



**HAL**  
open science

# Analyse de sensibilité pour la modélisation du comportement thermique d'un quartier par approche typologique, lors de la phase de reconstruction

Alexis Monteil

► **To cite this version:**

Alexis Monteil. Analyse de sensibilité pour la modélisation du comportement thermique d'un quartier par approche typologique, lors de la phase de reconstruction. Architecture, aménagement de l'espace. 2010. dumas-00564965

**HAL Id: dumas-00564965**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00564965>**

Submitted on 16 Feb 2011

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Alexis MONTEIL

Projet de recherche (8 mars – 3 septembre 2010) de master  
« Sciences et Techniques des Environnements Urbains »  
Spécialité Ambiances et Formes Urbaines



Sujet : Analyse de sensibilité pour la modélisation du comportement thermique d'un quartier par approche typologique, lors de la phase de reconstitution

Tuteurs : Bruno LACARRIERE (EMN) et Gwendall PETIT (IRSTV)

## Résumé :

La rénovation du bâti existant a clairement été identifiée comme la cible principale pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du bâtiment. Par ailleurs, c'est notamment à l'échelle locale que peuvent être définies et mises en œuvre des solutions énergétiquement durables.

Afin de soutenir les différents acteurs locaux dans leur prise de décision, de nombreux travaux scientifiques s'intéressent à la modélisation énergétique à l'échelle locale. Des outils d'aide à la décision en matière de rénovation du bâti commencent à voir le jour.

Ce stage s'inscrit dans cette thématique de modélisation du comportement thermique des bâtiments à l'échelle urbaine. En connaissant le comportement d'un nombre limité de bâtiments et de leur représentativité dans le quartier, on peut obtenir une vision plus ou moins précise du comportement thermique de ce dernier. A partir de paramètres identifiés comme étant les plus significatifs, il s'agit d'établir des lois simples décrivant les bâtiments « types » et de mettre en œuvre de relations de reconstitution des bâtiments pour l'ensemble du territoire concerné.

## Abstract :

Recent studies have shown that the best way of reducing greenhouse emissions of buildings lies in the refurbishment of existing buildings. Besides, the local scale seems to be the most relevant in order to define and initiate sustainable energy solutions. Many scientific projects focus on energy modeling at a local scale so as to help the various local protagonists in the process of decision-making. This has led to the development of various appropriate tools in the past few years. This internship fits in the concern of modeling the buildings thermal behaviour at urban scale. Knowing how a small number of representative buildings behave may lead to an accurate picturing of the energy consumption of an urban area. Therefore, depending upon the most significant input parameters, we will aim to define simple laws to characterize types of buildings and figure out spatial recovery relationships through the whole studied area.

## Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et assisté tout au long de ces six mois de stage, du 8 mars au 3 septembre 2010, à l'École des Mines de Nantes (département Systèmes Energétiques et Environnement – équipe de recherche Systèmes énergétiques durables et Territoires) ainsi qu'à l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (Projet de recherche fédératif « Données urbaines : outils et méthodes pour l'analyse spatiale de l'environnement urbain »), et plus particulièrement :

Bruno LACARRIERE, enseignant-chercheur au Département Systèmes Energétiques et Environnement de l'École des Mines de Nantes, et Gwendall PETIT, ingénieur à l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, pour leur disponibilité et leur confiance ;

Bernard BOURGES, professeur au Département Systèmes Energétiques et Environnement de l'École des Mines de Nantes, pour ses conseils et son aide précieux ;

Erwan BOCHER, enseignant-chercheur à l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, pour m'avoir permis de participer à l'École d'été de Gérone (Espagne) sur les SIG libres ;

Marjorie MUSY, chercheur et responsable de la spécialité "Ambiances et Formes Urbaines" du master 2 Sciences et Techniques des Environnements Urbains, pour avoir supervisé ce stage et participé à son bon déroulement ;

David GARCIA-SANCHEZ, doctorant au Département Systèmes Energétiques et Environnement de l'École des Mines de Nantes, pour ses conseils ;

Ian McCALL, Charlotte MARGUERITE, Santiago GARCIA-HERREROS et Hanna JESTIN-LEDUCQ, stagiaires à l'EMN ou l'IRSTV.

# Sommaire

<b>Introduction : enjeux – contexte général .....</b>	<b>8</b>
1) Contextes mondial, national et local .....	8
2) Enjeux énergétiques dans le bâtiment .....	9
<b>Rappel de la commande initiale de stage .....</b>	<b>11</b>
<b>I/ Etat de l'art .....</b>	<b>12</b>
1) Choix de l'échelle d'analyse .....	12
2) Stratégies de modélisation .....	13
3) Variété des modèles .....	16
4) Analyse de sensibilité : définition, intérêts, méthodes .....	25
5) Influence des différents paramètres sur la consommation énergétique des bâtiments 26	
6) Les systèmes d'informations géographiques dans l'analyse énergétique à l'échelle urbaine et le processus d'affectation géographique .....	28
<b>II/ Problématique, méthodologie et données .....</b>	<b>30</b>
1) Problématisation et hypothèses .....	30
2) Méthodologie .....	31
3) Données et outils.....	33
<b>III/ Analyse spatiale .....</b>	<b>35</b>
1) Collecte des données, indicateurs statistiques et identification du terrain d'étude .....	35
2) Analyse et indicateurs spatiaux .....	38
3) Affectation d'une localisation aux bâtiments.....	42
<b>IV/Analyse énergétique .....</b>	<b>46</b>
1) Définition de typologies initiales.....	46
2) Simulation de bâtiments.....	51
3) Paramètres d'entrée et précision des typologies de bâtiments .....	52
4) Consommation énergétique finale des bâtiments.....	59

5) Profils de puissance appelée.....	64
<b>VI/ Synthèse : discussion et limites de l'approche.....</b>	<b>67</b>
1) Discussion.....	67
2) Limites de l'approche et du thème de stage.....	67
<b>Bibliographie .....</b>	<b>69</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>72</b>

## Table des figures

Figure 1 - Approches de modélisation de la consommation énergétique des bâtiments (Swan & Ugursal, 2008).....	14
Figure 2 - Effectif des MI et IC selon la période de construction (source : ETHEL n°2, 2005) .....	16
Figure 3 - Consommation des MI et IC selon la période de construction (source: ETHEL n°2, 2005).....	16
Figure 4 - Facteurs qui influencent la consommation énergétique des bâtiments (Ratti, Baker & Steemers, 2005). .....	26
Figure 5 - Schéma de la méthodologie du projet .....	32
Figure 6 - Comparaison de la proportion de logement selon la période de construction pour l'IRIS 0409 (IRIS sélectionné) et l'IRIS moyen .....	36
Figure 8 - Répartition et nombre de bâtiments de Saint Félix selon le type .....	37
Figure 7 - IRIS 0409 Saint Félix (la couleur bleue correspond à l'Erdre entre Motte Rouge et le pont de la Tortière).....	37
Figure 9 - Répartition des périodes de construction des logements dans l'IRIS Saint Félix... ..	38
Figure 10 - Hauteur des bâtiments de Saint Félix .....	38
Figure 11 - Nombre de contacts mitoyens par bâtiment de l'IRIS Saint Félix.....	40
Figure 12 - Distribution des surfaces au sol des bâtiments de la BD parcellaire selon le nombre de surfaces mitoyennes .....	41
Figure 13 - Densité de bâti sur Saint Félix (mailles de 50m par 50m) .....	42
Figure 14 - Distribution des surfaces au sol des bâtiments de la BD INSEE selon type et âge .....	43
Figure 15 - Surface au sol des MI de la période 1915-1948 pour la BD INSEE et la BD parcellaire, après relevé de terrain.....	45

Figure 16 - Répartition des bâtiments selon type et âge.....	46
Figure 17 - Valeurs des U utilisés pour les STD ou calculé .....	48
Figure 18 – Principe de fonctionnement du logiciel Pleiades+COMFIE (Thiers, 2008).....	51
Figure 19 - U global selon surface habitable.....	53
Figure 20 - $U_i \cdot S_i$ selon les périodes de construction .....	54
Figure 21 - Besoins de chauffage selon le taux de renouvellement d'air .....	55
Figure 22 - Influence de l'orientation sur les besoins énergétiques.....	56
Figure 23 - Besoins de chauffage et $U_{toit}$ selon l'épaisseur d'isolant.....	57
Figure 24 - Besoins de chauffage et température de consigne.....	58
Figure 25 - Résidus du 1 <sup>er</sup> modèle selon la surface habitable.....	62
Figure 26 - Résidus du 2 <sup>nd</sup> modèle selon $S_{hab}$ .....	63
Figure 27 - Profil de puissance des bâtiments R 120m <sup>2</sup> selon la période d'âge et le nombre de façades mitoyennes .....	64
Figure 28 - Profil de puissance des bâtiments R 100m <sup>2</sup> selon la période d'âge et le nombre de façades mitoyennes .....	65
Figure 29 - Rendements des chaudières françaises (source : <a href="http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_SR1.pdf">http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_SR1.pdf</a> ) .....	75
Figure 30 - Proportion de logements selon la période de construction pour un échantillon d'IRIS ainsi que l'IRIS moyen .....	77
Figure 31 - Nombre de bâtiments selon âge et surface au sol calculé, d'après la BD INSEE.	78
Figure 32 - Besoins surfaciques de chauffage selon $S_{lat\_ext}/S_{hab}$ .....	79
Figure 33 - Besoins surfaciques de chauffage selon $S_{hab}$ .....	79
Figure 34 - Besoins surfaciques de chauffage selon $Vol/S_{hab}$ .....	80
Figure 35 - Besoins surfaciques de chauffage selon $S_{toit}/S_{hab}$ .....	80

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Consommation d'énergie (chauffage et eau chaude sanitaire) en énergie finale par type d'habitat en France en zone H1 (source: ADEME, 2005).....	9
Tableau 2- Tableau récapitulatif des modèles recensés utilisant l'approche typologique et caractérisés selon 12 critères.....	24

Tableau 3 - Brève analyse du tissu urbain de Saint Félix .....	40
Tableau 4 - Compositions des parois (murs, toiture, plancher) selon période .....	48
Tableau 5 - Typologie initiale de bâtiments.....	50
Tableau 6 – Comparaison énergétique de différentes organisations urbaines sommaires ....	52



# Introduction : enjeux – contexte général

## 1) Contextes mondial, national et local

La très grande majorité de la communauté scientifique mondiale s'accorde sur le réchauffement de la planète Terre. La modification globale future du climat est certaine, et diverses caractéristiques sont déjà notables à l'échelle du globe, d'après les travaux du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC): hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, fonte massive de la neige et de la glace et élévation du niveau des mers<sup>1</sup>. Entre 1970 et 2004, les émissions annuelles de gaz à effet serre (GES) – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, gaz fluorés, etc. – ont augmenté de 28,7 à 49 Gt.équ.CO<sub>2</sub>. Bien que nombreux soient les paramètres qui influent sur les concentrations atmosphériques en GES (rayonnement solaire, activité volcanique, circulation océanique,...), « *l'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques* », d'après le GIEC, hausse qui serait notamment due à l'utilisation massive des énergies fossiles que sont le pétrole, le gaz naturel et le charbon. La biosphère, les écosystèmes et l'Homme vont être impactés – de façon plus ou moins importante – par ce réchauffement climatique mondial.

Cet impact sur l'Homme et les écosystèmes risque d'être d'autant plus important que la démographie est, à l'heure actuelle, un aspect clé des problématiques alimentaires comme énergétiques. Alors que la Terre compte 6,812 milliards d'habitants début 2010<sup>2</sup>, ce chiffre pourrait s'élever à 9,1 milliards d'habitants d'ici 2050<sup>3</sup>.

Au regard de ces enjeux, la France, en signant la déclaration de Rio en 1992 ainsi qu'en ratifiant le Protocole de Kyoto en 2000, s'est engagée avec 173 Etats à mettre en œuvre un programme d'actions intégrant le concept de développement durable pour le XXI<sup>ème</sup> siècle, appelé Agenda 21. Selon la loi Grenelle I votée en octobre 2008, les collectivités territoriales apparaissent comme des « *acteurs essentiels de l'environnement et du développement durable* ». Les autorités locales sont appelées à mettre en place un programme d'Agenda 21 à leur échelle à partir d'un mécanisme de consultation de la population, en y intégrant à la fois les dimensions sociales, économiques, environnementales et de solidarité. En cohérence avec ces Agendas 21, des Plans Climat Territoriaux et leur composante Plan Énergie Climat Territorial (plans stratégiques comprenant différents volets sur un territoire donné, obligatoires pour les communes de plus de 50 000 habitants), intégrés à la logique de réduction par 4 d'ici 2050 des émissions de GES de 1990, commencent à voir le jour. A Nantes Métropole, le Plan Climat est prévu d'ici 2013, avec un objectif de réduction de 25% des émissions de GES en 2025 par rapport au niveau de 1990. Au niveau régional, le Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE), prévu par la loi Grenelle II promulguée le 12 juillet 2010, devient le nouveau document de planification territoriale, explicitant les politiques qui seront menées pour le développement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, la lutte contre le réchauffement climatique et l'amélioration de la qualité de l'air. Enfin, ces dispositifs législatifs prévoient des obligations d'évaluation et de synthèse des expériences et plans réalisés.

<sup>1</sup> GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 p.

<sup>2</sup> <http://www.census.gov/ipc/www/popclockworld.html>

<sup>3</sup> <http://www.un.org/apps/newsFr/storyFAR.asp?NewsID=10008&Cr=Population&Cr1=DESA>

## 2) Enjeux énergétiques dans le bâtiment

Dans l'habitat et le tertiaire, qui représentent 28% des émissions de GES en France métropolitaine en 2003 (ETHEL n°2, 2005), l'enjeu est de taille.

L'évolution des réglementations thermiques est synonyme de diminution de la consommation énergétique d'un bâtiment neuf, comme en témoigne ce tableau :

	Individuel	Collectif
Avant la 1 <sup>ère</sup> réglementation thermique de 1974	330 kWh/m <sup>2</sup> /an	210 kWh/m <sup>2</sup> /an
Règlementation de 1988	155 kWh/m <sup>2</sup> /an	145 kWh/m <sup>2</sup> /an
Règlementation de 2000	130 kWh/m <sup>2</sup> /an	110 kWh/m <sup>2</sup> /an
Règlementation de 2005	100 à 120 kWh/m <sup>2</sup> /an	90 à 110 kWh/m <sup>2</sup> /an

**Tableau 1 - Consommation d'énergie (chauffage et eau chaude sanitaire) en énergie finale par type d'habitat en France en zone H1 (source: ADEME, 2005)**

Malgré la diminution de la consommation moyenne d'un logement français entre 1973 et 2003 (de 372 kWh/m<sup>2</sup> à 245 kWh/m<sup>2</sup>), l'augmentation de la surface de logement par habitant, la progression des parcs résidentiel et tertiaire et l'augmentation des standards de confort ont entraîné une augmentation de la consommation finale d'énergie dans le bâtiment de 24% en volume, entre 1973 et 2004 (ADEME, 2005 ; ETHEL, 2005). Suite à la directive européenne sur la performance des bâtiments (Energy performance of buildings Directive – EPBD) de 2002 (Poel et al., 2007), l'ensemble législatif issu du Grenelle de l'environnement vise à « favoriser un urbanisme économe en ressources foncières et énergétiques » et généraliser les bâtiments basse consommation dans la construction à partir de 2012. L'enjeu véritable reste cet objectif de rénovation thermique de « 400 000 logements par an à partir de 2013 » et des « 800 000 logements sociaux les plus énergivores d'ici à 2020 »<sup>4</sup>. En effet, « sans travaux d'amélioration, c'est-à-dire en ne considérant que les flux démolitions/constructions, il est impossible de descendre sous la barre des 200 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an avant 2025 puis sous la barre des 175 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an en 2050, même au prix d'une réglementation sur le neuf atteignant la basse consommation en 2012 et le bâtiment passif en 2020 » (Marchal, 2008).

En 2020, au moins 23% de l'énergie finale consommée en France devra être renouvelable. En volume, et compte tenu de la réduction des besoins notamment dans les bâtiments, cela revient à augmenter de 20 Mtep annuelles la production d'énergie à partir de sources renouvelables. La chaleur renouvelable représente la moitié de cet objectif. La chaleur est en effet le premier poste de consommation énergétique nationale. Elle est aujourd'hui produite à 85% à partir d'énergies non renouvelables, et à 73% à partir d'énergies fortement émettrices de gaz à effet de serre. Le chauffage du résidentiel-tertiaire représente à lui seul un tiers des émissions de gaz à effet de serre de la France. Or d'importantes sources d'énergies renouvelables et de récupération, utilisables pour la production de chaleur, sont aujourd'hui sous-exploitées. Pour cela, il est nécessaire de mener de front des politiques d'économies d'énergie dans le bâtiment et des modèles de localisation de la demande énergétique.

<sup>4</sup> [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Grenelle\\_Envt-2\\_DEF\\_web.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Grenelle_Envt-2_DEF_web.pdf)

De plus, comme l'énonçait déjà Schilling (1984), la seule performance énergétique des bâtiments pris individuellement ne suffit pas à caractériser le comportement thermique d'un fragment urbain. La forme urbaine, le système « fragment urbaine », influe lui aussi sur la consommation énergétique des logements qui le composent partiellement. L'enjeu est donc de taille. Travailler à l'échelle du quartier renvoie donc aussi à l'étude aux échelles macroscopique et microscopique.

Ce projet de recherche s'inscrit par conséquent dans le contexte d'amélioration énergétique des bâtiments en zone urbaine. Transdisciplinaire, mêlant sciences de l'ingénieur (thermique et énergétique), géomatique et sociologie urbaine, dans le cadre général de la gestion de projet, ce stage prend plus particulièrement en compte les aspects méthodologiques de la détermination des consommations énergétiques sur un territoire.

## Rappel de la commande initiale de stage

La commande initiale de stage s'intitule : « Analyse de la pertinence d'une étude de sensibilité pour la modélisation du comportement thermique d'un quartier par approche typologique, lors de la phase de reconstitution ».

*« La modélisation du comportement thermique dynamique de bâtiments est une chose maîtrisée (en témoignent les nombreux outils dédiés). Dès lors qu'on opère un changement d'échelle et que l'on considère un ensemble de bâtiments (ex : quartier) ces outils deviennent vite limités (manque de flexibilité nécessaire à la représentation de la diversité des situations par exemple). Une des possibilités rencontrées dans la littérature est une approche par typologie de bâtiments. Sur la base de la connaissance du comportement d'un nombre limité de bâtiments et de leurs représentativités dans le quartier, on peut envisager une vision (plus ou moins) bonne du comportement de ce dernier. La « reconstitution » de l'objet d'étude qu'est le quartier n'est souvent qu'une répartition des consommations types proportionnellement au nombre de ces bâtiments. On envisage ici de vérifier la valeur ajoutée d'une approche par analyse de sensibilité sur la base d'une population de bâtiments simulés par ailleurs grâce aux outils classiques.*

*Ce travail sera structuré en trois parties :*

*Une première partie synthétisera l'ensemble des approches par typologies utilisées dans le contexte de modélisation à l'échelle du quartier. Cette synthèse mettra en avant les avantages et les limites d'une telle approche, ainsi que les outils utilisés. On regardera notamment les informations qui peuvent être espérées par l'implémentation d'un outil reposant sur ce type d'approche (Quels indicateurs liés à l'énergie? Quels indicateurs environnementaux ?). Ce travail précisera également les méthodes utilisées pour reconstituer l'échantillon (répartition en fonction de la fréquence du type, distribution basée sur des ratios...).*

*Dans un deuxième temps, le travail consistera à étudier le potentiel d'une approche par analyse de sensibilité. L'idée étant que sur la base d'un nombre limité de bâtiments « parfaitement » connus, une analyse de sensibilité devrait permettre de déterminer des lois simples liants indicateurs et paramètres explicatifs.*

*Sur la base de ces lois, la troisième étape consistera à déterminer les relations de reconstitutions du quartier à partir de la connaissance des paramètres explicatifs précédents mais pour l'ensemble des bâtiments du stock. Cette reconstitution exploitera les fonctionnalités de l'outil SIG.*

*La connaissance « parfaite » des bâtiments reposera sur une simulation systématique d'un ensemble de bâtiments faite au cours d'un stage du Master « Sciences et Techniques des Environnements Urbains » en parallèle de celui-ci. Les bâtiments types devront être définis dans le cadre du présent stage<sup>5</sup>. »*

---

<sup>5</sup> Il est à noter que ce stage de fin d'études s'inscrit dans la lignée des travaux d'A. Methenier, B. Neu ou M. Messerli sur la modélisation de la consommation énergétique à l'échelle territoriale, ses difficultés et la complexité de recueil des données nécessaires à la simulation.

# I/ Etat de l'art

Cette première partie est une synthèse bibliographique sur la modélisation de la consommation énergétique des bâtiments résidentiels par approche typologique, ainsi que sur le potentiel de simplification du modèle par des analyses de sensibilité. Seront exposés tous les points d'étude et de recherche qui interviennent dans les objectifs de ce stage. L'état de l'art permettra donc de préciser la problématique de recherche et la méthodologie à suivre.

L'approche typologique, fréquente dans la modélisation du comportement thermique du bâtiment, renvoie à la classification du bâti selon des caractéristiques diverses. Toute classification quelle qu'elle soit peut être valable, si son intérêt au regard des objectifs de modélisation est démontré. Ainsi, les bâtiments peuvent être classés, définis selon des paramètres variés dont les valeurs seront propres à chaque classe.

Compte-tenu de la richesse d'une approche par typologies de bâtiments, les objectifs de cet état de l'art sont multiples :

- Inventorier l'ensemble des approches par typologies utilisées en contexte urbain, à l'échelle du quartier (au minimum)
- Expliciter les objectifs de chaque approche, les outils utilisés, ainsi que les avantages et inconvénients de chacune d'elle
- Recenser les différents travaux ayant mis en évidence l'influence qualitative voire quantitative d'un ou plusieurs paramètres clés dans la consommation énergétique d'un logement

A l'heure actuelle, de nombreux outils de simulation et d'évaluation thermique et des consommations énergétiques existent à l'échelle du bâtiment. Trnsys, Energy Plus, Design Builder, ESP-r ou Pleiades+COMFIE comptent parmi les plus utilisés. Les besoins d'un bâtiment sont généralement estimés selon les caractéristiques suivantes : propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la construction, environnement et microclimat, systèmes et usages, ou forme et orientation des bâtiments.

La précision des résultats (et l'erreur conséquente) dépend des hypothèses de simplification du modèle, du nombre et de la précision des données d'entrée, ainsi que de la maîtrise partielle des données par défaut.

## 1) Choix de l'échelle d'analyse

La segmentation des bâtiments en classes selon des paramètres discriminants dépend de l'échelle d'analyse et de l'objet d'étude.

L'objet d'étude renvoie au type de bâti étudié. Le bâti industriel n'est pas étudié du fait de ses spécificités de fabrication et des processus de production liés. Les études inventoriées portent donc soit sur le secteur résidentiel, soit sur le secteur tertiaire, soit sur ces deux secteurs associés. L'étude peut porter sur un territoire (ville, quartier, région,...) ou sur un patrimoine bâti, comme le parc de logements d'un bailleur public.

Le choix de l'échelle d'étude dépend de celle des politiques publiques de rénovation thermique et d'amélioration de la performance énergétique du bâti ou de développement de systèmes énergétiques mutualisés. Elle peut être celle d'un logement, d'un bâtiment, d'un

ensemble immobilier, bien que l'action publique puisse se faire à une échelle plus large (îlot, fragment urbain, quartier). Le choix de l'échelle dépend bien sûr de la disponibilité des données (niveau d'agrégation/désagrégation de ces données) et de la capacité du chercheur à estimer les données manquantes.

Le quartier, qu'il soit compris au sens historique ou administratif, est un espace hétérogène aux frontières définies – on peut donc parler de territoire -, mêlant différentes formes urbaines. Ces dernières sont la conséquence d'idéologies d'urbanisation qui ont eu cours au XX<sup>ème</sup> siècle. Un fragment urbain, dont la taille est une question d'appréciation, est une sous-entité d'un quartier. Il n'est pas entité en lui-même et peut mêler plusieurs formes urbaines. Une définition précise est de fait difficile à donner. Quelque soit le qualificatif de la zone urbaine étudiée, sa situation, sa composition et l'organisation de ses bâtiments sont trois de ses principales spécificités.

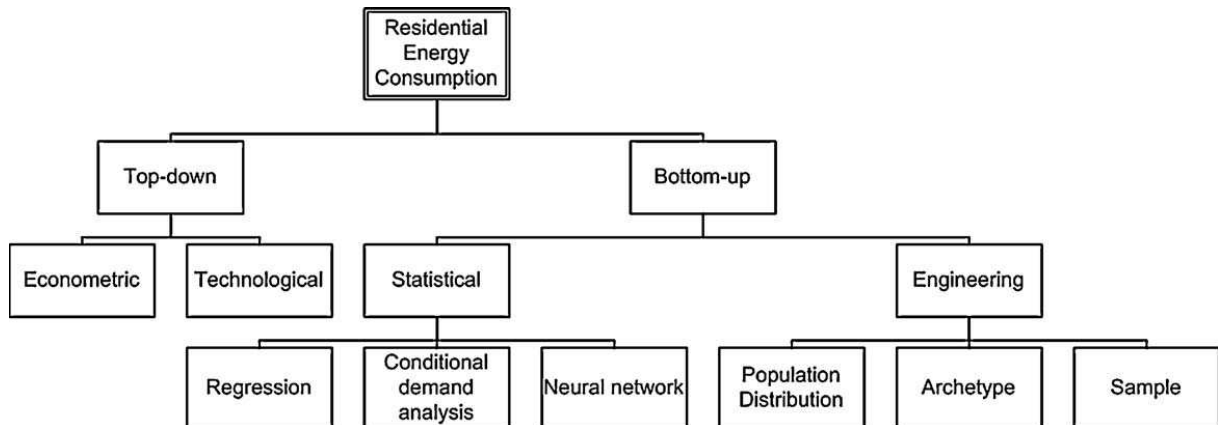
La question de l'échelle est primordiale dans le choix des paramètres de modélisation. En effet, certains paramètres peuvent avoir un effet sur la consommation énergétique des bâtiments à une certaine échelle et pas à d'autres. De fait, un va-et-vient continu entre l'échelle macroscopique et microscopique est nécessaire dans le processus de modélisation et de compréhension des phénomènes physiques en présence.

## 2) Stratégies de modélisation

A l'échelle urbaine (îlot, fragment urbain, quartier ou ville), deux stratégies de modélisation sont envisagées (Swan et Ugursal, 2008) :

- Une approche « de haut en bas » ou « descendante » (top-down) qui consisterait à relever la consommation énergétique globale de l'ensemble des bâtiments d'un quartier et à déterminer à partir de ratios (désagrégation) la part de l'énergie imputable aux différentes fonctions (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, etc.) ou à chaque bâtiment ou type de bâtiments. Les méthodes sont généralement économétriques et les variables mises en jeu se retrouvent être, à titre d'illustration, des indicateurs macroéconomiques (produit intérieur brut, indices des prix,...), les taux de constructions/démolitions et nombre d'unités dans le secteur résidentiel ou encore le taux de pénétration d'une technologie nouvelle. Les données nécessaires sont fréquemment utilisées sur le long terme (plusieurs années), d'où la difficulté à collecter des informations sur une même base de temps (heure, jour, mois,...) et sur une durée significative.
- Une approche « de bas en haut » ou « montante » (bottom-up) qui consisterait à agréger les besoins énergétiques pour les différents usages de l'ensemble des bâtiments voire installations qui composent le quartier. Sont différenciées les méthodes statistique et d'ingénierie. La première permet, d'après des informations historiques et grâce à une analyse par régression, l'attribution de consommations énergétiques à des usages particuliers puis, d'après un stock représentatif de bâtiments, l'estimation de la consommation énergétique globale. La seconde méthode – « approche thermodynamique » - est plus analytique, puisqu'elle utilise des données de puissance et d'utilisation des équipements, ainsi que des modèles de transferts de chaleur. Cette dernière approche est donc plus fine et précise, mais beaucoup plus chronophage. De façon générale, le temps de collecte important des données est la principale limite de cette approche.

Il existe donc pour chaque approche plusieurs groupes et sous-groupes de méthodes d'estimation de la consommation/demande énergétique, dont la structuration est rappelée par au schéma suivant :



**Figure 1 - Approches de modélisation de la consommation énergétique des bâtiments (Swan & Ugursal, 2008)**

Présentement, seule l'approche typologique (« archetype engineering method ») est prise en compte, ainsi que les modèles s'y rapportant. Comme évoqué précédemment, l'approche typologique renvoie à la classification de bâtiments en fonction de leurs caractéristiques principales ou spécifiques. Cette distribution doit conserver l'hétérogénéité des systèmes étudiés tout en étant efficace, à savoir tendre vers un minimum de classes. Chaque classe est définie par des paramètres particuliers qui deviennent données d'entrée de la modélisation. La différence entre les modèles se fait sur les bases de données utilisées et la façon d'établir des typologies de bâtiments ; les données disponibles déterminent les typologies de bâtiments (Bernal, 2007). Le bâtiment représentatif d'une typologie est simulé thermiquement en régime dynamique (STD : simulation thermique dynamique) et devient très précisément connu. La consommation d'énergie peut être estimée à l'échelle d'un territoire en multipliant la consommation énergétique du bâtiment représentatif d'une classe par le nombre de bâtiments de cette classe recensés sur le territoire étudié, et ce, pour chaque classe définie dans le modèle. Toutefois, les hypothèses de modélisation et de définition des classes typologiques (nombre, précision, disponibilité des données, influence des paramètres discriminants sur le modèle) sont à traiter avec rigueur (Kavgic et al., 2010).

Les indicateurs utilisés et utilisables en sortie de cette approche typologique sont multiples, de même que les objectifs qui concourent à utiliser cette approche. Il est évident que travailler sur la demande énergétique des foyers, leur consommation énergétique, les émissions CO<sub>2</sub>, les consommations de déchets ou d'eau ou encore la question de la précarité énergétique ne requiert pas la même modélisation ni les mêmes données. D'une façon générale, les modèles visent principalement à :

- estimer la consommation énergétique du secteur résidentiel et/ou tertiaire, désagrégées par type de bâtiments, catégories sociales ou encore usages énergétiques ;
- explorer et évaluer les effets techniques et économiques sur une période de temps de différentes stratégies de réduction des émissions de GES ou de la consommation/demande énergétique ;
- identifier les conséquences de stratégies de réduction des émissions sur la qualité des environnements intérieurs (Kavgic et al., 2010).

Ainsi, cette approche ne vise pas uniquement le domaine de l'énergétique mais peut être étendue à d'autres thématiques.

