



POLYTECH[®]
TOURS

Département Aménagement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Les effets du changement climatique sur les consommations de chauffage de l'habitat en 2050 en France



ACCADEBLED Juliette
DELAVALT Antoine
MAGRE Damien

2010-2011

Directeur de recherche
MAÏZIA Mindjid

Les effets du changement climatique sur les consommations de chauffage de l'habitat en 2050 en France

2010-2011

Directeur de recherche

MAÏZIA Mindjid

ACCADEBLEDE Juliette

DELAVALT Antoine

MAGRE Damien

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

AVANT-PROPOS

Le présent dossier se compose de trois rapports individuels ainsi que d'un rapport commun qui synthétise et analyse les résultats.

FORMATION PAR LA RECHERCHE ET PROJET DE FIN D'ETUDES

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer tout une partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont encadrés, suivis et soutenus lors de la réalisation de ce projet de recherche.

A cet effet, nous remercions tout d'abord Monsieur Maïzia, directeur de ce projet, qui a su nous guider pas à pas dans l'élaboration de cette étude et nous initier à la réalisation d'un mémoire de recherche.

Ensuite, nous souhaitons remercier l'ensemble des personnes rencontrées dans le cadre de ce PFE, et plus spécialement Monsieur Amiot, architecte et professeur au département aménagement de l'Ecole Polytech'Tours et Monsieur Déqué, responsable à Météo France du développement, de la diffusion et de la maintenance du modèle d'atmosphère Arpege-climat.

Enfin, nous remercions Florian Boschet, Lucie Maître et Sémia Oueslati, étudiants au département aménagement de l'Ecole Polytech'Tours, pour leur soutien tout au long de cette année de recherche.

**La modélisation du changement climatique en 2000 et
2050 et son lien avec les besoins énergétiques des
logements en France**

Antoine DELAVault

Sommaire

Sommaire	1
Introduction	2
Contexte scientifique et objectifs de la recherche	3
Température extérieure et modélisation du changement climatique	7
Conclusion	14
Bibliographie.....	15
Table des tableaux.....	16
Table des matières.....	17

Introduction

Le changement climatique fait l'objet de nombreux débats. De plus en plus de scientifiques sont d'accord pour affirmer que nous allons vers un réchauffement climatique, la tendance actuelle étant de parler de variations importantes du climat. Dans cette optique, nous nous posons la question du devenir des consommations énergétiques des logements en France. Ces dernières étant directement fonction du climat, il apparaît nécessaire de se rendre compte de l'évolution des températures extérieures afin d'évaluer les changements de consommations.

Dans ce rapport, l'objectif n'est pas de débattre sur la question du changement climatique, mais de voir comment celui-ci peut être introduit dans une problématique de comparaison des consommations énergétiques en 2000 et 2050.

Autrement dit, il s'agit de modéliser le changement climatique afin d'évaluer son impact sur les besoins énergétiques.

Le principal problème que ce rapport va tenter de surmonter est la constitution des bases de données liées au climat nécessaires au calcul des besoins. Nous cherchons à reconstituer les courbes de températures extérieures en 2000 et 2050 pour l'ensemble des communes du territoire métropolitain.

Une fois les températures connues, nous pourrons alors utiliser un outil qui nous permettra de quantifier le changement climatique afin de l'introduire dans un calcul des besoins énergétiques des logements.

Contexte scientifique et objectifs de la recherche

L'évolution des consommations énergétiques de l'habitat en France d'ici 2050 dépend directement de l'évolution du climat. Afin d'évaluer ces consommations énergétiques en 2000 et 2050, il est donc nécessaire de trouver une unité qui permet de lier les températures extérieures aux besoins énergétiques de l'habitat pour l'ensemble des communes du territoire métropolitain.

Plusieurs questions se posent alors :

- Connaît-on les températures extérieures en 2000 et 2050 pour l'ensemble des communes ?
- Quels sont les principaux facteurs agissant sur la température extérieure à l'échelle communale ?
- Les degrés heures permettent de répondre au problème, mais cette unité est-elle pertinente ?

1 Connaître la température extérieure

1.1 Les relevés de température extérieure

Pour l'année 2000, la température extérieure est disponible grâce aux relevés des stations météorologiques de 17 villes du territoire.

Pour l'année 2050, un simulateur climatique développé par Météo France, en collaboration avec le magazine Sciences et Vie, fournit ces données de températures pour les 22 préfectures de Région [1]. Cinq paramètres, dont la température maximale et la température minimale, sont estimés de manière hebdomadaire afin de caractériser l'évolution du climat. Il est important de préciser qu'il n'est pas possible d'établir une prévision précise de ces paramètres, du fait de l'évolution chaotique du climat. Les tendances globales affichées se révèlent être plus pertinentes à mettre en valeur [1].

Afin de mettre en évidence ces tendances, observons les résultats de Météo France. Le simulateur s'appuie sur deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC¹ : le scénario modéré dont l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre est moins rapide qu'actuellement et le scénario intensif où l'augmentation des émissions est proche de celle d'aujourd'hui. Le scénario intensif produit une augmentation moyenne des températures par rapport à aujourd'hui d'un peu plus de 2°C, tandis qu'elle est d'un peu plus de 1°C pour le scénario modéré. Dans les deux cas, l'écart-type est de 2°C, traduisant une variabilité non négligeable de la hausse des températures.

Le réchauffement climatique ne signifie pas un réchauffement continu de l'atmosphère. Le caractère incertain du climat peut parfaitement engendrer tour à tour

¹ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

un été chaud ou froid, comme un hiver doux ou rigoureux. Mais globalement, le réchauffement climatique semble se poursuivre [2].

1.2 Deux paramètres jouent sur la température extérieure : l'altitude et l'ICU (Ilot de Chaleur Urbain)

Les consommations étant calculées à l'échelle communale, les paramètres microscopiques tels que « l'effet canyon » dus aux bâtiments jouxtant la rue ne sont pas pris en compte. Deux paramètres macroscopiques agissent principalement sur la température extérieure : l'altitude et l'ICU (Ilot de Chaleur Urbain).

L'altitude

Plus l'altitude est importante, plus la température diminue : c'est « le gradient thermique ». Le gradient thermique varie selon les climats de base, la pente, la saison et l'exposition. Mais en moyenne, selon DEMANGEOT J. ([3], 2003), le refroidissement est de 0,5 °C pour une élévation de 100 mètres.

Le gradient thermique peut être dit « sec » ou « humide », suivant que l'on considère ou non l'effet de la vapeur d'eau. Ainsi, pour un gradient thermique dit « sec », le refroidissement est de 1 °C pour une élévation de 100 mètres, et 0,6 °C s'il est dit « humide » [4].

L'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) définit l'atmosphère avec un refroidissement de 0,65 °C pour une élévation de 100 mètres [5]. Ce chiffre se rapproche plus de celui obtenu en considérant un gradient thermique dit « humide ».

La littérature procure des chiffres quelques peu différents de la diminution de la température lorsque l'altitude augmente. Mais globalement, le refroidissement est compris entre 0,5 et 0,6 °C pour une élévation de 100 mètres.

L'Ilot de Chaleur Urbain

Généralement, la température de l'air est plus importante en milieu urbain qu'en milieu rural. Plus on s'éloigne du centre d'une agglomération, plus la température diminue : c'est le gradient de température horizontal. L'ICU, c'est cette aire urbaine où la température est supérieure à celle de la campagne avoisinante (OKE T.R., [6], 1978).

Il s'exprime par la différence de température entre le milieu urbain et le milieu rural alentour. Cette différence évolue de manière logarithmique avec la population de la ville étudiée (OKE T.R., [6], 1978).

D'autres facteurs jouent sur l'intensité de l'ICU. Les espaces verts, les conditions météorologiques (type de temps, nébulosité, précipitations), la forme urbaine (taille et couleur des bâtiments), le vent augmentent ou diminuent cette intensité (ESCOURROU G., [7], 1991). Plus le nombre de paramètres considéré est important, plus celle-ci sera quantifiée au mieux ; mais plus les bases de données devront être complètes, ceci étant difficile à obtenir pour l'ensemble du territoire métropolitain.

La population et la vitesse du vent sont les deux principaux paramètres représentants de l'ICU. Associés dans une même expression, ils permettent de quantifier au mieux l'augmentation de température en milieu urbain (OKE T.R., [6], 1978). Cependant, cela sous-entend qu'il faut disposer d'une base de données de la vitesse du vent pour chaque jour de chaque commune.

La première expression reste la plus simple à utiliser puisque seule une base de données de la population suffit.

2 Une unité pour lier changement climatique et besoins énergétiques : les degrés-heures

Les degrés-heures sont couramment utilisés pour évaluer l'énergie nécessaire à un bâtiment. Sur une période dite « de chauffe », les degrés-heures sont déterminés par la somme sur chaque heure de la différence entre une température de référence (ou température intérieure) et la température extérieure. Cette température de référence correspond à une température de confort différente d'un pays à l'autre, elle est souvent prise comme constante (DURMAYAZ A., KADIOGLU M., SEN Z., [8], 2000). En France, la température de confort est généralement comprise entre 18 et 20 °C pour un logement.

Le principal inconvénient de l'utilisation des degrés-heures vient du fait qu'il faut disposer d'une base de données des températures pour chaque heure de la période de chauffe.

En utilisant la même méthode de calcul, mais avec une base de données de températures journalières, il est possible de déterminer des degrés-jours. La température extérieure utilisée est alors une moyenne sur la journée. Mais en utilisant cette moyenne, le taux d'erreur augmente, diminuant ainsi la précision du calcul (COSKUN C., [9], 2010).

Il existe une autre méthode pour calculer des degrés-jours. Météo France utilise une moyenne entre la température maximale et la température minimale d'une journée. De la même manière que pour les degrés-heures, ces degrés-jours s'obtiennent par la différence entre une température de référence et cette moyenne [10].

Un autre inconvénient est la prise en compte d'une température de référence constante. Cela signifie que dans le calcul des degrés-jours, le bâtiment est chauffé en permanence, ce qui est légèrement différent en réalité. La nuit, la température dans un logement est souvent baissée, tout comme la journée lorsque celui-ci est vide. Ainsi, les degrés-jours sont trop représentés lors de ces périodes (BROMLEY M., [11], 2008).

3 Objectifs de la recherche

L'enjeu de ce rapport est donc de modéliser le changement climatique par un outil reliant températures extérieures et besoins énergétiques.

Nous avons pu voir précédemment dans la littérature que les degrés-heures ou degrés-jours permettent de simuler un changement climatique, autrement dit de simuler l'évolution des températures extérieures. Mais pour calculer ces degrés-heures sur l'ensemble du territoire métropolitain, il est nécessaire de reconstituer les courbes de températures extérieures pour chaque commune.

Est-il possible de lever simplement les contraintes de constitution de base de données des températures grâce à l'altitude et l'ICU des communes, afin de calculer les degrés-heures ?

L'altitude et l'ICU agissent de manière importante sur la température extérieure. Leur prise en compte semble donc essentielle. Grâce à une méthode d'interpolation¹, il s'avère possible de constituer une base de données des températures, et donc d'en déduire un calcul des degrés-heures.

L'objectif de ce rapport est donc dans un premier temps de reconstituer les courbes de températures extérieures de chaque commune du territoire métropolitain. Dans un deuxième temps, il s'agira de calculer les degrés-heures ou degrés-jours de ces mêmes communes.

¹ Cf. Magré D., Modèle d'interpolation par la méthode de pondération inverse à la distance au vue de généraliser les données sur l'ensemble du territoire (2011)

Température extérieure et modélisation du changement climatique

1 Créer un référentiel de température

Pour les températures de 2000, la base de données Météonorm fournit les températures horaires, soit 8760 heures pour une année, de 17 villes françaises.

Par exemple, pour la ville de Tours, cette base de données se présente sous la forme suivante :

Tableau 1 Base de données Météonorm

Heure	Température extérieure (°C)
1 (1h au 1 ^{er} janvier)	9,4
2	9,2
...	...
8760 (minuit au 31 décembre)	1,2

Pour les températures de 2050, le simulateur climatique de Météo France fournit les températures maximales et minimales hebdomadaires, soit 52 semaines pour une année, de 22 villes françaises.

Par exemple, pour la ville de Rennes, cette base de données se présente sous la forme suivante :

Tableau 2 Base de données Météo France

Semaine	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)
1 (première semaine de janvier)	3,8	9,6
2	4,8	8,4
...	...	...
52 (dernière semaine de décembre)	2,2	2,8

Le problème est donc d'obtenir des bases de données similaires pour l'ensemble des communes du territoire.

Le rapport de Magré D., ..., explique comment obtenir une base de données complète à partir de données discrètes comme celles fournies par Météonorm ou Météo France : c'est le modèle d'interpolation.

Pour pouvoir interpoler les températures de manière efficace, l'altitude et l'ICU ne doivent pas être pris en compte. Il s'agit donc de créer une base de données de températures dites « de référence », où les effets de ces deux paramètres seront « effacés ».

Nous avons alors une base de données de températures de référence pour 17 villes en 2000 et 22 villes en 2050, à laquelle un modèle d'interpolation pourra être appliqué.

1.1 L'effet de l'altitude

A une échelle plus fine que l'échelle communale, les effets du vent, de l'orientation d'un versant montagneux, de la nature du sol, de la saison... ont un rôle important, donnant parfois des résultats plutôt surprenants.

La composition de l'air joue également un rôle important dans la façon dont la température évolue avec l'altitude. Dans un souci de simplification, et parce que ces paramètres sont trop changeants d'une commune à l'autre et d'un jour à l'autre, nous considérerons que la température extérieure diminue de 0,55 °C pour une augmentation de 100 mètres d'altitude.

En appliquant cette valeur de 0,55 °C aux températures des 17 ou 22 villes des bases de données, on obtient une température « sans effet de l'altitude », ou température équivalente à altitude nulle, déterminée de la manière suivante :

$$T_{\text{altitudenulle}} = T_{\text{extérieure}} + \frac{0,55 * \text{Altitude}}{100} \quad (1)$$

Ainsi, par exemple, pour la ville de Tours, dont l'altitude est de 108 mètres, la température à altitude nulle est de 10 °C pour une température réelle de 9,4°C.

Après avoir appliquée l'expression (1) pour toutes les villes, il faut maintenant « soustraire » l'effet de l'ICU afin d'obtenir les températures « de référence ».

1.2 L'effet de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

Comme nous l'avons vu dans la littérature, plusieurs expressions permettent de caractériser l'ICU. Le problème est la possession ou non de bases de données telles que la population ou le vent. Les données de population pour les années 2000 et 2050 existent, avec quelques variantes pour l'année 2050. Les données de vent sont plus difficiles à obtenir pour l'ensemble des communes du territoire métropolitain. Nous opterons donc pour une expression de l'ICU ne dépendant que de la population de la commune.

L'ICU s'exprime par une différence de température : celle entre la température du milieu urbain et la température du milieu rural avoisinant.

En appliquant cette expression aux températures extérieures des 17 villes pour 2000 et des 22 pour 2050, cela donne :

$$T_{\text{ICU nul}} = T_{\text{extérieure}} - 2,01 * \log(\text{Population}) + 4,06 \quad (2)$$

Pour les bases de données de population de 2000 mais également de 2050, nous utiliserons les données INSEE. En 2050, la population est évaluée à partir des projections OMPHALE (outil méthodologique de projections d'habitants, d'actifs, de logements et d'élèves). Nous utiliserons le scénario dit « central » de l'INSEE pour le calcul de la température sans effet de l'ICU. Ce scénario se base sur une évolution de la population qui suit la tendance actuelle.

A titre d'exemple, pour la ville de Toulouse en 2000, sachant que la ville comptait 422170 habitants, l'effet de l'ICU sur la température extérieure engendre une augmentation de 7,3 °C par rapport à la campagne avoisinante.

Une commune de 1000 habitants possède déjà un ICU engendrant une augmentation de 2 °C par rapport à la campagne.

Rappelons-le, l'objectif est de créer un référentiel de température sans les effets de variables spatiales. Il ne reste donc plus qu'à combiner les expressions (1) et (2) pour obtenir ce référentiel. Cela donne :

$$T_{\text{référence}} = T_{\text{extérieure}} - \underbrace{2,01 * \log(\text{Population}) + 4,06}_{\text{ICU}} + \underbrace{\frac{0,55 * \text{Altitude}}{100}}_{\text{Altitude}} \quad (3)$$

A partir de ces températures dites « de référence », il est possible d'y appliquer un modèle d'interpolation. Celui-ci nous permettra d'obtenir, en partant des 17 villes pour 2000 ou des 22 pour 2050, la température extérieure pour l'ensemble des communes du territoire métropolitain¹.

2 L'évolution des températures extérieures entre 2000 et 2050 par le calcul des degrés-heures

2.1 Degrés-heures ou degrés-jours ?

Comme nous l'avons vu, il est possible de calculer des degrés-heures ou des degrés-jours. Quelle méthode choisir ? Les bases de données disponibles fixent généralement le choix.

Il est préférable d'utiliser des degrés-heures lorsqu'une base de données de relevés de températures horaires existe. Ceci permet d'une part de calculer finement les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur ; d'autre part, de faire varier la température intérieure, sur une journée par exemple, afin de se rapprocher le plus possible des modes de vie des occupants d'un logement.

Le calcul des degrés-heures (DH) comme celui des degrés-jours (DJ) doit s'effectuer sur une période dite « de chauffe ». Cette période correspond aux jours où le logement est chauffé dans l'année. Elle s'étale généralement de mi-octobre à mi-

¹ Cf. Magré D., Modèle d'interpolation par la méthode de pondération inverse à la distance au vue de généraliser les données sur l'ensemble du territoire (2011)

mai. Pour notre calcul des degrés-heures, dans l'optique d'évaluer les besoins de chauffage des logements en 2000 et 2050, nous considérons qu'ils sont positifs (besoin de chauffage) dès que la température extérieure est inférieure à la température intérieure. Dans le cas contraire, les degrés-heures sont nuls.

Rappelons l'expression permettant le calcul des degrés-heures sur toute la période de chauffe :

$$DH = \sum (T_{\text{intérieure}} - T_k) \quad (4)$$

avec $T_{\text{intérieure}} - T_k = 0$ si $T_{\text{intérieure}} < T_k$ et T_k la température à heure k .

Pour le calcul des degrés-jours sur une période de chauffe, il existe deux méthodes : l'une reprend le même calcul que pour les degrés-heures, l'autre utilise les températures maximales et minimales de la journée.

Pour la première méthode, il est nécessaire de connaître la température moyenne de la journée, soustraite à la température intérieure :

$$DJ = \sum (T_{\text{intérieure}} - T_k) \quad (5)$$

avec $T_{\text{intérieure}} - T_k = 0$ si $T_{\text{intérieure}} < T_k$ et T_k la température moyenne du jour k .

Pour la deuxième méthode, nous utilisons la moyenne entre la température maximale et la température minimale :

$$DJ = \sum (T_{\text{intérieure}} - \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}) \quad (6)$$

avec $T_{\text{intérieure}} - \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} = 0$ si $T_{\text{intérieure}} < \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}$ et $\frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}$ la moyenne entre la température maximale et minimale du jour k .

Il est important de préciser que les expressions (5) et (6) ne sont utilisées que lorsque les moyennes correspondantes sont inférieures à la température intérieure. Effectivement, lorsque cette moyenne est supérieure à la température intérieure, cela signifie qu'il fait plus chaud à l'extérieur qu'à l'intérieur. Or notre étude cherche à définir les besoins en chauffage des logements. Les degrés-jours sont donc considérés comme nuls lorsque la température extérieure est supérieure à la température intérieure.

Prenons l'exemple de la ville de Tours, pour laquelle nous possédons une base de données de températures horaires, et calculons les degrés-heures et degrés-jours avec les différentes méthodes, et ce pour l'année 2000 :

Tableau 3 Deux méthodes de calcul pour les degrés-jours - exemple de la ville de Tours

	Degrés-heures (°C.h)	Degrés-jours (expression 5) en °C.j	Degrés-jours (expression 6) en °C.j
Calcul	48751	2042	2047
Equivalent degrés-heures	48751	49008	49128

L'utilisation des expressions (5) ou (6) pour le calcul des degrés-jours engendre une certaine erreur par rapport au calcul des degrés-heures. Cependant, cette erreur est minime (pour l'exemple précédent, elle se situe entre 0,5 et 0,8 % suivant la méthode utilisée). Nous pouvons donc affirmer qu'aussi bien avec l'utilisation des degrés-heures que des degrés-jours, et peu importe l'expression, le résultat sera sensiblement identique.

