



Evaluation de produits d'effacement sur un ensemble de consommateurs par modélisation bottom-up d'un parc de logements

Sinziana Carloganu

► To cite this version:

Sinziana Carloganu. Evaluation de produits d'effacement sur un ensemble de consommateurs par modélisation bottom-up d'un parc de logements. Energie électrique. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT: 2016PSLEM064 . tel-03235746

HAL Id: tel-03235746

<https://pastel.hal.science/tel-03235746>

Submitted on 26 May 2021

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

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

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Évaluation de produits d'effacement sur un ensemble de consommateurs par modélisation bottom-up d'un parc de logements

École doctorale n°432

SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR

Spécialité ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS

COMPOSITION DU JURY :

M Guillaume Sandou, Professeur
CentraleSupélec, Président

M Frédéric Kuznik, Professeur
CETHIL-INSA de Lyon, Rapporteur

M Stéphane Ploix, Professeur
GSCOP - Grenoble INP, Rapporteur

M Jérôme Adnot, Professeur
Mines-Paristech, Membre du jury

M Bruno Duplessis
Mines-Paristech, Membre du jury

Soutenue par **Sînziana Carloganu**
le 08 Décembre 2016

Dirigée par **Jérôme Adnot**



Table des Matières

1	Caractérisation des usages domestiques de l'électricité	11
1.1	Définir la consommation d'électricité des ménages	12
1.1.1	Classification des usages domestiques de l'électricité. Classification des flexibilités de la demande électrique dans le cas du secteur résidentiel	13
1.1.2	Actions de pilotage de la demande mises en œuvre dans ce travail .	16
1.2	Caractérisation de l'usage chauffage par les ménages	18
1.2.1	Difficultés liées à l'estimation d'une température de référence . . .	21
1.2.1.1	Données issues de campagnes de mesures	21
1.2.1.2	Données issues d'enquêtes déclaratives	22
1.2.2	Approche spatio-temporelle de la gestion de la consigne	23
	Campagnes de mesures sur le parc français	24
	Enquêtes nationales sur les températures dans les logements	25
	Présentation de quelques études de cas	26
1.3	Conclusion du chapitre : hypothèses générales sur les modes de gestion . .	33
2	Approche théorique : modèles retenus pour les simulations	35
2.1	Modèle pour l'enveloppe du bâtiment	36
	Choix du schéma numérique	41
2.2	Réduction du modèle de bâti de référence	41
2.2.1	La méthode d'Eitelberg	42
2.2.2	Les méthodes modales	42
	La méthode de Marshall	43
2.2.3	La réduction en base équilibrée	44
	Approximation par perturbations singulières (à partir de la base équilibrée)	46
	Réduction au sens de la norme de Hankel	47
2.2.4	Méthode de réduction retenue	48

2.3	Modélisation des systèmes de chauffage intégrés au bâti	49
2.3.1	Modélisation du corps de chauffe de l'émetteur	49
2.3.2	Modélisation du régulateur	52
2.3.3	Modélisation du capteur de température	54
2.4	Dimensionnement des systèmes	54
3	Indicateurs et outils d'analyse de courbes de charges du secteur résidentiel	57
3.1	Outils pour l'analyse du foisonnement de courbes de charges	59
3.1.1	Facteur de charge	59
3.1.2	Coefficient de foisonnement - f	60
3.1.3	Demande maximum après foisonnement - $ADMD$	61
3.1.4	Relation entre f , $ADMD$ - Dimensionnement de réseaux basse tension	62
3.1.5	Intérêt des indicateurs f_N et $ADMD_N$ dans le cadre d'effacement de charges thermiques	63
3.2	Mise en place d'outils pour l'évaluation des effacements	64
3.2.1	Méthode de restitution de la référence dans le cas de scénarios simulés	64
3.2.2	Indicateurs retenus pour l'évaluation des effacements en énergie . .	67
	Caractérisation de la phase de recouvrement énergétique . .	68
3.2.3	Indicateurs retenus pour caractériser la déformation de la courbe de charge associée à un effacement	70
3.2.3.1	Effet de relance associé à un pilotage ON/OFF	70
	Modélisation de la courbe de charge agrégée (déformation) lors d'une relance	71
3.2.3.2	Définition des grandeurs associées au phénomène de re- lance pour le pilotage direct	74
3.2.3.3	Synthèse des études portant sur des effacements de l'usage chauffage	76
	Éléments issus de l'exploitation de données de démonstrateurs	76
	Études théoriques	78
3.2.4	Analyse de l'effet des effacements sur le confort thermique dans les logements	78
3.3	Conclusion	79
4	Études paramétriques sur des effacements types	81
4.1	Revue des méthodes d'analyse des paramètres d'influence	83
4.1.1	Méthodes pour l'analyse de sensibilité	83