Cette approche semble suffisamment fine puisque les estimations s'avèrent souvent conformes à la réalité. Elle permet de prendre en compte physiquement de nouvelles technologies et peut permettre de travailler sur de nombreux indicateurs, environnementaux

ou non (Kohler et al., 1997). Dans le domaine énergétique, cette approche permet une séparation des consommations selon l'usage énergétique (Swan et Ugursal, 2008). Cependant, la segmentation du parc bâti étudié reste difficile à mener en raison d'une relative faiblesse de données et d'un affinage souvent nécessaire des différentes classes (Marchal, 2008). Malgré l'intérêt de créer des classes de bâtiments - afin de réduire le temps de simulation d'un ensemble de bâtiments - (Parker et al., 2005), il s'avère que ce type de modèle reste particulièrement chronophage et demandeur de compétences informatiques poussées. Un dernier reproche à cette approche est la non prise en compte de facteurs économiques qui, dans une étude prospective, sont nécessaires à l'évaluation de scénarii de mise en œuvre ou d'arrivée sur le marché de nouvelles technologies, telles que le solaire photovoltaïque ou thermique.

Contrairement à d'autres pays européens pour lesquels des bases de données sur les caractéristiques thermiques par défaut des bâtiments par année de construction existent (utilisées par exemple dans l'application SUNTool), il ne semble pas que ce soit le cas pour la France à l'heure actuelle. Pour autant le projet européen TABULA<sup>6</sup>, qui s'étend de juin 2009 à mai 2012, vise à créer une structure harmonisée de typologies de bâtiments ciblée sur la consommation énergétique. Chaque typologie nationale sera basée sur un jeu de bâtiments types dont les caractéristiques techniques impactant la performance énergétique seront classées a minima selon la période de construction et la taille du bâtiment. Pourront être rajoutés le cas échéant d'autres paramètres concernant les zones climatiques et informations diverses : rendements pour les systèmes de production et distribution d'énergie, solutions d'économies d'énergie, etc. Les résultats au niveau national pourront être utilisés pour du conseil en rénovation thermique du bâtiment ou en modélisation énergétique d'un parc patrimonial. Ce projet est porté par l'ADEME et l'Institut Wohnen und Umwelt (IWU) de Darmstadt (Allemagne). IWU a déjà créé les typologies de bâtiments pour l'Allemagne, typologies qu'ont utilisé T. Vey et M. Messerli les années précédentes. Au niveau français<sup>7</sup>, cette classification ne repose pour l'instant que sur le critère « année de construction » pour lequel les valeurs sont avant 1975 et après 1975. A partir de statistiques nationales désagrégées, des consommations unitaires par logement et par m<sup>2</sup> sont données. Les données statistiques françaises collectées dans le cadre du projet TABULA sont attendues pour 2011. Le projet français BATAN<sup>8</sup> - construction d'une typologie thermique du bâti ancien d'avant 1948, étude du comportement réel d'un panel de bâtiment restreint et création d'une méthode de calcul - devrait être terminé pour 2010.

Le modèle BETEL développé par Maïzia et Traisnel (ETHEL n°1 et 2, 2005) donne une idée de l'intérêt des typologies de bâtiments, en termes de consommations énergétiques des maisons individuelles (MI) et immeubles collectifs (IC) selon la période de construction, au niveau national :

---

<sup>6</sup> <http://www.building-typology.eu>

<sup>7</sup> [http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA\\_SR1.pdf](http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_SR1.pdf)

<sup>8</sup> [http://www.maisons-paysannes.org/images/stories/pdf/comportement\\_thermique\\_du\\_bati\\_ancien\\_ecobat\\_20\\_mars\\_2009\\_version\\_light.pdf](http://www.maisons-paysannes.org/images/stories/pdf/comportement_thermique_du_bati_ancien_ecobat_20_mars_2009_version_light.pdf)



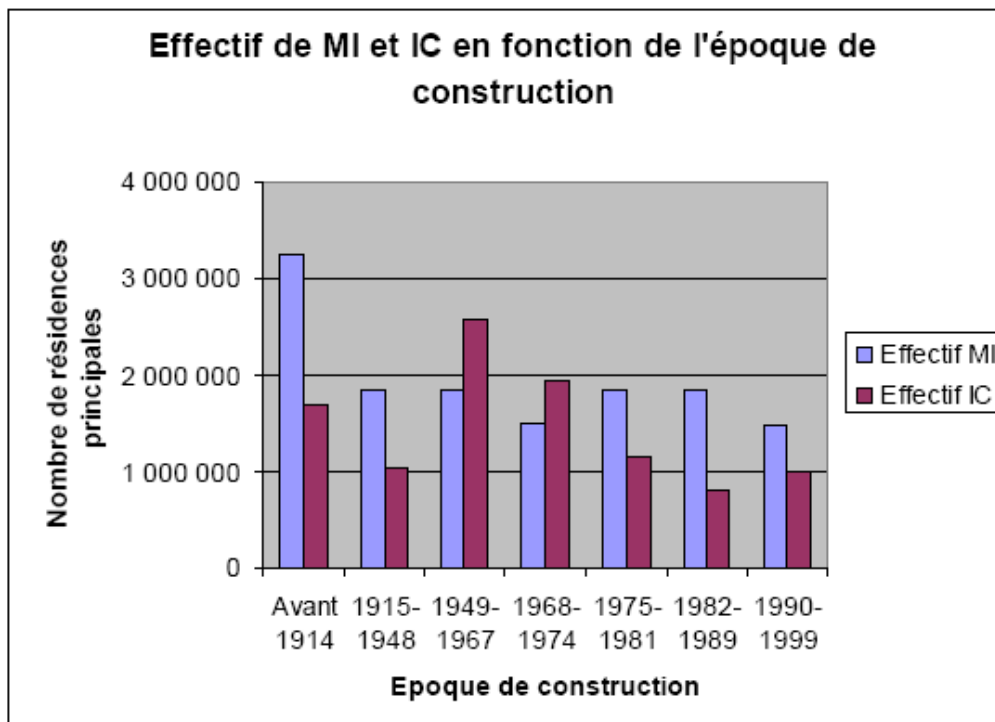


Figure 2 - Effectif des MI et IC selon la période de construction (source : ETHEL n°2, 2005)

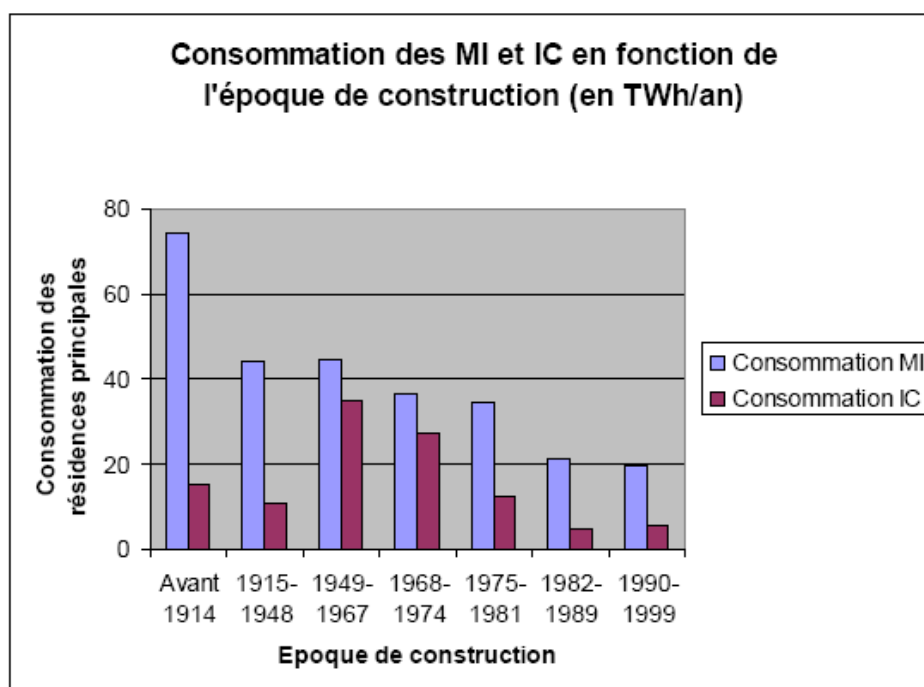


Figure 3 - Consommation des MI et IC selon la période de construction (source: ETHEL n°2, 2005)

### 3) Variété des modèles

Les différents modèles et outils recensés sont partiellement décrits selon 12 critères (étude sur le résidentiel et/ou tertiaire, objectif de modélisation et indicateur utilisé, nombre de paramètres déterminants, nombre de typologies définies, croisement de paramètres, analyse de sensibilité, utilisation de données issues de données officielles, extraction de

données par l'intermédiaire d'un système d'information géographique, reconstitution spatiale, détermination des autres valeurs utilisées, validation du modèle) dans le tableau ci-dessous (Swan et Ugursal, 2008 ; Kavgic et al., 2010), dont la liste n'est pas exhaustive.

Dans notre cas, quasiment tous ces modèles d'évaluation de la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier ont une approche fondée sur :

- l'exploitation de données officielles disponibles et/ou de relevés sur l'ensemble des bâtiments de l'aire géographique étudiée ;
- l'utilisation de méthodes à la fois physique (caractérisation thermique et microclimatique) et statistique (prise en compte du comportement des usagers)
- la discrétisation typologique (découpage d'une série statistique en classe) des échantillons de bâtiments et la détermination de classes plus ou moins nombreuses. Les bornes de chaque classe, sont dans la plupart des cas, explicités, le terme de « borne » faisant référence à des critères clairement définis ; les classes semblent homogènes et séparées. Le nombre de classes est quasi exclusivement déterminé par les bornes de chaque classe, qui sont elles mêmes définies selon des conditions physiques. Aucune méthode fréquente de découpage en classes (par quantiles, amplitude, grandes différences relatives, moyennes emboîtées) n'est mise en avant. Même si cela n'est pas spécifié, il s'agit dans ces modèles de conserver les ordres de grandeurs, la dispersion (maximiser l'hétérogénéité entre les classes et l'homogénéité à l'intérieur des classes) et de décider ou non de conserver les singularités (ce choix renvoie à la question d'analyse de sensibilité quand elle a lieu) ;
- l'application de ratios aux différentes classes, basés sur des consommations, des environnements bâtis et naturels, des usages, etc. ; la reconstitution de l'échantillon est réalisée en connaissant la répartition des fréquences de chaque type : le nombre de bâtiments/logements de chaque classe est connu à partir des bases de données utilisées. Les ratios
- l'utilisation quasi générale de paramètres primaires et secondaires (Firth et al., 2010). En effet, certains critères (âge, combustible utilisé,...) n'ont de sens que par rapport aux valeurs qu'ils représentent : une période de construction se caractérise par des matériaux de construction, une morphologie du bâtiment,... particuliers ; de même qu'un combustible de chauffage renvoie à un système au rendement, un niveau d'émissions d'équivalent CO<sub>2</sub>,...connus.

De façon générale, le succès d'un modèle d'évaluation de la consommation dépend de plusieurs facteurs. Peut être, l'un de plus importants fait référence aux données d'entrée et les sources de données. Il est évident que le défi pour chaque modèle a été mis sur la capacité à obtenir de manière rapide, simple et économique la plus grande quantité de données. Pour l'instant, aucun modèle ne propose de solution parfaite pour aboutir à cet objectif. En conséquence, les problèmes de transposition d'échelle, de précision des résultats, de collecte de données ou de coûts, persistent encore pour toutes les méthodes qui viennent d'être étudiées (Bernal, 2007).

<b>Modèle</b>	<b>Résidentiel / Tertiaire et donnée(s) de sortie</b>	<b>Noyau de calcul / méthode de calcul</b>	<b>Nombre de paramètres</b>	<b>Nombre de typologies / Echelle</b>	<b>Croisement de paramètres</b>	<b>Analyse de sensibilité</b>	<b>Données issues d'enquêtes officielles</b>	<b>Récupération données avec SIG</b>	<b>Reconstitution spatiale</b>	<b>Évaluation des autres paramètres</b>	<b>Validation du modèle/ Comparaison</b>
1 McGregor et al. (1993)	R (consommation énergétique mensuelle)	?	2 (3 niveaux d'isolation et 9 types de logements)	27	Oui (3*9)	Non	Non	Non	Non	Valeurs obtenues par Hourly Analysis Program	En accord avec valeurs régionales désagrégées
2 Huang & Boderick (LBNL, 2000)	R (conso. Chauffage/clim pour le stock national)	DOE 2.1	Plus de 2 (16 climats, 45 maisons pavillonnaires, ou 16 bâtiments collectifs)	?	Oui (climat+type)	Oui, partielle : évaluation des contributions mur, toit, fenêtres,...	Non	Non	Non	?	En accord avec données nationales par analyse de densité de population et normalisation
3 Jones et al. (2000) : Energy and Environment Prediction Model	R (consommation énergétique annuelle) domestique (mais aussi non domestique, industrielle, transport auto)	DEAP (procédure SAP)	Plus de 6 (surface au sol chauffée, surface de la façade, ratio vitrage/mur, surface exposée, âge (structure) et 20 formes bâties)	100 (du district à la ville)	Oui	Non	Oui (55000 enquêtes)	Oui	Oui, par affectation	Valeurs moyennes, tendances nationales	/
4 Atelier Parisien	R (émissions de CO2)	DPE	2 (âge, système de	9 (Ile de France)	Oui	Non	Oui (96000)	Non	Oui, par simple	Valeurs moyennes	Avec consommatio

d'Urbanisme (2007)			chauffage)						affectation		ns réelles ; écarts → usages
5 Maizia et al. (2006)	R (besoins énergétiques et gains solaires annuels)	Thermal Analysis Software	Plusieurs (propriétés thermiques, structurelles, organisation urbaine dont compacité)	18 blocs urbains (Ile de France)	Oui	Oui : % vitré, orientation / conditions climatiques, T°C sol	Oui (IAURIF)	Non	Non	Valeurs moyennes	Non
6 Methenier (2008) (cf. IWU)	R (consommations énergétiques annuelles)	/	2 (âge et organisation)	6 (Région allemande)	Oui	Non	/	Oui : analyse photo-aérienne	Oui	Non	A priori en accord avec données régionales
7 IWU (2007)	R (consommations énergétiques annuelles)	Valeurs de référence chauf+E CS pour chaque typologie	2 (âge et organisation)	50	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	?
8 Bourges & Lacarrière (2009)	R (consommation énergétique annuelle)	Méthode 3CL	8	2 types représentatifs de chaque bâtiment (3 bâtiments de logements collectif)	Non	Oui	Oui (approche patrimoniale)	Non	Non	/	Comparaison avec DPE
9 Shimoda	R		2 (type de	460	Oui	Non	Oui	Non	Non	Valeurs	En accord

et al. (2004)	(consommations énergétiques unitaires annuelles)		ménage, type de logement)	(23*20)						moyennes ou calculés	avec données officielles
10 Yamaguchi et al. (2007)	T (consommations énergétiques et évaluation de scénarii de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> )	?	4 (usages, système de chauffage, surface, zoning de l'espace)	Plusieurs millions de m <sup>2</sup> (en surface et non en nombre de bâtiments)	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Analyse de données spatialisées, valeurs par défaut	/
11 Ratti	R (consommations énergétiques annuelles)	LT	3 (profondeur de la rue, aspect du bâti, compacité urbaine)	?	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Valeurs moyennes	Etude avec Londres, Toulouse et Berlin ; comparaison avec données officielles
12 Musy et al. (2002)	R+T (différents critères environnementaux)	?	3 (type, âge, surface)	24 (2*3*4)	Oui	Non	Oui (enquêtes in situ informations fournies par EDF)	Oui	Oui	Valeurs moyennes	?
13 Wan & Yik	R (gains solaires annuels)	HTB2 et BECRES	4 (Disposition, orientation,	?	Non	Non	?	Non	Non	Logement référence de 40m <sup>2</sup>	Comparaison données historiques

			différents occupants et usages)							avec valeurs	
14 Schilling (1984)	R (consommations énergétiques annuelles)	?	2 (type d'îlot urbain + type de structure)	56	Oui	Non	Oui	Non	Non	?	A priori en accord avec données officielles
15 Johnston (2003)	R (consommations énergétiques annuelles et émissions)	BREDEM-9 + modèle DECADE	1 (avant/après 1996)	2	Oui	Non	Oui	Non	Non	Valeurs références	Limitée car échantillon trop restreint / Comparaison avec données empiriques
16 BREHOMES (1997)	R (demande énergétique annuelle)	BREDEM-12 + modèle DECADE	4 (forme bâtie, âge, tenue, propriété du système de chauffage)	>1000	Oui	Non	Oui	Non	Non	Valeurs références	Extensive
17 Gadsden (Solar Energy Planning)	R (consommations énergétiques annuelles)	BREDEM	2 (âge, type d'habitat)	54 (9*6) / bâtiment	Oui	Non	Oui (EHCS, données socio-économiques,...)	Oui	Oui	Valeurs références, SIG, données officielles	?
18 UK Carbon Domestic Model (2005)	R (consommations énergétiques mensuelles et émissions)	BREDEM-8 + modèle DECADE	6 (aire géographique, âge, type de construction, nombre	20000	Oui	Non	Oui	Non	Non	Valeurs références	Comparaison avec données régionales BERR

			d'étages, durée/teneur, surface plancher)								
19 DECarb (2007)	R (consommations énergétiques mensuelles)	BREDEM- 8 + modèle DECADE	8 (âge, type d'isolation, type de logement,...)	8064	Oui	Non	Oui	Non	Non	Valeurs références	Comparaison avec DUKES donnés par le BERR and les données du BRE Domestic Energy
20 Community Domestic Energy Model (2010)	R (consommations énergétiques mensuelles et émissions)	BREDEM- 8	2 (âge et forme bâtie)	47	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Valeurs références	Comparaison avec données agrégées du DEFRA (chauffage domestique) de 2001
21 Carlo et al. (2003)	T (consommations énergétiques annuelles)	DOE-2.1	3 paramètres mis en évidence, 12 typologies pour 695 bâtiments	512	Oui	Oui, qui détermine les 3 paramètres influents	Oui	Non	Non	Valeurs moyennes	?
22 Canadian Residential Energy End-use Model (CREEM)	R (demande énergétique annuelle)	HOT200 Batch v.7-14	4 (type, combustibles de chauffage, type, localisation)	8767	Oui	Non	Oui	Non	Non	?	Validation avec 3248 factures énergétiques de 2811 logements

(1998)											
23 North Karelia, Finland (1999)	R+T (demande annuelle et émissions + coûts relatifs / 1996)	/	?	4163	Oui	Non	Oui	Non	Non	?	Comparaison avec données nationales de SENER
24 Hens et al. (2001)	R (consommations énergétiques annuelles et émissions)	VerbCO2 M	5 (âge, type, surface, énergie primaire, présence système central de chauffage)	960 (jusqu'en 1990)	?	Non	Oui	Non	Non	?	Comparaison avec analyse top-down pour la région Wallonne
25 Energies Demain	R (consommations énergétique annuelles et évaluation de scénari de réduction des émissions de GES)	?	Nombre de paramètres du RGP 1999	Logements d'une zone administrative	Possible	Non	Oui	Non	Oui	Calculées par probabilité et données officielles	Comparaison avec données de terrain ADEME
26 Heiple & Sailor (2008)	R+T (demande énergétique)	DOE-2.1	Création de prototypes selon 3 paramètres (intensité de consommation, modes de consommation)	Logements d'une ville (étude de cas : Houston, US)	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	?	Comparaison avec données nationales désagrégées



			n, ratio gaz/électricité)								
27 Marchal (2008)	R (consommation énergétique) (référence DPE)	EQTOR II	5 paramètres (type de logement, type de combustible, nombre d'étages, zone climatique, date de construction)	Parc français segmenté en 156 classes, représentant 31,5 millions de logements	Oui	Oui sur un seul paramètre	Oui	Non	Non	Moyenne	Sans

**Tableau 2- Tableau récapitulatif des modèles recensés utilisant l'approche typologique et caractérisés selon 12 critères**

#### 4) Analyse de sensibilité : définition, intérêts, méthodes

La présente sous-partie ne vise pas à expliquer l'analyse de sensibilité d'un point de vue pratique et opérationnel étant donné que ces analyses seront menées dans le cadre d'autres stages. Néanmoins, l'utilisation par la suite de résultats de ces dernières nécessite de connaître la définition d'une analyse de sensibilité, ses objectifs et moyens, ainsi que les résultats attendus.

Les modèles développés visent quels qu'ils soient à approximer des phénomènes physiques, mathématiques, d'ingénierie,... plus ou moins complexes. Le développement de ces modèles nécessite plusieurs étapes ; l'une d'entre elles est la détermination des paramètres d'entrée les plus influents sur le résultat en sortie. Le paramètre d'entrée (ou entrée, variable, etc.) est une information que le modèle prend en compte et qui va donc permettre la simulation. Le résultat de sortie correspond simplement à l'information obtenue après simulation.

Une différenciation doit cependant s'opérer entre deux analyses proches mais distinctes : l'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité. L'analyse d'incertitude vise à découvrir la possible variation d'une sortie selon l'incertitude sur la valeur d'un paramètre d'entrée. L'analyse de sensibilité consiste quant à elle à mettre en évidence :

- quels paramètres d'entrée contribuent le plus à la variabilité du résultat et nécessitent le plus de précision afin de réduire l'incertitude de sortie ;
- quels paramètres d'entrée sont insignifiants vis-à-vis du résultat de sortie et peuvent être supprimés du modèle ;
- si un certain nombre de paramètres (et lesquels) interagissent ;
- quels sont les valeurs optimales de paramètres d'entrée ;
- si tous les effets observés peuvent être physiquement expliqués, bien qu'une erreur puisse être présente dans le modèle (Chan, Saltelli & Tarantola, 1997).

Il s'agit donc bien d'une analyse à la fois qualitative et quantitative.

Il a déjà été précisé que les analyses de sensibilité sur les paramètres d'entrée seront menées plus précisément dans le cas de deux autres stages. Nous nous intéressons dans cette étude aux deux premiers objectifs qui sont intimement liés. En effet, si les paramètres les plus influents sur le résultat final sont déterminés, alors les autres paramètres d'entrée, jugés insignifiants relativement aux précédents, peuvent être exclus du modèle. De nombreuses méthodes peuvent permettre de répondre à ces objectifs, bien que les résultats puissent varier.

Des méthodes telles que « la mesure de l'importance » (Homma & Saltelli, 1996) celle des « ratios de corrélation » (McKay, 1996) visent à estimer la contribution de chaque paramètre sur la sortie du modèle. Ces méthodes – appelées méthodes de sensibilité locale – sont fondées sur l'hypothèse d'une relation linéaire entre la sortie et l'entrée et ne prennent pas en considération la corrélation de paramètres d'entrée (Heiselberg et al., 2009). Toutefois, déterminer l'influence d'un paramètre revient aussi à connaître l'influence et l'interaction de tous les paramètres. La méthode « Fourier Amplitude Sensitivity Test » (Saltelli, Tarantola & Chan, 1999) ou la méthode de Sobol (1993) - méthodes de sensibilité globale - permettent de déterminer à la fois l'influence de chaque paramètre d'entrée pris séparément sur le résultat, mais aussi l'influence de ce paramètre en interaction avec un ou plusieurs des autres paramètres d'entrée, pour aboutir à l'« index de sensibilité totale » TSI.

Bien que globalement peu nombreuses, les analyses de sensibilité menées parmi les 26 modèles décrits (Tableau 2) suivent la première démarche, à savoir celle évaluant de façon indépendante l'influence des paramètres d'entrée sur le résultat final. Il ne semble pas que l'influence d'un paramètre en interaction avec un ou plusieurs autres variables soit posée, mise à part l'étude d'(Heiselberg, 2008), qui reprend la méthode de Morris. Cette remarque

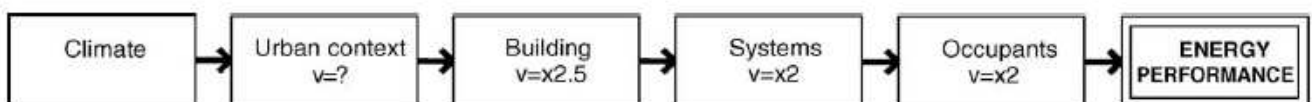
est à opposer aux différents articles de Saltelli dans lesquels la problématique de l'interaction de paramètres reste fondamentale.

Il est à noter que le modèle de (Firth et al., 2010) est un des seuls à prendre en compte la question de l'incertitude des données d'entrée sur le modèle en sortie, sur la question des émissions de CO<sub>2</sub>. L'auteur en arrive à la conclusion que la relation entre les incertitudes sur les paramètres d'entrée et l'incertitude sur la sortie (les émissions de CO<sub>2</sub>) est linéaire : ainsi, la somme des incertitudes sur les variables d'entrée correspond à l'incertitude sur les émissions de CO<sub>2</sub> des bâtiments étudiés.

## 5) Influence des différents paramètres sur la consommation énergétique des bâtiments

La tâche présente est d'explicitier les paramètres influençant la consommation énergétique des bâtiments (principale sortie étudiée, qu'elle soit finale ou primaire), à partir des analyses qui ont pu être menées dans différents travaux cités précédemment. En effet, pour simplifier au maximum nos modèles tout en gardant un niveau de précision - à définir par l'utilisateur - satisfaisant, il s'agit de comprendre l'influence qualitative et quantitative sur le résultat en sortie de chaque paramètre utilisé, et, si possible, l'influence de ce paramètre lorsqu'il est en présence d'autres variables particulières. Nous cherchons à faire ressortir des paramètres sensibles – paramètres qui jouent un rôle significatif sur le comportement énergétique d'une maison – et incertains – paramètres dont il est difficile de connaître la valeur précise -. Chaque variable peut influencer la consommation énergétique des bâtiments de façon positive (augmentation de la consommation) ou négative (diminution).

Le schéma suivant (Ratti, Baker & Steemers, 2005) résume l'influence de classes de paramètres que sont les systèmes utilisés, les caractéristiques de l'enveloppe, liés aux usages, etc.



**Figure 4 - Facteurs qui influencent la consommation énergétique des bâtiments (Ratti, Baker & Steemers, 2005).**

D'après les auteurs, les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe d'un bâtiment peuvent entraîner une variation de coefficient 2,5 sur sa consommation énergétique, les systèmes et le comportement des usagers une variation de coefficient 2 chacun. L'influence de la forme urbaine et de l'environnement urbain du bâtiment ne sont quant à eux pas encore déterminés. Néanmoins, ayant empiriquement calculé des consommations énergétiques de bâtiments similaires variant de 1 à 20, le coefficient d'influence du contexte urbain est affecté d'une valeur de 2.

Les variables jugées sensibles ou incertains qui ont été retrouvés dans différents articles sont les suivants :

- Usages et systèmes technologiques de l'habitat
  - Consigne de température
  - Nombre d'occupants
  - Puissance dissipée par les occupants et les équipements
  - Type de distribution du système de chauffage

- Rendement du brûleur
- Flux d'air par ventilation mécanique
- Forme urbaine et microclimat urbain
  - Données météorologiques (précipitations, rayonnement,...)
  - Latitude du site
  - Température extérieure
  - Organisation urbaine (isolé, en bande, semi-isolé, en extrémité)
- Enveloppe du bâtiment
  - Coefficient U du mur, des fenêtres, du plancher, du plafond et de la porte
  - Coefficient U des fenêtres
  - Albedo
  - Taux d'infiltration
  - Epaisseur d'isolant
  - Facteur de transmission du vitrage
  - Coefficients d'échanges convectifs
- Géométrie du bâtiment
  - Surface habitable du bâtiment
  - Surface vitrée, de mur
  - Nombre d'étages du bâtiment
  - Hauteur moyenne d'un étage

Cette liste n'est en rien exhaustive, elle donne simplement un aperçu de la variété des paramètres étudiés. Une typologie de bâtiments, comme déjà précisé, peut en principe être fondée sur n'importe lequel de ces paramètres. Des paramètres socio-économiques pourraient fonder les typologies, ou du moins les préciser, au regard de certaines données statistiques : par exemple, la rénovation thermique des logements a plus affecté ceux des propriétaires occupants que des propriétaires bailleurs, ainsi que les catégories socioprofessionnelles plus aisées (Marchal, 2008).

Les hypothèses faites dans ces modèles influent évidemment sur les résultats de sortie. A titre d'illustration, le modèle DEAP de (Jones et al., 2001) ne prend en compte que des chaudières gaz standard avec un rendement fixé ; de fait ne peut être calculée que la consommation d'énergie fossile. La consommation électrique est affectée à l'éclairage et au fonctionnement d'appareils électroménagers, sur la base de chiffres nationaux.

Le type de système de chauffage, ainsi que les pertes thermiques (dus à des techniques et des matériaux, de construction particuliers) sont déterminants pour la demande en chaleur du bâtiment (Firth et al., 2010). En effet, concernant le type de chauffage, « *les typologies de logements et d'équipements de chauffage se traduisent également par une grande variabilité des consommations : pour les logements construits de 1968 à 1974, la surconsommation due à l'équipement collectif de chauffage peut atteindre 10 ou 15%, par rapport à un chauffage central individuel, et 50 à 60% dans le cas d'un réseau de chaleur urbain. Cette valeur approche 75% dans le cas du chauffage urbain appliqué à la maison individuelle* » (ETHEL n°2, 2005). Les coefficients d'échanges convectifs (Brun et al., 2009 ; Lomas et al., 2000 ; Bozonnet, 2005), la conductivité thermique de l'isolant (McGregor et al., 2003 ; Natarajan, Levermore, 2007), le flux d'air par ventilation mécanique en hiver en journée (Heiselberg et al., 2009), la forme bâtie (Jones et al., 2004), la surface chauffée et surtout la consigne de température (Firth et al., 2010 ; Shimoda et al., 2004 ; Yamaguchi et al., 2007) semblent être les facteurs les plus significatifs dans la consommation énergétique des bâtiments. Un indicateur intéressant d'après (Schilling, 1984) se retrouve être le coefficient de forme (surface extérieure/volume du bâtiment, en  $m^2/m^3$ ), à l'échelle de l'îlot.

Par opposition, d'autres paramètres restent globalement insignifiants tels le nombre d'occupants (contrairement à la surface du logement), le coefficient de transmission thermique du plafond, des portes (Firth et al., 2010) ou encore la capacité calorifique ou la transmissivité du vitrage (Heiselberg et al., 2008).

On remarque quelques contradictions dans toutes ces analyses puisqu'il avait été démontré par (Schilling, 1984) que le comportement des occupants et l'installation de chauffage ne semblent pas être déterminants pour estimer la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle de la forme urbaine fragment urbain ou îlot). Cet aspect soulève une fois de plus la question du changement d'échelle : il est envisageable que certains paramètres soient importants à une échelle mais deviennent insignifiants à une autre. Les stages de I. McCall et C. Marguerite à l'École des Mines de Nantes visent à apporter des éléments de réponse à cette question.

Enfin, d'autres paramètres restent difficiles à évaluer, notamment du fait de l'interaction avec d'autres paramètres, tels que l'influence de l'environnement urbain (Maizia et al., 2006 ; Ratti, Baker & Steemers, 2005).

On notera que certaines variables sont peu étudiées par manque d'accès aux données, de même que certains phénomènes physiques restent peu questionnés, à l'instar de l'influence de l'environnement du bâtiment, qui reste difficilement modélisable. D'ailleurs, les limitations de données semblent peu étudiées quant à leur impact sur les méthodologies et leur implication dans la comparaison d'estimations (Kavgic et al., 2010).