De la même manière que nous nous sommes posés des questions sur les degrés-jours comparés aux degrés-heures, nous pouvons nous demander s'il est possible de calculer des « degrés-semaines », et comment.

Encore une fois, ce questionnement se pose car pour l'année 2050, nous possédons des bases de données de températures maximales et minimales pour chaque semaine. Utilisons donc l'expression (6) pour notre calcul des « degrés-semaines », et reprenons l'exemple de Tours :

Tableau 4 Calcul des degrés-semaines - exemple de la ville de Tours

	Degrés-heures (°C.h)	Degrés-semaines (°C.s)
Calcul	48677	294
Equivalent degrés- heures	48677	49392

En utilisant des degrés-semaines calculés en adaptant l'expression (7), une erreur de 1,5% apparaît par rapport au calcul des degrés-heures. Ici encore, cette erreur est minime. Nous pouvons donc penser que le calcul des degrés-semaines en 2050, transformés ensuite en degrés-heures, nous permettra d'obtenir des résultats très satisfaisants.

2.2 Le calcul des degrés-heures

La dernière étape de ce rapport est de calculer les degrés-heures pour l'ensemble des communes du territoire en 2000 et 2050. Nous pourrions alors nous rendre compte de l'évolution du climat, et en déduire les besoins en énergie des logements pour chaque typologie¹.

Rappelons qu'à ce niveau, nous possédons les courbes de températures extérieures pour l'ensemble des communes, grâce à l'interpolation effectuée. Afin de calculer les degrés-heures, il ne manque que des considérations sur la température intérieure.

Dans un logement, la température intérieure varie tout au long de la journée. Généralement, elle est plus élevée le matin et le soir, lorsque les occupants sont chez eux, et moins élevée pendant la journée et la nuit. Le weekend, la température est encore différente de celle de la semaine : les habitants sont en moyenne plus longtemps chez eux. Il serait donc plus judicieux de prendre en compte ces fluctuations pour le calcul des degrés-heures afin d'être au plus proche de la réalité.

Cependant, pour considérer une telle approche du calcul, il est nécessaire de connaître l'évolution des températures extérieures de manière fine, c'est-à-dire au minimum de manière horaire. Si nous possédons cette base de données pour l'année 2000, il n'en est pas de même pour l'année 2050. Nous ne pouvons pas prendre en compte les fluctuations de températures intérieures pour une année et pas pour l'autre, la comparaison entre les deux ne serait plus possible. Notre choix se tourne donc vers une température intérieure constante tout au long de la journée, une température de 18 °C.

La température intérieure étant fixée, il ne reste qu'à appliquer une expression pour calculer les degrés-heures. Mais laquelle ? Pour l'année 2050, nous ne pouvons utiliser que les degrés-semaines. Pour l'année 2000, n'ayant pas besoin d'une base de données de températures horaires puisque la température intérieure reste constante, nous utilisons des degrés-jours. Afin de réduire au maximum l'erreur entre le calcul en 2000 et celui en 2050, nous utilisons l'expression (6), c'est-à-dire la moyenne entre la température maximale et minimale d'une journée. Finalement, la même expression est utilisée pour 2000 et 2050, mais elle est appliquée pour un calcul de degrés-jours dans un premier temps et pour des degrés-semaines dans un second temps.

Ces calculs sont ensuite traduits en équivalent degrés-heures afin de pouvoir comparer les résultats et observer un changement climatique.

Prenons l'exemple de la ville de Clermont-Ferrand, et calculons les degrés-heures en 2000 et 2050². On obtient un résultat de 66158 DH en 2000 et 56490 DH en 2050. Pour un scénario de températures extérieures tendanciel (si les émissions de CO₂ se poursuivent comme dans les années 90-2000), la diminution des degrés-heures en

¹ Cf Accadebled J. : Analyse architecturale et constructive des différentes typologies de logements existants en France, en vue d'estimer les besoins en chauffage en 2000 et 2050 (2011)

² Pour les températures extérieures de 2050, nous utilisons le scénario dit « intensif » du simulateur de Météo France (scénario se basant sur une évolution tendancielle des températures)

2050 est donc de près de 15% par rapport à 2000. Ce chiffre ne reflète probablement pas exactement la réalité du fait des nombreux aléas sur les prévisions de température pour 2050, mais globalement, il semble y avoir une nette diminution des degrés-heures.

3 Les effets cumulés de l'ICU et du réchauffement climatique sur les besoins de chauffage

Comme nous l'avons précédemment, l'ICU s'accroît avec la population. En 2050, la population française devrait augmenter de près de 17 % par rapport à 2000. Cela ne signifie pas que chaque commune du territoire verra le nombre de ses habitants s'accroître, mais globalement les effets des ICU sur la température extérieure seront plus importants.

Aujourd'hui, le Français moyen vit dans une commune de près de 140000 habitants. Si cette ville subie une hausse de 17 % de sa population, son ICU aura pour effet une augmentation de la température extérieure qui passera de 6,2 °C à 6,4 °C. Pour une ville comme Limoges, qui comptait 131510 habitants en 2006, un gain de 0,2 °C grâce à la seule augmentation de population engendre une diminution des degrés-heures, et donc des besoins de chauffage, de 2,2 %.

Mais cette situation est peu probable. Il est plus intéressant de constater sur l'ensemble des communes l'évolution de la température due à la taille de la ville. En prenant la moyenne de l'intensité des ICU pondérée par la population de chaque commune, on obtient une diminution de cette intensité de l'ordre de 0.6 °C entre 2006 et 2050. Cette fois-ci, malgré une augmentation globale de la population, les besoins de chauffage augmenteront en moyenne de 8 % à cause de l'étalement des effets d'ICU, c'est-à-dire de l'étalement urbain.

En plus d'agir sur l'ICU, l'augmentation de la population agit directement sur le nombre de logements. La taille des ménages devrait passer de 2,3 en 2005 à 2,04 personnes par logement en 2050. A ce titre, le nombre de résidences principales devrait passer de près de 26 millions en 2000 à 34 millions en 2050. Les besoins de chauffage seront donc globalement plus importants.

L'augmentation moyenne des températures de 2 °C à cause du réchauffement climatique vient s'opposer à cette hausse des besoins. Pour la commune de Limoges, un gain de 2 °C dû au changement climatique (pour le scénario intensif de Météo France) engendre une diminution des degrés-heures, et donc des besoins, de 21 %.

Finalement, nous avons deux résultats « en contradiction » : une diminution des besoins grâce à l'augmentation de la population et surtout au réchauffement climatique, et une augmentation des besoins à cause de la même augmentation de population et de la structure des ménages.

Conclusion

La modélisation du changement climatique par l'outil degrés-heures est globalement efficace, mais difficile à construire pour toutes les communes du territoire français. Il est nécessaire d'utiliser des paramètres spatiaux qui jouent sur la température extérieure, l'altitude et l'ICU, afin de pouvoir appliquer un modèle d'interpolation qui reconstituera les courbes de températures désirées.

Les erreurs qui apparaissent dans les calculs dues aux imperfections des modèles utilisés ne remettent pas en cause le but de notre travail. Ce dernier étant la comparaison des besoins énergétiques des logements en 2000 et 2050, si les erreurs sont identiques ou presque lors des calculs pour ces deux années, la comparaison restera possible. Les chiffres seront quelque peu erronés mais des tendances pourront se dégager.

Afin de définir les besoins énergétiques pour l'ensemble des communes du territoire métropolitain en 2000 et 2050, il s'agit maintenant d'associer cette modélisation du changement climatique aux différentes typologies des logements existants. Les évolutions de population, de structures des ménages, interviendront également dans la recherche des consommations énergétiques.

Bibliographie

1. Simulateur climatique de Météo France, http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur
2. Comment interpréter les résultats du simulateur ?, http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/interpretation
3. Demangeot J. : Les milieux « naturels » du globe, pp. 173-174 (2003)
4. Définition du gradient thermique adiabatique, <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3406>
5. Définition de l'atmosphère normalisée, <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6526>
6. Oke T.R. : Boundary layer climates, pp. 254-260 (1978)
7. Escourrou G.: Le climat et la ville, pp. 59-67 (1991)
8. Durmayaz A., Kadioglu M., Sen Z. : An application of the degree-hours method to estimate the residential heating energy requirement and fuel consumption in Istanbul, 1245-1256 (2000)
9. Coskun C. : A novel approach to degree-hour calculation: Indoor and outdoor reference temperature based degree-hour calculation, 2455-2460 (2010)
10. Météo France, direction de la climatologie : Fiche méthode degrés-jours (2005)
11. Bromley M. : Degree-days – Handle with care ! (2008)

Table des tableaux

Tableau 1 Base de données Météonorm.....	7
Tableau 2 Base de données Météo France	7
Tableau 3 Deux méthodes de calcul pour les degrés-jours - exemple de la ville de Tours.....	11
Tableau 4 Calcul des degrés-semaines - exemple de la ville de Tours.....	11

Table des matières

Sommaire	1
Introduction	2
Contexte scientifique et objectifs de la recherche	3
1 Connaître la température extérieure	3
1.1 Les relevés de température extérieure.....	3
1.2 Deux paramètres jouent sur la température extérieure : l'altitude et l'ICU (Ilot de Chaleur Urbain)	4
2 Une unité pour lier changement climatique et besoins énergétiques : les degrés-heures	5
3 Objectifs de la recherche	5
Température extérieure et modélisation du changement climatique	7
1 Créer un référentiel de température.....	7
1.1 L'effet de l'altitude	8
1.2 L'effet de l'îlot de chaleur urbain (ICU).....	8
2 L'évolution des températures extérieures entre 2000 et 2050 par le calcul des degrés-heures.....	9
2.1 Degrés-heures ou degrés-jours ?	9
2.2 Le calcul des degrés-heures	12
3 Les effets cumulés de l'ICU et du réchauffement climatique sur les besoins de chauffage.....	13
Conclusion	14
Bibliographie.....	15
Table des tableaux.....	16
Table des matières.....	17

**Modèle d'interpolation par la méthode
de pondération inverse à la distance
au vue de généraliser les données
sur l'ensemble du territoire**

Damien MAGRE

Sommaire

Sommaire	1
Introduction	1
1 Présentation de la méthode de pondération inverse à la distance	1
2 Application de la PID aux températures extérieures sur le territoire français .	3
Conclusion	8
Bibliographie.....	9
Table des figures	10
Table des matières.....	11
Annexes.....	12

Introduction

Afin de savoir si le changement climatique aura des répercussions sur les besoins de chauffage en France d'ici 2050, on doit avant tout l'évaluer en simulant l'évolution des températures extérieures. Pour ce faire, à partir de quelques données obtenues par le simulateur de Météo France [1] et par Météonorm, on doit résoudre un problème d'interpolation au niveau national. On souhaite ainsi établir les températures des 36590 communes françaises en connaissant simplement celles de quelques villes. Il existe de nombreuses méthodes qui consistent à calculer des valeurs à partir de données incomplètes et/ou discrètes.

Cette partie a pour objectif de déterminer si, avec peu de données, un modèle d'interpolation peut généraliser de façon précise des variables relatives à l'ensemble d'un territoire. En effet, on souhaite extrapoler, à l'aide de la méthode de pondération inverse à la distance (PID), des données météorologiques hétérogènes et inégalement réparties sur ce territoire métropolitain français.

1 Présentation de la méthode de pondération inverse à la distance

1.1 Hypothèses et avantages de cette méthode

L'interpolation par la PID est une méthode dite simple car d'une part, elle nécessite que peu de calculs, et d'autre part, elle est relativement simple à appliquer d'après Arnaud M. et Emery X. (2000, [2]) et Lu G.Y. et Wong D.W. (2008, [3]). Ce moyen d'interpoler est généralement mis en application dans les systèmes d'information géographique car cette méthode est automatique et fournit donc des résultats reproductibles.

Cette méthode déterministe issue de l'estimation barycentrique a l'avantage de couvrir un large champ de données, contrairement aux méthodes de triangulation qui

prennent en compte uniquement les sites immédiatement voisins. En effet, la triangulation cherche à établir un point de référence à proximité de deux points connus afin de former, comme son nom l'indique, un triangle, et ainsi de réaliser un maillage du territoire.

De plus, la PID peut être appliquée même si les points d'observations ne sont pas disposés de manière régulière sur le territoire d'étude, contrairement à l'interpolation bilinéaire selon Arnaud M. et Emery X. (2000, [2]). Cette dernière, utilisée notamment dans l'imagerie numérique, consiste à attribuer à chaque inconnue une combinaison linéaire des quatre points connus les plus proches, obligatoirement incluant dans le maillage d'une grille régulière.

Enfin, la méthode de PID est beaucoup moins encombrante et complexe que celle par krigeage. En effet pour cette dernière, une fonction continue, soumise à plusieurs contraintes et reflétant de façon adéquate la structure spatiale des données, doit être réalisée afin de fournir des résultats convenables. Cette méthode d'interpolation est cependant beaucoup plus précise car elle tend à éliminer les valeurs incohérentes en se basant sur les valeurs des sites voisins. Par conséquent, si le nombre de points connus est faible, cette méthode sera moins efficace que celle PID [2,3].

1.2 Les limites de cette méthode et ses adaptations possibles

Néanmoins, au vu de ces hypothèses, des réserves sont à porter sur l'analyse des résultats.

Tout d'abord, ce moyen d'interpolation part avant tout de l'hypothèse que la diminution de la valeur de la variable en jeu est constante en fonction de la distance, ce qui n'est pas forcément le cas. Pour répondre à ce problème, Lu G.Y. et Wong D.W. (2008, [3]) ont proposé une méthode adaptée à la méthode d'interpolation classique, élaborée avec l'hypothèse supplémentaire que la déperdition par la distance est fonction du nombre de points à proximité de l'inconnu. On obtiendra alors un paramètre différent selon la dispersion des données sur le territoire d'étude. Cette méthode reste cependant toujours simple à appliquer et comporte peu de calculs. Une flexibilité est alors créée sur la relation entre la distance et la diminution de la valeur de la variable en jeu. Cette méthode adaptée, utilisée pour interpoler par exemple la pluviométrie et l'altimétrie sur un territoire, ne lève pas, malgré tout, le problème lié à la configuration géographique du lieu [3].

En effet, ces deux méthodes de PID supposent que les relations entre deux sites quelconques sont simplement proportionnelles à leur distance [2,3]. L'indifférence à la configuration géographique du lieu peut alors occasionner des erreurs relativement importantes sur des sites montagneux par exemple, car seule la distance est prise en compte. D'autre part, pour Arnaud M. et Emery X. (2000, [2]), ces méthodes de PID ne permettent pas d'ajouter des variables localisées en fonction de la configuration du terrain, et donc sous-entendent une homogénéisation de ce dernier. Afin de résoudre ce problème, et ainsi de pouvoir ajouter des variables localisées supplémentaires pour prendre en compte la morphologie du territoire, Bartier, P.M., Keller, C.P. (1996, [4]) ont établi une interpolation multi variables à partir de la méthode classique de PID. En effet, l'influence des connaissances du terrain entre alors en jeu dans l'interpolation, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis, notamment sur des territoires montagneux. Cette méthode multi variables lève donc l'hypothèse que la surface entre

deux points est lisse. On peut alors identifier, lors de l'interpolation, les changements brusques de hauteur et d'élévation [4]. Ce mode multi variables est finalement plus efficace pour interpoler l'altitude d'un territoire que les méthodes précédentes.

Cependant, ces trois modèles d'interpolation basées sur la PID, émettent une réserve importante. En effet, comme l'affirment Arnaud M. et Emery X. (2000, [2]), les valeurs interpolées sont obligatoirement comprises entre les valeurs minimales et maximales connues, ce qui limite fortement la plage des résultats si peu de données sont disponibles au départ.

Finalement, sachant que l'enjeu de ce rapport est d'obtenir les températures extérieures de chaque communes françaises en 2000 et 2050 afin d'évaluer le changement climatique en France, et au vue de ce qui a été réalisé précédemment sur la base de l'interpolation par PID, peut-on généraliser précisément, sur l'ensemble du territoire, des données ponctuelles et très peu nombreuses à partir de ce modèle d'interpolation ?

Le modèle d'interpolation par PID est une méthode pour interpoler des données peu nombreuses sur un large territoire. Le manque de valeurs initiales ne porte alors pas préjudice à la validité des résultats.

2 Application de la PID aux températures extérieures sur le territoire français

2.1 Détermination des données initiales

Tout d'abord, une collecte des données fournies par Météonorm pour 2000 et par Météofrance pour 2050 est nécessaire, même si ces données sont peu nombreuses et dispersées de façons irrégulières sur le territoire métropolitain français [1]. On obtient alors les températures journalières de 17 villes en 2000 et hebdomadaires pour 22 villes en 2050. Ces communes initiales sont localisées sur les figures 1 et 2.

Figure 1 : Localisation des 17 villes de référence pour l'interpolation des températures en 2000.

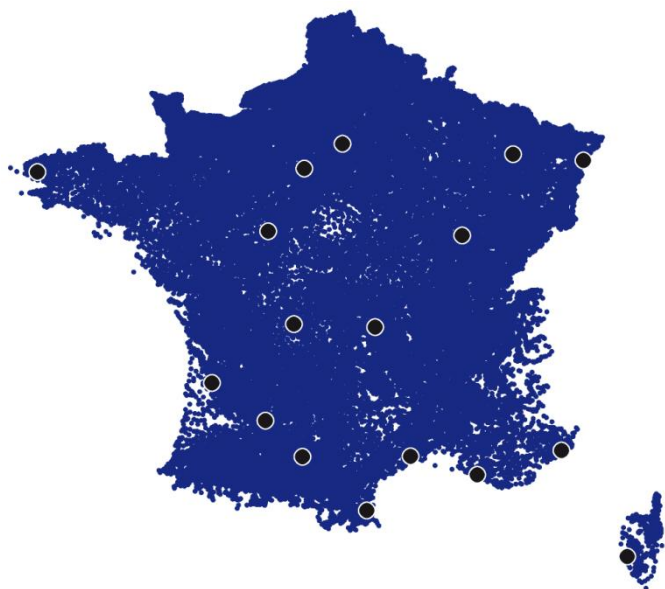
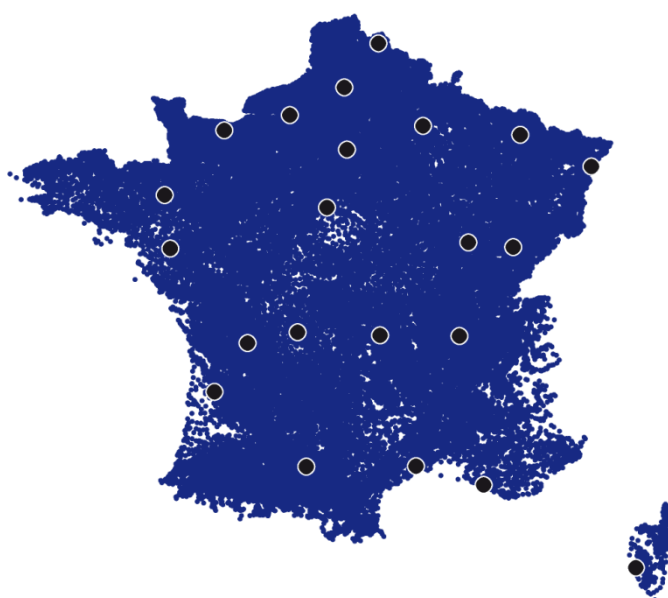


Figure 2 : Localisation des 22 villes de référence pour l'interpolation des températures en 2050.



Puis, selon nos hypothèses, les seules variables en jeu dans la détermination de la température sont l'altitude et l'ICU. En retirant ces deux effets aux températures relevées précédemment, on positionne les villes françaises au même niveau, c'est-à-dire à altitude et ICU nuls d'après Delavault, A. (2011, [5]). On obtient ainsi des températures, que l'on nomme Températures de références, qui sont indépendantes de ces deux paramètres. Les communes se situent alors sur une surface plane, ce qui permet d'appliquer l'interpolation par PID car désormais, seule la distance est prise en compte.

