir de jeux alternatifs de données d'entrée, combinant des modèles de natures diverses (notamment physiques et statistiques) selon les besoins.

Dans cet esprit, le présent travail cherche à explorer le potentiel de méthodes dites ascendantes, s'appuyant sur des modèles développés à l'origine pour la simulation à l'échelle d'un bâtiment isolé, mais extrapolés ici pour le parc de bâtiments d'une zone urbaine sur la base de bâtiments types. Les deux questions clés abordées sont celles de la sélection des bâtiments types et de la reconstitution des données d'entrée pertinentes sur le plan statistique pour la zone étudiée.

Des techniques d'analyse de sensibilité, en particulier la méthode des effets élémentaires de Morris, ont été appliquées à un code de calcul thermique de bâtiment (ESP-r). Elles ont mis en évidence une réponse non linéaire du modèle, notamment du fait des interactions entre paramètres et de la dispersion des paramètres d'entrée. Elles ont permis d'identifier les paramètres les plus sensibles et les plus en interaction (concernant les bâtiments eux-mêmes, leur environnement ou leurs habitants), sur lesquels doit être concentré le travail de collecte ou de reconstitution statistique.

Un modèle, dénommé MEDUS, de reconstitution de la distribution des besoins de chaleur sur un quartier à partir de trois typologies de bâtiments, a été développé et testé sur le secteur St-Félix à Nantes. Il est alimenté par des données INSEE à l'échelle d'un IRIS. Ses résultats sont analysés, à la fois sous l'angle de la pertinence des typologies choisies et dans une perspective d'application à l'échelle du quartier.

Mots clés

Demande d'énergie, échelle urbaine, Analyse de sensibilité, Méthode d'effets élémentaires.

Abstract

Urban scale is now considered as one of the most relevant scales to face energy and climate challenges. Specific needs for knowledge, decision making tools and evaluation are identified at urban scale. Modelling energy demand from residential buildings is one key aspect, prior to energy retrofitting of existing building asset or to valorisation of local energy sources. Diversity of local contexts, stakeholder goals and data availability lead to search flexible models, with ability to produce information for different applications, from alternative input data sets, combining different types of basic models (namely both physical and statistical ones), according to user needs.

The present work is exploring the potential of bottom-up approaches, based on engineering models, developed originally for isolated buildings. These models are extrapolated for the complete set of buildings in a city or neighbourhood, based on building archetypes. Two key questions tackled are the selection of suitable archetypes and the reconstitution of relevant input data, statistically representative for the area of interest

Sensitivity analysis techniques have been applied to a thermal simulation programme (ESP-r), particularly the Morris elementary effects method. A non-linear response of the model has been emphasized, caused by scattering of input parameters and interaction effects. The most influencing and interacting parameters have been identified. They concern the buildings themselves, their environment and the inhabitants. Data collection or statistical reconstitution must be concentrated in priority to these main parameters.

A model of the heat demand at a neighbourhood scale has been developed and tested on the sector St-Félix in Nantes. It is called MEDUS (Modelling Energy Demand at Urban Scale). Application is based on three building archetypes. Census data (INSEE) available at the sector scale are the main input data. Results are analyzed both to check archetype relevancy and to study a possible application for evaluating actions at sector scale, such as energy retrofitting.

Key Words

Urban scale, buildings, energy demand, sensitivity analysis, Morris method.