A partir des résultats d'analyse de sensibilité, des lois de reconstitution peuvent être théoriquement obtenues (Lacarrière et Bourges, 2009 ; Caldera et al., 2008). En effet : à partir de  $n$  paramètres d'entrée ( $n$  entier non nul),  $k$  ( $k \leq n$ ) sont retenus comme étant les plus significatifs sur la consommation énergétique. A partir de ces  $k$  paramètres,  $i$  ( $i \leq k$ ) forment  $T_j$  typologies (selon le croisement ou non des paramètres  $i$ ) car ils sont considérés comme discriminants et disponibles pour étudier les bâtiments du cas d'étude. Dans certains cas, les paramètres restants ( $k-i$ ) peuvent servir, sous forme de singularités, à préciser le modèle (Marchal, 2008). A partir du bâtiment représentatif de chacune des typologies  $BR(T_j)$ , des lois de reconstitution peuvent permettre, par régressions, de déterminer des relations entre  $BR(T_j)$  et les autres bâtiments de la typologie.

## **6) Les systèmes d'informations géographiques dans l'analyse énergétique à l'échelle urbaine et le processus d'affectation géographique**

Un système d'information géographique (SIG) est d'abord, et avant tout, un système d'information, et non un simple système de cartographie automatique. Sa caractéristique principale réside dans sa capacité à intégrer, gérer et analyser les données spatiales, et les données qualitatives ou quantitatives correspondantes, pour fournir des informations synthétiques sur un territoire.

Il stocke les informations (données graphiques raster, données graphiques vectorielles et données alphanumériques) en une série de couches thématiques qui peuvent être comparées et analysées conjointement, voire combinées en une nouvelle couche représentative d'une problématique particulière. Il permet une vision globale des territoires en proposant, par la mise en œuvre d'outils qui associent cartes et chiffres, de lier les plusieurs domaines, de les enrichir, de les synthétiser.

Un système d'information géographique est par conséquent l'addition d'un logiciel, de matériel, de données, des compétences d'un utilisateur ainsi que d'une méthode. Un système d'information géographique ne se limite donc pas au choix d'un logiciel et de données.

La spatialisation ajoute de nouvelles contraintes à la seule analyse statistique. Le territoire pose en lui-même un problème aux statistiques et à la cartographie du fait des effets de contour, de bordure et de définition.

Assez peu de modèles parmi ceux étudiés prennent en compte la dimension spatiale. De plus, ceux qui intègrent cette composante spatiale possèdent généralement des bases de données qui sont spatialisées : lors de la création de bases de données de logements, les logements étudiés sont référencés. Cet aspect est de nouveau pris en compte lors de la modélisation puis simulation, où chaque logement est localisé lors d'audits et relevés de terrain (Jones et al., 2007 ; Atelier parisien d'urbanisme, 2007), à la différence de l'utilisation du SIG pour la détermination de données géométriques : hauteur, nombre d'étages, surface, volume, proximité entre bâtiments, etc. (Heiple et al., 2007 ; Musy et al., 2004).

Pour autant, tous ces modèles utilisent la plateforme SIG pour calculer des caractéristiques géométriques, comme la surface au sol, le volume (si information sur la hauteur  $z$ ), les dimensions ou encore la surface exposée au rayonnement solaire.

La question de l'affectation reprend la question de l'échelle d'analyse. En effet, selon que l'on travaille sur le développement de systèmes de production énergétique collectifs ou bien sur un diagnostic de réseaux (gaz, électricité, eau, chaleur), il est envisageable que l'affectation des consommations énergétiques se situe à l'échelle de l'îlot par exemple, et peut donc concerner une quarantaine de bâtiments. Un projet de rénovation thermique ou bien de sensibilisation d'une population pourra prendre en compte un nombre plus restreint de bâtiments nécessitera, d'où un affinage du processus d'affectation. L'affectation pose un certain nombre de difficultés, notamment d'échelle de temps. Le processus de construction/destruction de bâtiments étant continu, une des difficultés réside dans la collecte de données d'une même période, ou en tout cas, de périodes proches.

## II/ Problématique, méthodologie et données

### 1) Problématisation et hypothèses

A partir de cet état de l'art et du cadre de recherche fixé, la problématique apparaît donc : quelle méthodologie de modélisation de la consommation énergétique des bâtiments d'un quartier avec reconstitution spatiale suivre ? Cette problématique peut se diviser aisément en plusieurs sous-questions intermédiaires :

- Au regard des avantages de l'approche par typologies de bâtiments, avec une vision opérationnelle, comment simplifier un modèle de détermination de la consommation énergétique des bâtiments ?
- Quels sont les paramètres influant sur la consommation énergétique résidentielle à l'échelle du quartier ?
- En proposant une modélisation fondée uniquement sur quelques paramètres, quelle précision obtient-on par classe de bâtiment, et globalement ?
- Les paramètres d'entrée retenus sont-ils suffisants pour la modélisation de chaque classe ? Des éléments correcteurs (facteurs socio-économiques ou physiques), ponctuels ou non, seraient-ils nécessaires ? Les données nécessaires sont-elles disponibles et si oui, à quelle échelle ?
- Du fait de l'intérêt particulier porté à la méthodologie d'établissement d'un cadastre énergétique des bâtiments résidentiels, quels sont les points critiques qui apparaissent tant en termes de collecte de données que d'analyse statistique, spatiale ou de reconstitution ?
- Quels outils sont nécessaires à la détermination de lois de reconstitution de l'échantillon et quelles difficultés apparaissent lors de cette étape ? Comment intégrer les potentialités des SIG à cette thématique ?

Le présent rapport tentera donc de répondre aussi précisément que possible à toutes les questions posées.

Diverses hypothèses générales ont été posées.

- Tout d'abord, on suppose que le bâti résidentiel peut facilement être isolé du bâti tourné vers d'autres usages (commerces, services,...) et que des indicateurs de consommation énergétique résidentielle peuvent être calculé indépendamment des autres usages.
- Comme déjà expliqué, on admet qu'un nombre de typologies restreint (que l'on peut analyser par simulation thermique dynamique puis reconstituer) suffit à décrire la diversité du bâti d'un quartier.
- La consommation énergétique d'un bâtiment/logement peut idéalement être déterminée en deux temps : d'abord par une analyse liée à la définition de classes

typologiques puis ensuite par l'application de facteurs correctifs personnalisés si nécessaire, tel des ratios de rénovation thermique.

Les hypothèses particulières seront explicitées au fur et à mesure du développement du projet.

## 2) Méthodologie

Pour mener à bien le projet, il s'avère nécessaire de déterminer une méthode, sorte de feuille de route, à suivre. La méthode suivie lors du présent projet est explicitée par la figure de la page suivante.

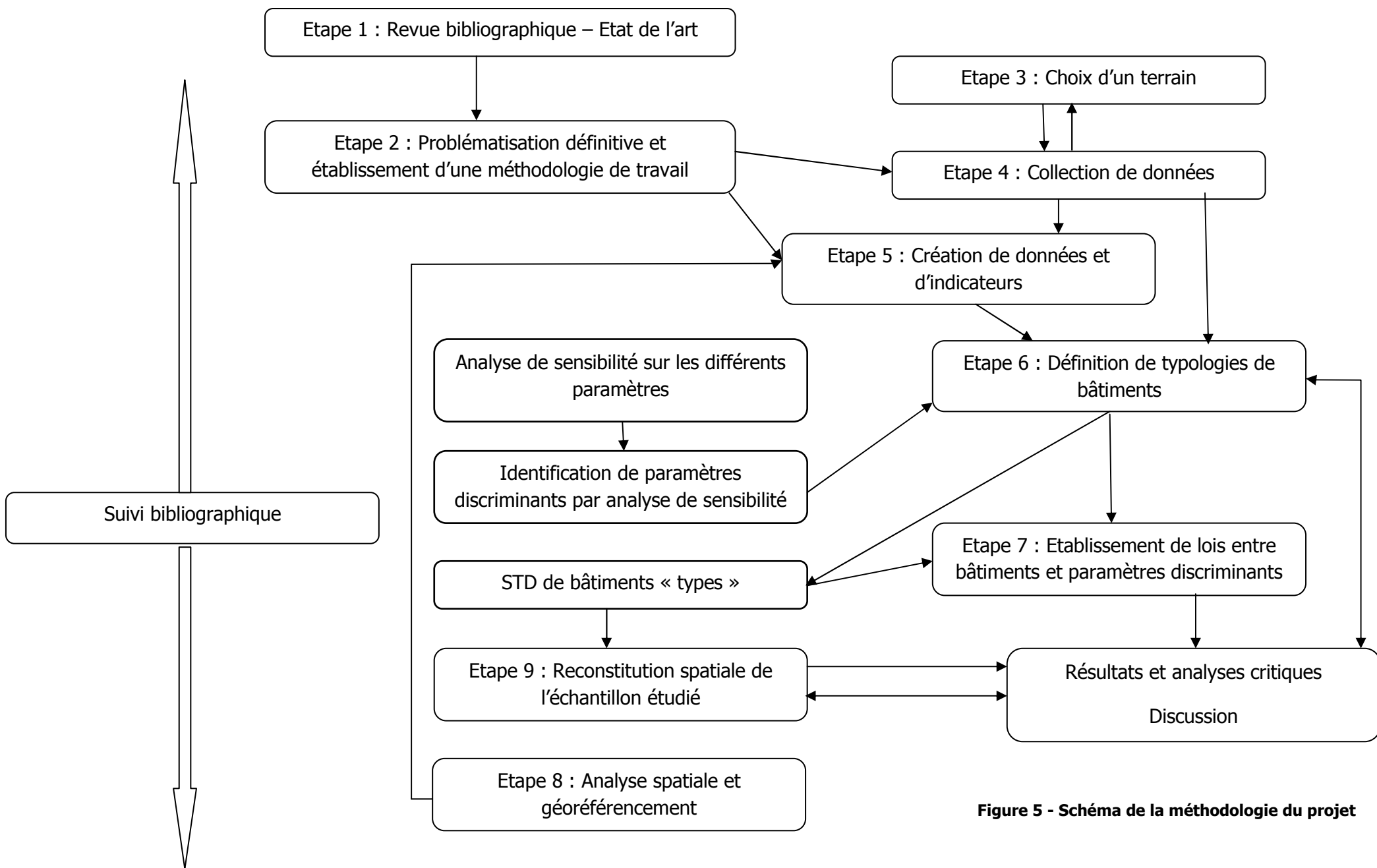
Cette méthodologie est présentée ici dans sa version finale, il est clair qu'elle aura été modifiée à plusieurs reprises au regard de l'avancement de ce projet et des autres stages qui contribuent à la réalisation des objectifs fixés. Les étapes 4, 5 et 8 (et le suivi bibliographique partiellement ont été abordées à l'IRSTV), durant les mois passés à l'Ecole Centrale de Nantes. Toutes les autres étapes ont été menées à l'EMN.

Les bulles bleues en pointillé représentent les étapes initialement prévues dans le cadre de deux autres projets de stage et d'un projet de doctorat. La numérotation des étapes ne reflètent pas l'ordre chronologique de réalisation de celles-ci. En effet, ce projet de recherche aura été mené sous forme d'allers-retours incessants entre les différentes étapes, visant à préciser les résultats, critiques et analyses intermédiaires.

Une description brève est nécessaire :

- A partir du contexte de recherche et de l'état de l'art (étape 1), une problématique et une méthodologie (plusieurs fois remaniée) ont été définies (étape 2).
- Dès lors, la recherche de données disponibles et peu onéreuses a permis de définir un territoire d'étude, dans la ville de Nantes (étapes 3 et 4).
- Par une analyse statistique et spatiale (étape 8), des indicateurs ont pu être créés à partir des données initiales (étape 5).
- A partir de paramètres jugés discriminants par analyses de sensibilité et selon les données disponibles, les classes typologiques de bâtiments ont été définies puis précisées (étape 6).
- Des simulations thermiques dynamiques de bâtiments pour différentes classes typologiques ont complété les analyses de sensibilité et précisé les typologies et lois statistiques de reconstitution de l'échantillon étudié (étape 7).
- A partir de ces lois et du travail de localisation des bâtiments (étape 8), l'objectif ultime s'avère être la reconstitution spatiale des consommations énergétiques des logements et bâtiments à l'échelle du territoire étudié (étape 9).
- Enfin, une phase d'analyse critique des résultats et de discussion conclura ce projet de recherche.
- Le suivi bibliographique a été mené tout au long du stage afin d'affiner la recherche l'intérêt des hypothèses faites à chaque étape ainsi que vérifier la cohérence du travail réalisé.





**Figure 5 - Schéma de la méthodologie du projet**

### 3) Données et outils

Diverses bases de données (BD) ont été utilisées lors de ce stage. Ces BD sont les suivantes :

- Fichier « détail logements » de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), issu du Recensement Général de Population 1999<sup>9</sup> : le fichier « détail logements » décrit chaque logement selon une vingtaine de critères. Toutes les questions du recensement relatives aux logements (et aux immeubles) sont codifiées et présentes dans ce fichier. Chaque logement est décrit selon les critères suivants : la catégorie (résidence principale, secondaire, logement occasionnel, vacant), le type (individuel ou collectif), les caractéristiques (taille, année d'achèvement...), le confort (installations sanitaires), les services (gardien, garage, box-parking), le mode de chauffage, le statut d'occupation (propriétaire, locataire...). Cette BD a été obtenue auprès du Réseau Quetelet, « réseau français des centres de données pour les sciences sociales ».
- BD TOPO® de l'Institut Géographique National (IGN) : cette composante topographique du Référentiel géographique à Grande Echelle (RGE®) de précision métrique, est la modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures. La BD TOPO® contient une description vectorielle 3D (structurée en objets) des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique, exploitable à des échelles allant du 1 : 5 000 au 1 : 50 000. Elle est fournie en projection Lambert 93. Elle permet de couvrir de manière cohérente l'ensemble des entités géographiques et administratives du territoire national. La BD TOPO® sert de référence pour la localisation de l'information thématique relative aux problématiques d'aménagement, d'environnement ou d'urbanisme. Elle est le socle nécessaire au fonctionnement des systèmes d'information des collectivités locales de la commune à la région. Elle est aussi un élément indispensable à la conception, au fonctionnement et à l'évaluation de nombreux services pour ces collectivités. Les objets de la BDTOPPO® sont structurés en thèmes, dont notamment le réseau routier, les bâtiments (le processus de production 3D permet notamment de connaître la hauteur des bâtiments), la structure administrative et la végétation arborée<sup>10</sup>. La BD TOPO® de l'IGN a été obtenue par l'intermédiaire de l'IRSTV.
- BD PARCELLAIRE® de l'IGN : cette composante parcellaire du Référentiel géographique à Grande Echelle (RGE®) de précision métrique, contient les données cadastrales, qui elles-mêmes proviennent du plan cadastral informatisé en mode vecteur (PCI Vecteur) ou du plan cadastral informatisé par scannage (PCI Image). La BD PARCELLAIRE® ne se substitue pas au plan cadastral. C'est un assemblage du plan cadastral dématérialisé, sur tout le territoire national couvert par le cadastre. La BD PARCELLAIRE® est superposable aux autres composantes du RGE®. Elle est fournie en projection Lambert 93. Le produit est constitué d'objets géographiques simples ponctuels et surfaciques : bâtiment, parcelle, localisant parcellaire, division cadastrale, commune, arrondissement municipal<sup>11</sup>. La BD TOPO® de l'IGN a été obtenue par l'intermédiaire de l'IRSTV.

<sup>9</sup> RGP : recensement général de population. Le recensement est une « photographie régulière des territoires [...] permettant de connaître la population résidant en France. Il fournit des statistiques finement localisées sur le nombre d'habitants et sur leurs caractéristiques, [...] ainsi que sur les logements » (INSEE)

<sup>10</sup> Descriptif du contenu BD TOPO® version 2, IGN, décembre 2009

<sup>11</sup> Descriptif du contenu BD PARCELLAIRE® version 1.1, IGN, décembre 2009

De plus, le rapport pour le compte du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM) de Pascale GRAULIERE (2007), historienne de l'architecture, intitulé « Typologies des bâtiments d'habitation existants en France – Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique » a été déterminant pour ce travail.

Enfin, les rapports de l'Agence Nationale de l'Habitat (ANAH) et de l'Observatoire de l'Habitat Existant (OHE), même si indirectement exploités, méritent d'être mentionnés ici.

Les outils utilisés principalement lors de ce stage sont les logiciels décrits ci-après :

- Minitab, logiciel propriétaire développé par la Pennsylvania State University, comprend un certain nombre de packages d'analyse statistique de données. Minitab a donc été utilisé pour l'analyse des caractéristiques des 142 445 logements de Nantes, fournies par la BD fichier détail logements de l'INSEE.
- OrbisGIS, logiciel libre développé par l'IRSTV, est un SIG dédié à la modélisation et la simulation scientifique. Cette plateforme se décompose en trois axes: technique d'acquisition de données (télédétection, modélisation et simulation, enquête sur site, ...), traitement et représentation des données spatiales (stockage, modélisation, simulation multi-échelle 3D+t) et partage de données géographiques<sup>12</sup>. La BD TOPO® et la BD PARCELLAIRE® ont été analysées par l'intermédiaire d'OrbisGIS.
- Pleiades+COMFIE, logiciel propriétaire développé par l'École des Mines de Paris et GEFOSAT avec le concours de l'Ademe et du programme Altener, est un logiciel de calcul par simulation dynamique des échanges thermiques multi-zones dans les bâtiments. Il est composé de plusieurs modules : COMFIE est le noyau de calcul (« boîte noire »), Pleiades est l'interface de saisie des bibliothèques, de gestion du bâtiment, de calcul et d'analyse de résultats et Alcyone est l'interface de saisie et d'affichage du bâtiment.

L'obtention du fichier FILOCOM<sup>13</sup> (fichier du logement communal, « base de données sur les logements et leur occupation ») permettrait de résoudre plus facilement la problématique du stage. Basée sur la taxe d'habitation (qui est perçue à l'échelle communale), cette BD donne beaucoup d'informations sur les logements d'une commune, selon des paramètres proches de ceux de la BD INSEE pour ce qui nous intéresse. De plus, chaque fichier est référencé selon le classement cadastral, ce qui permet de localiser le logement spatialement. L'analyse spatiale n'aurait donc pas besoin d'être menée. Toutefois, basé sur des déclarations fiscales, la diffusion de cette BD demeure réduite en raison de la confidentialité des données (Neu, 2008).

Il est à noter que l'obtention de ces BD a été particulièrement longue et difficile dans le temps imparti de six mois et a ainsi impacté le planning du stage de façon notable.

---

<sup>12</sup> [www.orbisgis.org](http://www.orbisgis.org)

<sup>13</sup> [http://www.observation-urbaine.certu.equipement.gouv.fr/article.php3?id\\_article=241](http://www.observation-urbaine.certu.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=241)

## III/ Analyse spatiale

### 1) Collecte des données, indicateurs statistiques et identification du terrain d'étude

L'objectif de ces étapes 3 et 4 est la recherche de connexions entre la BD topographique et la BD parcellaire de l'IGN, le fichier détail logements issu du RGP 1999 de l'INSEE ainsi que le rapport de P. Graulière.

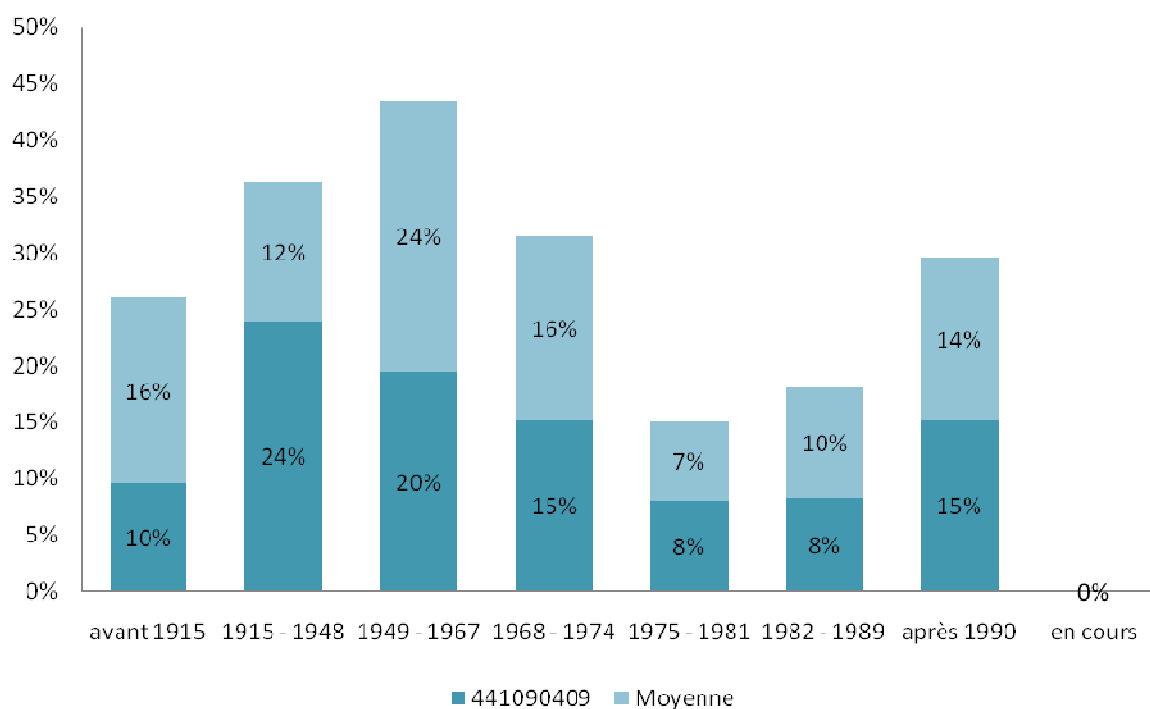
Le critère chronologique utilisé dans ce dernier est divisé en intervalles : avant 1914, de 1915 à 1948, de 1949 à 1967, de 1968 à 1974, de 1975 à 1981, de 1982 à 1989 et après 1990, quasi identiques à ceux de l'INSEE ; il y a donc correspondance entre le critère chronologique du rapport de synthèse sur les bâtiments d'habitat existants en France et la variable « période de construction » d'un logement du fichier détail logement issu du RGP 1999. Chaque limite d'intervalle marque une nouveauté en termes de matériaux, de techniques de construction, de morphologie urbaine ou encore de réglementation thermique (la première réglementation thermique date de 1974, puis viendront celles de 1988 et 2000). Il est donc envisageable pour chaque période de connaître les matériaux et les caractéristiques de construction (épaisseur des murs, isolation, rénovation, ratios, nombre de niveaux, couverture, mitoyenneté...) et d'en déduire des propriétés physico-thermiques. Ces périodes seront par la suite réduites au nombre de 5 (voir page 52 et suivantes).

Plutôt que de rester dans un cadre uniquement théorique, il a été décidé d'appliquer directement la méthodologie développée parallèlement, sur un terrain d'étude. Le choix de travailler à l'échelle de l'IRIS<sup>14</sup> a été décidé pour différentes raisons :

- les données sont disponibles à cette échelle ;
- la taille de l'aire statistique permet d'avoir une large diversité de bâtiments ;
- la taille de l'IRIS reste analysable tant d'un point de vue statistique (BD INSEE) que spatial (BD IGN)

---

<sup>14</sup> IRIS : îlots regroupés pour des indicateurs statistiques. Composés de 1800 à 5000 habitants pour les IRIS d'habitat, ceux-ci « constituent la brique de base en matière de diffusion de données infra-communales. Un IRIS doit respecter des critères géographiques et démographiques et avoir des contours identifiables sans ambiguïté et stables dans le temps » (INSEE)



**Figure 6 - Comparaison de la proportion de logement selon la période de construction pour l'IRIS 0409 (IRIS sélectionné) et l'IRIS moyen**

Le choix de l'IRIS (la ville de Nantes est divisée en 96 IRIS) a été réalisé grâce à la BD INSEE. En effet, il a été décidé de travailler sur un IRIS d'habitation qui soit le plus proche de l'IRIS moyen pour Nantes à partir des 3 critères : répartition des logements par période de construction, nombre de personnes moyen par logements, surface moyenne d'un logement. Malgré la classification par intervalles des paramètres période de construction et surface, il a été décidé d'utiliser la valeur moyenne de chaque intervalle pour comparer la surface moyenne d'un logement par IRIS.

La Figure 30 en ANNEXE montre la diversité des IRIS concernant la période de construction des bâtiments, uniquement pour un échantillon de onze IRIS. Ceci paraît totalement logique au regard de l'histoire de la ville. Il est cohérent que la proportion de bâtiments anciens la plus forte se trouve dans les IRIS des centres historiques de Nantes et que cette répartition des logements par IRIS selon la période de construction suive les différentes vagues d'urbanisation du territoire nantais.

L'IRIS sélectionné est donc celui qui se rapproche le plus de la moyenne pour les 3 paramètres explicités précédemment- paramètres arbitraires, choisis indépendamment des résultats des analyses de sensibilité -, il s'agit de l'IRIS 0409 Saint Félix (quartier des Hauts Pavés). La Figure 6 donne une idée de l'âge des logements de cet IRIS, en comparaison de ceux de l'IRIS moyen. Saint Félix comporte 627 bâtiments (150 IC et 477 MI) qui représentent 1906 logements (soit 25,8% de plus que l'IRIS moyen) et 3214 habitants. Sur ces 1906 logements, 94% sont des résidences principales (1773 logements). Les autres types de logements (secondaires, vacants, occasionnels) ont sciemment été gardés dans l'échantillon, étant donné le fait qu'ils peuvent à tout moment devenir résidences principales. Les logements sont, au total, à 75% collectifs et 25% individuels. Saint Félix peut être qualifié de zone urbaine dense.

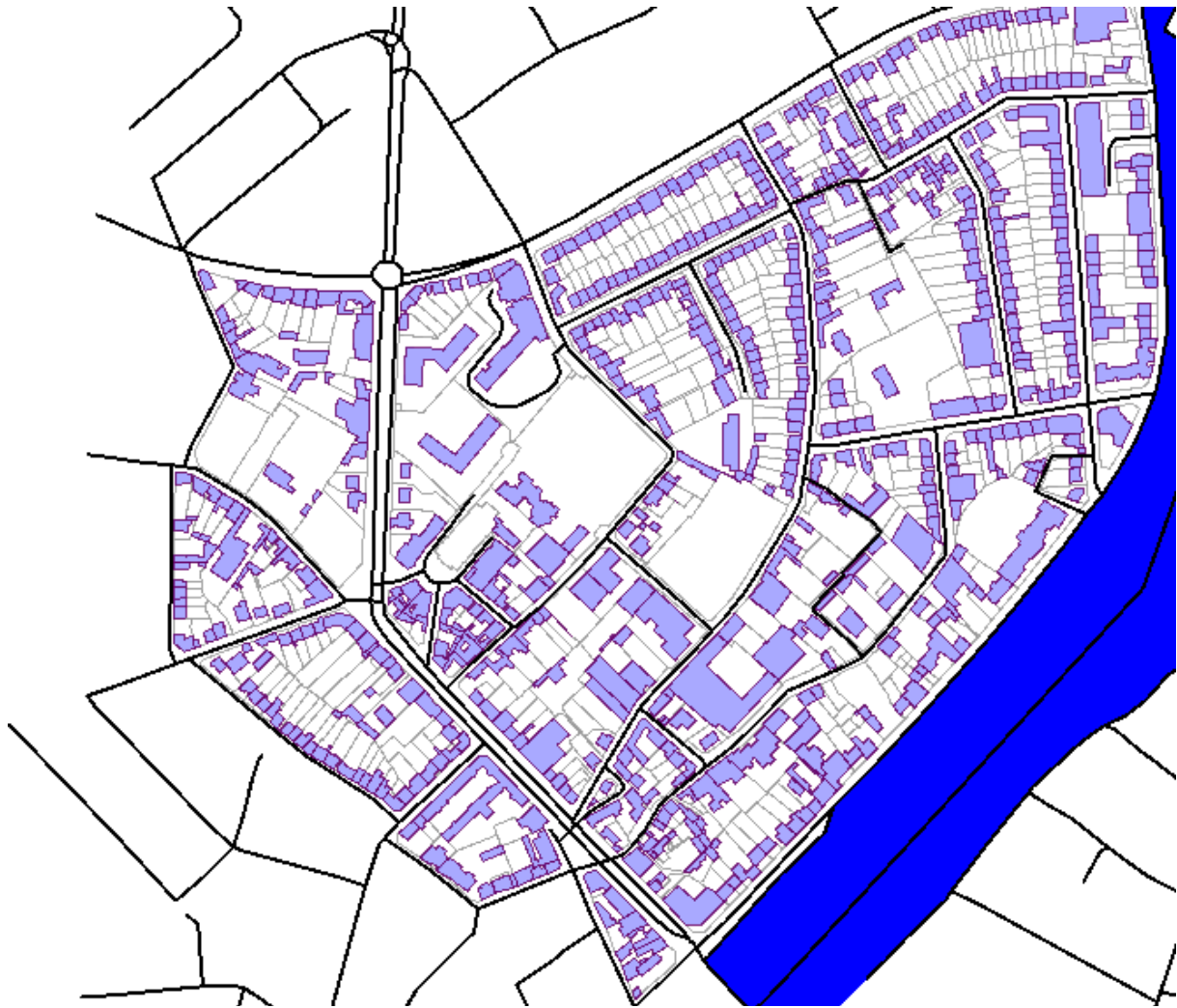


Figure 7 - IRIS 0409 Saint Félix (la couleur bleue correspond à l'Erdre entre Motte Rouge et le pont de la Tortière)

Par contre, les bâtiments sont à 24% des MI et à 76% des IC.