2.2 Interpolation des températures de référence

Après avoir obtenu ces températures de références, on applique la méthode d'interpolation de pondération inverse à la distance. Cette méthode consiste à généraliser sur l'ensemble du territoire nos données ponctuelles et non régulières. Pour cela, on applique l'expression (1) qui détermine la température T_0 , sans effets d'altitude et d'ICU, d'une commune, en fonction de la Température de référence, $T_{ref}(i)$, des communes situées à proximité et de leur distance d_i avec l'inconnue.

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^a \frac{T_{ref(i)}}{d_i^\beta}}{\sum_{i=1}^a \frac{1}{d_i^\beta}} \quad (1)$$

Dans cette expression, a représente le nombre de communes de références prises en compte à proximité de notre inconnue. Ce paramètre est obligatoirement inférieur au nombre de communes de référence (17 pour 2000 et 22 pour 2050). De son côté, β constitue un frein à l'interpolation équivalent à un frein au déplacement dans un modèle gravitaire ($\beta > 0$). Plus β est grand, plus il donne de poids aux points les plus proches et donc moins aux points les plus éloignés.

On obtient alors, à partir des villes de références, les températures T_0 maximum et minimum de l'ensemble des 36590 communes françaises sans effets d'altitude et d'ICU en 2000 et 2050. Puis, on réaffecte ces deux variables à chaque commune afin de connaître les températures exactes de celle-ci selon Delavault, A. (2011, [5]). Cela permet de déterminer les degrés-heures et ainsi de simuler le changement climatique sur cette période. (Annexe 1)

2.3 Optimisation de l'interpolation

Par la suite, on cherche à optimiser cette interpolation en faisant varier les paramètres a et β de l'expression (1). Afin de vérifier la pertinence de ce modèle selon Lu, G.Y. et Wong, D.W. (2008, [3]), on détermine l'erreur quadratique moyenne E (en %) selon les différentes valeurs des paramètres en question. On a

$$E = \frac{Q}{(1/N) \sum_{n=1}^N VO(n)} \times 100 \quad (2)$$

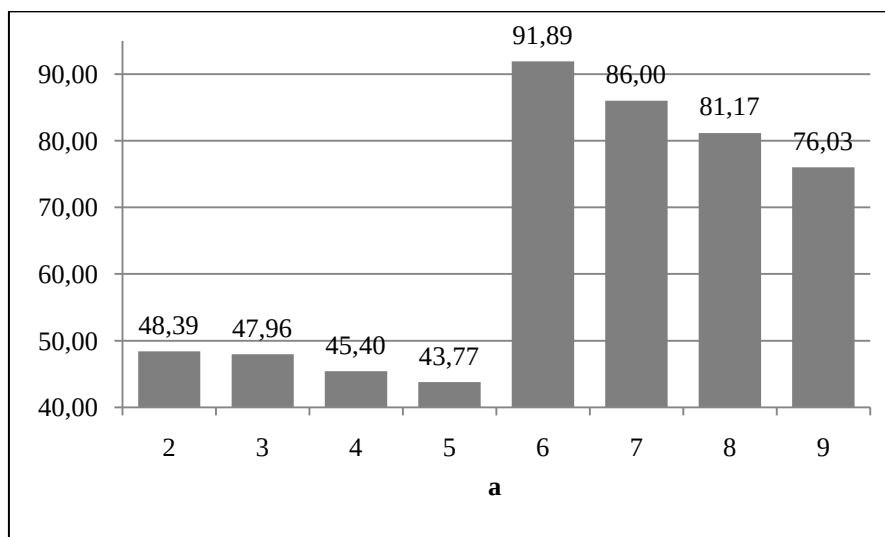
avec

$$Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (VP(n) - VO(n))^2} \quad (3)$$

où Q représente la moyenne quadratique entre la valeur observée (VO) à l'aide du simulateur de Météo France et le résultat obtenu par l'interpolation (VP). N correspond au nombre de points pris en compte pour chiffrer l'erreur (Annexe 2).

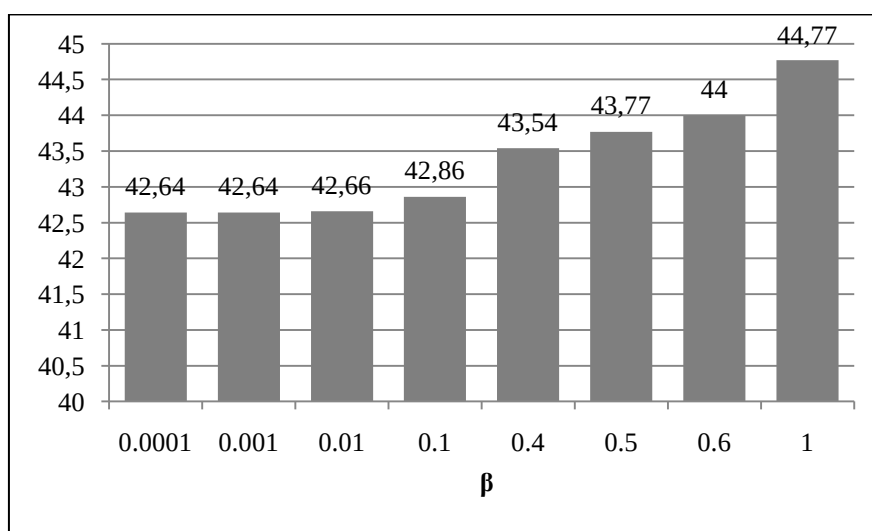
Tout d'abord, pour un β fixe, différentes valeurs de a sont étudiées afin de minimiser l'erreur due au nombre de communes à prendre en compte à proximité de l'inconnue.

Figure 3 : Erreur quadratique moyenne de l'interpolation par pondération inverse à la distance avec un paramètre β fixe ($\beta = 0.5$).



Au vue des résultats de la figure 3, on constate que l'interpolation des températures est améliorée si les 5 communes les plus proches du site en question sont retenues. A partir de cette valeur de a , les variations de β à leur tour permettent d'optimiser les résultats.

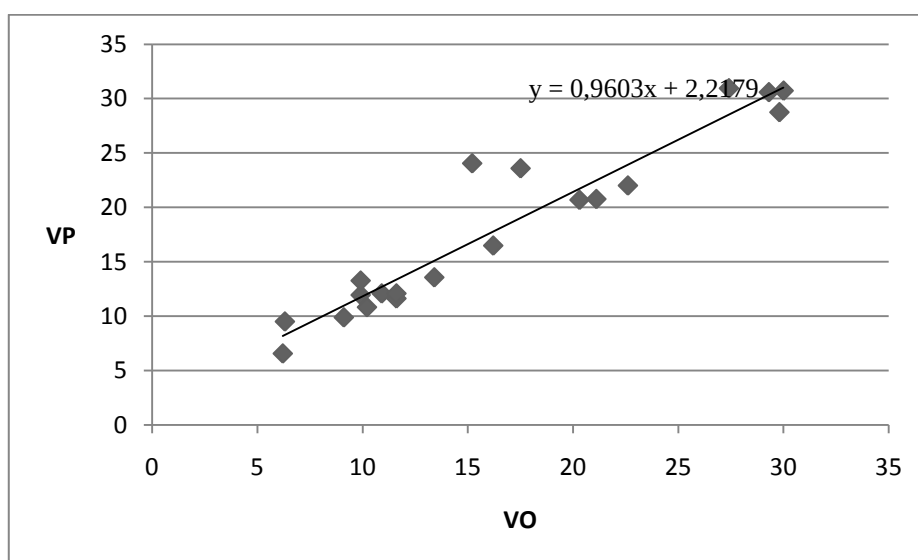
Figure 4 : Erreur quadratique moyenne de l'interpolation par pondération inverse à la distance avec un paramètre a fixe ($a = 5$).



Un poids faible sera donc attribué à β lors de l'interpolation des températures au vue de la figure 4. Cette mise en application se rapproche alors de la moyenne arithmétique des 5 valeurs retenues selon Arnaud, M. et Emery, X (2000, [2]), car les poids affectés tendent à être égaux. On constate cependant que l'erreur moyenne quadratique est de plus de 42%.

Néanmoins, en appliquant une régression linéaire à VO et VP, la pertinence de cette interpolation est vérifiée, comme le montre la figure 5.

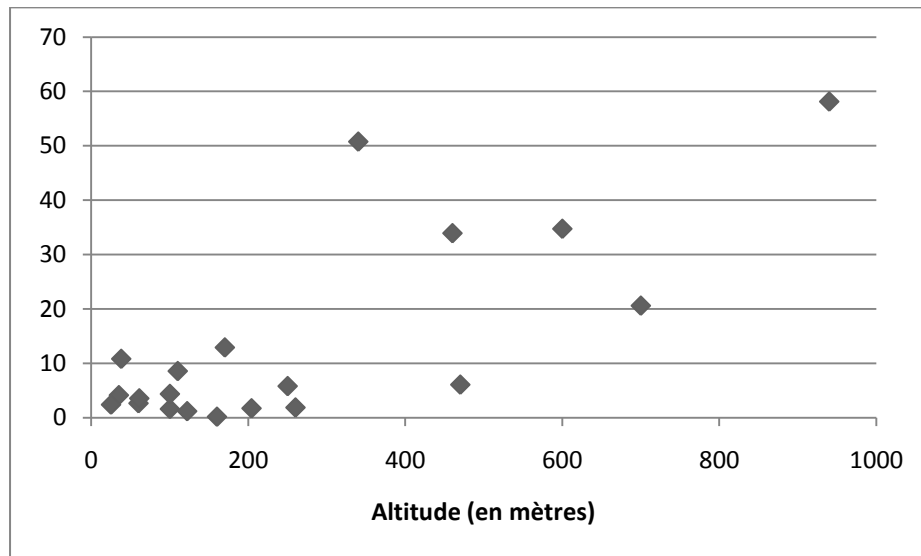
Figure 5 : Régression linéaire des valeurs observées sur le simulateur de Météo France et des valeurs obtenues par l'interpolation par la pondération inverse à la distance.



En effet, le coefficient de corrélation linéaire entre ces données est de 0.96, soit un écart de 4%. Les résultats obtenus par le calcul de la moyenne quadratique (figure 4) s'expliquent notamment par le fait que deux valeurs obtenues par l'interpolation diffèrent fortement des valeurs observées. En supprimant ces deux points lors du calcul de l'erreur quadratique moyenne, on obtient effectivement une erreur de 23,52% au lieu de 42,64%.

Ces écarts pourraient s'expliquer par la position de ces villes. En effet, comme le montre la figure 6, l'altitude joue un rôle important dans la détermination des températures.

Figure 6 : Représentation de l'erreur, en %, entre VO et VP en fonction de l'altitude des communes respectives pour les 20 points de comparaison.



On constate ainsi que les cinq écarts les plus importants coïncident avec des communes situées à plus de 300 mètres d'altitude. Un coefficient correcteur compensant cet effet d'élévation serait alors à mettre en place afin d'améliorer ce modèle d'interpolation.

Conclusion

Finalement, cette étude est limitée par les températures maximum et minimum recueillis grâce au simulateur de Météo France [1] et aux données de Météonorm. En effet, selon Arnaud M. et Emery X. (2000, [2]) les résultats de l'interpolation par pondération inverse à la distance sont bornés par les extrema des données disponibles. Malgré cela, on a réussi à simuler de manière plutôt précise le changement climatique en estimant les degrés-heures en France en 2000 et 2050 à partir de ce modèle. Les résultats ainsi obtenus sont utilisés pour la suite de ce projet dans le but d'estimer les effets du changement climatique sur les besoins de chauffage. Cependant, un autre modèle d'interpolation tel que le krigeage pourrait être mis en place afin de lever les réserves dues aux valeurs extrêmes.

De plus, même si les résultats obtenus sont relativement corrects, des paramètres supplémentaires seraient à prendre en compte afin de les affiner. Les effets de l'altitude, du vent et de l'orientation géographique des communes sur les températures extérieures pourraient être étudiés en complément de cette interpolation.

Bibliographie

1. Simulateur climatique de Météo France,
http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur
2. Arnaud, M., Emery, X. : Estimation et interpolation spatiale – méthodes déterministes et méthodes géostatiques, pp. 67—73 (2000)
3. Lu, G.Y., Wong, D.W. : An adaptative inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Dans : Computer & Geosciences, vol. 34, pp. 1044--1055 (2008)
4. Bartier, P.M., Keller, C.P. : Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using Inverse Distance Weighting (IDW). Dans : Computer & Geosciences, vol. 22, No.7, pp. 795--799 (1996)
5. Delavault, A. : La modélisation du changement climatique en 2000 et 2050 et son lien avec les besoins énergétiques des logements en France (2011)
6. Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., Wavresky, P. : Les types de climats en France, une construction spatiale. Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, document 501, mis en ligne le 18 juin 2010. URL : <http://cybergeog.revues.org/index23155.html>
7. Louisnard, O. : Initiation à MATLAB [En ligne], mis en ligne le 17 décembre 2008. URL : <http://perso.mines-albi.fr/~louisnar/matlab/polymatlab.pdf>

Table des figures

Figure 1 : Localisation des 17 villes de référence pour l'interpolation des températures en 2000.

Figure 2 : Localisation des 22 villes de référence pour l'interpolation des températures en 2050.

Figure 3 : Erreur quadratique moyenne de l'interpolation par pondération inverse à la distance avec un paramètre β fixe ($\beta = 0.5$).

Figure 4 : Erreur quadratique moyenne de l'interpolation par pondération inverse à la distance avec un paramètre a fixe ($a = 5$).

Figure 5 : Régression linéaire des valeurs observées sur le simulateur de Météo France et des valeurs obtenues par l'interpolation par la pondération inverse à la distance.

Figure 6 : Représentation de l'erreur, en %, entre VO et VP en fonction de l'altitude des communes respectives pour les 20 points de comparaison.

Table des matières

Sommaire	1
Introduction	1
1 Présentation de la méthode de pondération inverse à la distance	1
1.1 Hypothèses et avantages de cette méthode	1
1.2 Les limites de cette méthode et ses adaptations possibles	2
2 Application de la PID aux températures extérieures sur le territoire français .	3
2.1 Détermination des données initiales	3
2.2 Interpolation des températures de référence	4
2.3 Optimisation de l'interpolation	5
Conclusion	8
Bibliographie.....	9
Table des figures	10
Table des matières.....	11
Annexes.....	12
Annexe 1 : Programmation sous Matlab de l'interpolation par pondération inverse à la distance	12
Annexe 2 : Programmation sous Matlab de l'erreur quadratique moyenne	14

Annexes

Annexe 1 : Programmation sous Matlab de l'interpolation par pondération inverse à la distance

```
%function[BDT0max2050]=interpole(Xc,Yc,index1,T0max2050,a
%,BETA)

%Soit les variables exogènes suivantes:
%c le nombre de communes (c=36590).
%Soit Xc et Yc leurs coordonnées euclidiennes
%Soit C le nombre de communes pour lesquelles on dispose
%d'information (C=22).
%Soit index1 le vecteur représentant l'emplacement des C
%communes dans la base de données complète.
%Soit T0max2050 l'information connue des C communes qu'il
%faut interpoler.
%a représente le nombre de point de référence de
%l'interpolation (par exemple a=3, la commune c a pour
%référence 3 communes de C). a<=22.
%Beta sorte de frein à l'interpolation équivalent à un
%frein au déplacement dans un modèle gravitaire

%Soit la variable endogène suivante:
%BDT0max2050 est le résultat de l'interpolation pour
%l'ensemble des c communes

index1=[11164,32664,5503,8891,12988,4628,25905,7168,23391
,34898,28533,4459,22445,13640,17082,17419,30798,19762,140
42,31349,27960,12425];
index1=index1';

%X et Y représentent les coordonnées euclidiennes des C
%communes
X=Xc(index1);
Y=Yc(index1);

%T représente la variable à interpoler des C communes
T=[];
Tc1=[];
BDT0max2050=[];
for n=1:52;
    T=T0max2050;
    T=T(:,n);
```



```

%DIST représente la distance euclidienne entre les
%communes c et C
DIST=[];
for i=1:length(X);
DIST=[DIST (Xc-X(i)).^2+(Yc-Y(i)).^2).^0.5];
end

%DIST est ordonnée selon les C communes les plus proches
%de chaque c
DIST=DIST';
[DIST,index]=sort(DIST,1);
DIST=DIST';

%T est interpolé selon un frein BETA pour a communes
%prises comme référence
DIST=DIST.^(-BETA);
Tc4=T(index)';
Tc2=sum(DIST(:,1:a)')';
Tc3=[];
for i=1:a;
    Tc3=[Tc3 DIST(:,i)./Tc2];
end

%Pour les sites connus, on va obtenir DIST=0 dans la 1ère
%colonne de Tc3 donc lorsque la première colonne de Tc3
%contient un 0, BDT0max2050=T0max2050

Tc3(isnan(Tc3))=1;

Tc1=(Tc4(:,1:a).*Tc3);
BDT0max2050=[BDT0max2050 sum(Tc1')'];

end

%On veut réaffecter les effets d'altitude et d'ICU aux
%températures obtenues "BDT0max2050" en utilisant
%l'altitude et la population des villes contenues dans le
%fichier "Communes".

BDTmax2050=BDT0max2050+2,01*log(POPULATION50)-4,06-
0.55*repmat(Altitude,1,52)/100;

```

Annexe 2 : Programmation sous Matlab de l'erreur quadratique moyenne

```
%Détermination de l'erreur à partir de la base de données  
%"BDTmax2050" en fonction de a et BETA
```

```
%Soit VO la valeur des températures maximum observée sur  
%le simulateur de Météo France pour 20 villes déterminées  
%aléatoirement
```

```
VO=[9.9  
    9.9  
    10.9  
    17.5  
    22.6  
    27.4  
    29.8  
    20.3  
    6.3  
    10.2  
    11.6  
    11.6  
    13.4  
    21.1  
    15.2  
    30  
    29.3  
    16.2  
    6.2  
    9.1];
```

```
%Soit VP la valeur des températures maximum prédite par  
%l'interpolation (VP est élaborée en extrayant les 20  
%valeurs de "BDTmax2050" correspondant aux villes de VO)
```

```
VP=[BDTmax2050(2030,5)  
    BDTmax2050(4300,10)  
    BDTmax2050(10080,15)  
    BDTmax2050(11390,20)  
    BDTmax2050(14610,25)  
    BDTmax2050(22890,30)  
    BDTmax2050(23830,35)  
    BDTmax2050(26650,40)  
    BDTmax2050(30420,45)  
    BDTmax2050(35090,50)  
    BDTmax2050(8330,6)  
    BDTmax2050(30040,11)  
    BDTmax2050(3580,16)  
    BDTmax2050(1120,21)  
    BDTmax2050(16880,26)]
```

```

BDTmax2050(4020,31)
BDTmax2050(2390,36)
BDTmax2050(6850,41)
BDTmax2050(29010,46)
BDTmax2050(8480,51)];
%Soit N le nombre de points de comparaison
N=20;

%Calcul de l'erreur quadratique moyenne Q
n=1:N
Q=sqrt((sum(VP(n)-VO(n))^2)/N);

%Calcul de l'erreur en pourcentage E
E=100*Q/(sum(VO(n))/N);

```


**Analyse architecturale et constructive des différentes
typologies de logements existants en France en vue
d'estimer les besoins de chauffage en fonction du
changement climatique**

Juliette ACCADEBLED

Sommaire

Sommaire	2
1 Introduction	3
2 Etat de l'art : les typologies de logements et les effets du changement climatique sur les consommations de chauffage.....	3
3 Problématique et objectif de la recherche	7
4 Méthode et résultats : modélisation des typologies de logements.....	8
5 Conclusion	23
Bibliographie de l'état de l'art	24
Table des figures	25
Table des illustrations	25
Tables des tableaux	25
Table des matières.....	26
Annexes.....	27
1 Détermination des surfaces habitables de chacune des 5 catégories	27
2 Les coefficients Umurs et Uvitres	27

1 Introduction

Dans le contexte politique français actuel, un des objectifs posés par le Grenelle Environnement vise à diminuer nos dépenses énergétiques dans les bâtiments. Une des priorités aujourd'hui est d'utiliser les moyens disponibles à l'échelle de l'habitat afin d'améliorer leurs performances énergétiques thermiques et de concevoir des bâtiments plus sobres énergétiquement. Le chauffage représente la poste la plus consommateur d'énergie dans la facture énergétique du logement. Les besoins de chauffage sont directement liés au climat : lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure de confort, on doit utiliser le chauffage. La tendance actuelle parle de réchauffement climatique. C'est en ce sens, donc, que l'on peut penser que les besoins de chauffage vont diminuer en fonction de l'augmentation des températures.

Il s'agit alors de mettre en évidence les effets du réchauffement climatique sur les besoins de chauffage des logements existants en France actuellement¹. Un modèle quantitatif est utilisé afin d'estimer les besoins de chauffage des logements français en fonction des variations de températures.

Toutefois, la constitution de bases de données relatives aux caractéristiques constructives de l'ensemble des logements français pose problème. C'est pourquoi le classement des logements suivant différentes typologies est utilisé comme méthode.

Lorsque l'évolution des besoins de chauffage en fonction de l'augmentation des températures est connue, un modèle quantitatif nous permettra de connaître les besoins et consommations de chauffage sur l'ensemble de territoire métropolitain.

2 Etat de l'art : les typologies de logements et les effets du changement climatique sur les consommations de chauffage

L'évolution des besoins de chauffage dépend des caractéristiques constructives des logements et des variations des températures extérieures. L'enjeu ici est de savoir s'il est possible de déterminer les besoins de chauffage grâce à la méthode de classement par typologie des logements.

2.1 Classement des logements français par typologie : pourquoi cette méthode ?

Une analyse architecturale des logements français paraît être un exercice complexe et long. En effet, d'après l'INSEE (2006, [1]), il existe 28 millions de résidences principales en France en 2010.

La typologie n'est pas seulement un outil de classement qui repose sur des inventaires mais un outil intellectuel qui permet d'introduire un sens, une explication

¹ L'étude de l'ensemble des logements étudiés s'appuie sur ceux existants en 2000 et ne prend pas en compte les nouvelles constructions réalisées après 2000.

et un ordre dans la masse des faits bâtis à partir de conditions de conception et de production (Chiffard J-F. et al, 1977, [2]). Un type regroupe un ensemble de propriétés constantes qui caractérisent un moment de la production architecturale. La structure d'un type rassemble alors un ensemble de caractéristiques qui le différencient d'un autre. Par exemple, une des caractéristiques peut être l'utilisation de différents matériaux de construction suivant différents types. De plus, un type architectural possède un « pouvoir générateur » propre vis-à-vis de son contexte : il est toujours destiné à rentrer en rapport avec une forme urbaine déterminée. Il contribue à la constitution d'une forme urbaine par sa présence propre, par l'appartenance de certains de ses éléments qui le rattachent à l'espace urbain, par sa répétition et son mode d'assemblage (Chiffard J-F. et al, 1977, [2]).

La morphologie urbaine conditionne la construction d'un type. D'après Chiffard J-F. et al (1977, [2]), elle le contraint et suscite des caractéristiques particulières liées à l'environnement d'implantation. Or, les besoins énergétiques des bâtiments dépendent fortement de la morphologie urbaine dans lesquels ils s'inscrivent (Maïzia M., 2007, [3]).

La construction et l'évolution de la morphologie urbaine et des typologies architecturales sont liées à une époque. Une des caractéristiques majeures qui permet de différencier les typologies de bâtiments est l'époque de construction. En effet, les données historiques liées à la construction des bâtiments permettent de renseigner une partie des paramètres nécessaires à estimer les besoins de chauffage des logements (APUR, 2007, [4]). L'approche par la typologie architecturale des logements en fonction de l'époque de construction paraît alors être pertinente dans l'étude de l'estimation des besoins des logements français.

2.2 Les deux éléments clef de la typologie du logement : le type de logement et l'époque de construction

Dans la littérature, plusieurs ouvrages traitent des différentes typologies de logements (immeubles collectifs, maisons individuelles ...) mais bien souvent, les techniques architecturales et caractéristiques relatives aux époques de construction (matériaux de construction, surface habitable, ...) sont peu développées. Il est alors difficile de pouvoir confronter plusieurs points de vue et méthodes. Cependant, il existe quelques études sur la typologie architecturale.

Les types de logements

D'après l'INSEE [5], un logement est un local utilisé pour l'habitation. Il peut être séparé par des parties communes de l'immeuble (immeuble collectif) ou indépendant avec une entrée principale en accès direct avec l'extérieur, sans devoir traverser un autre local (maison individuelle ou immeuble).

On peut alors distinguer deux types de logements : le type de logement « appartement d'un immeuble collectif » et le type de logement « maison individuelle ».

Un immeuble collectif se définit par la construction d'au moins deux logements et ses caractéristiques architecturales et le nombre de logements varient suivant l'époque de construction

Contrairement à un immeuble, une maison se caractérise par un seul logement.

Les deux types de logements « maison individuelle » et « appartement » sont retenus. Dans chacun de ces types, il peut y avoir plusieurs sous-types. On peut distinguer les différentes époques auxquelles ils ont été construits. Cette méthode a été adoptée dans une étude de l'APUR² (2007, [4]).

L'époque de construction

Le travail de construction d'une typologie admet la continuité historique du passé et du présent³ (Castex J., 2001, [6]). En ce sens, les caractéristiques propres d'une certaine typologie de logement seraient liées à l'époque de construction de ce logement. La période de construction renvoie à la manière de construire et à l'utilisation de matériaux. Dans l'étude faite par l'APUR (2007, [4]), les architectes ont déterminé différentes typologies de logements parisiens en fonction des données historiques liées à la construction des bâtiments. Cette analyse architecturale est très complète et a nécessité différentes méthodes de travail pour la datation des bâtiments : une phase de collectes de données connues par le biais d'études antérieures⁴ et une phase d'enquête sur le terrain. Pour l'étude effectuée dans le cadre de ce Projet de Fin d'Etudes, il est évident que la phase d'enquête sur le terrain ne peut se faire à l'échelle métropolitaine.

La date de construction des logements français est une information qui n'existe pas jusqu'alors. Le but de cette étude n'est pas de former une base de données renseignant sur ces dates de constructions mais de classer les logements français suivant une typologie en fonction du type de logement (maison ou appartement) et de date de construction. Les périodes de construction retenues dans l'étude de l'APUR sont les suivantes : avant 1800, 1801-1850, 1851-1914, 1918-1939, 1945-1967, 1968-1975, 1976-1981, 1982-1989, au-delà de 1990 (APUR, 2007, [4]). Ces neuf catégories sont très détaillées et ont été établies en fonction du bâti parisien. A l'échelle nationale, l'INSEE (2006, [7]) a déterminé six catégories de période de construction : avant 1948, 1949-1974, 1975-1981, 1982-1992, 1993-1996, 1997-2001. On remarque que la première catégorie déterminée par l'INSEE regroupe les quatre premières périodes de l'étude APUR. Les périodes de construction suivantes de l'INSEE correspondent pour certaines à des réglementations thermiques⁵.

D'autres paramètres à prendre en compte

Une typologie comprend plusieurs caractéristiques qui la différencient d'une autre. En plus du type de logement et de la période de construction, une autre caractéristique peut être rajoutée, à savoir la surface du logement. En effet, suivant le type de logement (maison ou appartement), la surface peut varier. On distingue 5 catégories : moins de 40 m², de 40 à 70 m², de 70 à 100 m², de 100 à 150 m², 150 m² ou plus. En ajoutant cette caractéristique à la typologie de logement, cette dernière se précise mais en parallèle le nombre de typologies augmente.

² Atelier Parisien d'Urbanisme

³ Cette méthode est originaire d'Italie dans l'Ecole Muratorienne fondée par Saverio Muratori (1910-1973).

⁴ Etude de François Loyer sur les immeubles du XIX^e siècle : « Paris XIX^e siècle, l'immeuble et l'espace urbain »

⁵ Réglementations thermiques de 1974, 1981 et 1989

Une typologie de logement peut être considérée seulement du simple point de vue de l'unité bâtiment. Or, la morphologie urbaine et la configuration physique du voisinage plus ou moins immédiat du logement peut également être une des caractéristiques comprises dans la typologie. Du point de vue énergétique, augmenter la compacité à l'échelle urbaine permet de réduire significativement les déperditions de chaleur par les parois du bâtiment (Maïzia M., 2008, [8]). Néanmoins, cette caractéristique est difficile à prendre en compte à l'échelle nationale.

Nous retenons donc comme caractéristiques de chaque typologie de logements le type de logement, l'époque de construction et la surface habitable.

2.3 Les caractéristiques du bâti existant

L'étude effectuée par l'APUR permet de connaître principalement les caractéristiques architecturales des immeubles parisiens existants et elles peuvent être utilisées pour définir le type de logement « immeuble » de l'ensemble du territoire métropolitain (APUR, 2007, [4]). Concernant les maisons individuelles, les données sont peu développées dans l'étude de l'APUR car l'essentiel des logements parisiens sont des appartements. Pour le type de logement « immeuble », les données sont donc trouvées.

Pour le type « maison individuelle », l'ouvrage *NEUFERT – Les éléments des projets de construction*⁶ (2006, [9]) s'avère être une source d'informations intéressantes. Y sont décrits les différents matériaux de construction des murs extérieurs (enduit, isolation, blocs de maçonnerie...) et leurs épaisseurs. Ces deux informations se révèlent indispensables car, comme expliqué précédemment, les caractéristiques architecturales et la manière de construire sont liées à l'époque de construction. Tous les éléments de construction d'une maison sont décrits dans cet ouvrage comme la toiture (forme et matériaux), les fenêtres, le vitrage, etc. Il existe seize types de toitures. Le toit à deux versants ou en bâtière est la forme la plus répandue.

Cependant, le *NEUFERT* décrit les ouvrages de maçonnerie réalisés dans la construction de maisons après les premières réglementations thermiques de 1974 et 1982. Les informations manquent toujours pour les constructions effectuées avant ces dernières, soit pour les périodes « avant 1948 » et « de 1949 à 1974 ». Un entretien avec un architecte pourrait être un moyen de connaître ces informations.

2.4 Réchauffement climatique et construction du bâtiment : deux éléments qui impactent sur les besoins énergétiques

L'étude menée au Laboratoire des Sciences Appliquées en Bâtiments en Suisse (2005, [10]), montre une augmentation des températures d'ici 2050-2100 ainsi qu'une diminution des besoins de chauffage et une augmentation des besoins en climatisation. Les données météorologiques proviennent de bases de données de MeteoSwiss et sont observées sur la période 1985-2003 et des scénarios climatiques

⁶ 9^{ème} édition française revue et corrigée *NEUFERT, les éléments des projets de construction* parue en 2006.

sont élaborés sur la base des augmentations observées sur cette période. Une simulation énergétique dynamique sur un bâtiment a été réalisée. Ici on ne s'intéresse qu'aux résultats concernant les logements et non l'ensemble des bâtiments étudiés (tertiaire, commerces...). En résultat, on obtient des risques de surchauffe de mai à septembre avec des vagues de chaleur plus intenses et plus longues. Cependant, avec une bonne isolation, le nombre de jour de grande chaleur diminue. De plus, le niveau d'isolation permet une réduction du nombre de jours de la période de chauffe. La ventilation de nuit permet de refroidir l'air intérieur chauffé pendant la journée. Une diminution de 44% sur les besoins de chauffage sera possible dans le résidentiel avec le meilleur des scénarios climatiques élaborés dans cette étude. Ces résultats sont en accord avec ceux présentés par Christenson dont la méthode est basée sur les DJU⁷. On peut donc valider la méthode mise en place ici car les résultats recoupent ceux d'une méthode DJU. Cependant, cette étude n'est pas complète et d'autres paramètres sont à prendre en compte tels que les évolutions futures dans les constructions (augmentation des surfaces vitrées..), l'utilisation optimale de l'inertie thermique des matériaux de construction couplée à la ventilation et au refroidissement et les effets de l'îlot de chaleur urbain qui augmente les températures extérieures.

3 Problématique et objectif de la recherche

Rappelons que l'enjeu de ce rapport est de savoir s'il est possible de déterminer les besoins de chauffage suivant deux paramètres : la méthode de classement par typologie des logements et les variations de températures.

L'estimation des besoins de chauffage, des logements existants, en fonction de l'augmentation des températures est-elle théoriquement modélisable et exploitable grâce à une approche de classement par typologies des logements ?

On estime que le classement par typologie de logement va permettre de déterminer les besoins de chauffage en fonction de l'augmentation des températures.

L'objectif de ce rapport est alors de vérifier et démontrer que la réponse énoncée est vraie. Dans un premier temps, il s'agit de dresser les caractéristiques constructives des logements et de classer ces derniers suivant différentes typologies. Puis dans un second temps, il s'agit de calculer les besoins de chauffage des différentes typologies de logements et de voir leur évolution en fonction des variations de températures.

⁷ Degrés Jour Unifiés.

4 Méthode et résultats : modélisation des typologies de logements

4.1 Caractéristiques architecturales et constructives des logements

Comme vu précédemment, les caractéristiques architecturales et constructives se rapportent au type de logement (maison ou appartement) et à l'époque de construction. Les époques de construction sont au nombre de sept⁸ : avant 1949, de 1949 à 1974, de 1975 à 1981, de 1982 à 1989, de 1990 à 1998, 1999 et après 1999. On remarque ici que la sixième période de construction ne constitue pas un intervalle mais seulement l'année 1999. Les différences de caractéristiques constructives entre la cinquième et sixième période ne seront donc pas remarquables. On pose alors comme hypothèse que le seul changement notable dans les caractéristiques des logements concerne la ventilation. Il est considéré plus efficace et performant en 1999 que pour la période 1990-1998

A ce stade, le nombre de typologies de logements s'élève alors à 14. Cependant, la typologie peut être affinée en ajoutant la caractéristique de surface habitable. Suivant le type de logement, la surface peut varier. Le nombre de catégories de surface habitable retenu est de cinq⁹ : moins de 40 m², de 40 à 70 m², de 70 à 100 m², de 100 à 150 m², 150 m² ou plus. En ajoutant cette caractéristique à la typologie de logement, cette dernière se précise mais en parallèle le nombre de typologies augmente et atteint 70 typologies (2x7x5).

En vue d'estimer les besoins de chauffage des logements, il faut déterminer quels sont les éléments déperditifs de ces derniers. Le principal élément est l'enveloppe directement en contact avec l'environnement extérieur. Celle-ci dépend des modes architecturaux et donc à des époques de construction ainsi que du type de logement. Les surfaces déperditives des maisons individuelles sont les parois verticales (murs), le toit et le sol. Pour les appartements, il existe deux configurations : soit l'appartement est situé au milieu de l'immeuble et ne possède comme surface déperditive que les parois verticales, soit il est situé au premier ou dernier étage de l'immeuble et possède, en plus des parois verticales, le sol ou le toit respectivement.

Chaque typologie est enrichie d'hypothèses relatives à la constitution des parois (opaques et vitrées) de l'enveloppe, à la configuration et l'orientation du logement, etc. Il est nécessaire d'indiquer ici que l'ensemble des hypothèses posées dans cette étude ne fait pas partie d'un consensus parfaitement établi et elles peuvent être critiquées et discutables par beaucoup d'experts.

Les cinq catégories de surface habitable sont : moins de 40m², de 40 à 70 m², de 70 à 100 m², de 100 à 150 m² et plus de 150m². Les deux types de logements (maison ou appartement) se répartissent de manière hétérogène suivant les surfaces habitables. En effet, il existe peu de maisons de moins de 70 m² alors que la majorité des

⁸ Déterminées à partir de la base de données utilisée lors des calculs des consommations de chauffage des logements français sur l'ensemble du territoire métropolitain.

⁹ Déterminées à partir de la base de données utilisée lors des calculs des consommations de chauffage des logements français sur l'ensemble du territoire métropolitain.

appartements se situent dans ces catégories. Les maisons ayant une surface habitable comprise entre 70 et 100m² sont les plus répandues. Au-delà de 100m², les maisons représentent une part importante contrairement aux appartements qui sont plus rares. On souhaite disposer d'une seule surface habitable par catégories. On effectue alors la moyenne de l'intervalle de chacune d'elles. De plus, au-delà de 85m², les logements, aussi bien maison individuelle qu'appartement, possèdent deux étages. Enfin, chaque logement est considéré comme un rectangle.

On considère que les maisons individuelles de moins de 85m² sont mitoyennes sur les deux façades de largeur de la maison. Ces deux façades sont orientées est et ouest. Les façades nord et sud jouissent alors d'une surface vitrée. Pour une surface habitable de 85m², on considère la mitoyenneté sur une seule façade sur la largeur de la maison. Cette façade peut être orientée est ou ouest¹⁰. Trois façades (dont celles nord et sud) jouissent alors de surfaces vitrées. Au-delà de 125m², les maisons ne possèdent aucune surface d'enveloppe mitoyenne.

Les schémas ci-dessous permettent de visualiser la disposition des maisons mitoyennes pour les surfaces habitables inférieures à 125m² (schémas 1 et 2). Au-delà, les maisons ne sont plus mitoyennes (schéma 3).

¹⁰ Les façades est et ouest reçoivent la même quantité d'énergie solaire. On peut donc considérer ici l'une ou l'autre.

Schéma 1 : Maisons mitoyennes sur deux façades

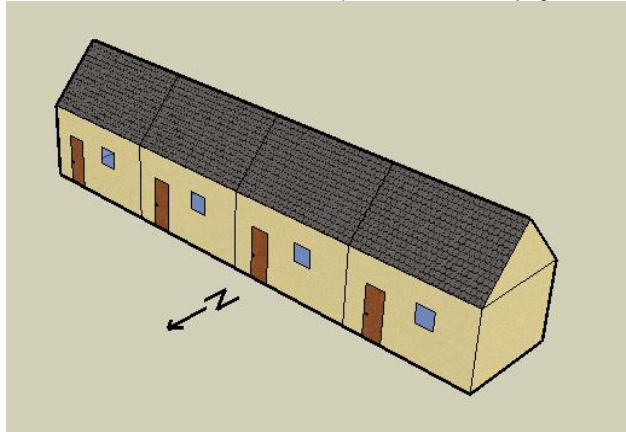
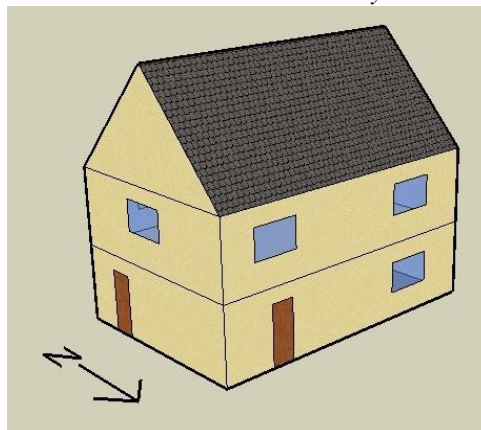


Schéma 2 : Maisons mitoyennes sur une façade



Schéma 3 : Maison non mitoyenne



La forme de toit la plus répandue est celle à deux versants ou en bâtière. On considère une pente de $47,5^\circ$. La surface de toiture est calculée grâce à la formule de largeur d'un pan de toit : $\text{Largeur d'un pan de toit} = (\text{largeur au sol}/2) / \cos(47,5)$.

Pour les appartements en immeubles collectifs, on pose l'hypothèse qu'ils se situent tous au milieu de l'immeuble et non au rez-de-chaussée ou au dernier étage. Il y a donc des répercussions sur les surfaces d'enveloppe déperditives car on ne prend pas en compte le toit, le sol et les portes¹¹ comme des surfaces déperditives. Cependant, les appartements situés au rez-de-chaussée ou au dernier étage perdent beaucoup de chaleur par le sol ou le toit. On juge alors pertinent de prendre les quatre parois verticales comme surfaces déperditives afin d'arriver à une moyenne et une compensation de perte de chaleur. Un appartement de ce type est très difficile à représenter schématiquement. De plus, le nombre d'appartements situés au milieu d'un immeuble est supérieur à celui des appartements situés au rez-de-chaussée ou au dernier étage d'un immeuble. Concernant les appartements, on considère qu'à partir de 125m^2 , les logements comptent deux niveaux. En dessous de 125m^2 , les logements ont un seul niveau.