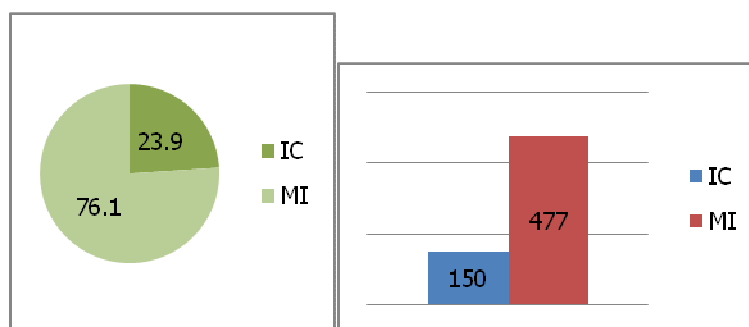
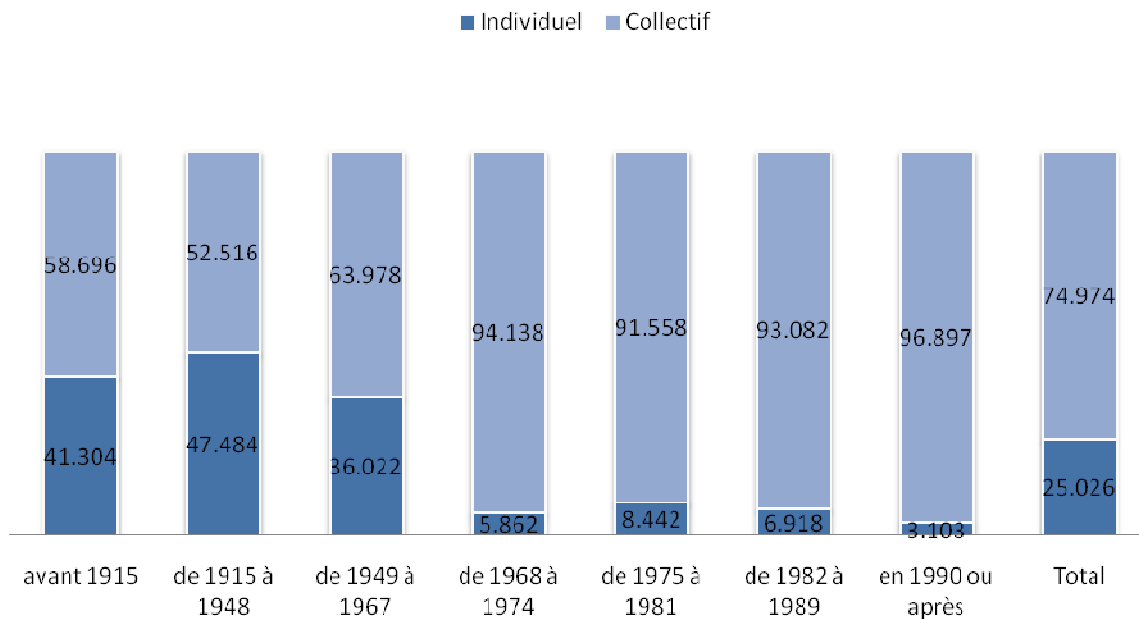


Figure 8 - Répartition et nombre de bâtiments de Saint Félix selon le type

La répartition des logements varie selon les périodes de construction comme en atteste la figure suivante.

On considère donc à l'issue de ce choix que la zone statistique Saint Félix fournit un terrain d'études varié, principalement résidentiel (mise à part des commerces aux abords des boulevards), et dans lequel sont absents des équipements particuliers (caserne, universités, etc.).



**Figure 9 - Répartition des périodes de construction des logements dans l'IRIS Saint Félix**

## 2) Analyse et indicateurs spatiaux

L'objectif de cette étape a été de tenter de combiner les variables disponibles ou calculables à partir des BD de l'IGN et celle de l'INSEE. Il s'agit ici de calculer le plus grand nombre d'indicateurs spatiaux qui puissent permettre le géoréférencement des logements/bâtiments de Saint Félix. Ces indicateurs sont - logiquement - principalement orientés selon des critères géométriques au regard des variables manipulables dans les BD IGN : densités, hauteur, surface, volume, etc.



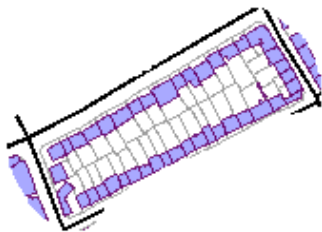
**Figure 10 - Hauteur des bâtiments de Saint Félix**



Une première étape consiste à filtrer l'information des différentes BD. En effet, alors que la BD INSEE décrit 627 bâtiments pour l'IRIS Saint Félix, la BD topographique en donne 214 et la BD parcellaire 961. Comme la BD parcellaire décrit les bâtiments à la parcelle, elle est choisie comme référence. A partir de la BD topographique, dont chaque bâtiment regroupe plusieurs bâtiments de la BD parcellaire, la hauteur de chaque bâtiment de cette dernière a été calculée. En résumé, la hauteur de chaque bâtiment de la BD parcellaire correspond à la hauteur du bloc de la BD topographique dont il fait partie. Après filtrage des constructions légères, bâtiments scolaires, culturels, garages et autres constructions de surface au sol inférieure à 20m<sup>2</sup>, on obtient un parc de bâtiments de 653 unités, soit 5,1% de plus que le nombre de bâtiments recensés dans la BD INSEE. Bien que des logements inférieurs à 20m<sup>2</sup> existent, ils sont uniquement collectifs ; dans ce cas, le bâtiment n'a pas une surface au sol de moins de 20m<sup>2</sup>. Il est à noter que la différence d'âge des BD peut expliquer en grande partie cette différence, par la construction de nouveaux bâtiments après 1999.

Une étude de terrain (voir ANNEXE 1 : Etude de terrain) a été menée afin de se rendre compte des types de bâtiments présents dans cet IRIS, de l'organisation urbaine, du nombre d'étages des bâtiments (hauteur des bâtiments), de l'actualité ou non des BD (démolitions et reconstructions) ou encore des rénovations qui ont pu avoir lieu ou en cours. Cette étude a permis surtout de déceler les classes de bâtiments qui ressortent le plus de ceux qui sont très minoritaires voire anecdotiques. Les bâtiments n'ont pas été systématiquement localisés de cette manière : l'idée reste de spatialiser l'information de façon automatique (par traitement avec SIG). Les bâtiments qui seront par la suite considérés comme représentatifs seront quand même localisés, afin qu'ils servent à l'établissement de lois de reconstitution, notamment par l'obtention de ratios (géométrie, matériaux, etc.).

Au regard de l'étude de terrain, des hauteurs<sup>15</sup> ou de la densité de hauteur qui a aussi été calculée pour des mailles de 50m x 50m, du plan de l'IRIS et de l'étude de terrain, quelques aspects remarquables de morphologie urbaine ressortent.



Présence de maisons individuelles (faible hauteur) mitoyennes par les deux faces latérales. Alignées sur rue, le jardin se trouve en cœur d'îlot. Toutes ces maisons possèdent une surface au sol de l'ordre de 60 à 90m<sup>2</sup> et sont principalement RDC+1.



Présence de logements collectifs (hauteur significative) imposants. Alignés sur rue, ils possèdent une surface au sol supérieure à 300m<sup>2</sup> et sont principalement RDC+4 et RDC+5.

<sup>15</sup> « La hauteur du bâtiment correspond à la différence entre le z le plus élevé du pourtour du bâtiment et un point situé au pied du bâtiment. La hauteur est arrondie au mètre. » (Descriptif du contenu BD TOPO® version 2, IGN, décembre 2009)





Présence de logement principalement individuel isolé sur parcelle. Le découpage parcellaire n'est pas régulier, ce qui donne un schéma de construction aléatoire. Maisons de surface au sol importante (>100m<sup>2</sup>), elles sont généralement composées d'un RDC+1.

**Tableau 3 - Brève analyse du tissu urbain de Saint Félix**

Il est de toute façon clair que l'organisation du tissu urbain peut, en première approximation, être abordée visuellement : en effet, sur la Figure 7, les 3 types d'organisation se démarquent généralement, et finalement, une division de l'IRIS en sous-parties est envisageable. Toutefois, l'analyse devra au préalable descendre à l'échelle du bâtiment, étant donné l'impossibilité – pour l'instant – de simuler thermiquement des formes urbaines.

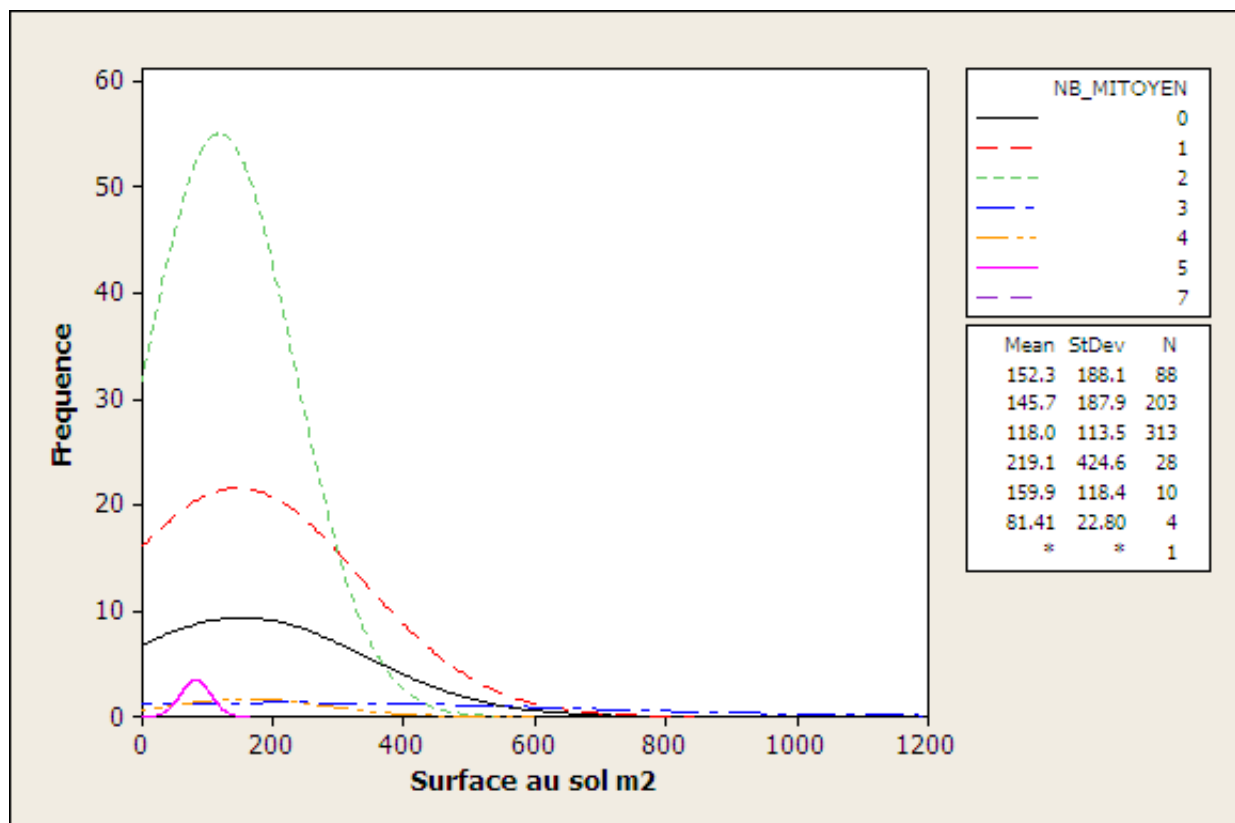
Ce tableau met en évidence la question de la mitoyenneté, qui est une autre façon de décrire de façon approximative le bâti étudié. Les bâtiments mitoyens et les bâtiments isolés ont été séparés, dans l'idée que l'organisation urbaine pourrait par la suite être considérée comme paramètre discriminant. A partir du nombre de bâtiments en contact avec un autre sur l'échantillon Saint Félix, une analyse a permis d'obtenir, pour tous les bâtiments non isolés de l'IRIS, le nombre de bâtiments mitoyens et leur numéro d'identification, ainsi que la surface de contact pour chaque bâtiment. Comme le nombre de bâtiments en contact avec un seul est de 7 au maximum sur l'IRIS, alors 7 colonnes ont été créées et remplies par le numéro d'identification des bâtiments mitoyens, sinon par un « 0 ».



**Figure 11 - Nombre de contacts mitoyens par bâtiment de l'IRIS Saint Félix**

Il est à noter que les bâtiments de logement collectif ne comptent pas nécessairement le plus de bâtiments mitoyens. En effet, malgré leur importante surface au sol - donc leur périmètre -, contrairement aux maisons individuelles, ils n'ont généralement qu'entre 1 et 3 surfaces de contact avec d'autres bâtiments, comme en atteste la Figure 11 ci-dessus.

Comme l'explique le graphique ci-dessous, les surfaces au sol moyennes des bâtiments possédant 1, 4 ou aucun contact(s) de mitoyenneté sont proches. De façon générale, on voit ici qu'il paraît difficile de séparer les bâtiments avec 1, 2 ou 4 contacts mitoyens en termes de « surface au sol », puisque leurs distributions se recoupent. On ne peut dans ce cas s'appuyer que sur la proportion de chacun de ces 3 types de bâtiments : les bâtiments avec 3 surfaces mitoyennes ou plus restent minoritaires. Les bâtiments isolés représentent 13.5% de l'ensemble des bâtiments, dont certains grands collectifs.



**Figure 12 - Distribution des surfaces au sol des bâtiments de la BD parcellaire selon le nombre de surfaces mitoyennes**

A propos de l'organisation urbaine en zone urbaine dense, un indicateur qui prendrait tout son sens dans l'analyse énergétique territoriale serait le coefficient de forme pour chaque bâtiment, et au mieux pour différentes organisations urbaines. Ainsi il pourrait être possible de se pencher sur les travaux de (Schilling, 1984) pour avoir une estimation (imprécise) de la consommation énergétique du bâtiment. Cependant, par manque de temps et de maîtrise du langage SQL, ce coefficient de forme n'a pas pu être déterminé pour tous les bâtiments de Saint Félix sous OrbisGIS. Néanmoins, ce paramètre est pris en compte dans la partie suivante pour l'analyse thermique de bâtiments.

Un autre indicateur spatial peut être la densité de bâti (voir Figure 13). En effet, cette densité qui est égale à la surface construite sur la surface de la maille peut être un indicateur intéressant pour la caractérisation du territoire étudié (la taille de la maille peut toutefois être critique). La densité de bâti confirme finalement la répartition des surfaces des différents bâtiments de façon générale. On remarque sur la figure suivante que les mailles de plus

fortes densités de bâti sont celles sur lesquelles sont construits les bâtiments de logement collectif de surface au sol importante (supérieure à 60%). Par contre, les zones de concentration de maisons individuelles en bande sont caractérisées par des densités de bâti comprises entre 20% et 40%.



**Figure 13 - Densité de bâti sur Saint Félix (mailles de 50m par 50m)**

### 3) Affectation d'une localisation aux bâtiments

La phase d'affectation correspond à l'attribution d'une localisation à chaque bâtiment de la zone étudiée. On suppose qu'en travaillant sur les données géométriques des bâtiments de la BD INSEE, il est possible de trouver des relations avec celles des bâtiments des BD IGN.

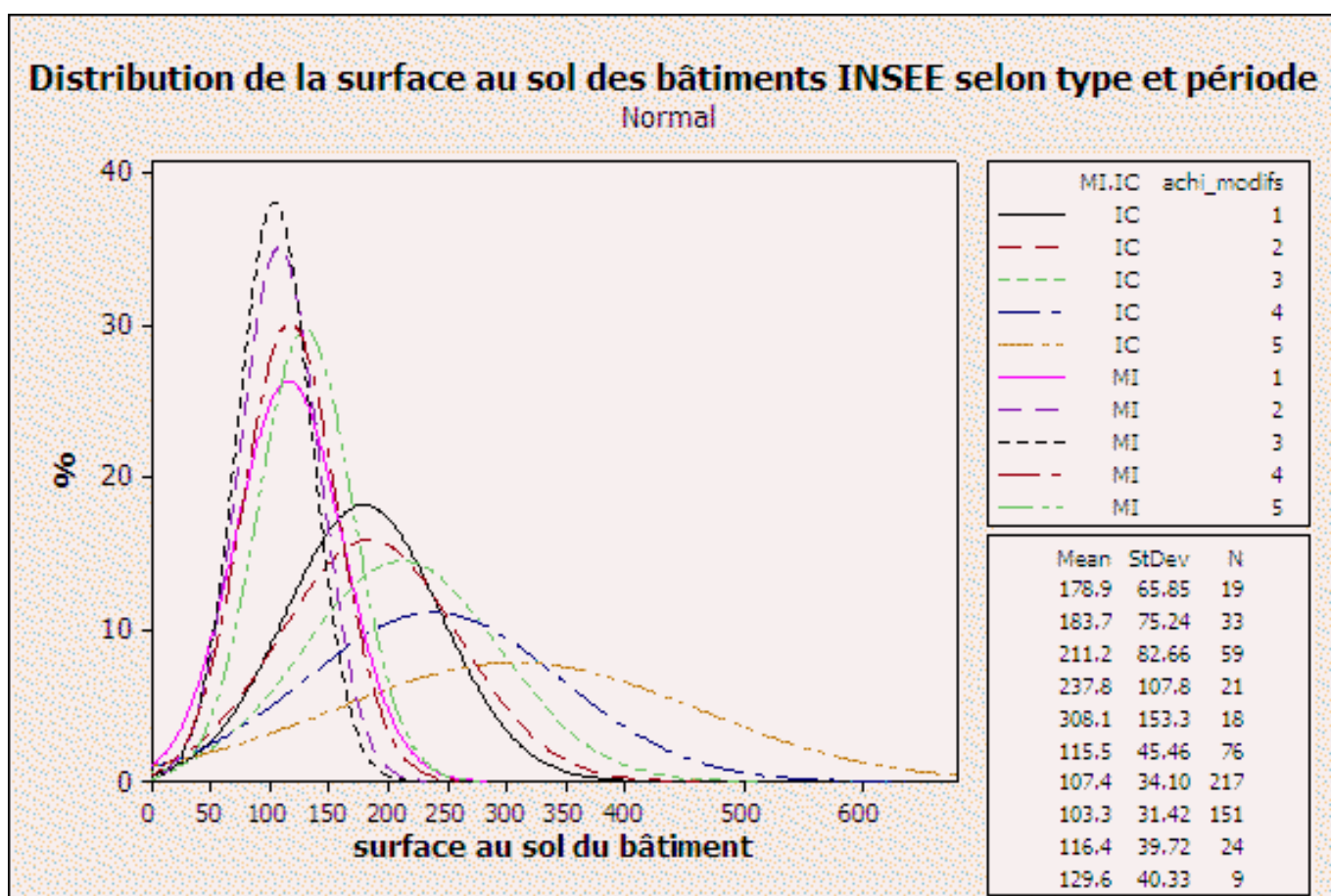
Cette localisation peut se faire à une échelle plus ou moins large selon l'objectif poursuivi. Soit il s'agit de localiser précisément chaque bâtiment (mise en place d'un réseau de chaleur,...), soit cette localisation peut s'effectuer dans une zone plus large (sensibilisation des habitants,...).

Cette phase peut se faire par différents moyens<sup>16</sup> :

<sup>16</sup> N'est pas détaillé ici l'utilisation de fichiers sur les logements localisés, comme le fichier FILOCOM, qui permettrait de localiser les bâtiments à une échelle restreinte. L'obtention de ce fichier permettrait de travailler à la différenciation des typologies de bâtiments sur des aspects géométriques ou de ratios en utilisant les BD IGN.

- Par l'affectation d'une localisation à un bâtiment de façon plus ou moins précise lors d'un relevé de terrain ; dans ce cas, chaque bâtiment de la BD INSEE est reporté géographiquement – par correspondance – à un bâtiment de la BD parcellaire. Cette étape est coûteuse en temps, non reproductible pour une zone d'étude autre, et la définition de classes de typologies n'a de sens qu'a posteriori : répartition des typologies de bâtiments sur le territoire et dégagement d'indicateurs, ratios, etc. propres à ces typologies.
- À partir d'un échantillon de bâtiments réels, par typologies par exemple, on en tire des ratios, valeurs types de paramètres géométriques et des distributions. Cet échantillon permet de tirer des lois statistiques de reconstitution pour le reste de la zone d'étude. Toutefois, une condition est nécessaire à la réalisation de cette méthode : par type de bâtiments, certaines des distributions de paramètres suivant les typologies doivent être différenciées.

Notre étude vise à utiliser la seconde méthode, à partir de bâtiments classés selon leur âge (5 classes) et leur type (MI ou IC). Des premiers tests ont pour but de vérifier si l'hypothèse de différenciation de quelques distributions selon le type de bâtiment.



**Figure 14 - Distribution des surfaces au sol des bâtiments de la BD INSEE selon type et âge**

Cette hypothèse pour la surface au sol n'est pas validée comme en témoigne la Figure 14 : à l'intérieur du cadre rouge se mêlent, pour des mêmes surfaces au sol, tous types de bâtiments et d'âges.

Les surfaces au sol pour les IC correspondent à : surface moyenne d'un logement \* nombre de logements moyen par étage ; pour les MI, comme le nombre d'étages n'est pas donné, la surface habitable est prise pour la surface au sol.

Il n'est pas en l'état actuel des choses possible de différencier les MI et IC de la BD INSEE, d'après de graphique. On remarque néanmoins que la séparation apparaît progressivement pour les MI selon les périodes de construction ; en effet, plus les MI sont récentes, plus leur distribution en surface au sol s'éloigne de celles des IC. Comme l'hypothèse « un niveau par MI » est exagérée, on obtiendrait des résultats encore plus concentrés pour les MI en considérant deux niveaux.

Les résultats et observations sont similaires pour les hauteurs des bâtiments selon type et âge.

Dans cette configuration, travailler par anamorphose (affectation d'un bâtiment INSEE à un bâtiment IGN selon l'ordre croissant ou décroissant du paramètre étudié) peut prendre sens pour les IC de surface au sol supérieure à 500m<sup>2</sup>. Néanmoins, entre 50m<sup>2</sup> et 500m<sup>2</sup> au sol – zone où se concentrent un grand ensemble de bâtiments, cette méthode ne permet pas d'affecter aux bâtiments une localisation.

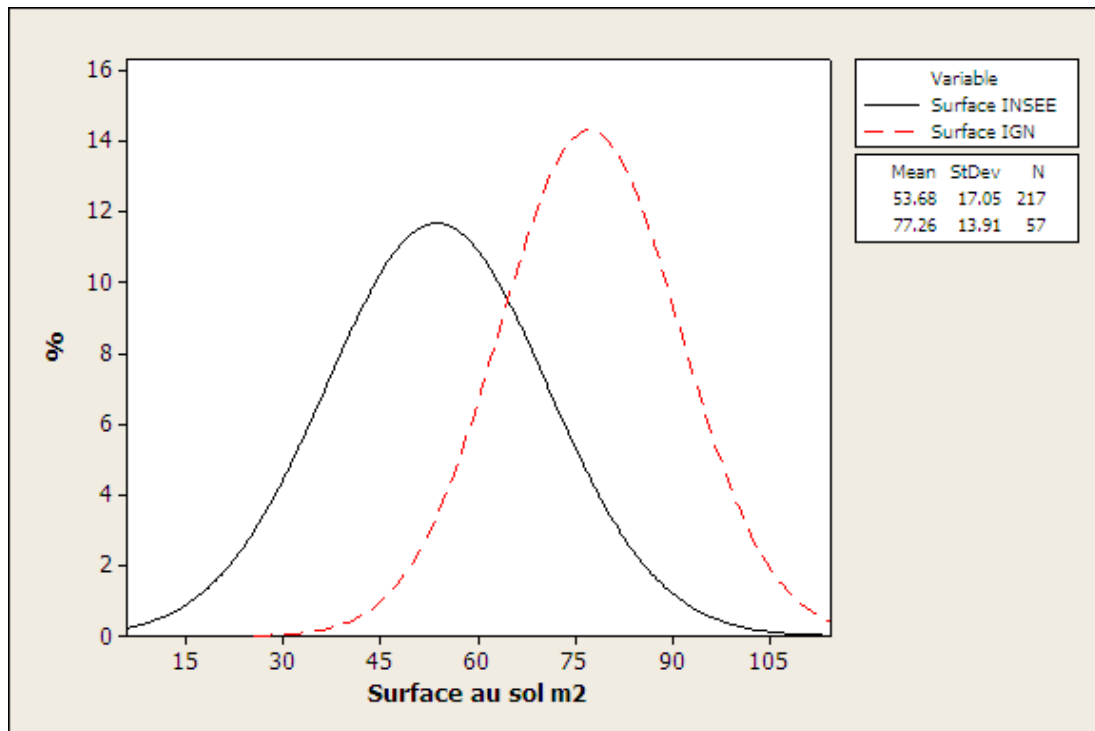
Ces résultats ne sont pas étonnants au regard des diversités d'occupation, de surface, de nombre d'étages pour les IC : les coefficients de corrélation entre les différentes variables sont peu élevés (au maximum : 0.928 entre le nombre de logements dans l'IC et le nombre d'habitants ; 0.918 entre le nombre de pièces et le nombre d'habitants). De même, la hauteur calculée pour chaque bâtiment (à partir du nombre d'étages et de la hauteur caractéristique d'un étage par période de construction) n'est en rien corrélée à la surface au sol approximative calculée (0.032). Le coefficient de corrélation est plus élevé pour les bâtiments de la BD parcellaire (0.272), même si aucun lien ne peut en être tiré. De fait, utiliser la même méthode de calcul pour tous ces bâtiments n'est pas rigoureux.

En utilisant certains bâtiments relevés lors de l'étude de terrain et par extraction de 54 MI R+1 en bande de la période 1915-1948 (voir Tableau 3 - Brève analyse du tissu urbain de Saint Félix, 1<sup>ère</sup> ligne), on relève des similarités entre la BD INSEE et la BD parcellaire. En effet, en considérant les surfaces au sol avec les approximations de calcul : pour la BD INSEE, considérant deux niveaux, on calcule la surface au sol à partir de la surface habitable en multipliant le nombre de pièces par 22m<sup>2</sup> par pièce<sup>17</sup> ; pour la BD parcellaire, la surface au sol équivaut à la surface de la géométrie, donc prenant en compte les surfaces de parois. On obtient la figure suivante :

---

<sup>17</sup> Surface moyenne d'une pièce dans le parc de logement français, constante depuis 30 ans environ (source : ETHEL n°2, 2005)





**Figure 15 - Surface au sol des MI de la période 1915-1948 pour la BD INSEE et la BD parcellaire, après relevé de terrain**

Alors que les surfaces de la BD parcellaire sont surestimées par la prise en compte de la structure des bâtiments et les surfaces issues de la BD INSEE sous-estimées en supposant systématiquement deux niveaux pour tous les MI de la période, on observe une distribution proche avec déphasage. De plus, les surfaces IGN sont plus concentrées que celles issues de la BD INSEE.

Ces résultats mettent en évidence la difficulté de l'étape d'affectation à une large échelle. Il semble que des similarités apparaissent en considérant un nombre restreint de bâtiments d'un tissu urbain aux caractéristiques affirmées, d'une période donnée.

**En conclusion, il apparaît utile de coupler une échelle bâtiment et une échelle plus large, même si demeure la question de la méthode à suivre. En effet, les questions de mitoyenneté peuvent être traitées à l'échelle bâtiment, mais les analyses de densité de bâti, formes urbaines caractéristiques méritent ontologiquement d'être étudiées à une échelle plus vaste (de la rue à l'îlot). Ces questions de cohabitation d'échelles pourraient être précisées par des statistiques à partir d'un échantillon réel, en considérant à la fois des données quantitatives et qualitatives. De plus, cette courte analyse met en relief la proximité de certaines typologies d'un point de vue géométrique. A titre d'illustration, des petits IC peuvent partager un ensemble de caractéristiques géométriques proches avec d'autres MI. Dès lors, la distinction du type de bâtiment lors de l'analyse spatiale devient superflue.**

## IV/Analyse énergétique

### 1) Définition de typologies initiales

La différence entre les périodes de construction n'affecte que la composition des parois et les techniques de construction. Un certain nombre de paramètres peuvent varier selon les périodes, comme les débits de ventilation, les déperditions linéiques, les rendements des systèmes de chauffage, etc.

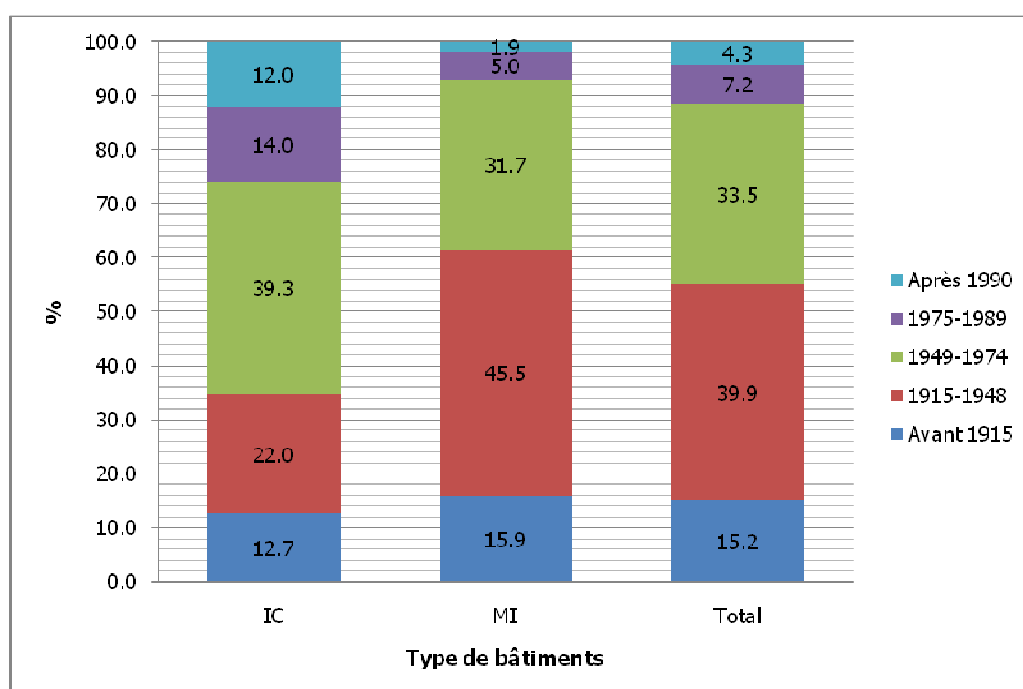


Figure 16 - Répartition des bâtiments selon type et âge

Tous les modèles étudiés ont mis en évidence l'influence de caractéristiques thermiques des bâtiments dans l'évaluation de leur consommation énergétique. C'est pourquoi les années de construction (qui réfèrent à des caractéristiques thermiques fixées) sont reprises dans cette étude. Les périodes étudiées sont celles définies par l'INSEE et reprises dans le rapport de P. Graulière ; il s'agit des périodes avant 1915, 1915-1948, 1949-1967, 1968-1974, 1975-1981, 1982-1989 et après 1990. Comme le précisent déjà (Caldera et al., 2008), il est décidé, du fait des grandes similarités perçues dans le rapport de P. Graulière, de regrouper les périodes 1949-1967 et 1968-1974 en une seule : 1949-1974. En effet, la 1<sup>ère</sup> réglementation thermique française ne date que d'après le premier choc pétrolier de 1973 et ses conséquences n'apparaissent qu'après 1975. Une faible isolation des bâtiments apparaît déjà avant 1974, mais elle est loin d'être majoritaire. Les formes architecturales sont semblables pour ces deux périodes de construction intensive (ETHEL n°2, 2005), qui fusionnent en définitive. Il en est de même pour les périodes 1975-1981 et 1982-1989 qui fusionnent en une seule, puisque leurs caractéristiques morphologiques et de matériaux se rapprochent, ainsi que la prédominance de maisons individuelles. De plus, bien que l'amélioration énergétique est réelle après la RT 1982 (ETHEL n°2, 2005), ces deux classes restent trop difficiles à différencier. Par conséquent, les classes d'âge utilisées passent de 7 à 5.

Pour le logement collectif comme individuel, les différentes caractéristiques de construction, de matériaux et morphologico-architecturales (avec application directe pour le cas nantais) de chaque période sont données en

ANNEXE 2 : Caractéristiques morphologiques et architecturales des bâtiments par période de construction.

Toutefois, définir de manière uniforme les bâtiments d'une même période reste difficile compte-tenu pour plusieurs raisons.