Les caractéristiques architecturales et constructives qui permettent de qualifier l'enveloppe de chaque typologie proviennent de l'étude de l'APUR, d'entretiens avec un architecte¹², et de bases de données. Elles ont été récoltées en vue de renseigner le logiciel de calculs des besoins énergétiques¹³ utilisé pour cette étude. Les deux tableaux ci-dessous (tableaux 1 et 2) synthétisent l'ensemble de ces informations concernant les types de logements et l'époque de construction. Les cinq catégories de surface ne sont pas représentées dans ce tableau mais constituent l'objet des tableaux 3 et 4.

¹¹ Les portes d'entrée des appartements sont considérées comme ne donnant pas sur l'environnement extérieur direct mais sur un couloir intérieur où la température est supérieure à celle extérieure. Ici, les portes ne sont donc pas considérées comme des surfaces déperditives.

¹² Hervé Amiot, architecte – cabinet Architecteurs

¹³ Logiciel 2COC_2° - cours d'énergie urbaine M. Maïzia

*Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques constructives du type de logement
maison individuelle*

EPOQUE DE CONSTRUCTION	Avant 1949	1949-1974	1975-1981	1982-1989	1990-1998	1999	Après 1999
HSP¹⁴	3m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m
Surface vitrée	10% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	13% de surf. habitable
Répartition des surfaces vitrées	Même % sur chaque façade ¹⁵	Même % sur chaque façade	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)
Matériau des parois verticales opaques	30 cm de brique	15 cm de béton plein	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers
Isolation des murs	/	/	4cm de laine de verre	5cm de laine de verre	8cm de laine de roche ¹⁶	8cm de laine de roche	9cm de laine de roche
Type de fenêtre et de vitrage	Fenêtres battantes simple – simple vitrage et volets perméables à l’air	Fenêtres battantes simple – simple vitrage et volets perméables à l’air	Fenêtres battantes double, lame 6mm et volets perméables à l’air	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (air) 4(12)4	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (air) 4(12)4	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (air) 4(12)4	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (argon) 4(12)4
Type de porte	Non isolée	Non isolée	Non isolée	Non isolée	Isolée	Isolée	Isolée
Toiture : matériau et forme	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°	Ardoise / tuile En bâtière Pente 47,5°
Isolation de la toiture	/	/	/	/	/	/	25cm de laine de roche
Sol	Dalle béton de 5cm sur vide sanitaire	Dalle béton de 5cm sur vide sanitaire	Dalle béton de 10cm sur vide sanitaire	Dalle béton de 12cm sur vide sanitaire	Dalle béton de 12cm sur vide sanitaire	Dalle béton de 12cm sur vide sanitaire	Dalle béton de 12cm sur vide sanitaire
Isolation du sol	/	/	/	/	4cm de laine de verre	4cm de laine de verre	4cm de laine de verre
Ponts thermiques	k = 0,10	k = 0,90	k = 0,75	k = 0,50	k = 0,50	k = 0,50	k = 0,35
Ventilation	Naturelle	Naturelle	VMC hygro A	VMC hygro A	VMC hygro A	VMC hygro B	VMC hygro B

¹⁴ Hauteur Sous Plafond

¹⁵ Elément peu pris en compte à l’époque

¹⁶ Laine de roche plus performante que laine de verre

Tableau 2 : Synthèse des caractéristiques constructives du type de logement appartement

EPOQUE DE CONSTRUCTION	Avant 1949	1949-1974	1975-1981	1982-1989	1990-1998	1999	Après 1999
HSP	3m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m
Surface vitrée	10% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	12% de surf. habitable	13% de surf. habitable
Répartition des surfaces vitrées	Même % sur chaque façade	Même % sur chaque façade	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)	Surf. vitrée de plus en plus importante sur la façade sud (50%)
Matériau des parois verticales opaques	40 cm de brique	15 cm de béton plein	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers	20 cm de blocs de maçonnerie creux de béton granulats légers
Isolation des murs	/	/	4cm de laine de verre	5cm de laine de verre	8cm de laine de roche	8cm de laine de roche	9cm de laine de roche
Type de fenêtre et de vitrage	Fenêtres battantes simple – simple vitrage et volets perméables à l'air	Fenêtres battantes simple – simple vitrage et volets perméables à l'air	Fenêtres battantes double, lame 6mm et volets perméables à l'air	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (air) 4(12)4	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (air) 4(12)4	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (air) 4(12)4	Fenêtres double vitrage à isolation thermique renforcée (argon) 4(12)4
Ponts thermiques (k^{17})	k = 0,10	k = 0,90	k = 0,75	k = 0,50	k = 0,50	k = 0,50	k = 0,35
Ventilation	Naturelle	Naturelle	VMC hygro A	VMC hygro A	VMC hygro A	VMC hygro B	VMC hygro B

Les matériaux qui constituent les parois des logements ont été déterminés grâce à l'époque de construction. On distingue trois périodes :

- Avant 1949 : le parc d'avant guerre n'est pas très performant (à cause de la pierre ou de la brique) mais les déperditions restent raisonnables car les méthodes de construction génèrent peu de ponts thermiques et les surfaces vitrées restent faibles.
- De 1949 à 1974 : cette période correspond à l'époque de construction la moins performante. Les méthodes étaient mal maîtrisées et particulièrement « énergivores ». Les murs sont peu épais, le béton est utilisé systématiquement, les surfaces de vitrages ont augmenté et les ponts thermiques ne sont pas traités.
- Après 1975 : l'isolation fait son apparition de façon systématique et les exigences des différentes réglementations thermiques renforcent les performances des logements.

¹⁷ k est le coefficient qui détermine la valeur des ponts thermiques. Au plus k est élevé, plus les ponts thermiques sont importants et moins le logement est performant. C'est pourquoi k(avant 1949) est inférieur à k(1949-1974) dans les tableaux 1 et 2.

On sait que les catégories de surface habitable sont au nombre de cinq. Les éléments constitutifs du logement, comme les surfaces vitrées, la superficie de la toiture, etc., dépendent des surfaces habitables mais pas de la même manière suivant une maison ou un appartement.

Pour une maison individuelle, les surfaces d'enveloppe prises en compte sont les parois verticales, le sol en contact avec l'extérieur et le toit (tableau 3).

Pour un appartement, seules les parois verticales sont des surfaces déperditives (tableau 4).

Tableau 3 : Synthèse des surfaces suivant les époques de construction du type de logement maison

SURFACE HABITABLE	20m²	55m²	85m²	125m²	150m²	
HSP	3m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	
Superficie et nombre de niveaux	20 m ² (5m x 4m) 1 niveau	55 m ² (9,2m x 6m) 1 niveau	85 m ² (7,7m x 5,5m) 2 niveaux	125 m ² (9,6m x 6,5m) 2 niveaux	150 m ² (10m x 7,5m) 2 niveaux	
Configuration spatiale de la maison	Mitoyenne sur deux façades	Mitoyenne sur deux façades	Mitoyenne sur une façade	Murs non mitoyens	Murs non mitoyens	
Surface vitrée et répartition sur les façades	2m ² 1m ² nord 1m ² sud	5,5m ² 2,75m ² nord 2,75m ² sud	8,5m ² 2,8m ² nord 2,8m ² sud 2,8m ² est	12,5m ² 3,1 nord 3,1 sud 3,1 m ² est 3,1m ² ouest	15m ² 3,75m ² nord 3,75m ² sud 3,75m ² est 3,75m ² ouest	10% de surf. habitable (avant 1949)
	2,4m ² 0,6m ² nord 1,8m ² sud	6,6m ² 1,65m ² nord 4,95m ² sud	10,2m ² 2,55m ² nord 5,10m ² sud 2,55m ² est	15m ² 4,5m ² nord 7,5m ² sud 1,5m ² est 1,5m ² ouest	18m ² 5,4m ² nord 9m ² sud 1,8m ² est 1,8m ² ouest	12% de surf. habitable (de 1949 à 1999)
	2,6m ² 0,65m ² nord 1,95m ² sud	7,15m ² 1,8m ² nord 5,4m ² sud	11m ² 2,8m ² nord 5,5m ² sud 2,8m ² est	16,25m ² 5m ² nord 8m ² sud 1,6m ² est 1,6m ² ouest	19,5m ² 5,8m ² nord 9,8m ² sud 2m ² est 2m ² ouest	13% de surf. habitable (après 1999)
Surface des parois verticales opaques	28m ²	49,7m ²	120m ²	184,2m ²	199m ²	Avant 1949
	22,6m ²	39,4m ²	97,3m ²	149,5m ²	161m ²	De 1949 à 1999
	22,4m ²	38,85m ²	97,5m ²	148,3m ²	159,5m ²	Après 1999
Surface de(s) porte(s)	1 porte 1,5m ²	2 portes 3m ²	2 portes 3m ²	3 portes 4,5m ²	3 portes 4,5m ²	
Surface de toiture	29,6m ²	81,7m ²	62,7m ²	92,4m ²	111m ²	
Surface d'enveloppe au sol	20 m ²	55 m ²	42,5m ²	62,4m ²	75m ²	

Tableau 4 : Synthèse des surfaces suivant les époques de construction du type de logement appartement

SURFACE HABITABLE	20m²	55m²	85m²	125m²	150m²	
HSP	3m	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	
Superficie et nombre de niveaux	20 m ² (5m x 4m) 1 niveau	55 m ² (9,2m x 6m) 1 niveau	85 m ² (7,7m x 11m) 1 niveau	125 m ² (9,6m x 6,5m) 2 niveaux	150 m ² (10m x 7,5m) 2 niveaux	
Surface vitrée et répartition sur les façades	2m ² 0,5m ² nord 0,5m ² sud 0,5m ² est 0,5m ² ouest	5,5m ² 1,4m ² nord 1,4m ² sud 1,4m ² est 1,4m ² ouest	8,5m ² 2,1m ² nord 2,1m ² sud 2,1m ² est 2,1m ² ouest	12,5m ² 3,1 nord 3,1 sud 3,1 m ² est 3,1m ² ouest	15m ² 3,75m ² nord 3,75m ² sud 3,75m ² est 3,75m ² ouest	10% de surf. habitable (avant 1949)
	2,4m ² 0,8m ² nord 1,2m ² sud 0,3m ² est 0,3m ² ouest	6,6m ² 2,2m ² nord 3,3m ² sud 0,7m ² est 0,7m ² ouest	10,2m ² 3,4m ² nord 5m ² sud 1m ² est 1m ² ouest	15m ² 4,5m ² nord 7,5m ² sud 1,5m ² est 1,5m ² ouest	18m ² 5,4m ² nord 9m ² sud 1,8m ² est 1,8m ² ouest	12% de surf. habitable (de 1949 à 1999)
	2,6m ² 0,8m ² nord 1,3m ² sud 0,3m ² est 0,3m ² ouest	7,15m ² 2,1m ² nord 3,6m ² sud 0,7m ² est 0,7m ² ouest	11m ² 3,3m ² nord 5,5m ² sud 1m ² est 1m ² ouest	16,25m ² 5m ² nord 8m ² sud 1,6m ² est 1,6m ² ouest	19,5m ² 5,8m ² nord 9,8m ² sud 2m ² est 2m ² ouest	13% de surf. habitable (après 1999)
	28m ²	49,7m ²	120m ²	184,2m ²	199m ²	Avant 1949
	22,6m ²	39,4m ²	97,3m ²	149,5m ²	161m ²	De 1949 à 1999
	22,4m ²	38,85m ²	97,5m ²	148,3m ²	159,5m ²	Après 1999
Surface des parois verticales opaques						

4.2 Calculs pour estimer les besoins de chauffage des logements

Les différentes typologies doivent être établies de manière cohérente. C'est pourquoi, des hypothèses sont énoncées afin de justifier les choix adoptés.

Pour chaque époque de construction, on a déterminé de manière théorique des caractéristiques constructives qui lui sont propres (tableaux 1, 2, 3 et 4). Or, dans la réalité, un logement peut voir ses caractéristiques évoluer dans le temps. Par exemple, actuellement, une maison construite avant 1949 peut avoir été améliorée avec des travaux de rénovation comme la pose de double vitrage ou triple vitrage ou encore la mise en place d'une isolation des parois verticales et horizontales. Les besoins de chauffage vont alors diminuer. Cependant, dans la modélisation théorique, pour chacune des époques de construction, on ne modélise pas ces travaux de rénovation et donc pas la diminution des besoins de chauffage.

La performance thermique des enveloppes et de leurs matériaux est déterminée par le coefficient U qui est fonction de la période de construction du logement. Plus U est élevé, moins les parois sont performantes. Le rapport de l'APUR nous donne les valeurs des Umurs et Uvitres. Toutefois, les résultats obtenus ne correspondent pas exactement aux valeurs des réglementations thermiques. Les Umurs théoriques diminuent avec le temps mais ils sont bien inférieurs à ceux définis par les réglementations thermiques. Néanmoins, cela reste généralisé à l'ensemble des époques de construction et on peut donc poser l'hypothèse que cela n'a pas d'influence sur les résultats (ils ne seront pas faussés). De plus, cela peut compenser les pertes de chaleur des anciens logements considérés comme non-rénovés présentés précédemment.

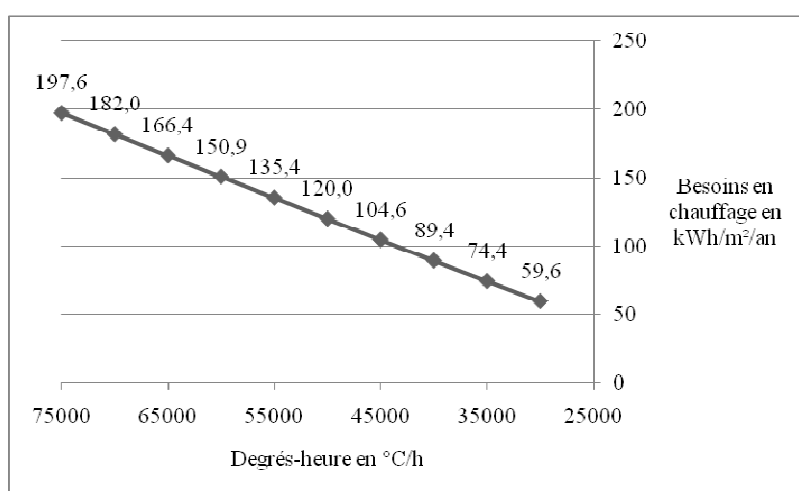
A ce stade, on peut effectuer le bilan énergétique thermique des logements en ajoutant un nouveau paramètre : l'augmentation des températures. On se place uniquement dans le cadre d'une étude en termes de chauffage. Le bilan est effectué sur l'ensemble de la période de chauffe. Cette période représente l'ensemble des mois de l'année pour lesquels les besoins et les consommations de chauffage sont comptabilisés. La période de chauffe est l'unité de temps considérée dans l'étude mais elle peut être étendue à l'année car le chauffage ne fonctionne que pour cette période. Elle est déterminée grâce à l'indicateur degrés-heure (DH). Cet indicateur est le résultat de la mesure de la température horaire moyenne extérieure d'un lieu géographique donné, par rapport à la température de référence intérieur ou température de confort intérieur. Ils sont ensuite cumulés sur la durée de la période de chauffe et ils servent à comparer les besoins et les consommations de chauffage d'un logement d'une année à l'autre. Concrètement, plus les DH sont élevés, plus le climat est rigoureux. Lorsqu'ils diminuent, cela prouve que le climat se réchauffe et le nombre de jours de la période de chauffe diminue également¹⁸. Actuellement, les DH sont définis suivant des zones climatiques françaises et varient entre 63 000°C.h (zone climatique ayant les températures les plus froides) et 37 000°C.h (zone climatique ayant les températures les plus élevées).

¹⁸ Comme l'a montré Thomas Frank dans l'étude présentée dans l'état de l'art..

On pose l'hypothèse que le climat va se réchauffer et donc les DH vont diminuer (ainsi que le nombre de jours de la période de chauffe). Ces variations de DH permettent de modéliser des scénarios climatiques sur l'évolution des températures.

Par exemple, pour une maison individuelle de 55 m² construite entre 1982 et 1989, on obtient la droite suivante lorsque les DH varient de 75 000 à 30 000°C.h. La fonction de la droite permet de connaître les besoins de chauffage de cette maison suivant les variations de DH.

Figure 1 : Evolution des besoins de chauffage en fonction du réchauffement climatique d'une maison individuelle de 55 m² construite entre 1982 et 1989



Entre 75 000°C.h et 30 000°C.h, les besoins ont été divisés par 3 en passant de 197,6kWh/m²/an à 59,6kWh/m²/an respectivement soit une diminution de 70% des besoins de chauffage.

Ainsi, pour n'importe quels DH donnés, on peut connaître les besoins de chauffage de toutes les typologies.

4.3 Résultats et interprétations relatifs aux types de logements, époques de construction et surface habitable pour une valeur de DH donnée

Les tableaux ci-dessous montrent les résultats des besoins de chauffage des 70 typologies. Ils ont été établis lorsque les DH sont égaux à 50 000°C.h¹⁹.

¹⁹ Valeur de DH prise arbitrairement

Tableau 5 : Besoins en kWh/m²/an des 35 typologies de maisons individuelles pour
DH=50 000°C.h

	EPOQUE DE CONSTRUCTION						
SURF	Avant 1949	1949-1974	1975-1981	1982-1989	1990-1998	1999	Après 1999
20m²	619,1	917,7	703,1	210,9	192,8	187,4	134,8
55m²	570,6	694,5	568,2	120,4	103,8	98,8	71,6
85m²	388,5	518,8	330,5	99,0	85,0	79,8	60,9
125m²	395,4	512,8	318,9	91,7	77,3	72,1	55,7
150m²	380,8	247,5	310,2	85,2	71,7	66,5	51,4
TOTAL	2 354,4	2 891,3	2 230,9	607,7	530,6	504,5	374,4

Tableau 6 : Besoins en kWh/m²/an des 35 typologies d'appartements pour
DH=50 000°C.h

	EPOQUE DE CONSTRUCTION						
SURF	Avant 1949	1949-1974	1975-1981	1982-1989	1990-1998	1999	Après 1999
20m²	230,2	654,1	273,7	198,8	182,7	177,3	132,8
55m²	146,6	341,5	129,8	98,5	88,1	82,8	64,1
85m²	119,4	257,9	102,5	75,9	67,3	62,1	51,3
125m²	137,4	277,0	89,6	71,6	61,7	56,6	46,2
150m²	125,9	247,5	81,4	65,5	56,4	51,4	42,1
TOTAL	759,5	1 778,0	677,0	510,3	456,1	430,1	336,5

Rappelons que plus les DH diminuent : plus les températures augmentent. On observe alors un réchauffement climatique.

Tout d'abord, pour les deux types de logements, on remarque que les besoins de chauffage diminuent lorsque la surface habitable augmente. Ils diminuent de 60,5% pour les maisons et de 65,5% pour les appartements. Cependant, on note que pour la période avant 1949, les besoins pour les logements de 125m² sont supérieurs à ceux des logements de 85m². Il en est de même pour les appartements construits entre 1949 et 1974.

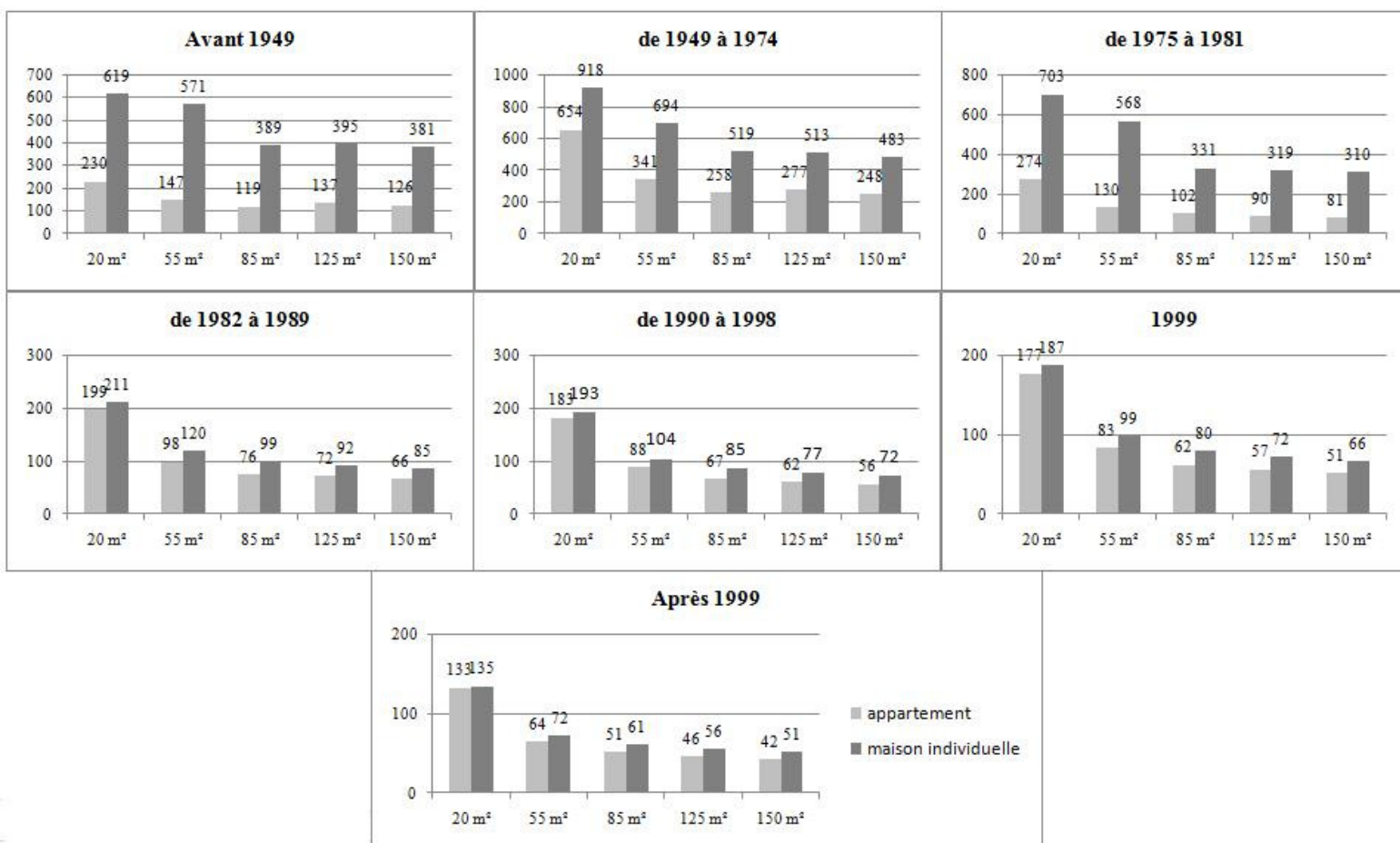
En comparant les deux types de logements, on remarque que les besoins de chauffage d'un appartement sont inférieurs à ceux d'une maison individuelle. En effet, les surfaces déperditives considérées pour un appartement (parois verticales) sont bien moindres que celles considérées pour une maison individuelle (parois verticales, toiture et sol). Cette idée renvoie à la notion de compacité (rapport adimensionnel entre la surface d'enveloppe et volume qu'elle contient). Elle permet de réduire significativement les déperditions de chaleur par les parois du logement.

Pour les deux types de logements construits après 1982, on remarque que les besoins diminuent fortement en fonction de la surface habitable et notamment en passant de 20m² à 55m². On note une diminution des besoins de 46% pour les maisons et de 52% pour les appartements. Les écarts sont beaucoup moins importants pour les surfaces habitables suivantes.

Pour les maisons individuelles, entre les périodes 1975-1981 et 1982-1989, les besoins diminuent de 72,8%. Pour les époques antérieures et ultérieures, il n'y a pas de si importante diminution. Cela peut s'expliquer par le fait que les réglementations à partir de 1982 concernent un plus grand nombre de logements que durant la période précédente allant de 1975 à 1981, période de la première réglementation thermique. Lors de la première réglementation thermique, certaines nouvelles constructions n'ont pas respecté les normes thermiques et c'est pourquoi on remarque une différence entre les périodes 1975-1981 et 1982-1989.

Les techniques de construction et la performance des matériaux de construction s'étant améliorées, on remarque que les besoins diminuent lorsque les logements sont récents. Entre la période avant 1949 et après 1999, les besoins de chauffage ont diminué de 84,1% pour les maisons individuelles et de 55,7% pour les appartements. Les méthodes de construction s'améliorant et les réglementations thermiques devenant de plus en plus strictes (après 1999), on peut dire que les besoins de chauffage suivant la performance thermique des nouveaux logements vont encore diminuer au fil du temps.

Figure 2 : Histogrammes des besoins de chauffage en kWh/m²/an lorsque DH=50 000°C.h des maisons et des appartements en fonction de l'époque de construction et de la surface habitable



Les écarts des besoins de chauffage entre les maisons individuelles et les appartements sont très importants de la période avant 1949 à la période 1975-1981 et se réduisent énormément (93,3%) à partir de 1982 pendant que les réglementations thermiques accentuent et améliorent leurs normes.

4.4 Résultats et interprétations relatifs à l'impact du réchauffement climatique sur les besoins de chauffage

Pour des raisons de simplification de lecture des graphiques, on ne présente pas tous les logements suivants leurs surfaces habitables. On prend arbitrairement la surface habitable de 85m². On fait ensuite varier les besoins en fonction des DH pour les sept périodes de construction. On a alors sept droites représentées sur chaque graphique.

Figure 3 : Evolution des besoins en kWh/m²/an des maisons individuelles suivant l'évolution des DH pour les sept périodes de construction

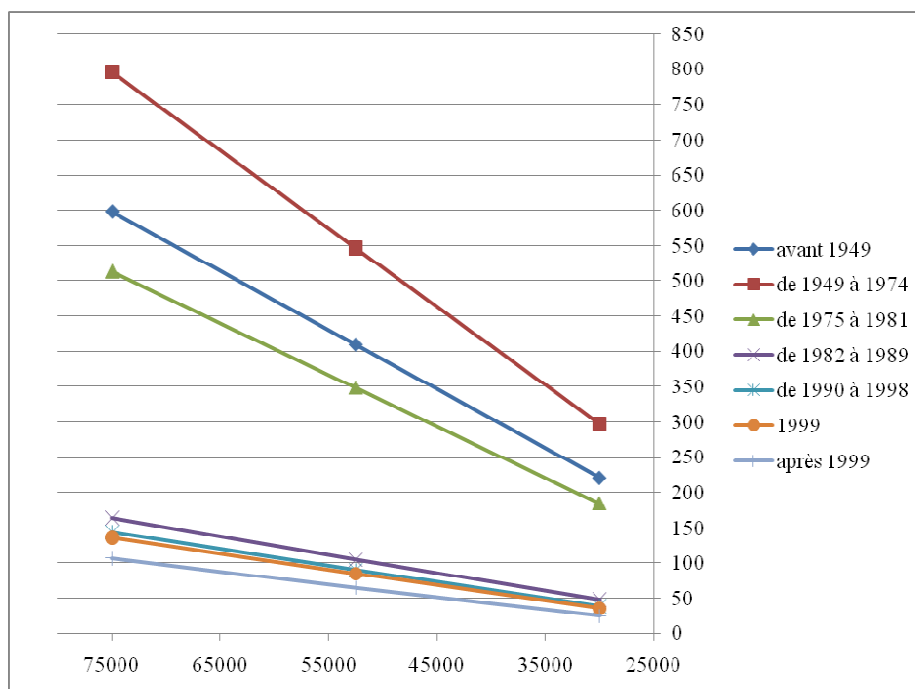
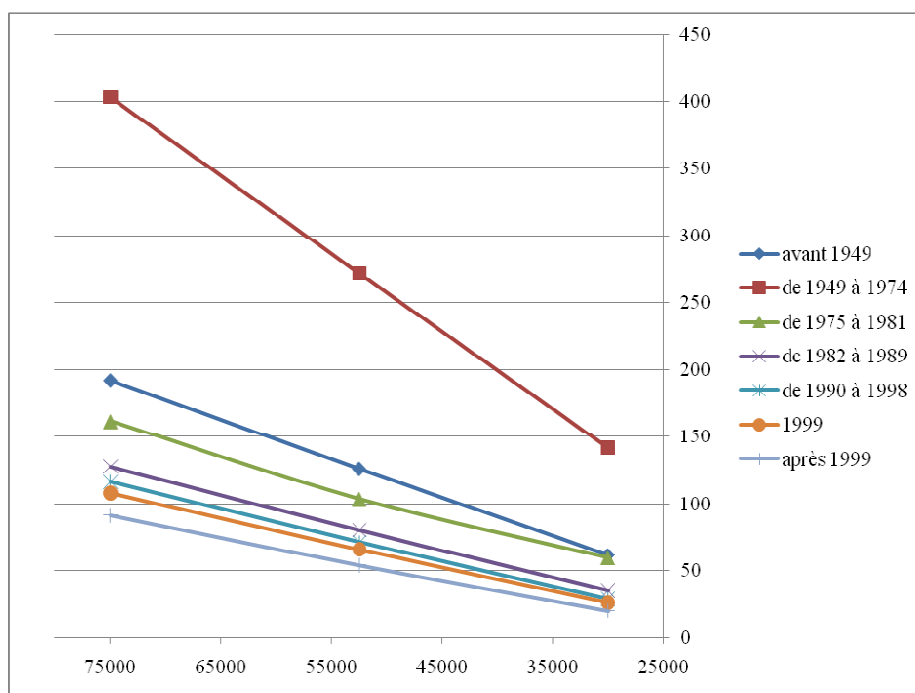


Figure 4 : Evolution des besoins en kWh/m²/an des appartements suivant l'évolution des DH pour les sept périodes de construction



Sur les deux graphiques, les besoins de chauffage des logements construits entre 1949 à 1974 sont supérieurs à ceux des logements construits antérieurement (avant 1949). Cela s'explique par le fait que la période d'après guerre a vu se construire des logements de moins bonne performance énergétique que précédemment à cause de techniques de construction mal maîtrisées.

Les besoins d'une maison individuelle de 85m² construite avant 1949 diminuent de 63,2% suivant l'augmentation des températures. On remarque qu'il en est de même pour les maisons construites pendant les périodes 1949-1974 (62,7%) et 1975-1981 (64,1%). Les maisons construites à partir de 1982 jusqu'en 1999 voient leurs besoins diminuer mais cela, de manière moins significative que pour les trois époques précédentes. Par contre, concernant les appartements, ce même écart est observé entre les logements d'avant 1949 et ceux construits après 1949.

On remarque cependant que toutes les droites évoluent de la même manière, à savoir, que les besoins de chauffage diminuent en fonction de l'augmentation des températures.

5 Conclusion

L'exercice de modélisation et de classement des logements suivant des typologies se trouve être pertinent en vue de simplifier la réalité. Cependant, aux hypothèses posées viennent s'ajouter les incertitudes de calculs liées à la schématisation de la réalité, ce qui peut amener à discuter les résultats obtenus. Toutefois, la mise en place de ce modèle théorique s'est rendue obligatoire au vue du grand nombre de logements à l'échelle métropolitaine et a permis d'estimer les besoins de chauffage.

Pour aboutir à des résultats plus proches de la réalité du parc, cette démarche pourrait être menée à l'échelle locale avec des analyses plus fines des caractéristiques constructives et de performances énergétiques des logements. De plus, du point de vue des relations qu'il existe entre le changement climatique et les besoins de chauffage, il serait pertinent d'intégrer les impacts des variations de températures dans la conception des bâtiments, et plus spécialement les nouvelles conditions climatiques d'été.

L'étude présentée ici s'inscrit dans un projet de plus grande envergure. Il s'agit maintenant de combiner cette modélisation aux scénarios d'évolution des températures.

Bibliographie de l'état de l'art

1. INSEE, http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATFPS05201
2. Chiffard, J.F., Delorme, J.C., Pietu, M., Roujon, Y., Scalabre, J.P.: Morphologie urbaine et typologie architecturale. pp. 14--19, IERAU-CORDA, Paris (1977)
3. Maïzia, M. : L'énergétique urbaine et la morphologie des villes : l'analyse du bâti parisien, Les Annales de la recherche urbaine, 103, pp. 79--85 (2007)
4. APUR Atelier Parisien d'Urbanisme : Consommations d'énergie et émission de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes. Etude technique (2007)
5. INSEE, <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/logement.htm>
6. Castex, J. : Une typologie à usages multiples – classer, comprendre, projeter. Ecole d'architecture de Versailles, Versailles, pp. 114 (2001)
7. Jacquot, A. : Cinquante ans d'évolution des conditions de logement des ménages. Données INSEE, figure 3, pp. 469 (2006)
8. Maïzia, M. : Energie, réseaux et formes urbaines, Les Cahiers de l'IAURIF, 147, pp.174--179 (2008)
9. Neufert, E., Du Bellay, J.C., Gauzin-Mueller, D., Hoyet, R., Zarek, M. : Neufert, les éléments des projets de construction – 9^{ème} édition française revue et augmentée. pp.98-99, 108, Dunod, Le Moniteur, Paris (2006)
10. Frank, T. : Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. pp. 1175-1185, Energy and Buildings 37, (2005)

Table des figures

Figure 1 : Evolution des besoins de chauffage en fonction du réchauffement climatique d'une maison individuelle de 55 m² construite entre 1982 et 1989

Figure 2 : Histogrammes des besoins de chauffage en kWh/m²/an lorsque DH=50 000°C.h des maisons et des appartements en fonction de l'époque de construction et de la surface habitable

Figure 3 : Evolution des besoins en kWh/m²/an des maisons individuelles suivant l'évolution des DH pour les sept périodes de construction

Figure 4 : Evolution des besoins en kWh/m²/an des appartements suivant l'évolution des DH pour les sept périodes de construction

Table des illustrations

Schéma 1 : Maisons mitoyennes sur deux façades

Schéma 2 : Maisons mitoyennes sur une façade

Schéma 3 : Maison non mitoyenne

Tables des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques constructives du type de logement maison individuelle

Tableau 2 : Synthèse des caractéristiques constructives du type de logement appartement

Tableau 3 : Synthèse des surfaces suivant les époques de construction du type de logement maison

Tableau 4 : Synthèse des surfaces suivant les époques de construction du type de logement appartement

Tableau 5 : Besoins en kWh/m²/an des 35 typologies de maisons individuelles pour DH=50 000°C.h

Tableau 6 : Besoins en kWh/m²/an des 35 typologies d'appartements pour DH=50 000°C.h

Table des matières

Sommaire	2
1 Introduction	3
2 Etat de l'art : les typologies de logements et les effets du changement climatique sur les consommations de chauffage.....	3
2.1 Classement des logements français par typologie : pourquoi cette méthode ?.....	3
2.2 Les deux éléments clef de la typologie du logement : le type de logement et l'époque de construction	4
2.3 Les caractéristiques du bâti existant	6
2.4 Réchauffement climatique et construction du bâtiment : deux éléments qui impactent sur les besoins énergétiques	6
3 Problématique et objectif de la recherche	7
4 Méthode et résultats : modélisation des typologies de logements.....	8
4.1 Caractéristiques architecturales et constructives des logements.....	8
4.2 Calculs pour estimer les besoins de chauffage des logements.....	16
4.3 Résultats et interprétations relatifs aux types de logements, époques de construction et surface habitable pour une valeur de DH donnée	17
4.4 Résultats et interprétations relatifs à l'impact du réchauffement climatique sur les besoins de chauffage.....	21
5 Conclusion	23
Bibliographie de l'état de l'art	24
Table des figures	25
Table des illustrations	25
Tables des tableaux	25
Table des matières.....	26
Annexes.....	27
1 Détermination des surfaces habitables de chacune des 5 catégories	27
2 Les coefficients Umurs et Uvitres	27

Annexes

1 Détermination des surfaces habitables de chacune des 5 catégories

Les 5 catégories de surface habitable sont :

- 1 : Moins de 40m²
- 2 : De 40 à 70 m²
- 3 : De 70 à 100 m²
- 4 : De 100 à 150 m²
- 5 : Plus de 150m²

On souhaite disposer d'une seule surface habitable par catégories. On effectue alors la moyenne de l'intervalle de chacune d'elles. De plus, au-delà de 85m², les logements, aussi bien maison individuelle qu'appartement, possèdent deux étages. Enfin, chaque logement est considéré comme un rectangle. On obtient alors :

- 1 : 20m² (5x4) : un niveau
- 2 : 55m² (9,2x6) : un niveau
- 3 : 85m² (5,5x7,7x2) : deux niveaux
- 4 : 125m² (9,6x6,5x2) : deux niveaux
- 5 : 150m² (10x7,5x2) : deux niveaux

A partir de 85m² de surface habitable, la maison possède deux niveaux. Donc l'ensemble de la surface habitable n'est pas en contact direct avec le sol. Il y a donc seulement la moitié de la surface habitable qui est déperditive.

➤ Par exemple : pour une maison de 85m² à deux niveaux :

- le sol du 1^{er} étage a une superficie de 42,5m²
- le sol du rez-de-chaussée, en contact avec l'extérieur, a également une superficie de 42,5m². Celle-ci est considérée comme une surface déperditive

2 Les coefficients Umurs et Uvitres

D'après le rapport de l'APUR, les valeurs de U sont les suivantes :

1974-1981 : Umurs = 1,8 et Uvitres = 2,3 (W/m²/an)

1982-1989 : Umurs = 1,15 et Uvitres = 1,81 (W/m²/an)

Après 1990 : Umurs = 0,65 et Uvitres = 0,87 (W/m²/an)

Les résultats obtenus sont :

1974-1981 : Umurs = 0,59 et Uvitres = 2,45 (W/m²/an)

1982-1989 : Umurs = 0,52 et Uvitres = 1,7 (W/m²/an)

1990-1999 : Umurs = 0,37 et Uvitres = 1,7 (W/m²/an)

après 1999 : Umurs = 0,37 et Uvitres = 1,2 (W/m²/an)

**Les effets du changement climatique sur les
consommations de chauffage de l'habitat en 2050 en
France**

Sommaire

Sommaire	1
Introduction	2
1 Contexte scientifique et objectifs de la recherche	2
2 Bilan des consommations de chauffage des logements français en 2000....	6
3 Prospective à l'horizon 2050 : les consommations de chauffage des logements français en 2050 suivant les 4 scénarios prospectifs	9
Conclusion générale	16
Bibliographie.....	17
Table des figures	18
Table des tableaux.....	18
Table des matières.....	19
Annexes.....	20
Annexe 1 : Système de relations entre le changement climatique et besoins de chauffage	20

Introduction

L'engagement écologique pris par la France appelé « facteur 4 » se traduit par une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. La question des consommations énergétiques pour le logement prend toute son ampleur, et plus particulièrement les consommations de chauffage. Les parties précédentes montrent la place du changement climatique et des typologies de logements dans la problématique des besoins de chauffage.

L'objectif de cette partie est de calculer les consommations en 2050, sur la base de celles de 2000, et ce pour l'ensemble des communes du territoire. Il s'agit ici de mener un exercice de prospective fondé sur les tendances actuelles d'évolution du climat et du parc de logements.

L'étude de prospective permet ainsi de comparer les consommations envisageables en 2050 par rapport à celles de 2000 et de mettre en exergue les leviers pour atteindre le « facteur 4 ».

1 Contexte scientifique et objectifs de la recherche

1.1 Contexte et enjeux liés au changement climatique et aux consommations de chauffage

On sait désormais qu'une modification du climat sur l'ensemble du territoire est prévue d'ici 2050, celle-ci étant causée par les 150 milliards de tonnes de carbone émises par les activités humaines depuis le XIX^{ème} siècle. L'équilibre thermique de la terre a été modifié et les températures devraient augmenter de 1,1°C à 6,4°C d'ici 2100¹ causant des événements irréversibles à l'échelle de plusieurs générations (élévation du niveau de la mer, etc.). Les scientifiques admettent qu'une réduction d'un « facteur 4 »² des émissions de CO₂ est indispensable à l'échelle nationale et cela, avant 2050. Le secteur du bâtiment fait partie des grands émetteurs de CO₂. Il comptabilise à lui seul près de la moitié de l'énergie consommée en France et environ un tiers des émissions nationales (APUR, 2007, [1]). C'est aussi le seul secteur pour lequel il est possible de réduire les émissions et les consommations énergétiques de manière significative. Le chauffage compte à lui seul pour 70% des consommations énergétiques des résidences principales.