- D'abord, la variété de matériaux utilisés dans une région de mêmes caractéristiques géologiques peut être significative. Les matériaux utilisés avant 1915 sont très majoritairement locaux, une certaine homogénéité se retrouve dans les bâtiments de cette époque. Par contre, entre 1915 et 1948 se mêlent matériaux locaux et matériaux industriels et préfabriqués dans des proportions inconnues.
- De plus, pour chaque période, les techniques de construction diffèrent selon les bâtiments (plancher sur vide sanitaire ou dallage, toiture en pente ou terrasse, variation du pourcentage de surface vitrée, etc.). Toutefois, les périodes récentes sont plus simples à définir du fait d'une homogénéisation des techniques de construction des bâtiments à partir de 1982.
- Les rénovations, réhabilitations et entretiens ont entraîné un mélange entre techniques de construction initiales et plus récentes (simple/double vitrage, combles aménagés/perdus,...) et entre matériaux utilisés originellement et au moment de la modification du bâtiment (menuiseries bois/PVC, isolation. De plus, ces rénovations varient selon le statut d'occupation : un logement d'un propriétaire occupant a une probabilité plus élevée d'avoir été rénové qu'un logement en location (Marchal, 2008).
- Les caractéristiques thermiques des matériaux varient au cours du temps.
- L'altération des parois depuis la date de construction diffère selon les bâtiments.
- La différenciation de l'habitat (maisons individuelles anciennes découpées en appartements) a pu entraîner des rénovations/détériorations partielles du bâtiment.

Des compositions de parois, toiture et plancher « types » ont été définies dans le cadre de ce stage à partir du rapport « Typologies de l'habitat existant » et de la bibliothèque des compositions du logiciel Pleiades-COMFIE. Ces compositions semblent majoritaires (d'après le rapport mentionné). Les compositions utilisées pour les STD pour les maisons individuelles (MI) sont mentionnées dans le tableau ci-dessous (de l'extérieur vers l'intérieur) :

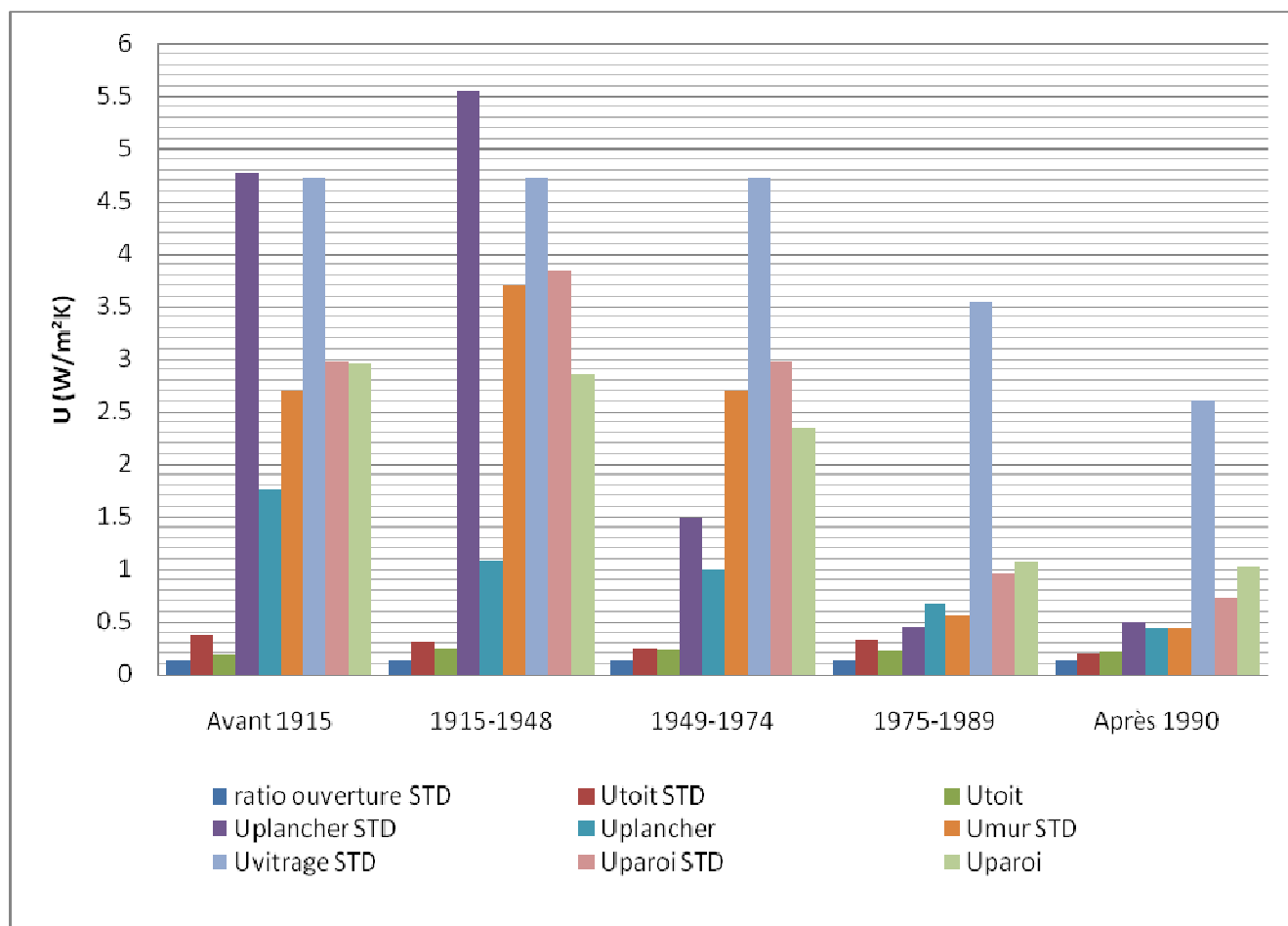
Période	Mur	Plancher	Toiture	Vitrage et ouverture
Avant 1915	Enduit extérieur 1cm ( $\lambda=1.15W/mK$ ) Pierre 30cm ( $\lambda=1.01 W/mK$ ) Enduit plâtre 2cm	Bois léger 2.5cm Mortier 3cm ( $\lambda=1.15W/mK$ ) Carrelage 2cm	Ardoise 1cm Lame d'air 1.3cm Bois 5cm Laine de verre 10cm Placo. BA13	Simple vitrage bois
1915-1948	Enduit extérieur 2cm ( $\lambda=1.15W/mK$ ) Parpaings de 20cm Enduit plâtre 2cm	Béton lourd 20cm Plâtre courant 2cm Carrelage 2cm	Ardoise 1cm Lame d'air 1.3cm Bois 5cm Laine de verre 12cm Placo. BA13	Simple vitrage bois
1949-1974	Enduit extérieur 2cm ( $\lambda=1.15W/mK$ ) Parpaings de 20cm Enduit plâtre 2cm	Béton lourd 20cm Polystyrène expansé 2cm Mortier 5cm Carrelage 1cm	Terre cuite 2cm Laine de verre 20cm Placo BA13	Simple vitrage bois



1975-1989	Enduit extérieur 2cm ( $\lambda=1.15W/mK$ ) Parpaings de 20cm Polystyrène 6cm Placoplâtre BA13	Béton lourd 20cm Polystyrène exp 6cm Mortier 5cm Carrelage 1cm	Ardoise 1cm Laine de verre 12cm Plaques plâtre 10cm	Simple vitrage PVC
Après 1990	Enduit extérieur 2cm ( $\lambda=1.15W/mK$ ) Parpaings de 20cm Polystyrène 8cm Placoplâtre BA13	Placoplâtre BA13 Hourdis béton 20cm Laine de verre 8cm Mortier 5cm Carrelage 1cm	Ardoise 1cm Laine de verre 12cm Plaques plâtre 10cm	Double vitrage PVC

**Tableau 4 - Compositions des parois (murs, toiture, plancher) selon période**

La Figure 17 montre les différences entre les valeurs des U qui ont été calculés à partir du rapport de P. Graulière « Typologies de l'habitat existant... » et celles qui ont été utilisées pour les STD et qui proviennent majoritairement de la bibliothèque de Pleiades+COMFIE. La proximité des valeurs de UparoiSTD et UtoitSTD des périodes avant 1915 (construction en matériaux locaux) et 1949-1974 (matériaux industriels) est notable. De fait, les besoins surfaciques en chauffage pour un même bâtiment seront proches, comme l'attestent les résultats des STD présentés prochainement.



**Figure 17 - Valeurs des U utilisés pour les STD ou calculé**

Période / Type

Maison individuelle

Immeuble collectif

Avant 1915



1915-1948



1949-1974



1975-1989



Après 1990



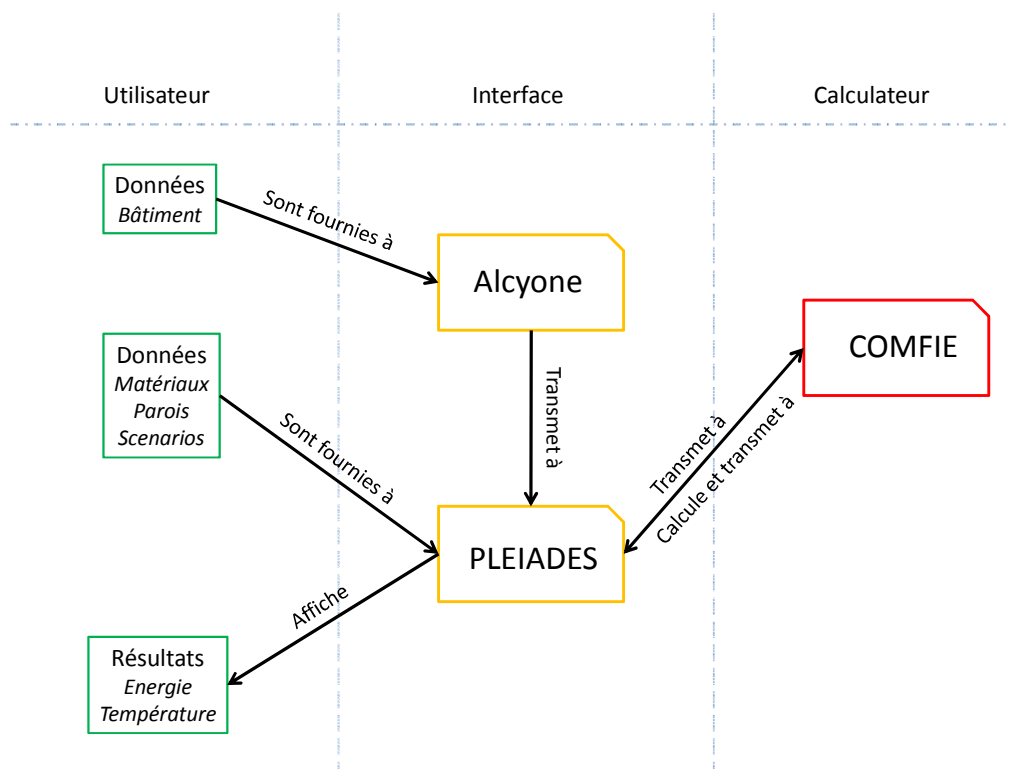
**Tableau 5 - Typologie initiale de bâtiments**

Les paramètres retenus pour la définition des classes typologiques de logements sont donc les suivants :

- Période de construction des bâtiments : avant 1915 (période 1), 1915-1948 (période 2), 1949-1974 (période 3), 1975-1989 (période 4) ou après 1990 (période 5).
- Type d'organisation urbaine : maison individuelle ou immeuble collectif.

La classification illustrée de bâtiments de l'IRIS Saint Félix est présentée dans le Tableau 5 - Typologie initiale de bâtiments.

## 2) Simulation de bâtiments



**Figure 18 – Principe de fonctionnement du logiciel Pleiades+COMFIE (Thiers, 2008)**

A partir des typologies définies simplement, il s'agit de préciser ces typologies et d'établir des modèles de comportement thermique du parc étudié.

Dans ce cadre sont menées des analyses de sensibilité, qui visent à comprendre et mettre en évidence un certain nombre de paramètres influents qui servent à l'établissement d'un modèle statistique. Ces modèles ont pour objectif d'être simplifiés grâce à ces analyses de sensibilité.

Le paramètre de sortie est principalement l'énergie totale annuelle consommée (kWh/m<sup>2</sup>.an), mais celle-ci n'est pas le seul critère d'analyse. En effet, le profil temporel de puissance appelée (selon différents intervalles de temps) est aussi étudié dans le développement des modèles et leur comparaison. Ces derniers ont également pour but l'analyse ultérieure du bâtiment en relation avec des systèmes de conversion et des réseaux (chaleur, électriques, gaz,...).

Dans le cadre des typologies définies précisées ci-avant, les analyses seront donc fondées sur les besoins énergétiques et leur répartition temporelle.

Les simulations permettant ces analyses ont été réalisées avec Pleiades+COMFIE, dont le principe de fonctionnement est décrit en figure 18. Les paramètres d'entrée des simulations sont donnés en ANNEXE 4. Sauf si spécifié, les résultats présentés par la suite utilisent ces paramètres de simulation.

### 3) Paramètres d'entrée et précision des typologies de bâtiments

Il a déjà été précisé que de nombreux paramètres peuvent être significatifs dans la détermination des consommations du secteur résidentiel. Les classes de paramètres influant sur cette consommation (voir Figure 4 - Facteurs qui influencent la consommation énergétique des bâtiments (Ratti, Baker & Steemers, 2005).) sont analysées de façon la plus approfondie possible. Néanmoins, les paramètres d'entrée seront étudiés séparément et il ne s'agira pas, au vu de la méthode et des moyens utilisés, d'établir un classement des données les significatives.

Tout d'abord, il convient de préciser que les paramètres climatiques ne seront pas étudiés en détail : en effet, considérant la situation d'étude en région nantaise, la zone climatique retenue reste la zone H2. De fait, la zone climatique (H1, H2 et H3 ainsi que les sous-zones climatiques issues de la RT 2005) n'est pas prise en compte comme paramètre discriminant.

- Mitoyenneté et type d'organisation urbaine :

La question de la mitoyenneté pour le logement individuel a été étudiée de façon simplifiée par simulation thermique dynamique<sup>18</sup>. Le logiciel utilisé, CitySim propose un calcul de la consommation énergétique d'un fragment urbain en simulant à l'échelle bâtiment. Quatre maisons individuelles (R) de surface au sol de 74m<sup>2</sup> (paramètres de simulation fournis en ANNEXE 6) ont été analysées dans différentes configurations. Les résultats – consommation énergétique finale des quatre bâtiments – sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Configuration	Consommation énergétique obtenue	Comparaison par rapport au cas « maisons isolées »
<b>Maisons isolées</b>	59438 kWh	/
<b>Maisons mitoyennes 2 à 2</b>	49658 kWh	<b>-16.5%</b>
<b>Maisons en bande</b>	44684 kWh	<b>-24.8%</b>

**Tableau 6 – Comparaison énergétique de différentes organisations urbaines sommaires**

A partir de ces simulations simplifiées, on remarque l'organisation urbaine influe de façon significative sur la consommation énergétique. Ce critère peut être pris en compte soit directement en tant que paramètre discriminant, soit par l'application d'un facteur correctif compris entre 0 et 1 – 1 correspondant au cas initial d'une maison individuelle -, selon la

<sup>18</sup> Simulation réalisée par Charlotte Marguerite avec le logiciel CitySim développé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

situation : mitoyenne par une façade ou en bande. C'est ici que le calcul du coefficient de forme grâce aux potentialités SIG peut intervenir. Néanmoins, des valeurs de référence – par défaut – peuvent être utilisées dans ce cas à partir des travaux de (Schilling, 1984). La question de la mitoyenneté est abordée plus précisément dans les STD présentées ensuite.

- Coefficients de transmission thermique U par période

Les compositions de parois ont été détaillées plus tôt. Celles-ci ne sont que des estimations, et comme précisé, elles ne représentent que partiellement le parc d'une période de construction. Des disparités significatives peuvent être observées selon les matériaux/épaisseurs utilisées dans la construction.

Les coefficients de transmission thermique globaux pour les bâtiments ( $U_{bât}$ ) simulés varient selon les périodes, comme le montre la figure suivante :

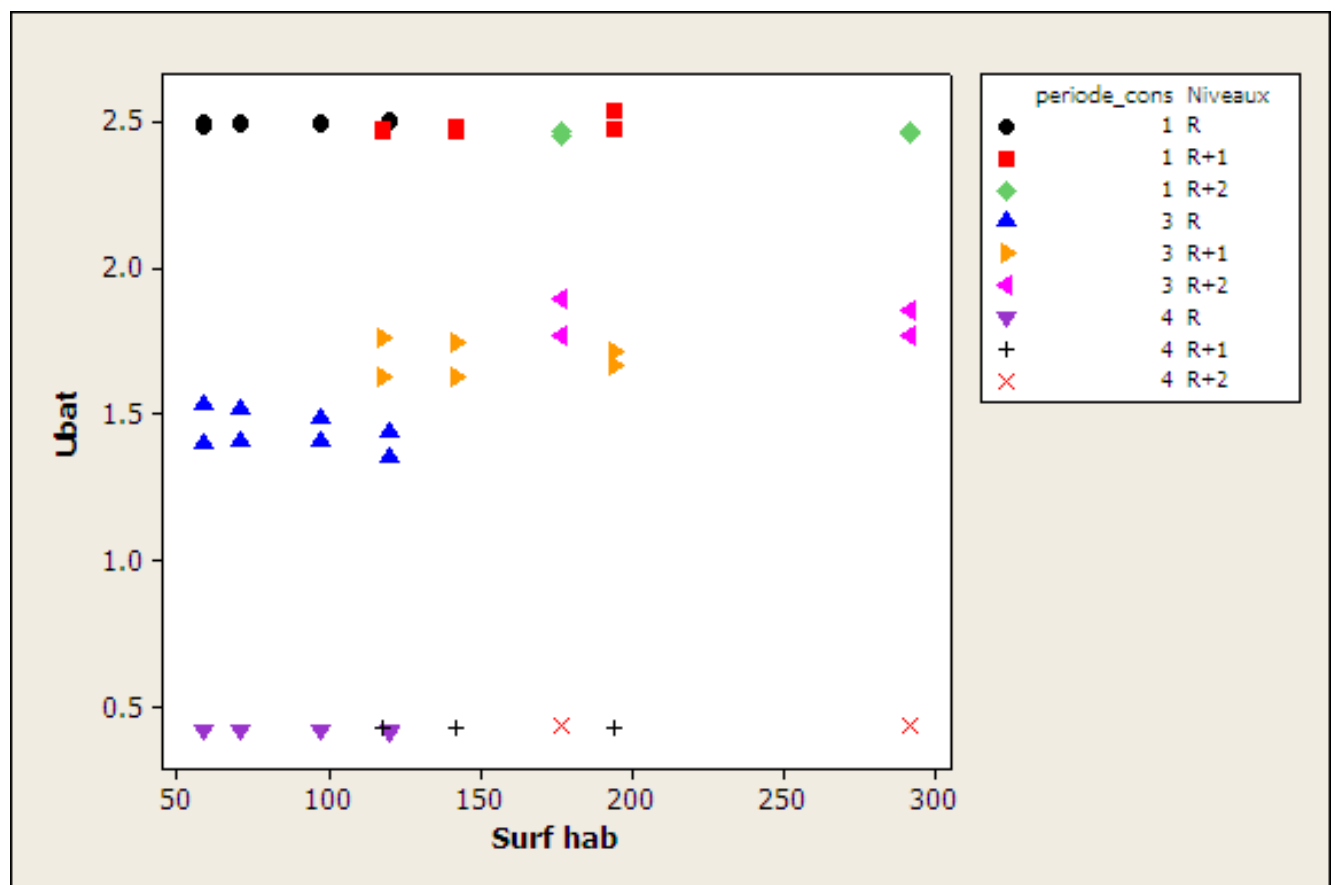


Figure 19 - U global selon surface habitable

$U_{bât} = \Sigma(U_i S_i) / S_T$  où  $S_T$  est la surface totale en contact avec l'extérieur. Les façades mitoyennes ne sont pas prises en compte dans les calculs.

Les trois périodes se distinguent aisément. Le coefficient  $U_{bât}$  est constant pour les périodes 1 et 4, mais cela n'est pas le cas pour la période 3. En effet, pour la période 3,  $U_{bât}$  varie selon le nombre de façades mitoyennes et l'influence relative des déperditions par le mur. Pour la période 4, des  $U_i$  proches entraînent une répartition équilibrée des déperditions par paroi. Pour la période 3, l'importance prépondérante de  $U_m$  (et des surfaces latérales extérieures prépondérantes par rapport à toutes les surfaces prises en compte), a pour

conséquence une différence de  $U_{\text{bât}}$  pour les bâtiments à une ou deux façades latérales mitoyennes. Le graphique suivant résume ce propos :

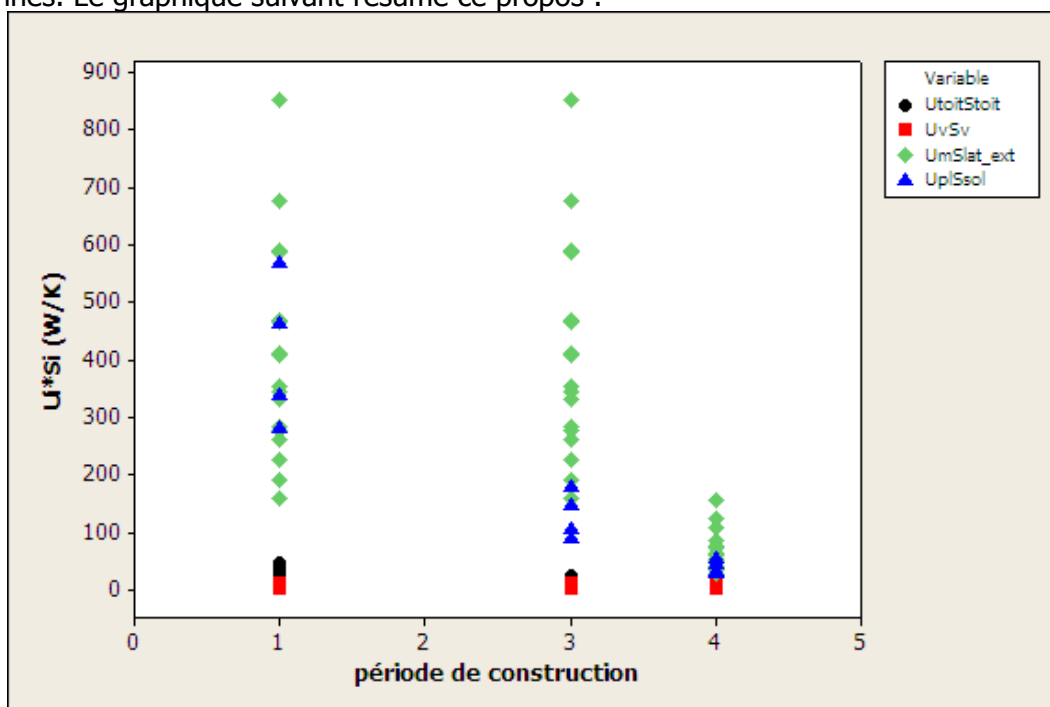


Figure 20 -  $U_i*S_i$  selon les périodes de construction

Les valeurs  $U_{mSlat\_ext}$  pour la période 3 s'étendent sur un grand intervalle relativement aux autres  $U_iS_i$ . Ce n'est pas le cas pour les périodes 1 et 4 pour lesquelles les  $U_iS_i$  sont plus homogènes.

Quelques remarques basiques méritent d'être faites :

- l'influence des pertes par le plancher et par le toit diminue avec le nombre de niveaux ;
- les pertes par les parois latérales sont systématiquement majoritaires pour les bâtiments R+1 et R+2.
- les pertes par les parois latérales sont plus significatives pour un bâtiment avec deux façades mitoyennes qu'avec une seule ;

Ces remarques pourraient potentiellement permettre de préciser les modèles (voir la partie IV/ 4)) entre les typologies selon les produits  $U_i*S_i$  les plus significatifs (MI en bande pour la période 2, très majoritairement à plusieurs niveaux pour la période 1, etc.).

De façon générale, la définition des compositions reste trop approximative en comparaison de celles utilisées par exemple dans le modèle de (Marchal, 2008). Ceci se vérifie par les STD menées dont les résultats (besoins surfaciques en chauffage) par période de construction sont globalement plus faibles que les moyennes nationales (voir Tableau 1). Ceci peut s'expliquer en partie par :

- Des variétés de comportements des occupants non pris en compte, mise à part la température de chauffe qui correspond à la moyenne nationale (ADEME, 2005).
- Des taux d'isolation supérieurs à la réalité, notamment pour la toiture des bâtiments des périodes 1, 2 et 3 ou les murs de la période 3.
- Un taux de renouvellement d'air a priori plus faible pour les périodes 1 et 2 plus faible que dans le cas réel (voir partie suivante).
- La non prise en compte du taux de remplacement de fenêtres simple vitrage en fenêtres double vitrage des bâtiments/logements (d'après (Marchal, 2008), 58.8% des fenêtres des logements d'avant 1982 sont en double vitrage).



Ces remarques s'ajoutent à celles formulées en page 46. Néanmoins, étant donné l'impossibilité de travailler à la définition de typologies prenant en compte ces différentes remarques, elles sont laissées de côté. Nous considérons qu'une étude de terrain a posteriori permettra de préciser les consommations énergétiques par la prise en compte de ratios.

- Taux de ventilation hiver :

Pour un bâtiment, des STD ont été menées afin de saisir l'influence du taux de renouvellement d'air sur la consommation énergétique d'un bâtiment. Ce paramètre n'a été testé que sur un seul type de bâtiment (R, 71.01m<sup>2</sup> habitables, mitoyen par une façade latérale). Le taux de renouvellement d'air hiver varie entre 0.6 vol/h (taux de renouvellement d'air d'un logement récent) et 6 vol/h. Les résultats sont donnés par le graphique suivant :

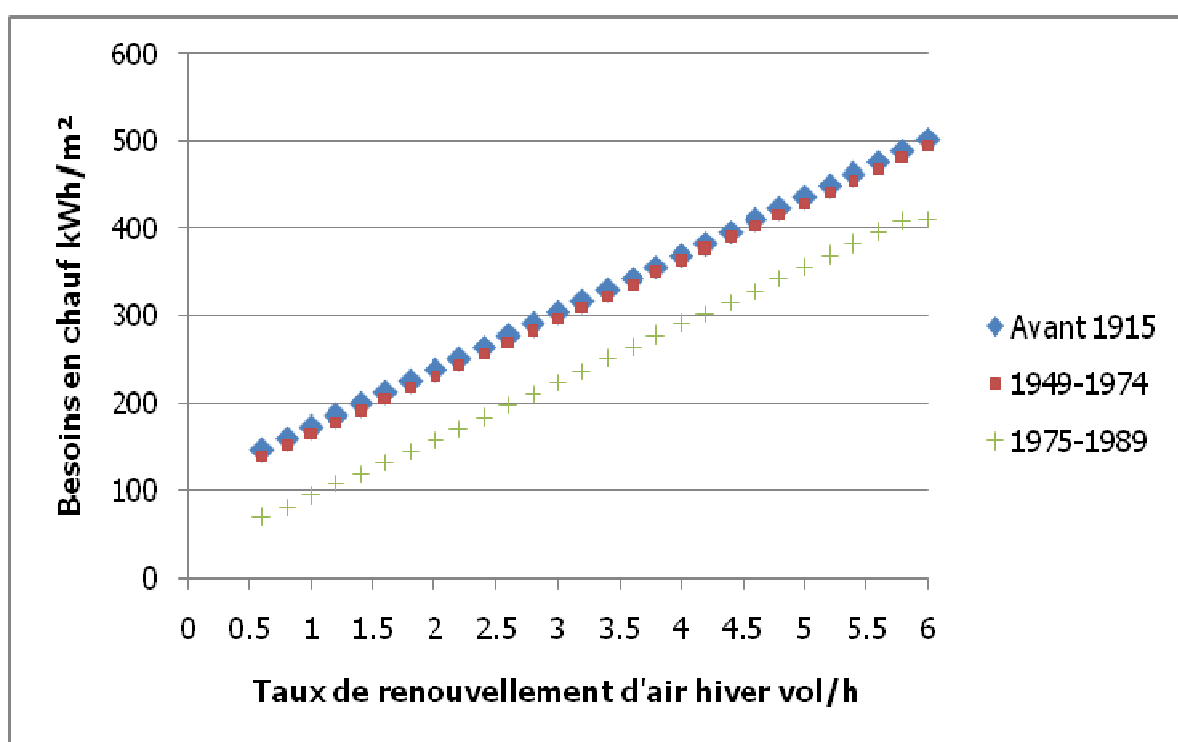


Figure 21 - Besoins de chauffage selon le taux de renouvellement d'air

Au regard des coefficients de détermination ( $R^2=0.999$ ), il y a quasi linéarité entre le taux de renouvellement d'air et les besoins de chauffage en kWh/m<sup>2</sup> quelle que soit la période considérée. On observe une variation entre 2.5 et 3, entre les cas extrêmes ( $n=0.6$  et  $n=6$  vol/h). De fait, à l'échelle du bâtiment, ces simulations vérifient partiellement les résultats de (Heiselberg, 2008) : le taux de renouvellement d'air hiver, est donc, du fait des déperditions qui caractérisent l'entrée d'air extérieur froid dans le bâtiment et l'évacuation d'air intérieur, un paramètre significatif dans la détermination des besoins en chauffage du bâtiment.

Le taux de renouvellement d'air varie selon les périodes de construction ; il est plus élevé pour les logements d'avant 1975 (Kirchner, 2009). Néanmoins, ce paramètre est pris constant par la suite, à  $n=1$  vol/h, quelque soit le type de bâtiment, au regard de la difficulté à estimer, par période de construction, le taux de renouvellement d'air « type ». En effet, ce taux à l'intérieur d'une même période de construction varie énormément d'un logement à un autre. Outre les caractéristiques de ventilation du logement (type de ventilation, respect ou non des réglementations, etc.), ce rapport décrit l'importance du rôle des occupants dans



l'aération du logement, selon la disposition de ce dernier : présence d'une salle de bain, ouverture des fenêtres en période de chauffe, bouchage des gaines, etc.