En parallèle, la question énergétique fait également partie des préoccupations politiques, notamment depuis la loi Grenelle 2 promulguée en juillet 2010. Un des engagements du Grenelle Environnement est « l'amélioration des bâtiments et l'harmonisation des outils de planification en matière d'urbanisme » dont un de ses

¹ Source : IPCC 2007 (Intergovernmental Panel on Climate Change)

² Traduction de l'objectif planétaire du Protocole de Kyoto de diviser par quatre les émissions de CO₂ des pays développés comme la France.

objectifs est de permettre la construction de bâtiments plus sobres en énergie. Il se traduit par une amélioration technologique dans le neuf et une accélération de la rénovation thermique du parc ancien.

De nombreuses études ont montré comment et combien les consommations énergétiques et les émissions de CO₂ pouvaient diminuer significativement grâce à des actions d'ordre technologique sur le bâti. Du point de vue des dépenses énergétiques et émissions de CO₂, les consommations de chauffage des différentes typologies de tissus urbains sont mises en évidence dans la recherche « *Les gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ des tissus urbains* » (2010, [2]). Concernant le changement climatique, il existe peu d'études et de recherches, tout du moins en France³, qui examinent les liens qu'il pourrait y avoir entre la modification du climat et les consommations énergétiques.

Sachant que l'enjeu de cette partie est d'estimer, grâce à des scénarios prospectifs, les consommations de chauffage en 2050, on peut se poser la question de savoir si d'ici 2050, en France, l'habitat sera-t-il concerné par une baisse de la consommation de chauffage due au réchauffement climatique?

1.2 Objectifs de la recherche

Il s'agit donc ici de déterminer les effets de l'évolution des températures sur les consommations énergétiques (et plus spécifiquement les consommations de chauffage) des logements français à partir d'une modélisation quantitative entre 2000 et 2050. Deux variables entrent en jeu : les variations de températures entre 2000 et 2050 (modélisées par l'indicateur DH⁴) et les caractéristiques constructives des logements. Cette étape de modélisation quantitative est amenée dès le début de l'étude afin de mettre en évidence et de classer les leviers (variables) disponibles pour la diminution des consommations de chauffage des logements et ainsi élabore des scénarios prospectifs à l'horizon 2050 : que deviendraient les consommations de chauffage en 2050 si le parc de logements (caractéristiques et nombre) évoluait suivant la tendance actuelle ? Quels sont les leviers disponibles à l'échelle du logement pour stabiliser ou diminuer les consommations en chauffage ?

Répondre à ces questions revient à identifier comment la modification du parc de logements et l'augmentation des températures agissent, à l'échelle temporelle de 2050 et à l'échelle spatiale nationale, sur les consommations en chauffage de l'habitat.

La réalisation des scénarios s'appuie sur des hypothèses d'évolution du parc de logements et de l'augmentation des températures etc.

³ Une étude a été menée par Thomas Franck : « *Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland* » et conclut à une baisse de 44% des consommations de chauffage des logements d'ici 2050 grâce au meilleur des scénarios climatiques élaborés dans cette étude.

⁴ Degrés-heures

1.3 Les étapes de la recherche

Le Projet de Fin d'Etudes se déroule en plusieurs étapes et selon deux modes d'organisation. Dans un premier temps, le sujet est divisé en trois sous-sujets suivant les différentes bases de données à dresser et ils constituent, pour chacun, des tâches individuelles (Accadebled J. (2011) [3], Delavault A. (2011) [4] et Magré D. (2011) [5]). Dans un second temps, une tâche collective vise à regrouper les bases de données obtenues précédemment et établir une modélisation et des calculs cohérents. Trois grandes étapes sont réalisées dont chacune a été subdivisée en tâches.

Etape 1 : Structuration préliminaire du modèle :

- *Constitution d'un système de variables relatives au changement climatique et aux consommations de chauffage.* Cette tâche consiste à envisager un ensemble de variables ayant des effets sur les consommations de chauffage (variables relatives aux déperditions et aux apports de chaleur pour un logement et aux variations de températures)
- *Construction d'un modèle.* Cette tâche vise à observer l'évolution des consommations de chauffage en fonction des variations des degrés-heures pour un type de logement.

Etape 2 : Etude et réalisation des bases de données relatives aux variables endogènes

- *Interpolation par la pondération inverse à la distance.* Cette étape permet d'obtenir les températures des 36590 communes en 2000 à partir de 17 villes de référence, et en 2050 à partir de 22 villes.
- *Détermination des degrés-heures.* Une fois l'interpolation des températures obtenue, le calcul des degrés-heures permet de modéliser le changement climatique et d'établir le lien entre climat et besoins de chauffage (Annexe 1).
- *Constitutions de typologies de logements et calculs de leurs besoins de chauffage.* Cette partie traite de la constitution de typologies de logements afin de calculer les besoins de chauffage. Ce travail aborde les questions de caractéristiques constructives des logements, des mitoyennetés, etc.

Etape 3 : Bilan des consommations de chauffage à l'échelle nationale

- *Bilan des consommations de chauffage des logements en 2000 :* Réalisation du bilan des consommations de chauffage de l'ensemble des logements français en 2000 grâce aux données issues des trois parties réalisés précédemment. On indique ici que les données utilisées pour le parc de logements de 2000 sont issues de données INSEE relatives aux données du parc de logements de 2006.
- *Prospective et élaboration de différents scénarios.* Cette dernière étape consiste à explorer les scénarios prospectifs de consommations de chauffage en 2050 en fonction de l'augmentation des températures. Il s'agit d'établir des scénarios d'évolution des températures, des rénovations réalisées dans

les anciens logements et des améliorations des performances énergétiques des logements neufs construits entre 2000 et 2050 :

- *Scénario tendanciel* : ce scénario repose sur les tendances actuelles de développement du parc de logements et en parallèle de l'augmentation de la population. Il ne tient pas compte des rénovations qui peuvent être faites sur le parc ancien. Il s'appuie également sur les températures prospectives de 2050 établies à partir d'un modèle tendanciel. Selon l'AIE⁵, un scénario tendanciel est « un scénario où la demande d'énergie évolue dans le futur conformément aux tendances du passé et où aucune politique nouvelle n'est adoptée ».
- *Scénario d'évolution modérée des températures et d'évolution tendancielle du parc de logements* : ce scénario modélise une augmentation moins rapide des températures qu'actuellement (donc des DH modérés plus élevées que les DH tendanciels) mais l'évolution du nombre de logements reste tendancielle.
- *Scénario d'évolution tendancielle des températures et de rénovation des logements construits avant 1974* : dans ce scénario, les logements anciens sont rénovés. Comme le premier scénario, les températures de 2050 sont calculées à partir d'un modèle tendanciel.
- *Scénario d'évolution modérée des températures et de rénovation des logements construits avant 1974* : le parc de logements anciens connaît des rénovations et les températures augmentent moins rapidement qu'aujourd'hui.

⁵ Agence Internationale de l'Energie

2 Bilan des consommations de chauffage des logements français en 2000

Le bilan établit ici dépend des caractéristiques constructives des différentes typologies de logements et des températures extérieures. Il permet de mettre en évidence les leviers disponibles à l'échelle des bâtiments afin d'améliorer les performances énergétiques de ces derniers. Il permet également de fixer la base de la comparaison avec les consommations de chauffage en 2050.

2.1 Méthode

La troisième partie de ce projet (Accadebled J. (2011, [3]) donne les besoins de chauffage des différentes typologies de logements en fonction des degrés-heures. Ces derniers ont été déterminés à partir des première et deuxième parties (Delavault A. (2011, [4]) et Magré D. (2011, [5]), et ce pour l'ensemble des communes du territoire métropolitain.

Il suffit de traduire les besoins de chauffage des 70 typologies en consommations. Le système de chauffage entre ici en jeu puisque c'est grâce à son rendement que l'on peut traduire les besoins en consommations :

$$C_f = B / r \quad (1)$$

Avec C_f la consommation en énergie finale, B les besoins et r le rendement du système de chauffage.

En connaissant la répartition des typologies de logements pour l'ensemble des communes françaises et leur nombre, on obtient la consommation en chauffage des logements de l'ensemble des communes du territoire.

2.2 Hypothèses générales du calcul des consommations de chauffage des logements français en 2000

Le calcul thermique des logements nécessite d'établir au préalable une description fine des caractéristiques constructives et des données climatiques utilisées. La démarche de classement des logements par typologie permet de simplifier la description de l'habitat français mais tend à conserver les variables pertinentes liées au calcul des consommations de chauffage. Dans l'exercice de modélisation et de simplification, deux groupes d'hypothèses ressortent :

- Les hypothèses relatives au climat
- Les hypothèses relatives aux caractéristiques constructives des logements (nature et composition de l'enveloppe, taux de vitrage, etc.)

L'ensemble de ces hypothèses sont présentées dans les parties de Accadebled J., Delavault A. et Magré D. (2011, [3], [4], [5]).

2.3 Bilan des consommations de chauffage en 2000 par typologie

L'énergie finale consommée pour le chauffage des logements français en 2000 est égale à 979 TWh, soit 39,2 MWh/an/ménage. D'après Maïzia M. et al. (2010, [2]), les consommations de chauffage en 2000 devraient être de l'ordre de 385 TWh, soit 2,5 fois inférieures à celles estimées ici. Cela s'explique par le fait que le travail effectué ici est théorique et ne reflète pas totalement la réalité. De plus, la simplification des caractéristiques faite sur l'ensemble des résidences principales françaises, grâce à des typologies, augmente l'incertitude des résultats finaux et explique l'écart observé entre le modèle théorique et la réalité.

Les consommations sont réparties de manière hétérogène suivant les types de logements et les époques de construction.

Figure 1 : Répartition du nombre de logements en 2000 par type de logements et par période de construction

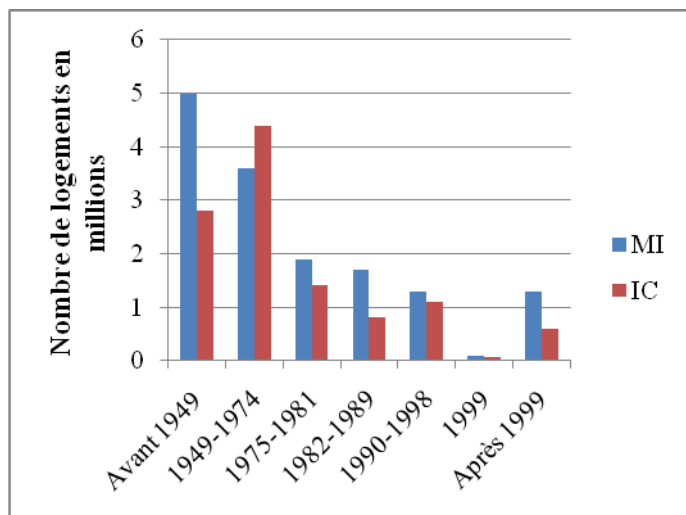
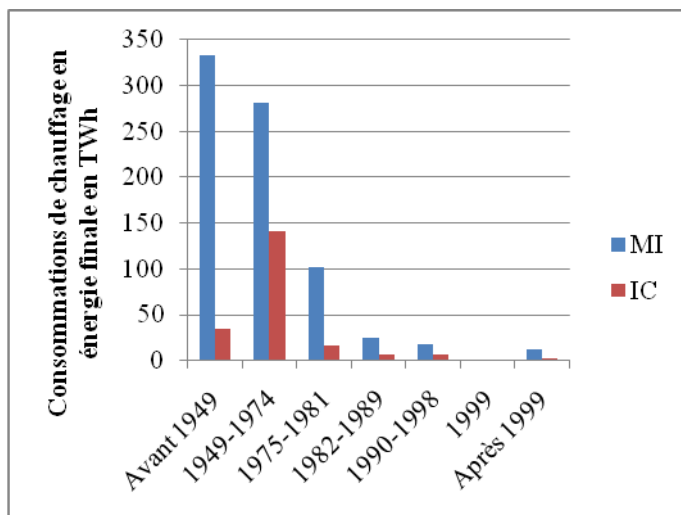


Figure 2 : Consommations théoriques de chauffage en TWh en 2000 par type de logements et par période de construction



Avant même de remarquer et de comparer les différentes consommations de chauffage entre les types de logements, on perçoit de très faibles, voire inexistantes, consommations pour les logements construits en 1999. En effet, cette période ne concerne qu'une seule année alors que les autres en représentent plusieurs. Comme cité plus haut, le parc de logements de 2000 est en réalité caractérisé par les logements de 2006. C'est pourquoi la période « après 1999 » concerne l'ensemble des logements construits entre 1999 et 2006.

Concernant les types de logements, les écarts de consommations entre immeuble collectif et maison individuelle étaient prévisibles. On observe des consommations très élevées pour les maisons individuelles par rapport aux immeubles collectifs. L'écart le plus important concerne les logements construits avant 1949 avec les consommations des maisons individuelles 9,8 fois supérieures à celles des

appartements. Les consommations importantes des maisons s'expliquent également par le fait que, durant les périodes de construction définies, on a construit plus de maisons individuelles que d'immeubles collectifs, sauf pour la période d'après guerre.

Cependant, au fur et à mesure, on note une diminution des consommations des maisons de 96% entre la période « avant 1949 » et « après 1999 ». Pour ce qui est des appartements, l'évolution n'est pas similaire. En effet, on remarque que la période « 1949-1974 » a des consommations très élevées (141,2 TWh) par rapport à la période antérieure et à celles postérieures. La période d'après guerre a vu se construire des logements de moins bonne qualité et de moins bonne performance énergétique qu'avant 1949 et qu'après la première réglementation thermique de 1974 ce qui explique que les consommations de chauffage des appartements soient très importantes. De plus, cette période comprend 25 années de construction de logements pendant que les trois périodes suivantes ne comprennent que 6 à 8 années de construction. Cela explique donc que les consommations de chauffage sont très élevées pour la période « 1949-1974 » car elle comprend beaucoup de logements, de l'ordre de 8 millions contre 3,3 millions, 2,5 millions et 2,4 millions de logements construits respectivement pour les périodes « 1975-1981 », « 1982-1989 » et « 1990-1998 » (figure 1).

3 Prospective à l'horizon 2050 : les consommations de chauffage des logements français en 2050 suivant les 4 scénarios prospectifs

Cette partie est consacrée au bilan de chauffage des logements en 2050. La prospective à l'horizon 2050 prend en compte, d'une part, l'augmentation des températures et, d'autre part, les évolutions du parc de logements. La nécessité de diminuer les consommations dans un avenir proche nous conduit également à imaginer quatre scénarios pour l'évolution des consommations de chauffage des logements en 2050.

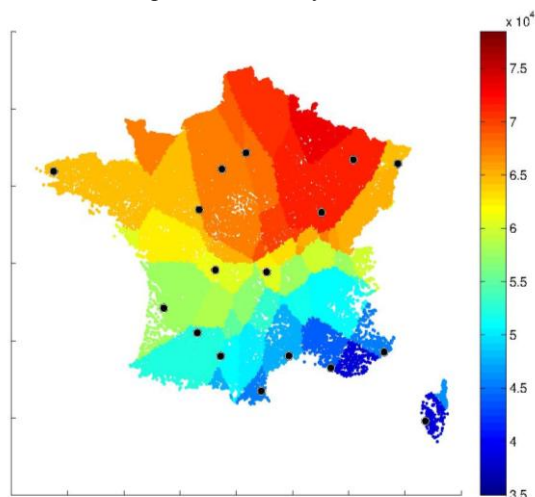
Pour ce qui est du parc de logements, on prend, à la manière des scénarios précédents, une évolution tendancielle et une autre basée sur une réhabilitation importante des logements les plus anciens. Le scénario tendanciel prend en compte une évolution du nombre de logements selon un accroissement de la population et de la structure des ménages qui suit la tendance actuelle. Le taux de renouvellement du logement ancien est lui aussi basé sur les modifications actuelles. Le deuxième scénario (dit « modéré ») prend en compte un nombre de logements identiques au précédent, mais avec une réhabilitation totale des logements construits avant 1974. Pour cela, on reprend les caractéristiques de rénovation prévues par le Grenelle II de l'Environnement.

3.1 Les hypothèses des scénarios climatiques

L'interpolation par pondération inverse à la distance a permis d'obtenir les températures minimum et maximum des 36590 communes françaises. A partir de ces valeurs, et de l'hypothèse que la température intérieure souhaitée dans les logements est de 18°C, on obtient les degrés-heures sur l'ensemble du territoire métropolitain.

La France est découpée en 3 zones climatiques (H1, H2 et H3) selon les réglementations thermiques. Comme le montre la figure 3 des degrés-heures en 2000, trois zones se distinguent : elles correspondent aux 3 zones climatiques.

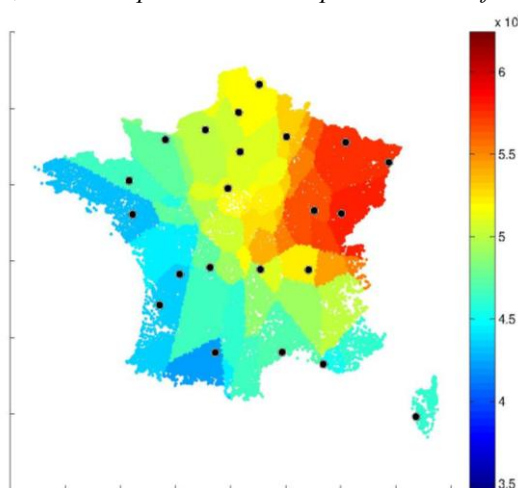
Figure 3 : Représentation des degrés-heures en 2000 réalisée à partir des 17 températures de référence



A partir des températures de 2050 relevées sur Météo France, et selon le scénario tendanciel du GIEC, la figure 4 représentant les degrés-heures permet de constater que la zone H1 s'est restreinte à quelques départements situés au nord-est de la France. La zone H3 de son côté, est désormais située sur la côte ouest du pays. Dès lors, la zone H2 s'étend du nord au sud-est de la France.

De même, à partir du scénario modéré du GIEC, le contour des zones climatiques reste identique. Cependant, une légère augmentation des degrés-heures est observée sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Figure 4 : Représentation des degrés-heures en 2050, selon le scénario tendanciel du GIEC, réalisée à partir des 22 températures de référence.

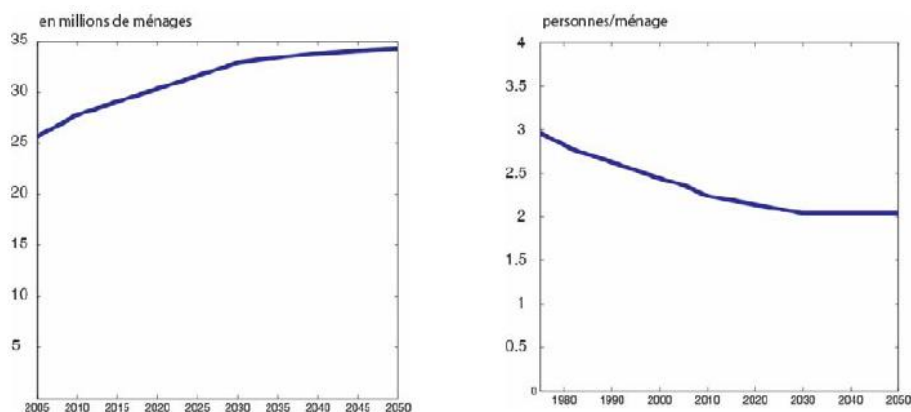


Finalement, suite aux deux simulations du changement climatique effectuées précédemment, on s'aperçoit que, quelque soit le scénario pris en compte, les degrés-heures évoluent de la même manière.

3.2 La poursuite des tendances démographiques pour les scénarios du parc de logements

Le nombre de logements dépend directement de l'accroissement de la population d'ici 2050 et de la diminution de la taille des ménages. Sans considérer les divers scénarios d'évolution de la population, nous avons vu que celle-ci devrait augmenter de 17 %, soit atteindre 70 millions d'individus en France, selon un scénario tendanciel. Le nombre de personne par ménage devrait passer de 2,4 en 2000 à 2,04 en 2050. Le parc de logement passerait ainsi de près de 26 millions de résidences principales en 2000 à un peu plus de 33 millions en 2050, soit une augmentation de 27%.

Figure 5 : Evolutions démographiques à l'horizon 2050



Source : M. MAÏZIA, *Prospective à l'horizon 2050 du développement urbain en France et implications énergétiques et spatiales des secteurs de l'habitat et de la mobilité quotidienne*

3.3 L'évolution des performances énergétiques des logements et des systèmes de chauffage

Depuis la première réglementation thermique de 1974, les nouveaux logements doivent sans cesse obéir à des restrictions de plus en plus importantes en matière de consommation d'énergie. Pour l'étude de prospective menée ici, on considère que les futures réglementations, notamment celles de 2012 et 2020, seront mises en place dans les délais prévus.

Ainsi, pour le scénario tendanciel d'évolution du parc de logements, les besoins de chauffage des logements construits après 1999 prennent en compte les nouveaux

labels BBC⁶ de la RT 2012 et BEPOS⁷ de la RT 2020. Pour le scénario modéré, on considère que la rénovation des logements construits avant 1974 suit les recommandations du Grenelle II de l'environnement, à savoir une division par plus de 3 des besoins de chauffage.

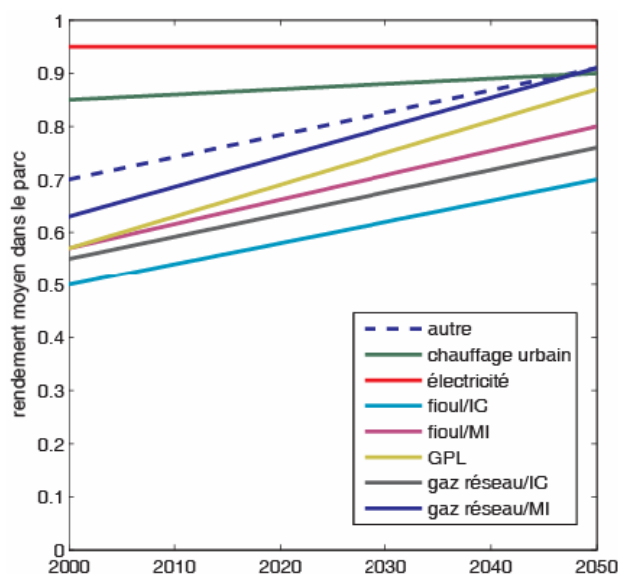
Les systèmes de chauffage devront voir leurs rendements s'améliorer d'ici 2050. D'après Laurent M.H. et al. (2006, [1]), les rendements des systèmes de chauffage vont gagner environ 0,2 en rendement global (génération, distribution et émission). Seul le rendement des systèmes électriques reste à 0,95.

Tableau 1 : Rendement des systèmes de chauffage en 2000 et 2050

	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Electricité	Gaz bouteille ou citerne	GPL	Bois (autre)
En 2000	0,85	0,58	0,54	0,95	0,6	0,58	0,7
En 2050	0,9	0,82	0,73	0,95	0,9	0,86	0,9

Source : Laurent M-H et al, 2006, et pour le chauffage urbain M. MAÏZIA, UTEAM

Figure 6 : Evolution des rendements globaux des systèmes de chauffage



Source : Laurent M-H et al, 2006, et pour le chauffage M. MAÏZIA, UTEAM

⁶ Bâtiment Basse Consommation

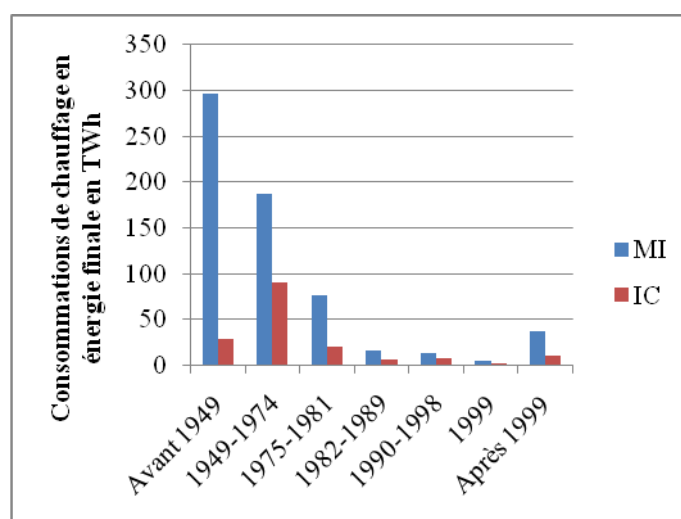
⁷ Bâtiment à Energie Positive

3.4 Bilan des consommations de chauffage en 2050

Le scénario tendanciel consiste, comme nous l'avons vu précédemment, à poursuivre les tendances actuelles, aussi bien relatives au changement climatique qu'au parc de logements. Sur la base des hypothèses fixées pour ce scénario, les consommations de chauffage s'élèvent à 794 TWh/an en 2050, soit une diminution de l'ordre de 19 % par rapport à 2000. Malgré l'augmentation du nombre de logements, et sans prendre en compte une politique de rénovation du parc, l'élévation des températures en 2050 suffit à elle seule à diviser par 1,2 les consommations en énergie finale.

Les consommations de chauffage par ménage s'élèvent à 23,3 MWh/an en 2050, soit une baisse de l'ordre de 40 % par rapport à 2000. Ces gains par ménage s'expliquent, comme le souligne Maïzia M. et al (2010, [2]), par les effets mécaniques du jeu du parc de logements. En effet, les nouveaux logements BBC pèsent sur la moyenne.

Figure 7 : Consommations théoriques de chauffage en TWh en 2050 par type de logement et par période de construction selon les scénarios 1 et 2



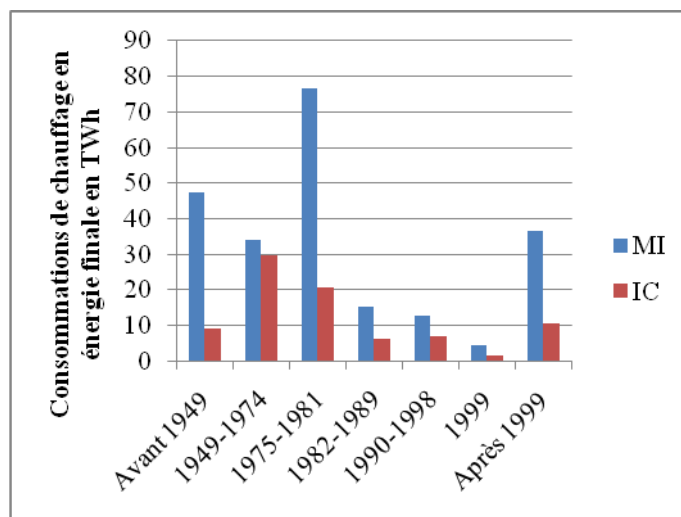
La plupart des observations vues en 2000 restent valables pour ce scénario. Soulignons simplement que la structure du parc évolue peu, et que le nombre de maisons individuelles construites entre 2000 et 2050 est toujours plus élevé que le nombre d'immeubles collectifs : pour 100 maisons, on construit 50 immeubles. Malgré cela, on peut observer que les consommations des maisons individuelles sont 3,4 fois plus élevées que celles des immeubles collectifs. La superficie moyenne et les caractéristiques physiques sont la cause de cet écart des consommations : une maison est en moyenne plus grande qu'un appartement, tout comme sa surface d'enveloppe.

Le nombre de logements construits entre 2000 et 2050 est proche de celui sur la période 1949-1974 (plus de 7 millions), et pourtant les consommations d'après 1999 représentent seulement 17 % de celles de 1949-1974. Les efforts réalisés en matière

d'isolation du bâti grâce aux réglementations thermiques (RT 2012, RT 2020) permettent de réduire significativement les consommations de chauffage.

Le deuxième scénario proposé consiste, comme nous l'avons vu, à considérer une évolution tendancielle du parc de logement mais avec une évolution modérée du changement climatique. Les résultats montrent que pour ce scénario, les consommations de chauffage s'élèvent à 794,8 TWh/an en 2050, soit un chiffre identique au premier scénario, à 0,8 TWh/an près. Il ne semble pas utile de présenter plus en détail ces résultats tant les conclusions seront analogues à précédemment.

Figure 8 : Consommations théoriques de chauffage en TWh en 2050 par type de logement et par période de construction selon les scénarios 3 et 4



Pour les scénarios 3 et 4, on arrive à la même conclusion que pour les deux scénarios précédents avec des consommations totales similaires : 311,8 TWh pour le scénario 3 et 312,1 TWh pour le scénario 4. Que l'évolution des températures soit tendancielle ou modérée, les consommations varient très peu.

Cependant, on remarque que la rénovation des logements construits avant 1974 permet une nette diminution des consommations de chauffage de 83% pour les maisons individuelles et de 67% pour les appartements par rapport aux deux scénarios précédents. Les logements rénovés sont alors moins énergivores que les premiers logements concernés par la première réglementation thermique de 1974.

3.5 Conclusion des scénarios prospectifs

Tableau 2 : Effets du changement climatique sur les consommations de chauffage de l'habitat en France

	Situation en 2000	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Consommations de chauffage (TWh/an)	979	794	795	312	312

Le nombre de scénarios proposés ici peut en fait être ramené à deux. En effet, du point de vue des consommations de chauffage, le premier scénario arrive aux mêmes conclusions que le second. Il en est de même entre le troisième scénario et le quatrième.

Que le parc connaisse des transformations sur ses logements anciens ou non entre 2000 et 2050, les consommations de chauffage diminuent suivant l'augmentation des températures. Entre la situation en 2000 et les deux premiers scénarios prospectifs, les diminutions de consommations sont de l'ordre de 19%. Elles sont de l'ordre de 68% entre la situation en 2000 et celles des deux scénarios suivants. De plus, on note une diminution de 61% des consommations entre les situations où le parc ne connaît pas de rénovation (scénarios 1 et 2) et les situations où le parc ancien est rénové (scénarios 3 et 4). L'entretien et la rénovation du parc existant représentent des leviers majeurs et indispensables à étudier et à mettre en place afin de diminuer les consommations de chauffage des logements. En effet, si le taux de renouvellement du parc demeure à son rythme actuel (1% par an), le parc construit aujourd'hui et hérité du passé représentera plus de deux tiers de celui de 2050.

3.6 Limites relatives à l'élaboration et aux résultats des scénarios prospectifs proposés

Si l'on compare les résultats obtenus dans cette étude avec ceux Maïzia M. et al (2010, [2]), on remarque que les consommations de chauffage ne devraient pas diminuer en 2050, mais plutôt augmenter de l'ordre de 32 % selon un scénario tendanciel.

Cette différence de résultats s'explique en considérant l'échelle à laquelle on se place ici pour calculer les consommations de chauffage. On a observé le bâtiment et son enveloppe sans prendre en compte les éléments environnants. D'autres paramètres modifient les comportements thermiques et énergétiques du bâtiment : l'urbanisme, l'occupation du sol ou encore les déplacements de la population. Dans les scénarios élaborés, on a caricaturé et schématisé la réalité.

Dans ces conditions, avec les hypothèses de cette étude, la diminution des consommations obtenue grâce à l'augmentation des températures d'ici 2050 est un résultat tout à fait cohérent.

Conclusion générale

Les méthodes et hypothèses utilisées dans cette recherche s'avèrent donner des chiffres et résultats globalement surévalués. De plus, les scénarios climatiques prospectifs de Météo France ne prennent pas en compte, dans l'élaboration de leur modèle, certaines grandeurs importantes comme par exemple l'orientation géographique des communes. Aux incertitudes liées à l'imperfection du modèle il faut ajouter le caractère chaotique de l'évolution du climat.

Cependant, aborder la question des consommations de chauffage, par une approche climatique et de typologies de logements, a permis, au sortir de la recherche, d'aboutir aux résultats escomptés d'une diminution de 68% des consommations entre 2000 et 2050. Les observations empiriques que l'on mène lorsque l'on réfléchit à l'avenir des consommations en fonction du climat, à savoir, « il fera plus chaud donc on consommera moins », se révèlent être en accord avec le bilan.

Finalement, les résultats obtenus par cette étude restent à une échelle globale, c'est-à-dire métropolitaine. Une recherche sur les consommations énergétiques des logements à une échelle locale, qui prendrait en compte par exemple « l'effet canyon » des rues, ainsi qu'un modèle climatique plus fin, pourrait venir approfondir ce Projet de Fin d'Etudes.

Bibliographie

1. APUR Atelier Parisien d'Urbanisme : Consommations d'énergie et émission de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes. Etude technique (2007)
2. Maïzia, M., Ceze, C., Rimmel, L., Joliton, D., Berge, S., Menard, R., Viejo Garcia, P., Lerolles, H., Teller, J., Les gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbains, rapport de recherche, PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture), Paris (2010)
3. Accadebled J., Analyse architecturale et constructive des différentes typologies de logements existants en France en vue d'estimer les besoins en chauffage en fonction du changement climatique, (2011)
4. Delavault A., La modélisation du changement climatique en 2000 et 2050 et son lien avec les besoins énergétiques des logements en France, (2011)
5. Magré D., Modèle d'interpolation par la méthode de pondération inverse à la distance au vue de généraliser les données sur l'ensemble du territoire, (2011)
6. Maizia M., Prospective à l'horizon 2050 du développement urbain en France et implications énergétiques et spatiales des secteurs de l'habitat et de la mobilité quotidienne
7. Traisnel, J.P., Maïzia, M., Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique, Cahier du CLIP, vol 16, Paris (2004)
8. Traisnel, J.P., Joliton, D., Laurent, M.H., Caffiaux, S., Mazzenga, A., Habitat Facteur 4 : étude d'une réduction des émissions de CO2 liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, Cahier du CLIP, vol 20, Paris (2010)

Table des figures

Figure 1 : Répartition du nombre de logements en 2000 par type de logements et par période de construction

Figure 2 : Consommations théoriques de chauffage en TWh en 2000 par type de logements et par période de construction

Figure 3 : Représentation des degrés-heures en 2000 réalisée à partir des 17 températures de référence

Figure 4 : Représentation des degrés-heures en 2050, selon le scénario tendanciel du GIEC, réalisée à partir des 22 températures de référence

Figure 5 : Evolutions démographiques à l'horizon 2050

Figure 6 : Evolution des rendements globaux des systèmes de chauffage

Figure 7 : Consommations théoriques de chauffage en TWh en 2050 par type de logement et par période de construction selon les scénarios 1 et 2

Figure 8 : Consommations théoriques de chauffage en TWh en 2050 par type de logement et par période de construction selon les scénarios 3 et 4

Table des tableaux

Tableau 1 : Rendement des systèmes de chauffage en 2000 et 2050

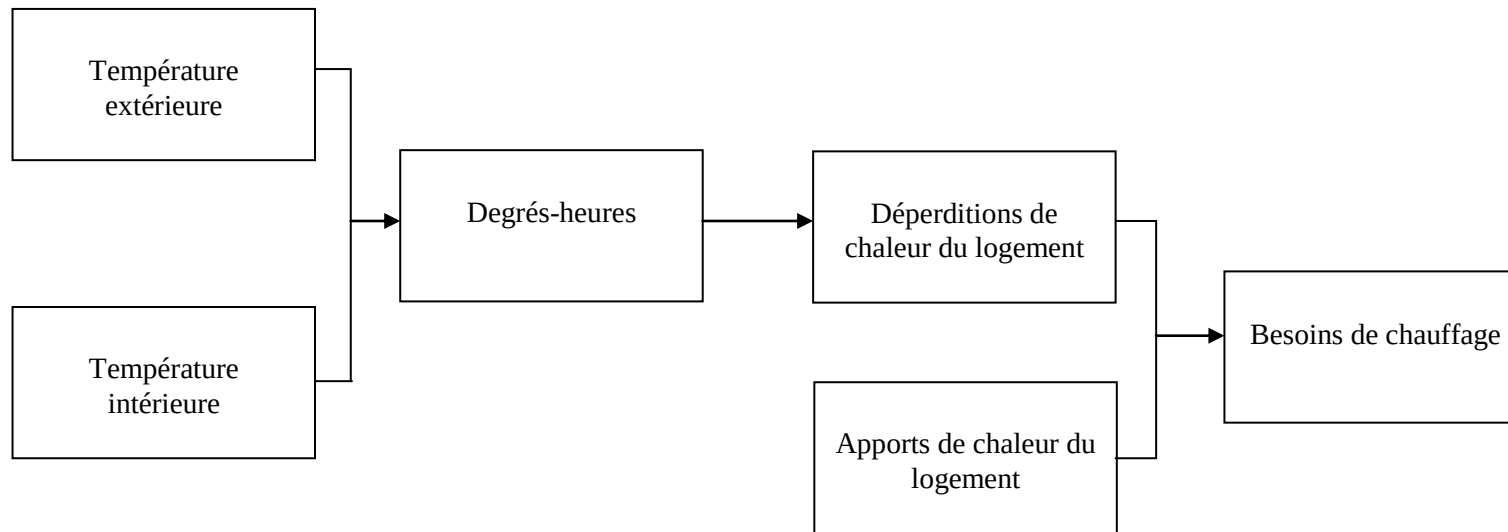
Tableau 2 : Effets du changement climatique sur les consommations de chauffage de l'habitat en France

Table des matières

Sommaire	1
Introduction	2
1 Contexte scientifique et objectifs de la recherche	2
1.1 Contexte et enjeux liés au changement climatique et aux consommations de chauffage	2
1.2 Objectifs de la recherche	3
1.3 Les étapes de la recherche	4
2 Bilan des consommations de chauffage des logements français en 2000....	6
2.1 Méthode	6
2.2 Hypothèses générales du calcul des consommations de chauffage des logements français en 2000.....	6
2.3 Bilan des consommations de chauffage en 2000 par typologie	7
3 Prospective à l'horizon 2050 : les consommations de chauffage des logements français en 2050 suivant les 4 scénarios prospectifs	9
3.1 Les hypothèses des scénarios climatiques	9
3.2 La poursuite des tendances démographiques pour les scénarios du parc de logements	11
3.3 L'évolution des performances énergétiques des logements et des systèmes de chauffage	11
3.4 Bilan des consommations de chauffage en 2050	13
3.5 Conclusion des scénarios prospectifs	15
3.6 Limites relatives à l'élaboration et aux résultats des scénarios prospectifs proposés.....	15
Conclusion générale	16
Bibliographie.....	17
Table des figures	18
Table des tableaux.....	18
Table des matières.....	19
Annexes.....	20
Annexe 1 : Système de relations entre le changement climatique et besoins de chauffage	20

Annexes

Annexe 1 : Système de relations entre le changement climatique et besoins de chauffage



CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement



Département Aménagement
35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
MAÏZIA Mindjid

ACCADEBLED Juliette
DELAVALT Antoine
MAGRE Damien
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2007-2008

Titre : Les effets du changement climatique sur les consommations de chauffage de l'habitat en 2050 en France

Résumé :

Les deux premières parties de ce rapport sont consacrées à la reconstitution de bases de données sur le climat à l'échelle du territoire en vue d'établir un lien entre changement climatique et besoins énergétiques. Le principal problème à surmonter est la généralisation de données discrètes de températures à l'ensemble des communes de la France métropolitaine.

La troisième partie du rapport est destinée à quantifier l'impact des variations de températures sur les consommations de chauffage des différentes typologies de logements. Elle consiste donc à mettre en place des typologies de logements en abordant les questions de caractéristiques constructives des logements, des mitoyennetés, etc. Le lien entre type de bâti et besoins de chauffage est établi dans cette partie.

La dernière partie de ce rapport présente les résultats obtenus en matière de consommations de chauffage, en fonction de l'évolution du climat. Elle consiste à calculer ces consommations en 2000 puis à établir un exercice de prospective à l'horizon 2050. A partir de scénarios basés sur deux mutations du climat (une évolution tendancielle par rapport à aujourd'hui et une de manière modérée) et sur des taux différents de réhabilitation des logements (un taux suivant les tendances actuelles et un taux volontairement surévalué), les consommations de chauffage obtenues permettent de répondre à la question : « La hausse des températures d'ici 2050 engendrera-t-elle une diminution des consommations de chauffage pour les logements français ? »

Mots clés : Changement climatique, Consommations de chauffage, Degrés-heures, Interpolation PID, Performance énergétique, Prospective 2050, Typologies de logements