- Orientation du bâtiment

L'orientation du bâtiment influe sur les apports solaires, eux-mêmes dépendant du taux de vitrage et de la disposition des fenêtres. Ce paramètre n'a été testé que sur un seul type de bâtiment (R, 71.01m<sup>2</sup> habitables, mitoyen par une façade latérale). La variation des besoins est limitée, comme en témoigne le graphique suivant :

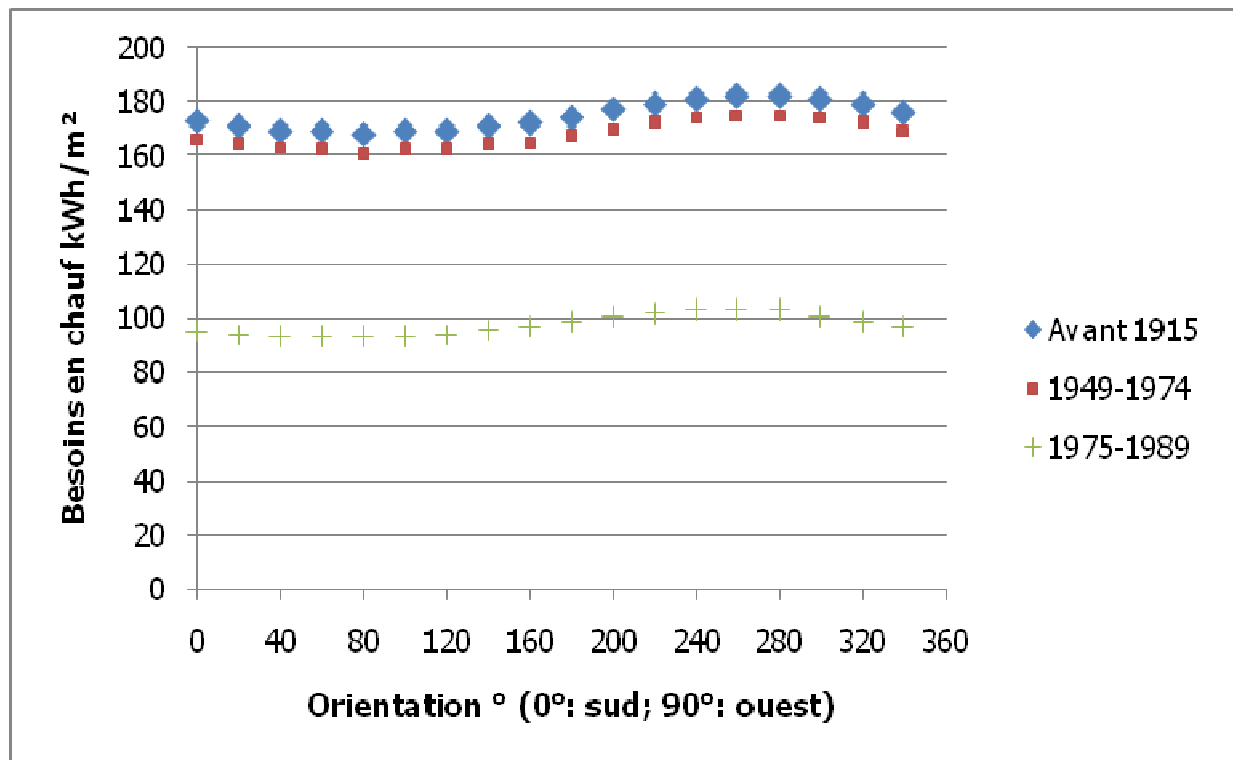


Figure 22 - Influence de l'orientation sur les besoins énergétiques

Finalement, il apparaît que le choix arbitraire d'orientation nord-sud n'influe pas ; les consommations moyennes pour chacune des périodes 1, 3 et 4 sont de 175 kWh/m<sup>2</sup>an (écart-type : 5.1 kWh/m<sup>2</sup>an), 168 kWh/m<sup>2</sup>an (écart-type : 5 kWh/m<sup>2</sup>an), 97.6 kWh/m<sup>2</sup>an (écart-type : 3.9 kWh/m<sup>2</sup>an) respectivement. Elles sont très proches des consommations calculées pour l'orientation choisie (0°) : 173, 166 et 95 kWh/m<sup>2</sup>an.

- Épaisseur de l'isolant en toiture

Le taux d'isolation en toiture a probablement été majoré pour les périodes d'avant 1975. De fait, on cherche à caractériser l'évolution des besoins en chauffage selon l'épaisseur de laine de verre en toiture. L'évolution est donnée par le graphique suivant (Figure 20).

On remarque logiquement une décroissance en 1/x des besoins en chauffage et du coefficient  $U_{\text{toit}}$ . A nouveau, on remarque que l'épaisseur de l'isolant est un paramètre dans le calcul des besoins de chauffage (et par conséquent du  $U_{\text{bât}}$ ). Ce résultat est donc à mettre en relation avec les remarques précédentes à propos des approximations de composition des parois. De fait, à l'intérieur d'une typologie, la question de la rénovation des bâtiments d'avant 1975 par une isolation de la toiture peut entraîner des variations significatives sur les besoins de chauffage. Par contre, l'isolation du toit (comme de toutes les autres parois) par

l'intérieur peut entraîner de brutales variations de température dues à une faible inertie thermique. Dès lors, l'impact sur le profil temporel de puissance appelée peut être marqué<sup>19</sup>.

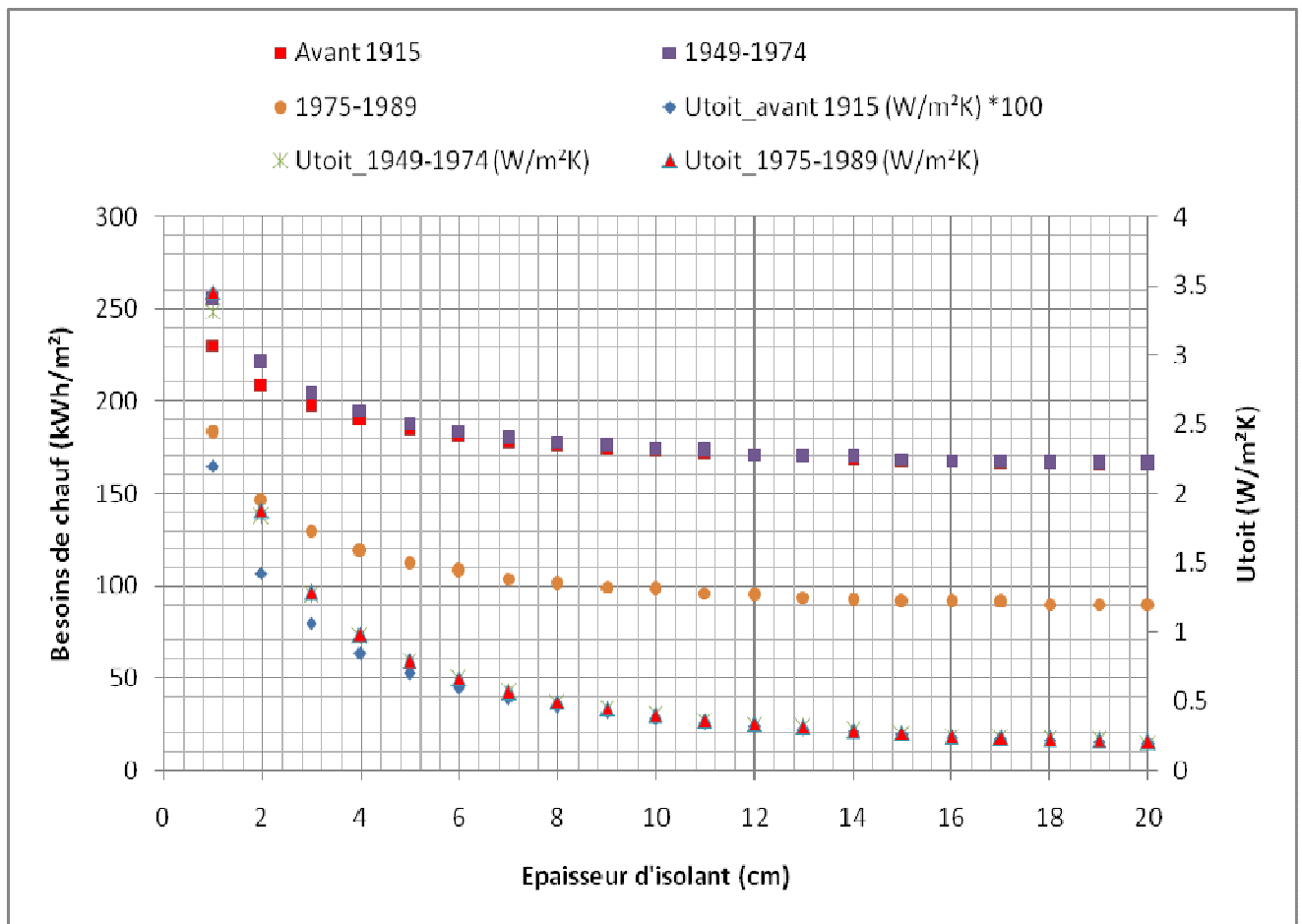


Figure 23 - Besoins de chauffage et Utoit selon l'épaisseur d'isolant

- Température de consigne

Alors que la température de consigne (température de chauffe pendant la saison de chauffage) est reconnu comme paramètre significatif, un même bâtiment (MI, R+1, 118.2m<sup>2</sup> habitables, 59.1m<sup>2</sup> au sol, une façade mitoyenne) a été simulé pour les 3 périodes de construction différentes : avant 1915, 1949-1974 et 1975-1989.

La relation linéaire entre la température de consigne et les besoins de chauffage est logiquement linéaire (graphique suivant) et la sensibilité à ce paramètre est forte. De nouveau, ce graphique montre l'influence des comportements des occupants, qui peuvent être variés au sein d'une même classe typologique.

<sup>19</sup> Ceci n'est qu'une hypothèse. Par manque de temps, les simulations et calculs nécessaires à sa validation ou son infirmation n'ont pas pu être menés.

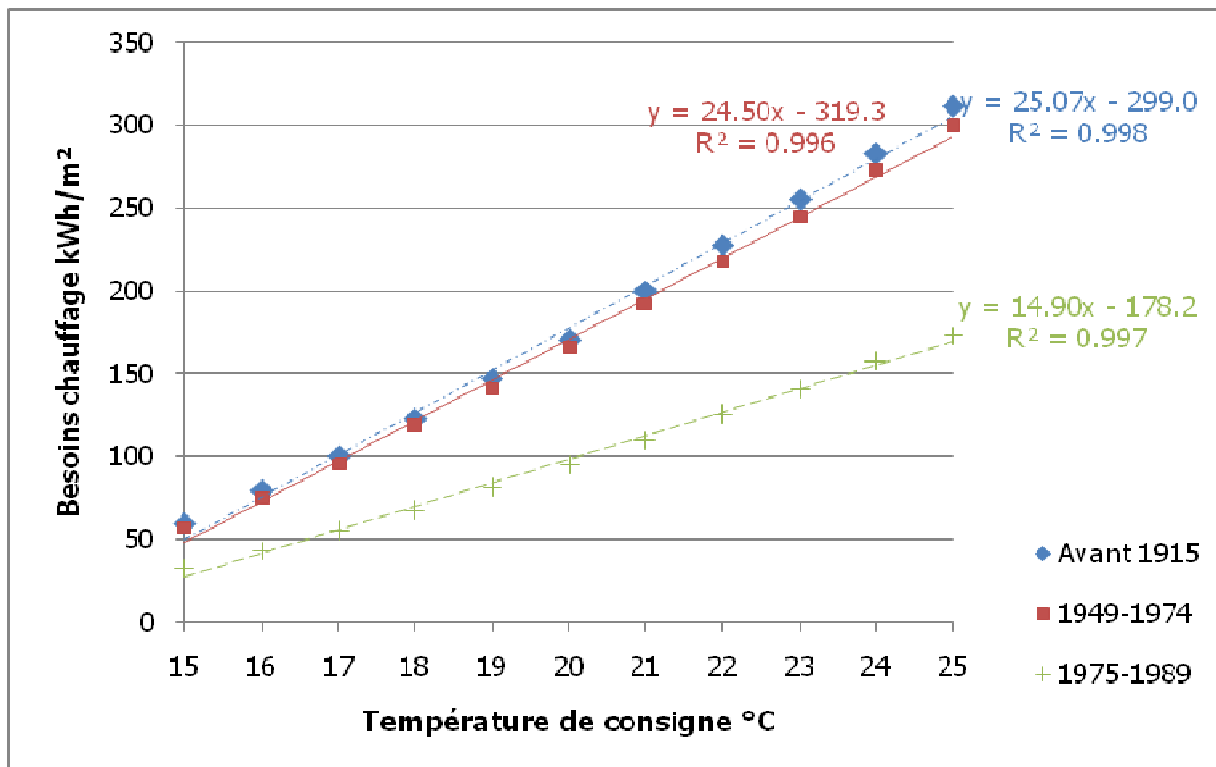


Figure 24 - Besoins de chauffage et température de consigne

- Paramètres géométriques

Les paramètres géométriques étudiés sont ramenés à la surface habitable. Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer la corrélation entre tous ces paramètres afin de limiter leur nombre.

	Ssol/Shab	Slat_ext/Shab	Surf hab	Sv/Shab
Slat_ext/Shab	0.267			
Surf hab	-0.796	-0.361		
Sv/Shab	0.267	1.000	-0.361	
Stoit/Shab	1.000	0.271	-0.798	0.271
Slat_ext/Vol	-0.125	0.921	-0.051	0.921
Vol/Shab	1.000	0.269	-0.800	0.269
Vol/Ssol	-0.964	-0.266	0.842	-0.266

	Stoit/Shab	Slat_ext/Vol	Vol/Shab
Slat_ext/Vol	-0.122		
Vol/Shab	1.000	-0.124	
Vol/Ssol	-0.964	0.113	-0.965

En effet :

- $S_v/S_{hab}$  est corrélé à  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$  puisque  $S_v=0.135*S_{lat\_ext}$ .
- $S_{toit}/S_{hab}$  est corrélé à  $S_{sol}/S_{hab}$  puisque la surface du toit et celle du sol ont la même longueur.
- $Vol/S_{hab}$  est corrélé à  $S_{sol}/S_{hab}$  puisque  $Vol=S_{sol}*H_{moy}$ .
- $Vol/S_{sol}$  est corrélé à  $S_{toit}/S_{hab}$  d'après ce qui précède.
- Les autres paramètres fortement corrélés (>0.9) découlent de ce qui précède.

Les autres paramètres ne sont pas corrélés entre eux, ce qui est cohérent d'après les géométries des bâtiments simulés. Puisqu'il y n'a pas d'homothétie dans ces configurations et que de plus, la surface mitoyenne est variable, il est logique de ne trouver qu'une faible corrélation entre eux.

Cela signifie que les paramètres à prendre en compte dans l'établissement d'un modèle statistique devront être choisis en conséquence (colinéarités entre paramètres, etc.). Ces colinéarités peuvent aussi avoir lieu avec d'autres paramètres tels les apports solaires. En effet, ceux-ci sont fortement à la surface de vitrage, même si la colinéarité semble s'estomper pour les bâtiments R+2, ainsi que pour certains bâtiments R+1. De façon générale, les apports solaires diminuent par rapport à la surface habitable. Alors que le ratio de surface vitrée par rapport à la surface latérale extérieure est pourtant constant, ces bâtiments R+2 présentent des apports solaires plus faibles par rapport aux autres configurations.

Plusieurs graphiques sont fournis en ANNEXE 7. On distingue sur ces derniers que les besoins surfaciques diminuent avec la surface habitable (même si les besoins en kWh augmentent du fait de la diminution relative des apports gratuits internes) ou le nombre de façades mitoyennes (car même si les apports solaires diminuent, la diminution du coefficient  $U_{bât}$  d'un bâtiment avec deux façades mitoyennes est prépondérante). Pour deux bâtiments R et R+1 de surface habitable très proche (donc avec des apports gratuits internes quasi identiques) avec un même  $U_{bât}$ , les besoins surfaciques sont légèrement plus faibles pour le bâtiment R+1 : cela semble principalement dû à l'augmentation des apports solaires surfaciques causée par les deux niveaux.

Toutefois, il apparaît que l'évolution diffère pour un même bâtiment R (même  $U_{bât}$ ) selon qu'il ait une ou deux façades mitoyennes : pour les bâtiments à deux façades mitoyennes, les besoins surfaciques atteignent un maximum qui correspond au bâtiment de surface au sol de 100m<sup>2</sup> puis diminuent. L'augmentation peut s'expliquer par la baisse relative des apports internes, néanmoins l'atteinte d'un maximum (augmentation puis diminution des besoins surfaciques) reste inexpliquée. Si cela n'est pas dû à des erreurs lors des simulations, alors la différenciation des bâtiments selon le nombre de façades mitoyennes serait légitime.

#### **4) Consommation énergétique finale des bâtiments**

- Eau chaude sanitaire

Tout d'abord, on notera que la consommation énergétique pour l'eau chaude sanitaire peut être calculée aisément, à partir des données de (Methenier, 2008). A partir de données de l'ADEME (2007), la consommation journalière d'eau par logement a été estimée à : (40.5\*nper + 28.5 litres, avec un coefficient de détermination de 0.985) où nper correspond au nombre d'occupants du logement. Le nombre d'occupants étant donné par logement par la BD INSEE, la consommation énergétique finale pour l'ECS a pu être déterminée par logement par la relation :

$$Q=365*m.cp.(Tb-Tr)/1000, \text{ avec}$$

Q : consommation énergétique en kWh

Cp : capacité calorifique de l'eau en Wh/(kg.K)

Tr : température du réseau estimée à 15°C

Tb : température du ballon estimée à 60°C

Les différents rendements des systèmes de chauffage (renseignés dans la BD INSEE) ont permis de préciser les consommations énergétiques primaires. Ces rendements pour différents types de chaudière selon leur âge et le combustible sont connus (ANNEXE 4). Par conséquent, les besoins énergétiques pour l'ECS ont été déterminés par logement et par

bâtiment (addition des consommations énergétiques primaires pour l'ECS par logement pour les IC), sans prise en compte d'une quelconque consommation d'ECS propre à l'IC.

- Climatisation :

Les besoins de climatisation sont négligeables étant donné que la température de climatisation a sciemment été fixée à 27°C. Dans le cas du bâti résidentiel, il n'est pas nécessaire de la prendre en compte, contrairement à l'étude du bâti tertiaire ou industriel. Dans le cadre des simulations réalisées, les besoins en climatisation s'échelonnent entre 1 et 6 kWh/m<sup>2</sup> ; Au maximum, la climatisation représente 7% des besoins surfaciques en chauffage (MI de 59m<sup>2</sup>).

- Chauffage

A partir des simulations réalisées, un modèle statistique à partir des différents paramètres thermiques et géométriques a été établi. Ce modèle vise à modéliser les besoins des bâtiments simulés et cherche à qualifier la sensibilité aux paramètres géométriques inter- et intra-typologies. Il est établi par analyse de variance, qui repose sur la décomposition de la variance et utilise le mécanisme du F de Fisher.

Tout d'abord, il est évident que c'est bien une combinaison de ces paramètres qui prévaut. Les modèles fondés uniquement sur des paramètres géométriques ou thermiques ne rendent pas compte des résultats des simulations.

- Des approximations quant aux paramètres variables/constants, ainsi que la négligence de covariances ont initialement entraîné des biais qui ont tenté d'être corrigés par la suite.
- Pour des raisons de colinéarité entre variables, un choix doit être fait entre les paramètres utilisés. Par exemple, le ratio  $S_v/S_{hab}$  étant colinéaire à  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$  (et aux apports solaires par ailleurs), seul  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$  est utilisé dans l'établissement d'un modèle.
- Initialement le ratio  $S_{ext\_tot}/S_{hab}$  avait été utilisé ( $S_{ext\_tot}$ =surface totale en contact avec l'extérieur) : or il s'est avéré nécessaire de séparer  $S_{toit}/S_{hab}$  et  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$  compte-tenu des différences de  $U_{toit}$  et  $U_m$ . Utiliser  $S_{ext\_tot}$  revient à considérer les mêmes caractéristiques thermiques pour le toit et les parois latérales, ce qui est bien sûr une erreur.
- La pondération initialement prévue n'a finalement pas été utilisée du fait de la taille de l'échantillon. Cette pondération s'obtenait par individu par le ratio entre la fréquence de la classe de surface de l'individu dans la BD INSEE et celle de l'échantillon.

Le niveau de confiance choisi est de 95%.

### Modèle n°1 :

Une première analyse de variance a permis l'établissement d'un premier modèle, dont les paramètres sont en vert. La période de construction est un paramètre qualitatif puisque les valeurs prises sont 1, 3 et 4.

Analysis of Variance for BC kWh/m<sup>2</sup>, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Ssol/Shab	1	2354.5	4.7	4.7	3.19	0.082
Slat_ext/Shab	1	5172.7	5567.6	5567.6	<b>3774.30</b>	<b>0.000</b>
Stoit/Shab	1	307.7	6.9	6.9	4.65	0.037
Vol/Shab	1	0.9	2.3	2.3	1.53	<b>0.223</b>
Agbruts W/m <sup>2</sup>	1	174.2	105.1	105.1	<b>71.25</b>	<b>0.000</b>
periode_cons	2	43522.0	19.9	10.0	6.75	0.003
periode_cons*Ssol/Shab	2	117.3	3.2	1.6	1.10	<b>0.343</b>
periode_cons*Stoit/Shab	2	158.6	3.2	1.6	1.10	<b>0.343</b>
periode_cons*Slat_ext/Shab	2	698.3	698.3	349.1	<b>236.69</b>	<b>0.000</b>
Error	40	59.0	59.0	1.5		
Total	53	52565.3				

S = 1.21455    R-Sq = 99.89%    R-Sq(adj) = 99.85%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-154.3	165.3	-0.93	0.356
Ssol/Shab	242.3	135.8	1.78	0.082
Slat_ext/Sha	63.317	1.031	61.44	0.000
Stoit/Shab	-266.4	123.5	-2.16	0.037
Vol/Shab	73.01	58.99	1.24	0.223
Agbruts W/m <sup>2</sup>	-3.1969	0.3787	-8.44	0.000
Ssol/Shab*periode_cons				
1	-63.2	100.6	-0.63	0.534
3	-85.9	100.6	-0.85	0.398
Stoit/Shab*periode_cons				
1	65.84	98.68	0.67	0.508
3	80.81	98.68	0.82	0.418
Slat_ext/Sha*periode_cons				
1	16.051	1.452	11.06	0.000
3	15.677	1.452	10.80	0.000

#### Unusual Observations for BC kWh/m2

Obs	BC kWh/m2	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	148.000	150.615	0.419	-2.615	-2.29 R
33	145.000	147.368	0.419	-2.368	-2.08 R
51	83.000	86.564	0.421	-3.564	-3.13 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Le coefficient de détermination est plutôt bon ( $R^2=0.9989$ ), avec déviation de 1.21455. Les paramètres les plus significatifs sont  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$ ,  $periode\_cons*S_{lat\_ext}/S_{hab}$  et les apports internes surfaciques (Agbruts W/m<sup>2</sup>). Par contre, la probabilité d'incertitude sur plusieurs autres variables est élevée (en orange). La probabilité d'incertitude sur la constante est aussi élevée, ce qui signifie que le modèle n'en dépend pas, ce qui est positif.

Les coefficients des paramètres les plus significatifs sont donnés dans la colonne « Coef » :

- Le coefficient pour  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$  est positif, ce qui semble cohérent (voir Figure 32) pour les raisons données en IV/ 3).
- Le coefficient pour  $S_{toit}/S_{hab}$  est quant à lui négatif : les besoins diminuent en effet lorsque ce paramètre augmente. Il en est de même pour  $S_{toit}/S_{hab} * periode\_cons$ , ce qui est étrange puisque cela est en désaccord avec les résultats des simulations. Ce signe négatif pourrait être le résultat d'une covariation négligée. Cependant, elle n'a pas clairement été identifiée.
- Les apports internes surfaciques ont aussi un coefficient négatif : les apports étant constants en valeur absolue, ils diminuent avec la surface habitable ; comme les besoins surfaciques diminuent globalement lorsque  $S_{hab}$  augmente, le signe du coefficient est logique.
- Alors que les coefficients pour  $S_{lat\_ext}/S_{hab} * periode\_cons$  sont constants pour les périodes 1 et 3, ils diffèrent pour  $S_{toit}/S_{hab} * periode\_cons$ .

Les résidus (ou  $Besoins_{prédits} - Besoins_{calculés}$ ) sont représentés sur le graphique ci-dessus. Comme précisé en bleu ci-dessus, on remarque quelques valeurs qui se démarquent (entourées en rouge). Ces résidus correspondent exclusivement aux bâtiments R+1, quelle que soit la période. Il y a des biais dans ce modèle qui entraîne la non prise en compte de la

sensibilité des bâtiments R+1 de l'échantillon. Ce modèle est donc à perfectionner : l'option choisie est d'intégrer les différents coefficients de transmission  $U_i$ .

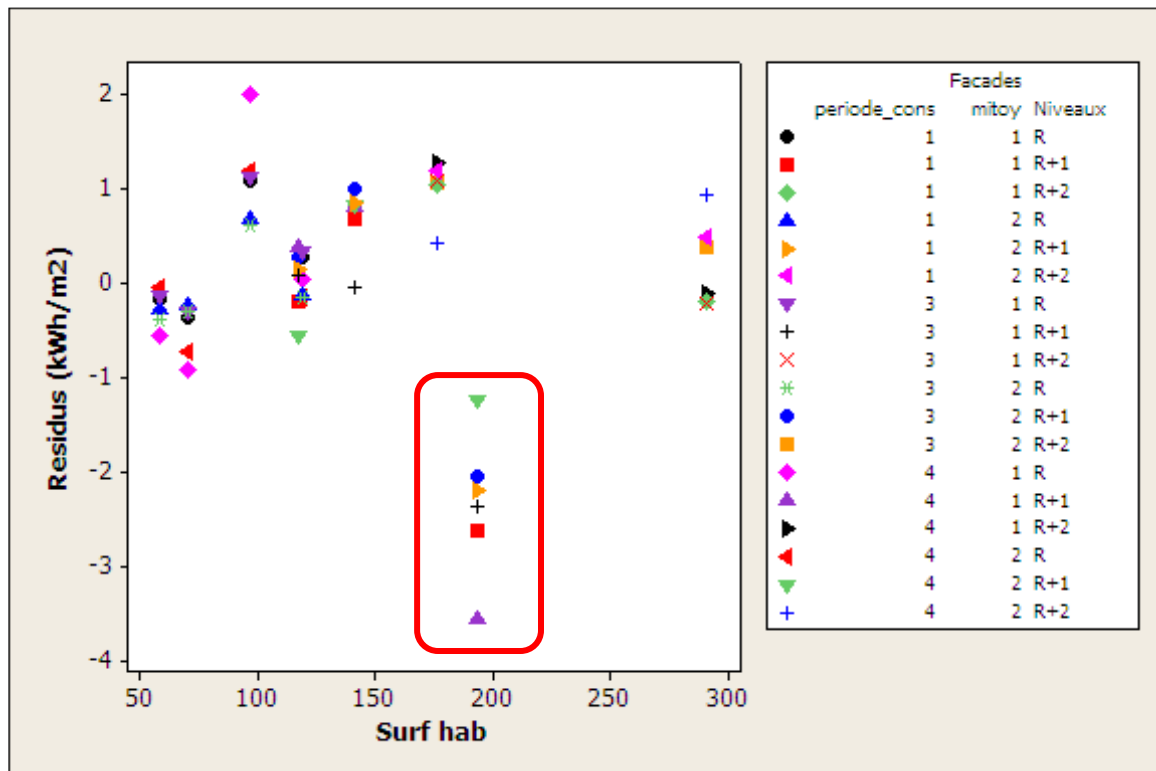


Figure 25 - Résidus du 1<sup>er</sup> modèle selon la surface habitable

Modèle n°2 :

La même analyse est menée avec de nouveaux paramètres mêlant plus précisément données thermiques et géométriques. Le coefficient de détermination est correct et tous les paramètres semblent significatifs (surtout  $U_{lat\_ext} S_{lat\_ext}/S_{hab}$  et  $U_{toit} S_{toit}/S_{hab}$ ) et ont une probabilité d'incertitude très faible.

Analysis of Variance for BC kWh/m2, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
UtoitStoit/Shab	1	379	596	596	116.81	0.000
UplSsol/Shab	1	30793	50	50	9.71	0.003
UvSv/Shab	1	7429	68	68	13.37	0.001
UmSlat_ext/Shab	1	13380	12669	12669	2481.14	0.000
Agbruts W/m <sup>2</sup>	1	339	339	339	66.40	0.000
Error	48	245	245	5		
Total	53	52565				

S = 2.25969 R-Sq = 99.53% R-Sq(adj) = 99.49%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	52.742	1.915	27.54	0.000
UtoitStoit/S	82.063	7.593	10.81	0.000
UplSsol/Shab	-1.6001	0.5136	-3.12	0.003
UvSv/Shab	236.06	64.57	3.66	0.001
UmSlat_ext/S	27.5103	0.5523	49.81	0.000
Agbruts W/m <sup>2</sup>	-2.8947	0.3552	-8.15	0.000

Unusual Observations for BC kWh/m2

Obs	BC kWh/m2	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
6	80.000	84.684	0.946	-4.684	-2.28 R
26	154.000	149.274	0.546	4.726	2.16 R
29	134.000	128.986	0.601	5.014	2.30 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Le coefficient S est élevé, ce témoigne d'une grande dispersion des résidus, comme en atteste la Figure 26. On remarque dans ce cas que la sensibilité des bâtiments à deux façades mitoyennes est mal prise en compte.

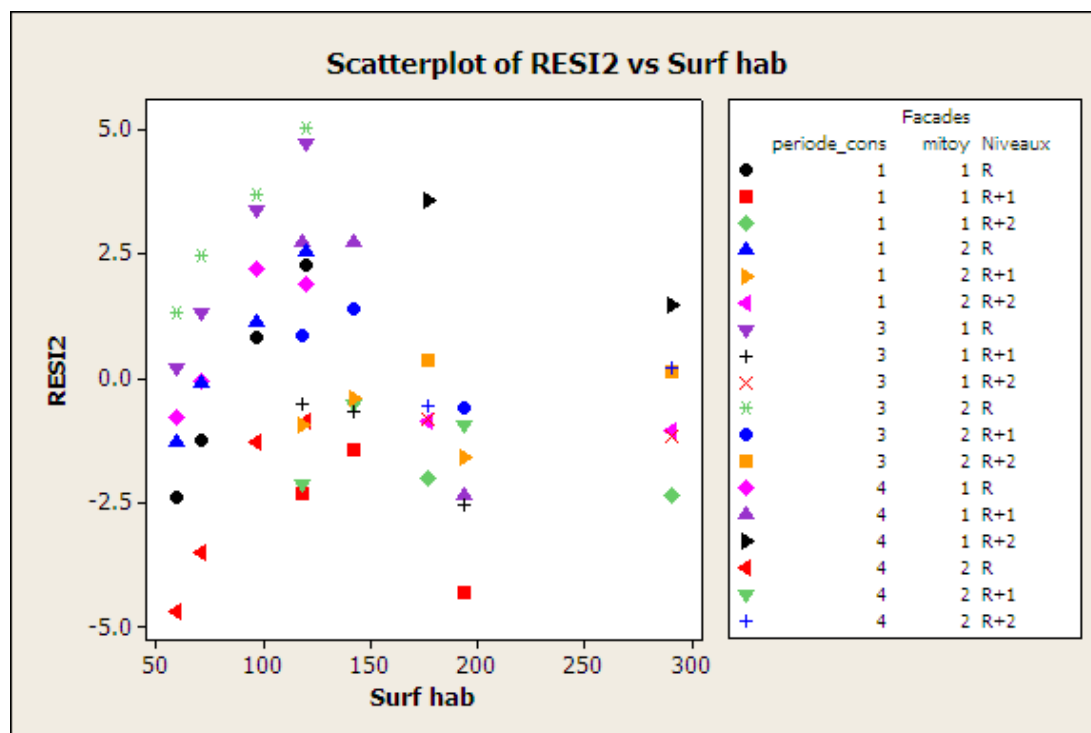


Figure 26 - Résidus du 2<sup>nd</sup> modèle selon Shab

En procédant à la même analyse par classe d'âge, on remarque logiquement cette même dispersion qui n'est donc pas inhérente à une période particulière.

Un dernier modèle statistique a tenté d'être établi pour une approche plus physique à partir des déperditions par les parois et la ventilation, les apports internes et les apports solaires. En utilisant une régression multiple, il s'agit donc d'expliquer les valeurs prises par la variable endogène (besoins surfaciques en chauffage) à partir de deux variables explicatives : le coefficient de déperditions  $C_d$  et les apports gratuits totaux  $AG_{tot}$ , ramenés à la surface habitable.

La tentative s'est révélée infructueuse puisque le coefficient de détermination  $R^2$  est faible. De fait, même si l'approche physique semble intéressante, le modèle statistique établi n'apparaît pas pertinente. Toutefois, l'analyse n'a pu être reconduite par manque de temps.

**Dans les différents modèles statistiques, tous les paramètres variables ou constants ont a priori été pris en compte. Quelques soient ces modèles statistiques, une sensibilité à certains individus trans-typologies n'est pas prise en compte. Il reste des biais non identifiés dans l'étude, qui peuvent s'expliquer par des phénomènes physiques mal compris, comme l'effet du sol dans les simulations. Ceux-ci ne permettent donc pas en l'état la compréhension précise de la sensibilité des besoins de chauffage aux différents paramètres dimensionnels. De plus, les proportions de cette sensibilité ne peuvent pas à présent être détaillées précisément. En résumé, la sensibilité des besoins de**

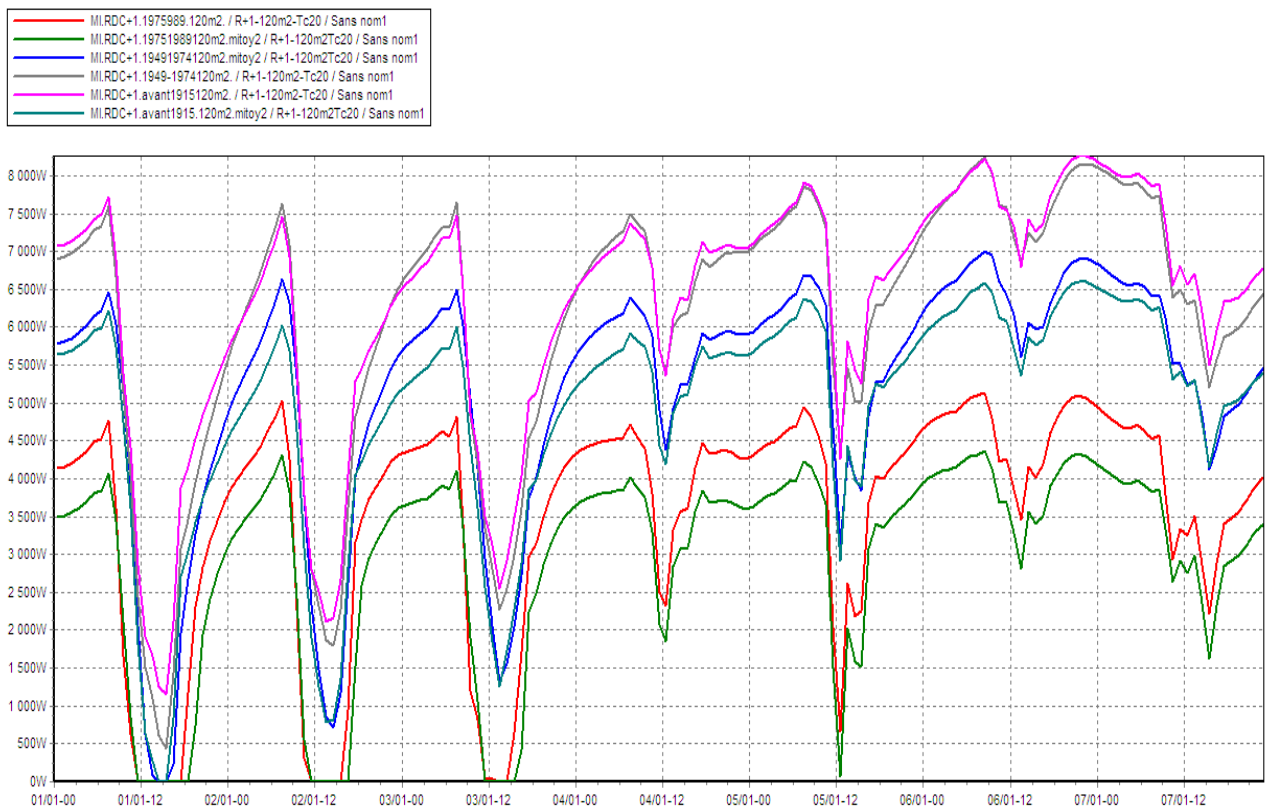


**chauffage au paramètre  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$  est importante à la fois entre et à l'intérieur d'une typologie de bâtiments. La sensibilité aux autres paramètres dimensionnels semble quant à elle constante.**

### 5) Profils de puissance appelée

Il s'agit ici de pouvoir comparer les modèles sur le comportement thermique des bâtiments de la zone étudiée avec d'autres indicateurs que les besoins de chauffage. Néanmoins, les profils temporels de puissance appelée n'ont pu être que brièvement étudiés. Quelques résultats intéressants apparaissent tout de même entre les typologies.

Les deux graphiques suivants présentent les profils de puissance appelée pour la semaine la plus froide de l'année, en l'occurrence la première. Pour la Figure 27, il s'agit d'une MI de 120m<sup>2</sup> R et d'une MI 100m<sup>2</sup> R pour la Figure 28. Les six courbes présentent donc le croisement des paramètres « Nombre de façades mitoyennes » et « Période de construction ».



**Figure 27 - Profil de puissance des bâtiments R 120m<sup>2</sup> selon la période d'âge et le nombre de façades mitoyennes**

Pour ce graphique, voici la correspondance entre couleur et configuration :

- Rose : période 1, une façade mitoyenne ;
- Turquoise : période 1, deux façades mitoyennes ;
- Gris : période 3, une façade mitoyenne ;
- Bleu : période 3, deux façades mitoyennes ;
- Rouge : période 4, une façade mitoyenne ;

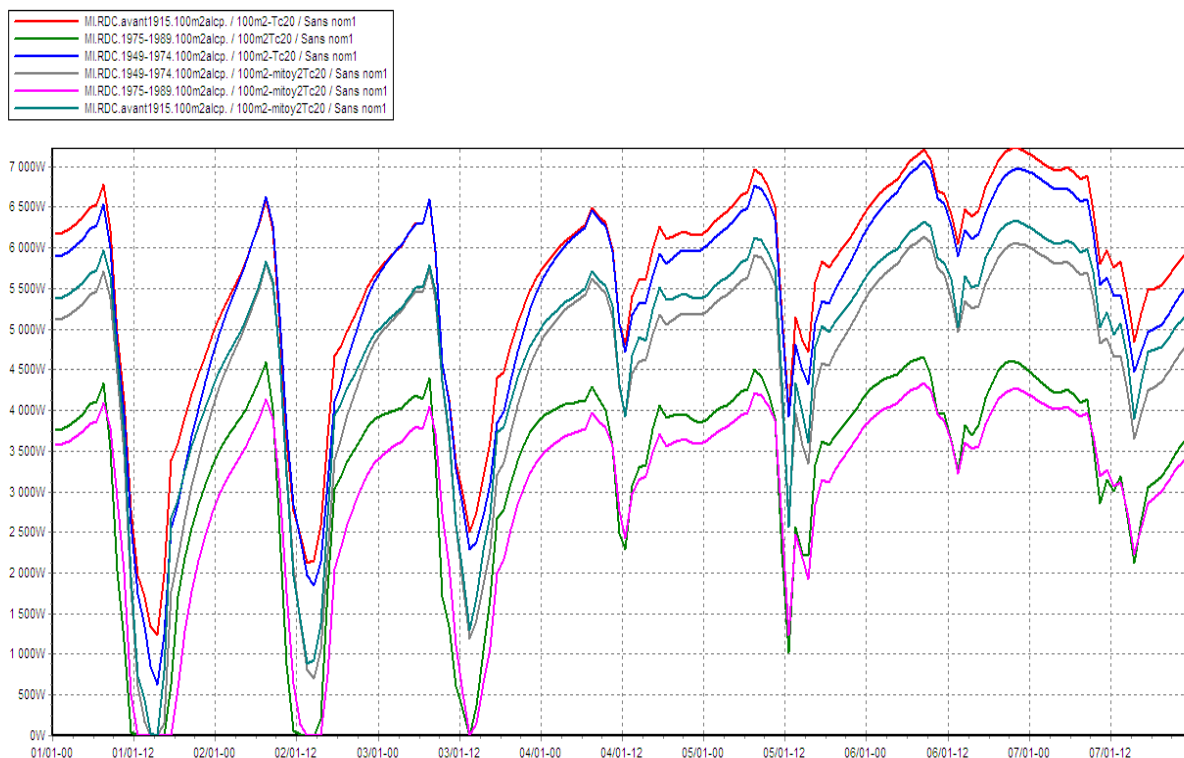
- Vert : période 4, deux façades mitoyennes.

Quelques soient les configurations retenues, on observe des différences entre les profils quotidiens. Ces variations sont dues à la température extérieure et aux apports solaires principalement. Néanmoins, les pics de puissance sont logiquement atteints aux mêmes heures. Entre les bâtiments mitoyens par une façade (entre les périodes 1 et 3 d'un côté et 4 de l'autre), le  $\Delta P$  est quasiment constant à 3000W (ce qui entraîne une évolution du ratio des puissances).

Les évolutions des profils pour la période 4 sont similaires, avec un  $\Delta P$  de l'ordre de 500W, qui est maintenu quasiment constant sur toute la période. Au milieu de la journée, il arrive que les apports solaires soit suffisants pour maintenir la température intérieure, puisque  $P=0$ .

Les profils des périodes 1 et 3 avec une façade mitoyenne sont très majoritairement superposées ; toutefois, on remarque un décrochage au milieu de chaque journée (qui atteint jusque 1000W), décrochage qui pourrait s'expliquer par une meilleure inertie du bâtiment de la période 1, et donc par des variations de température moins importantes que pour le bâtiment de la période 3.

L'influence de la mitoyenneté est réelle ici pour les bâtiments des périodes 1 et 3. Alors que leur profils de puissance appelée sont superposés dans la configuration « une façade mitoyenne », la différence entre les périodes 1 et 3 est plus marquée ( $0W < \Delta P < 500W$ ) pour la configuration « deux façades mitoyennes ». Ceci peut être partiellement mis sur le compte de l'inertie thermique du bâtiment.



**Figure 28 - Profil de puissance des bâtiments R 100m<sup>2</sup> selon la période d'âge et le nombre de façades mitoyennes**

Les correspondances entre couleur et configuration sont les suivantes :

- Rouge : période 1, une façade mitoyenne ;
- Turquoise : période 1, deux façades mitoyennes ;

- Bleu : période 3, une façade mitoyenne ;
- Gris : période 3, deux façades mitoyennes ;
- Vert : période 4, une façade mitoyenne ;
- Rose : période 4, deux façades mitoyennes.

Pour les bâtiments à une façade mitoyenne, l'évolution est similaire à celle en Figure 27. L'écart  $\Delta P$  est diminué à 2000W environ (soit une diminution de 33% pour une diminution de surface habitable de 16.7%). La diminution proportionnelle de la puissance appelée est plus marquée pour les bâtiments des périodes 1 et 3 que de la période 4. Il apparaît donc une sensibilité de la puissance appelée à la surface habitable plus importante pour les bâtiments anciens. Cependant la variation  $\Delta P$  est moins marquée pour les bâtiments anciens de 100m<sup>2</sup> que ceux de 120m<sup>2</sup>.

**En conclusion, malgré des résultats limités, une sensibilité des profils de puissance à la surface habitable (au minimum) apparaissent à la fois entre et à l'intérieur des typologies. Néanmoins, le faible nombre de résultats ne permet de mesurer l'amplitude de cette sensibilité.**

# VI/ Synthèse : discussion et limites de l'approche

## 1) Discussion

Les résultats issus des simulations (besoins de chauffage et apports solaires bruts) semblent être cohérents entre eux. Comme les caractéristiques thermiques des périodes étudiées ont été plutôt vues à la hausse, les besoins sont plus faibles que ceux réels par tranche d'âge.

Les conclusions des analyses statistiques encore approximatives et ne permettent de préciser la sensibilité des besoins de chauffage et des profils de puissance aux paramètres. Néanmoins, cette sensibilité semble réelle à la fois entre et à l'intérieur des classes typologiques. Il en est de même pour différents paramètres tels la température de consigne, taux de renouvellement d'air en hiver, épaisseur d'isolant en toiture, etc. Toutefois, il apparaît que ces résultats s'accordent avec ceux obtenus par l'analyse bibliographique, à l'échelle du bâtiment. Même si les paramètres dimensionnels ont été étudiés plus en détail que d'autres variables, cela ne présume en rien de leur importance relative.

Les points méthodologiques soulevés sur l'importance de l'environnement bâti (question du changement d'échelle) sont confirmés par les travaux de (Steeemers, 2008) et (Baker, Ratti et Steemers, 2005). Pour autant, aucun résultat propre à la question de la mitoyenneté n'a été trouvé dans la littérature étudiée.

## 2) Limites de l'approche et du thème de stage

La principale et conséquente limite de ce stage reste l'indisponibilité des données nécessaires à la modélisation thermique du quartier. En effet, comme l'avaient souligné M. Messerli et K. Bernal les années précédentes, la collecte d'informations reste difficile pour des questions administratives et juridiques. L'obtention du fichier FILOCOM, base de données spatialisées, – par ailleurs utilisé dans d'autres modèles nantais – pourrait permettre de faciliter l'étude de la modélisation thermique du quartier par typologies de bâtiments.

A titre d'exemple, la BD INSEE a été obtenue mi juin et la BD PARCELLAIRE© fin juillet. Traiter alors statistiquement et spatialement une telle quantité d'informations et créer un modèle simplifié en deux mois relève de la gageure.

De fait, l'enchaînement des points méthodologiques soulevés manque de clarté, dû aux remaniements fréquents du planning de travail.

La question des outils se pose dans la méthodologie et l'obtention de résultats intermédiaires. En effet, les simulations systématiques ont été réalisées avec le logiciel Pleiades+COMFIE. Ces *runs* systématiques ont entraîné des incertitudes/erreurs sur les paramètres géométriques d'entrée. De fait, il est nécessaire de réfléchir en amont à la taille de l'échantillon d'étude : il est aisé de simuler jusqu'à 10-15 bâtiments sous Pleiades+COMFIE, mais un nombre supérieur de bâtiments à étudier élève le risque d'incertitude. De plus, si les bâtiments simulés sont tous différents géométriquement, Pleiades+COMFIE est un outil intéressant, même si l'effet de certains phénomènes physiques sur les résultats finaux restent suspects (effet du sol notamment). Par contre, pour la

simulation systématique de mêmes bâtiments avec seulement une ou plusieurs variables, il est nécessaire de travailler en traitement par lots (*batch processing*) afin de limiter les erreurs/incertitudes humaines pour chaque bâtiment.

Ce stage a de plus mis en exergue les difficultés du travail en groupe. En effet, alors que plusieurs stages étaient combinés à une thèse de doctorat, il s'agissait de travailler les uns et les autres de façon à s'auto-alimenter en données et résultats. Ce travail collectif a plutôt mal fonctionné, dû à un manque de temps et de communication.

En effet, la méconnaissance des activités en cours des autres stagiaires, les choix d'étude et l'aménagement du planning de chacun ont entraîné un réel problème de gestion du temps de travail restant et d'avancement. A titre d'exemple, les résultats des analyses de sensibilité nécessaires à la création de typologies de bâtiments n'étaient pas disponibles début août. Dès lors, des analyses de sensibilité partielles ont été menées lors de ce stage. Le choix des paramètres testés s'est fait de façon arbitraire. De fait, un certain nombre de paramètres apparaissant comme significatifs dans la littérature ont été pris par défaut (température de consigne, épaisseur de l'isolant,...). De plus, les étapes postérieures à l'étape 5 ont été considérablement retardées voire non réalisées. Enfin, alors que les simulations thermiques dynamiques des bâtiments types étaient prévues dans le cadre d'un autre stage, elles ont finalement été réalisées en grande partie dans le cadre de ce stage, avec un cœur de calcul différent de celui prévu. Finalement, les allers-retours de données et résultats qui étaient prévus entre les 3 stages et le doctorat n'ont, dans mon cas, pas eu lieu de façon suffisante. De fait, certains aspects de la problématique, comme une réflexion sur les paramètres significatifs à l'échelle du quartier dans la modélisation énergétique, n'ont pas été traités dans le cadre de ce projet.

Pour la suite, pour l'étude thermique des bâtiments d'un territoire nantais, il serait nécessaire d'établir un échantillon de bâtiments à l'IRSTV avec des historiens de l'architecture, architectes, ingénieurs et sociologues, économistes de la construction, afin de pouvoir mener des études sur la ville de Nantes ou un quartier sans avoir à prendre (beaucoup) de temps à la collecte de données – d'ailleurs très approximatives – sur des bâtiments des typologies initiales. Comme les STD l'ont montré, l'influence de la composition des parois est significative. De fait, avoir des données plus claires sur le sujet affinerait certainement les résultats (en les rendant plus proches de la réalité), ce qui simplifierait la comparaison de modèles.

## Bibliographie

1. ATELIER PARISIEN D'URBANISME (2007), Consommations d'énergie et émissions de GES liées au chauffage des résidences principales parisiennes.
2. BAKER N., STEEMERS K. (1996), LT Method 3.0 - a strategic energy-design tool for Southern Europe, *Energy and Buildings*, 23, 251-256.
3. BAKER N., STEEMERS K., RATTI C. (2005), Energy consumption and urban texture, *Energy and Buildings*, 37.
4. BERNAL K. V. (2007), *Evaluation de la consommation énergétique, à l'échelle du fragment urbain*, rapport de stage de master STEU, Ecole des Mines de Nantes.
5. BERRY M. P. (1999), *Systèmes d'information géographique - dossier documentaire*, DGUHC et IGN.
6. BORDES-PAGES E. (1995), Référentiel de densités et de formes urbaines, IAURIF.
7. BOURGES B., LACARRIERE B. (2009), Simplified implementation of energy certificates - Application to the social housing.
8. BOUYER J. (2009), *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*, thèse de doctorat, CERMA, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.
9. BOZONNET E. (2005), *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon*, thèse de doctorat, Université de La Rochelle.
10. BROWNSWORD R. A., FLEMING P. D., POWELL J. C., PEARSALL N. (2005). Sustainable cities - modelling urban energy supply and demand. *Applied Energy*, 82, 167-180.
11. CALDERA M., CORGNATI F. M., FILIPI M. (2008), Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings, *Energy and Buildings*, 40, 1972-1983.
12. CHAN K., SALTELLI A., TARANTOLA S. (1997), Sensitivity analysis of model output: variance-based methods make the difference, *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 261-268.
13. CSTB, ADEME (2006), *Comparaison internationale bâtiment et énergie*, Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Energie dans le Bâtiment.
14. CURCI G. (2000), Le parc de logements à travers ses fichiers fiscaux, Note de synthèse du Service Economie et Statistique, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement.
15. FIRTH S.K., LOMAS K. J., WRIGHT A. J. (2010), Targeting household energy efficiency measures using sensitivity analysis. *Building research and information*, 38, 25-41.
16. GADSDEN S. J., RYLATT R. M., LOMAS K. J. (2003), Methods of predicting urban domestic energy demand with reduced datasets: a review and a new GIS-based approach, *Building Serv. Eng. Res. Technol.*, 24, 93-102.
17. GRAULIERE P. (2007). *Typologie des bâtiments d'habitation en France - Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique*, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer.
18. 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, 1426-1436.
19. HEISELBERG P., BROHUS H., RASMUSSEN H., THOMAS S., HESSELHOLT A., SEINRE E (2009), Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings, *Renewable Energy*, 34, 2030-2036.

20. HOLTIER S., STEADMAN J. P., SMITH M. G. (2000), Three-dimensional representation of urban built form in a GIS, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27, 51-72.
21. HOUDANT N., SCHRAM J. (2009), ENERTER: a tool to simulate housing energy consumption, ECEEE 2009 Summer study, Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably.
22. 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, 39-49.
23. KAVGIC M., MAVROGIANNI A., MUMOVIC D., SUMMERFIELD A., STEVANOVIC Z., DJUROVIC-PETROVIC M. (2010), A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector, *Building and Environment*, 45, 1683-1697.
24. KIRCHNER S., RAMALHO O., LUCAS J-P., LIBERON J. (2009), Etat de la ventilation dans le parc de logements français, CSTB, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur.
25. MAIZIA M., SÈZE C, BERGE S., TELLER J., REITER S., MÉNARD R. (2006), Energy requirements of characteristic urban blocks.
26. MAÏZIA M., TRAISNEL J. (2005), Analyse et modélisation des comportements Transport-Habitat-Localisations Rapport 3, ETHEL, 148 p.
27. MAÏZIA M., TRAISNEL J. (2005), Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL Rapport 2, ETHEL, 148 p.
28. MARCHAL J., LAGANDRE E. (2008), *Modélisation des performances thermiques du parc de logements - février 2008*, ANAH.
29. 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*, Eleventh International IBPSA Conference, Scotland.
30. METHENIER A. (2008), Determination of residential heat demand "hot spot" to provide cost effective renewable heating energy options in Baden-Württemberg, rapport de stage de master STEU, EIFER.
31. MOUILLART M. (Observatoire de l'Habitat Existant) (2008), Les marchés de l'entretien-amélioration, ANAH.
32. MUSY M., RAMOS F., SIRET D., MOREAU G., MARENNE C. (2004), Développement d'un SIG 3D dédié au diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments, *Association Universitaire de Génie Civil*, 8.
33. NEU B. (2008), Recensement et analyse des données énergétiques sur le territoire de l'Ile de Nantes, rapport de stage de master STEU, CERMA.
34. NUSS S. (2002), Les consommations d'énergie des bâtiments existants, COSTIC, rapport de stage de master, ENSAIS.
35. PÉREZ-LOMBARD L., ORTIZ J., POUT C. (2008), A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, 40, 394-398.
36. POEL B., VAN CRUECHTE G., BALARAS C.A. (2007), Energy performance assessment of existing dwellings, *Energy and Buildings*, 39, 393-403.
37. RIVAT G. (2005). Réalisation d'un outil de communication basé sur les SIG 3D pour la représentation des caractéristiques des bâtiments en vue d'une utilisation dans la phase opérationnelle de l'OPATB Île de Nantes, rapport de stage de master SIG et gestion de l'espace, CERMA.
38. SALTELLI A., CHAN K, SCOTT E. M. (Eds) (2000), *Sensitivity Analysis*, London, J.Wiley.
39. SANCHEZ DE LA FLOR S., DOMINGUEZ S. A. (2004), Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings, *Energy and Buildings*, 36, 403-413.

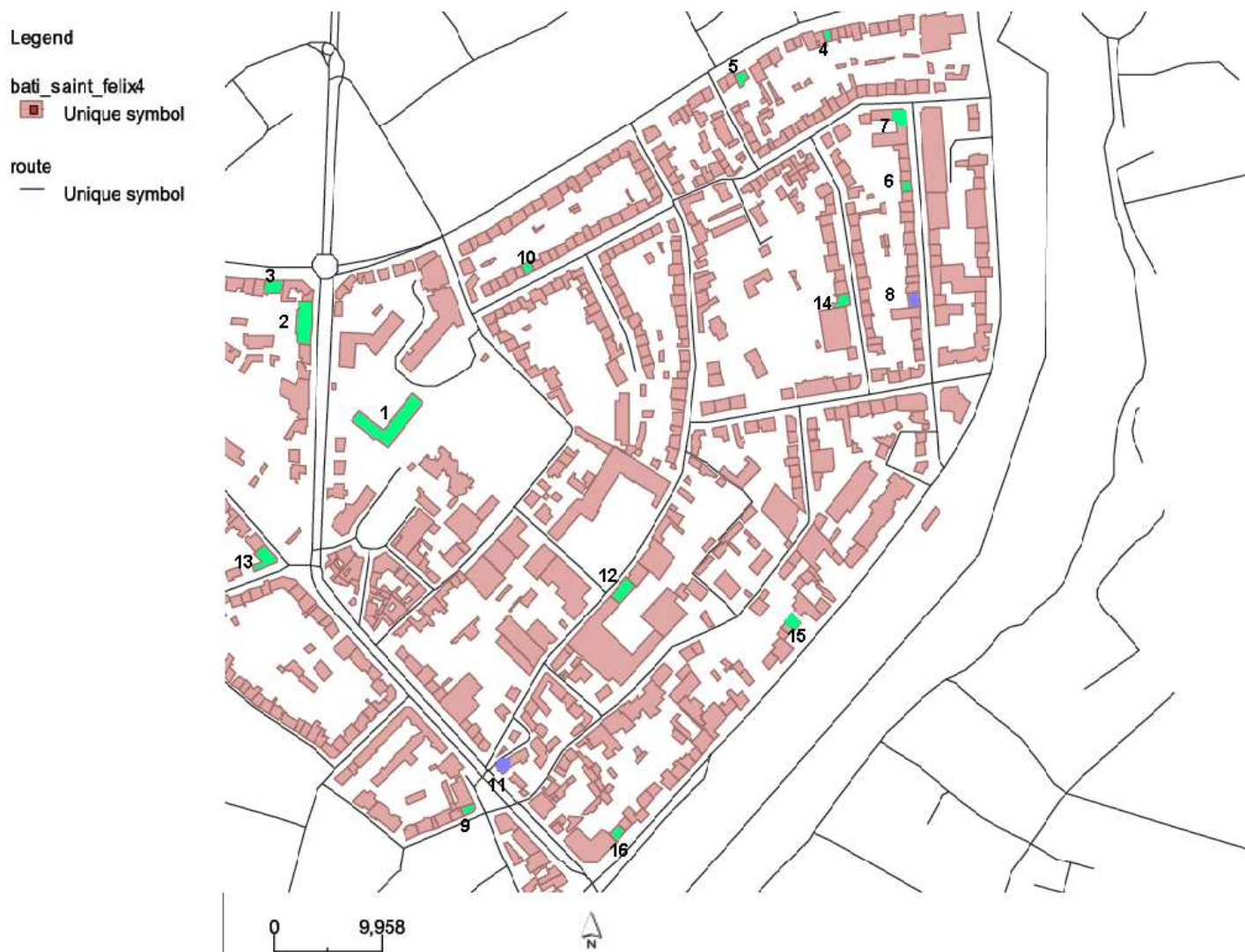
40. SCHILLING D. (1984), Formes urbaines et consommation d'énergie, *METROPOLIS*, 88-96.
41. SCHILLING D. (1986), Forme urbaine et énergie : étude de la répartition des consommations à Strasbourg, Actes du Colloque « Conception des formes urbaines et contrôle énergétique, Nantes, CERMA, 63-94.
42. SHIMODA Y., FUJII T., MORIKAWA T., MIZUNO M. (2004), Residential end-use energy simulation at city-scale, *Building and Environment*, 39, 959-967.
43. SHIMODA Y., YAMAGUCHI Y., MIZUNO M. (2007), Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management, *Energy and Buildings*, 39, 580-592.
44. SOBOL I. M., KUCHERENKO S. S. (2000), Global sensitivity indices for non linear mathematic models. Review, *Wilmott Magazine*.
45. STEEMERS K. (2003), Energy and the city: density, buildings and transport, *Energy and Buildings*, 35, 3-14.
46. 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, 1820-1833.
47. THIERS, S. (2008), *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
48. VEY T. (2007), Caractérisation de deux quartiers de la ville d'Ettlingen pour la détermination de systèmes de chauffages optimaux, rapport de stage de master STEU, EIFER.



# Annexes

## ANNEXE 1 : Etude de terrain

Localisation des 12 bâtiments, a priori représentatifs d'une période, retenus. Ces bâtiments ne serviront finalement pas à l'étude (particulièrement à la phase d'affectation, par manque de temps).



## ANNEXE 2 : Caractéristiques morphologiques et architecturales des bâtiments par période de construction

Avant 1915 : principalement maisons individuelles; Immeubles bourgeois devenus collectifs depuis; 2 périodes non étanches: construction avec matériaux locaux puis début des matériaux manufacturés; bâti ancien en granit ou calcaire; apparition des matériaux industriels début XX<sup>ème</sup> (parpaings de mâchefer, béton, mortier ciment, brique, fer).

Logement individuel	Logement collectif
<p>Maison bourgeoise (isolée, RDC+1, 3.3m de hauteur sous plafond); maison de bourg (RDC+1, mitoyen, 3m); villa éclectique (RDC+2, isolé, 2.7m); pavillon de banlieue (RDC+1, en bande, 2.7m).</p> <p>Murs : matériaux locaux dominants (e: entre 30 et 50cm) et apparition de matériaux industriels.</p> <p>Plancher : dallage sur terre plein non isolé; plancher bois.</p> <p>Toiture : pente et charpente bois; ardoises. Plancher haut : plâtre sur lattis. Isolation sous rampant mise en œuvre a posteriori.</p> <p>Ouvertures : bois; simple vitrage (parfois double); ratio de 10% à 25%. Menuiseries remplacées.</p>	<p>Immeuble historique (RDC+3 à 5, 3.3m sous plafond), immeuble ouvrier (RDC +3 à 5, 2.8 à 3.3m sous plafond). Aligné, mitoyen.</p> <p>Murs : matériaux locaux dominants (e: entre 30 et 50cm) et apparition de matériaux industriels.</p> <p>Plancher : dallage sur terre plein non isolé; plancher bois.</p> <p>Toiture : pente et charpente bois; ardoises. Plancher haut : plâtre sur lattis. Isolation sous rampant 16cm mise en œuvre a posteriori.</p> <p>Ouvertures : bois; simple vitrage (parfois double); ratio de 25% à 33% ; minimum 3 travées. Menuiseries remplacées.</p>

1915-1948 : début des banlieues pavillonnaires; typologies de bâtiments proches de celles de la période précédente avec plus de matériaux industriels.

Logement individuel	Logement collectif
<p>Villa éclectique, pavillon de banlieue (en moyenne : RDC+1, 2.6m sous plafond).</p> <p>Murs : matériaux locaux (e: entre 30 et 50cm) ou matériaux industriels (parpaings de 20, brique creuse de 20, mortier ciment extérieur et plâtre intérieur).</p> <p>Plancher : carrelage ou plancher sur terre plein ou poutrelles et entrevous sur demi sous-sol ou vide sanitaire.</p> <p>Toiture : plafond plâtre sur lattis bois; charpente en bois. Isolation sous rampant mise en œuvre a posteriori.</p> <p>Ouvertures : bois; simple vitrage (parfois double); ratio de 10% à 25%. Menuiseries remplacées.</p>	<p>HBM, immeubles modernes ; RDC +4 à +6 ; aligné, mitoyen ou en îlot pour HBM. 2.60 à 2.80m sous plafond.</p> <p>Murs : béton, ciment, brique, le plus souvent non enduits. Paroi mince : 20 à 35cm.</p> <p>Plancher : plancher bois ou dalles en béton. Souvent la cave n'est plus systématique. Sur parking ou sur garage.</p> <p>Toiture : ardoise, tuile plate, toiture-terrasse. Plafond plâtre sur lattis bois; charpente en bois ou toiture-terrasse. Isolation sous rampant 16cm mise en œuvre a posteriori.</p> <p>Ouvertures : bois (métalliques pour immeuble moderne); simple vitrage (parfois double); ouverture de 33% sur façade principale. Menuiseries remplacées.</p>

1949-1974 : accent sur le collectif pour la reconstruction, appauvrissement et banalisation des formes constructives, grands ensembles. Cadre réglementaire favorisant le développement de produits industriels. Rupture de la morphologie du bâti. Constructions mitoyennes majoritaires mais en déclin. Début du double vitrage.

Logement individuel	Logement collectif
<p>Pavillon reconstruction (RDC+1, isolé plutôt, 2.6m sous plafond)</p> <p>Murs : aggloméré de ciment, parpaings.</p>	<p>Immeuble pastiche (aligné, mitoyen, RDC+2, 2.6m sous plafond), collectif type MRU (isolé ou regroupé en cités, RDC+5 minimum, 2.6m sous plafond)</p> <p>Murs : aggloméré de ciment, brique creuse, parpaing.</p>

<p>Plancher : poutrelles et entrevous béton; non isolé</p> <p>Toiture : isolation laine de verre 4-7cm; charpente légère bois et début isolation laine de roche à partir des années 50. Isolation mise en œuvre a posteriori.</p> <p>Ouvertures : bois et PVC; simple vitrage (parfois double); ouverture de 12% à 25% selon type. Menuiseries remplacées.</p>	<p>Dalles béton. Immeuble pastiche : e&lt;45cm ; MRU : 20 à 35cm ; panneaux sandwichs (isolation minimum) ; plaques de plâtre.</p> <p>Plancher : poutrelles et entrevous béton; faiblement isolé. Isolation a posteriori.</p> <p>Toiture : isolation non précisée (supposée à 5cm) ; toit traditionnel et du toit terrasse. Isolation et étanchéité des terrasses mises en œuvre a posteriori.</p> <p>Ouvertures : précadre en béton, simple vitrage bois (menuiseries remplacées), fenêtres carrées. Contrevents et persiennes métalliques ; ratio de 25% sur rue. Parfois PVC et double vitrage.</p>
--	--

1975-1989: Poursuite de la morphologie du pavillon; maisons groupées construites à 70% dans les zones urbaines.

Logement individuel	Logement collectif
<p>Pavillon secteur groupé (RDC+1, 2.6m, isolé ou mitoyen).</p> <p>Murs : blocs de parpaings, enduits monocouches isolant intérieur polystyrène 6cm.</p> <p>Plancher : dallage béton sur terre plein isolé 6cm.</p> <p>Toiture : plafond plaques plâtre 10cm; isolation 10-15cm (plus importante si combles non aménagés); ardoises ou tuiles.</p> <p>Ouvertures : simple et double vitrage; bois, augmentation du PVC; ratio=12-15%</p>	<p>Petit collectif (RDC+5, isolé sur parcelle, 2,5m sous plafond), débuts de l'habitat intermédiaire (plus expérimental, RDC+3 à 6, beaucoup moins rectiligne).</p> <p>Murs : structure à paroi porteuse, béton banché, parpaing ; doublage de 8 en moyenne, enduits monocouches de 2cm en moyenne.</p> <p>Plancher : dallage béton sur vide sanitaire. 5cm d'isolant en moyenne.</p> <p>Toiture : terrasses très majoritaires; dalles et isolation polystyrène de 4/5. Panneaux sandwich et isolation intégrée.</p> <p>Ouvertures : PVC, aluminium dans secteurs plus aisés ; simple et double vitrage ; volets roulants PVC. Ratio variable non précisé.</p>

Après 1990: Secteur groupé en zones urbaines.

Logement individuel	Logement collectif
<p>Pavillon secteur groupé (RDC+1, 2.5m, isolé ou mitoyen).</p> <p>Murs : Enduit 2cm, parpaings de béton 20, isolation de 8cm, placoplâtre BA13.</p> <p>Plancher : hourdis polystyrène 8cm; enduit plâtre sous face.</p> <p>Toiture : 20cm de laine de verre ; pente parfois.</p> <p>Ouvertures : bois et PVC; double vitrage ; volets pleins en bois.</p>	<p>Petit collectif (RDC+5, isolé sur parcelle, 2.5m sous plafond), débuts de l'habitat intermédiaire (plus expérimental, RDC+3 à 6, beaucoup moins rectiligne).</p> <p>Murs : parpaings de béton, maçonnerie traditionnelle, aggro. ; isolation de 8-10cm en moyenne. Extérieur : enduit monocouche de 2cm ; intérieur : polystyrène, contre-cloisons</p> <p>Plancher : poutrelles majoritaires, isolation polystyrène</p> <p>Toiture : toiture pente et terrasse ; isolation 15-18cm.</p> <p>Ouvertures : PVC, aluminium dans secteurs plus aisés ; simple et double vitrage ; volets roulants PVC. Ratio variable non précisé.</p>

**ANNEXE 3** : description du bâtiment utilisé pour la simulation de différents taux de renouvellement d'air hiver (Figure 21)

**Table 16**

<b>Heating system type</b>	Distribu- tion effi- ciency	Emission efficiency	Control efficiency	Heat generati- on effi- ciency	Energy carrier
<b>Installation de chauffage</b>	Rd	Re	Rg	Rr	Energie
Convecteurs électriques NF électricité performance catégorie C	1	0,95	1	0,99	électrique
Panneaux rayonnants électriques ou radiateurs électriques NF..C	1	0,97	1	0,99	électrique
Plafond rayonnant électrique	1	0,98	1	Rr2	électrique
Plancher rayonnant électrique	1	1,00	1	Rr2	électrique
Radiateur électrique à accumulation	1	0,95	1	0,95	électrique
Plancher électrique à accumulation	1	1,00	1	0,95	électrique
Electrique direct autre	1	0,95	1	0,96	électrique
Pompe à chaleur (divisé) - type split	1	0,95	2,6	0,95	électrique
Radiateurs gaz à ventouse	1	0,95	0,73	0,96	gaz naturel ou GPL
Radiateurs gaz sur conduits fumées	1	0,95	0,6	0,96	gaz naturel ou GPL
Poêle charbon	1	0,95	0,35	0,8	charbon
Poêle bois	1	0,95	0,35	0,8	bois
Poêle fioul	1	0,95	0,55	0,8	fioul
Poêle GPL	1	0,95	0,55	0,8	GPL
Chaudière individuelle gaz installée jusqu'à 1988 (*)	0,92	0,95	0,6	Rr1	gaz naturel ou GPL
Chaudière individuelle fioul installée jusqu'à 1988 (*)	0,92	0,95	0,6	Rr1	fioul
Chaudière gaz sur sol installée jusqu'à 1988 et changement de brûleur (*)	0,92	0,95	0,65	Rr1	gaz naturel ou GPL
Chaudière fioul sur sol installée jusqu'à 1988 et changement de brûleur (*)	0,92	0,95	0,65	Rr1	fioul
Chaudière gaz installée entre 1989 et 2000 (*)	0,92	0,95	0,73	Rr1	gaz naturel ou GPL
Chaudière fioul installée entre 1989 et 2000 (*)	0,92	0,95	0,73	Rr1	fioul
Chaudière gaz installée à partir de 2001 (*)	0,92	0,95	0,78	Rr1	gaz naturel ou GPL
Chaudière fioul installée à partir de 2001 (*)	0,92	0,95	0,78	Rr1	fioul
Chaudière gaz installée basse température	0,92	0,95	0,8	Rr1	gaz naturel ou GPL
Chaudière fioul installée basse température	0,92	0,95	0,8	Rr1	fioul
Chaudière gaz condensation	0,92	0,95	0,83	Rr1	gaz naturel ou GPL
Chaudière fioul condensation	0,92	0,95	0,83	Rr1	fioul
Chaudière bois classe inconnue	0,92	0,95	0,3	0,9	bois
Chaudière bois classe 1	0,92	0,95	0,34	0,9	bois
Chaudière bois classe 2	0,92	0,95	0,41	0,9	bois
Chaudière bois classe 3	0,92	0,95	0,47	0,9	bois
Chaudière charbon	0,92	0,95	0,5	0,9	charbon
Réseau de chaleur	0,92	0,95	0,9	0,9	réseau de chaleur
Chaudière électrique	0,92	0,95	0,77	0,9	électrique
Pompe à chaleur air/air	0,85	0,95	2,2	0,95	électrique
Pompe à chaleur air/eau	0,92	0,95	2,6	0,95	électrique
Pompe à chaleur eau/eau	0,92	0,95	3,2	0,95	électrique
Pompe à chaleur géothermique	0,92	0,95	4	0,95	électrique

**Figure 29 - Rendements des chaudières françaises** (source : [http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA\\_SR1.pdf](http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_SR1.pdf))

## **ANNEXE 4** : description des simulations réalisées sous Pleiades+COMFIE

### Paramètres variables :

- ✚ Surface au sol : 59.1m<sup>2</sup> (8.31m\*7.11m), 71.01m<sup>2</sup> (10.02m\*7.09m), 97.05m<sup>2</sup> (13.69m\*7.09m), 119.5m<sup>2</sup> (14.39m\*8.31m).
- ✚ Niveaux : R, R+1, R+2.
- ✚ Nombre de façades mitoyennes (façades latérales) : 1, 2.
- ✚ Période de construction : avant 1915, 1949-1974, 1975-1989 (les compositions des parois sont données dans le Tableau 4 - Compositions des parois (murs, toiture, plancher) selon période).

Le bâtiment de surface au sol 119.5m<sup>2</sup> n'est simulé qu'avec un seul niveau (R). Tous les autres paramètres sont croisés.

### Paramètres constants :

#### ✚ Situation et environnement

Fichier Météo La Rochelle (zone H2b DPE).

Température du sol : 15°C à 10m de profondeur.

Altitude du site : 22m.

Pas de masque.

#### ✚ Composants

Température de consigne entre le 1<sup>er</sup> octobre et le 15 mai : 20°C.

Température de climatisation entre le 15 mai et le 1<sup>er</sup> octobre : 27°C.

Température d'une zone mitoyenne : 19°C.

Taux de renouvellement d'air (ventilation externe) : 1 vol/h du 1<sup>er</sup> octobre au 15 mai et 1 vol/h entre 19h et 8h, 0.5 vol/h entre 8h à 19h du 15 mai au 1<sup>er</sup> octobre.

4 personnes par habitat (occupation de 100% du lundi au vendredi entre 19h et 8h et le samedi et dimanche, occupation de 25% du lundi au vendredi entre 8h et 12h et 14h et 19h, occupation de 50% du lundi au vendredi entre 12h et 14h).

Puissance dissipée : 100W.

Pas de ventilation interne.

Occultation : R=1 m<sup>2</sup>K/W de 19h à 8h du 1<sup>er</sup> octobre au 15 mai et de 8h à 20h du 15 mai au 1<sup>er</sup> octobre.

#### ✚ Bâtiment

Hauteur d'un niveau intermédiaire : 2.8m.

Hauteur moyenne du dernier niveau : 3.55m (hauteur entre 2.8m et 4.3 dû à un dénivelé de toiture de 1.5m).

% d'ouverture par rapport à la surface latérale en contact avec l'extérieur Slat\_ext : 13.5% (hauteur d'une ouverture : 1.7m).

2 fenêtres orientées sud, 2 fenêtres orientées est et 1 fenêtre orientée nord pour les cas « 1 façade mitoyenne », à chaque niveau ; 2 fenêtres orientées sud et 1 fenêtre orientée nord pour les cas « 2 façades mitoyennes », à chaque niveau (dans les 2 cas, toutes les fenêtres sont de même taille).

Orientation nord-sud (axe est-ouest).

Plancher en contact avec le sol, toiture et parois non mitoyennes en contact avec l'extérieur.

Pas de ponts thermiques.  
Etats de surface et albédos par défaut.

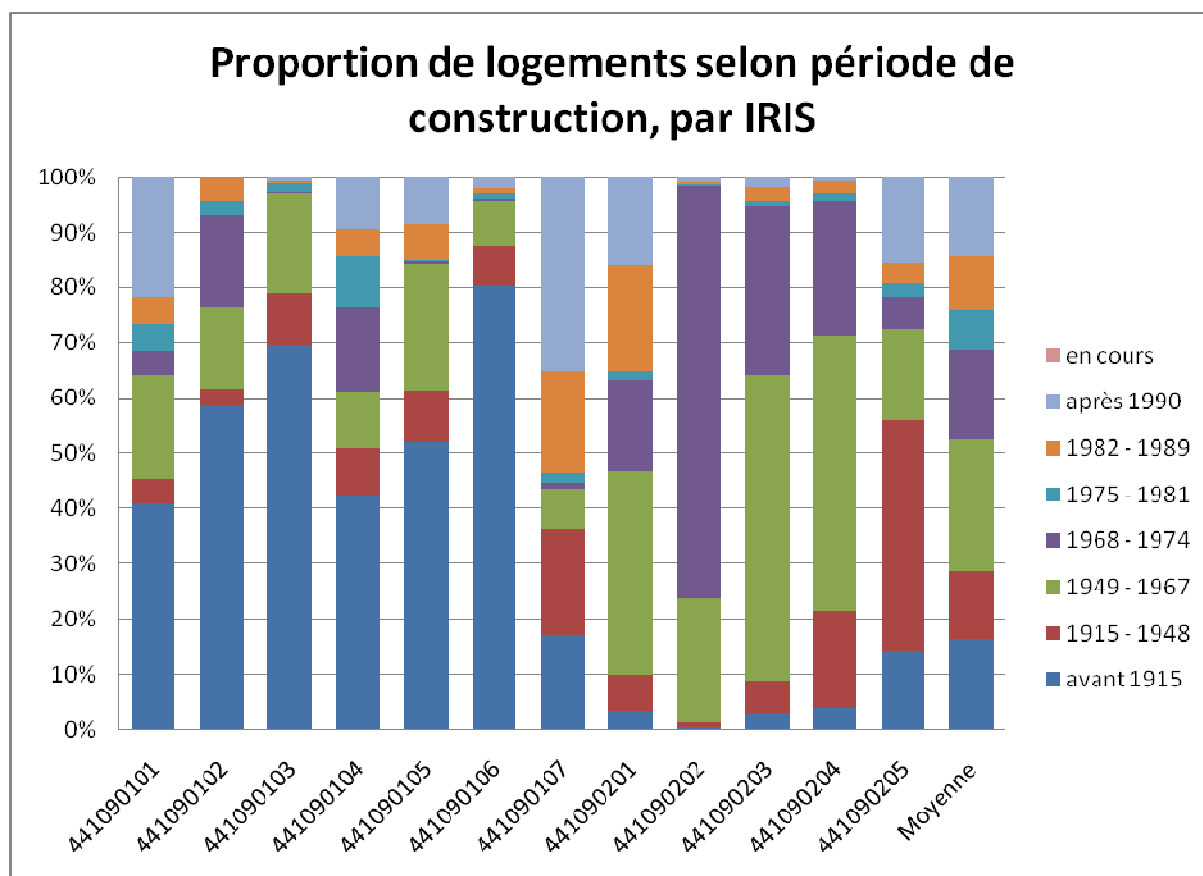
🏠 Simulation

Simulation sur une année (52 semaines).  
Pas de temps : 15min.

Les paramètres variant indirectement entre les différentes configurations sont les suivants :

- Apports gratuits internes (Ag)
- Apports solaires (As)
- Surface vitrée (Sv), surface de toit (Stoit), surface latérale en contact avec l'extérieur (Slat\_ext), volume (Vol), surface habitable (Shab), hauteur moyenne d'un niveau (Hmoy), surface mitoyenne (Smitoy)
- Débit d'air (car défini en vol/h)

## ANNEXE 5 :



**Figure 30 - Proportion de logements selon la période de construction pour un échantillon d'IRIS ainsi que l'IRIS moyen**



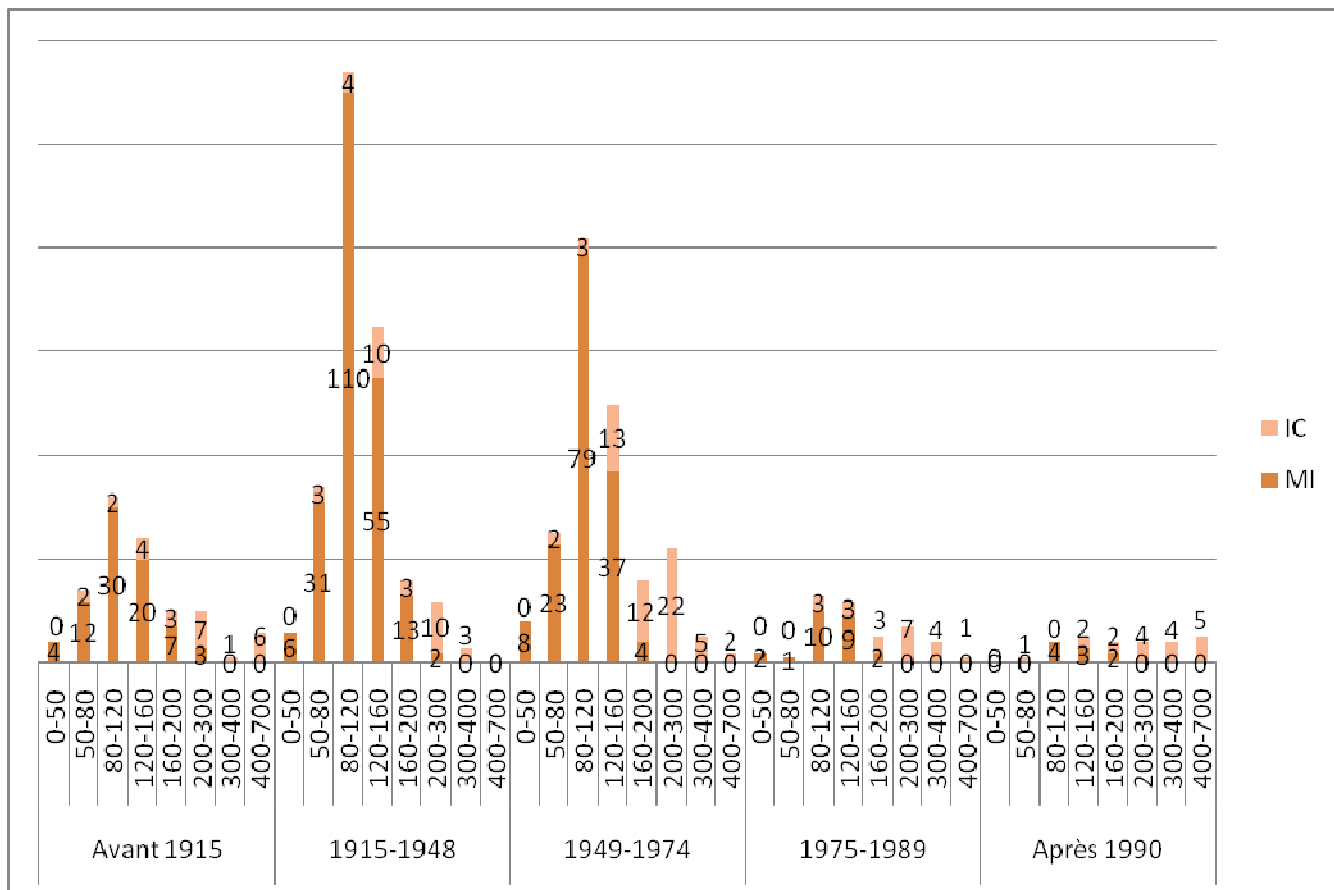


Figure 31 - Nombre de bâtiments selon âge et surface au sol calculé, d'après la BD INSEE

**ANNEXE 6** : paramètres de simulation thermique dynamique sous CitySim pour 4 bâtiments dans 3 configurations différentes

	Maison isolée	En bande	Mitoyen 2 par 2
<b>Volume (m³)</b>	238	951.3	475.6
<b>U toit (W/m²K)</b>	0.3	0.3	0.3
murs couche 1	crépis	crépis	crépis
<b>épaisseur (m)</b>	0.02	0.02	0.02
<b>conductivité (W/mK)</b>	0.85	0.85	0.85
murs couche 2	moellons1800	moellons1800	moellons1800
<b>épaisseur (m)</b>	0.4	0.4	0.4
<b>Conductivité (W/mK)</b>	1.045	1.045	1.045
murs couche 3	plâtre1200	plâtre1200	plâtre1200
<b>épaisseur (m)</b>	0.01	0.01	0.01
<b>Conductivité (W/mK)</b>	1	1	1
<b>U vitrage (W/m²K)</b>	1,38	1,38	1,38
<b>G vitrage</b>	0,7	0,7	0,7
<b>% vitrage</b>	0.3	0.3	0.3
<b>albédo parois</b>	0.2	0.2	0.2
<b>surface au sol (m²)</b>	74	296	148
<b>Coef transmission thermique du sol (W/m²K)</b>	0,05	0,05	0,05
<b>Fichier Météo</b>	Bâle (Suisse)	Bâle (Suisse)	Bâle (Suisse)
<b>taux d'infiltration (vol/h)</b>	0.4	0.4	0.4

**ANNEXE 7** : Besoins en chauffage selon différents paramètres géométriques

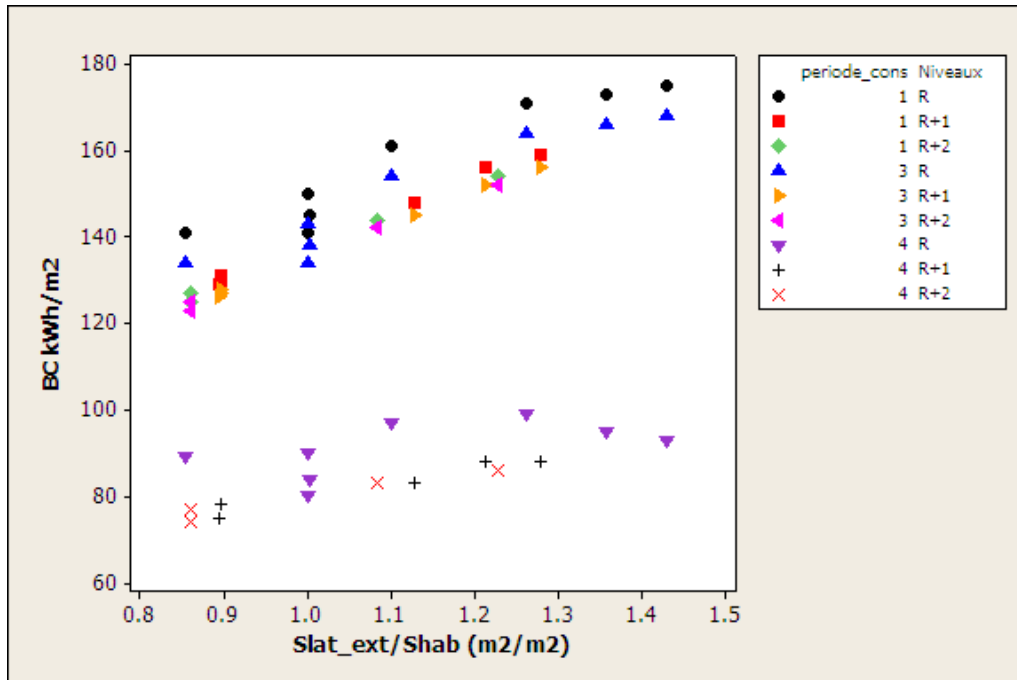


Figure 32 - Besoins surfaciques de chauffage selon  $S_{lat\_ext}/S_{hab}$

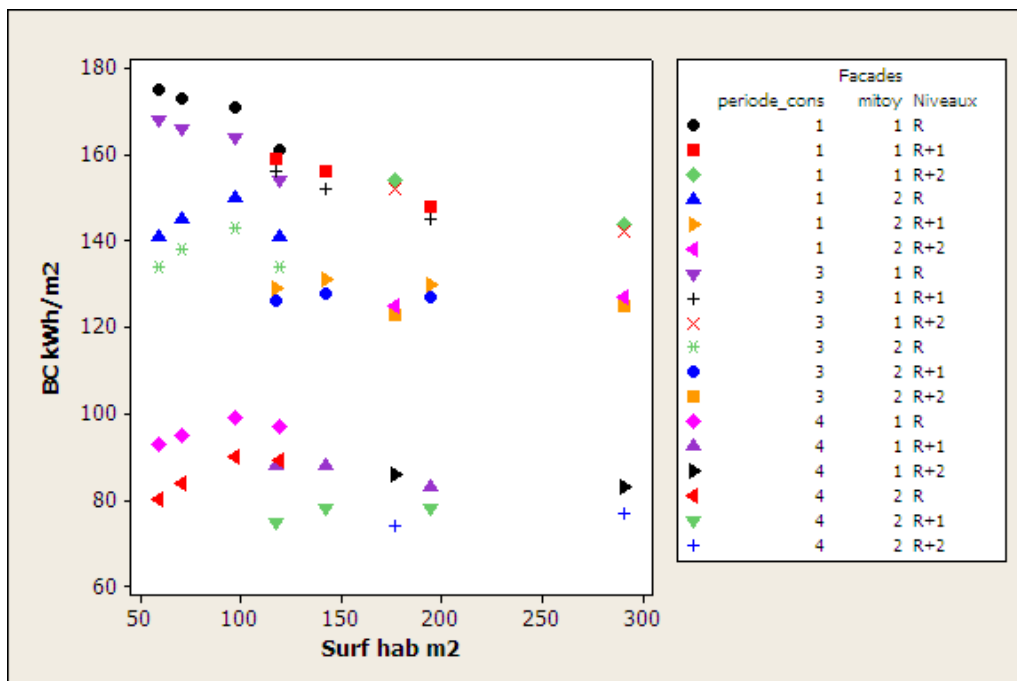


Figure 33 - Besoins surfaciques de chauffage selon  $S_{hab}$



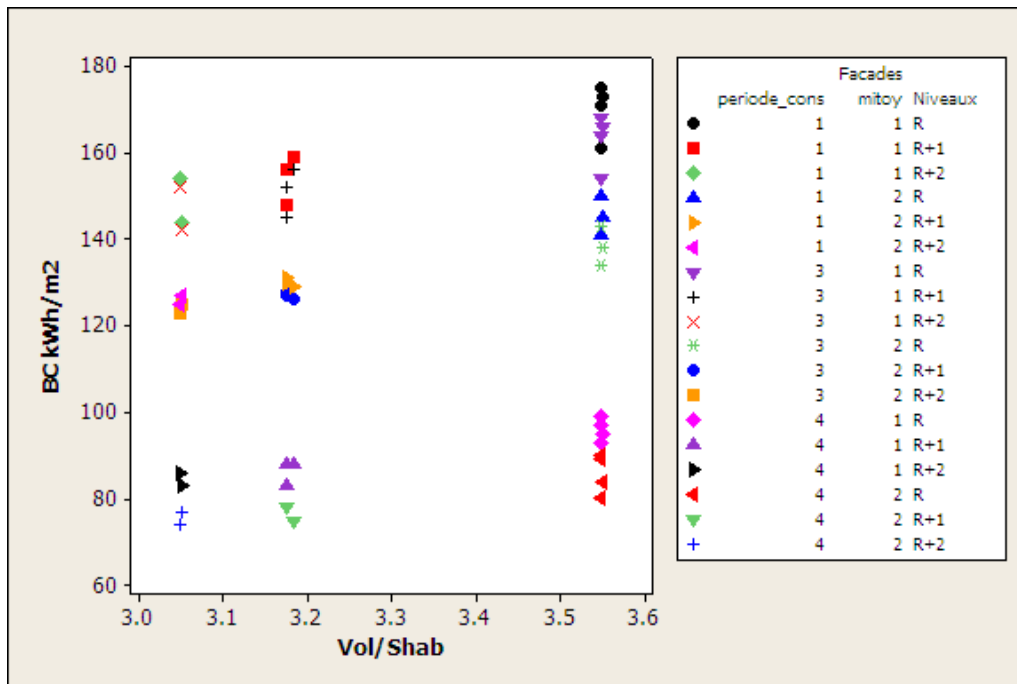


Figure 34 - Besoins surfaciques de chauffage selon  $Vol/S_{hab}$

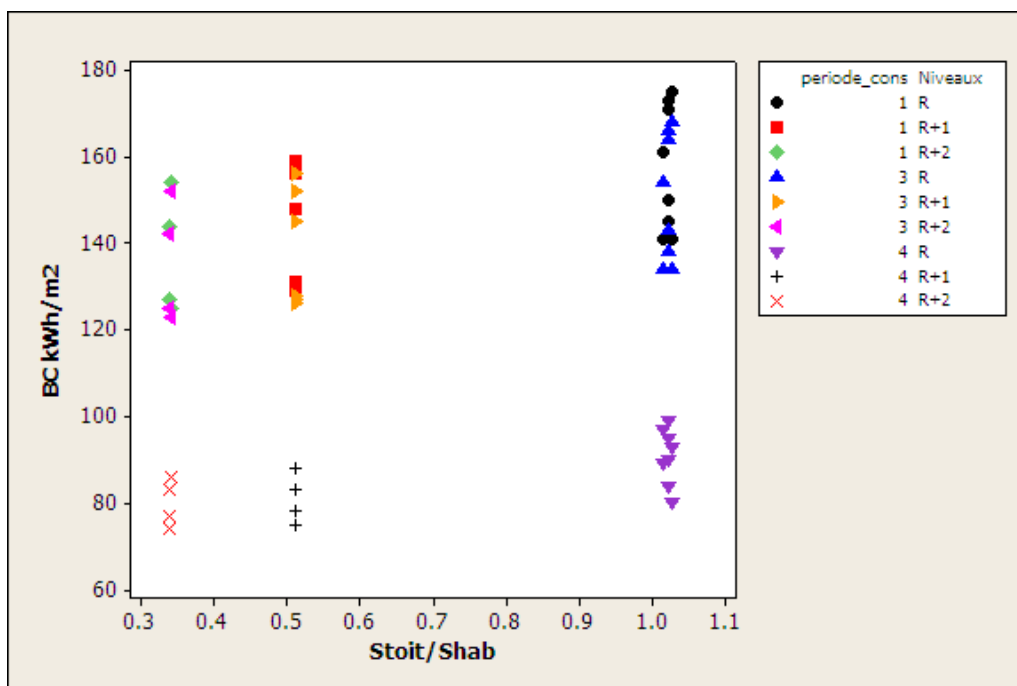


Figure 35 - Besoins surfaciques de chauffage selon  $S_{toit}/S_{hab}$