4.1.2	Pratique de l'analyse de sensibilité dans le cadre de la simulation thermique du bâtiment	83
4.2	Analyse paramétrique pour l'effacement	86
4.2.1	Hypothèses pour la construction des modèles de bâti de référence	87
4.2.2	Hypothèses sur le choix des sollicitations extérieures	88
	Données pour le climat	88
	Scénarios de consigne et scénarios de présence	88
4.2.3	Définition des variables d'intérêt	90
	Sollicitations extérieures - données liées au climat	91
	Scénario de consigne et de présence	92
	Paramètres liés au bâti	92
	Paramètres liés aux systèmes	93
4.2.4	Approche retenue	94
4.2.5	Résultats de l'analyse paramétrique	95
4.2.5.1	Sensibilité des consommations énergétiques annuelles pour l'usage chauffage	95
4.2.5.2	Évaluation selon les indicateurs caractérisant les effacements	98
4.2.6	Synthèse du criblage de <i>Morris</i>	100
4.3	Influence de la diversité comportementale sur quelques effacements types	102
4.3.1	Construction de scénarios de présence	104
4.3.1.1	Scénario conventionnel	104
4.3.1.2	Scénario profilé	105
4.3.1.3	Scénario dynamique	105
	Caractérisation des individus	105
	Reconstruction de ménages	107
4.3.2	Construction des stratégies de gestion des systèmes à partir des scénarios de présence	111
4.3.2.1	Consigne fixée	111
4.3.2.2	Instants de changement de consigne	111
4.3.2.3	Scénario avec réduit	112
4.3.2.4	Scénario avec coupure	114
4.3.2.5	Scénario mixte	114
4.3.3	Apports internes	115
4.3.4	Analyse succincte de la diversité issue du modèle de présence	116
4.3.5	Analyse de l'impact de différentes stratégies d'effacement	120

4.3.6	Résultats sur les indicateurs d'effacement dans le cas du scénario avec réduit	121
4.4	Conclusions du chapitre	134
4.4.1	Influence des caractéristiques constructives	134
4.4.2	Hypothèses liées à la gestion des systèmes	134
4.4.3	Perspectives	135
5	Exploitation de données issues d'expérimentations	137
5.1	Données disponibles issues d'une expérimentation	139
5.1.1	Présentation de l'expérimentation	139
5.1.2	Caractérisation des consommateurs de l'échantillon global	141
5.1.3	<i>Nettoyage</i> des données	142
5.1.3.1	Données des index globaux	142
5.1.3.2	Données d'usages spécifiques	143
5.1.4	Caractérisation des consommations individuelles et de l'agrégat	144
5.1.5	Caractérisation du foisonnement journalier des courbes de charges	147
5.2	État de l'art des méthodes d'estimation de la courbe de référence à partir de données terrain	149
5.3	Analyse de quelques effacements - méthodes	151
5.3.1	Caractérisation des effacements à partir de l'exploitation des index de consommation des logements	151
5.3.1.1	Perte de diversité associée aux effacements de l'usage chauffage	152
5.3.1.2	Construction d'une courbe de référence	153
	Procédure de sélection des <i>jours similaires</i>	153
	Méthode d'ajustement	154
	Évaluation des effacements	154
5.3.1.3	Apports et limites de l'évaluation	158
5.3.2	Consommations d'ECS pour les logements équipés de ballons électriques	159
5.3.2.1	Modèle générique recherché et définition des paramètres inconnus	162
	Données disponibles	162
	Hypothèses pour l'estimation des caractéristiques des ballons	165
	Domaine de validité	165
	Détermination de la puissance nominale des ballons	166
	Estimation des courbes de charge unitaire à 1min	167

	Attribution de paramètres génériques aux ballons du parc . . .	168
5.3.2.2	Méthode pour ajuster le modèle de demande des abonnés HP/HC	169
5.3.2.3	Étude de cas - ballon asservis HC	170
5.3.2.4	Bilan et perspectives	171
5.3.3	Index pour l'usage chauffage	172
5.3.3.1	Modèle statique - signature énergétique	174
5.3.3.2	Cadre théorique pour l'identification paramétrique	177
5.3.3.3	Approche <i>boîte noire</i>	178
5.3.3.4	Approche <i>boîte grise</i>	181
5.4	Conclusion du chapitre	189
6	Modélisation parc	191
6.1	Objectifs de la modélisation parc	192
6.1.1	Représenter les sources de diversité	192
6.1.2	Modéliser la demande électrique résidentielle: revue de littérature .	193
6.1.3	Structure générale du modèle <i>bottom-up</i> - Périmètre de l'étude . . .	197
6.1.3.1	Périmètre géographique	197
6.1.3.2	Bâtiments représentés	197
6.1.3.3	Usages de l'électricité modélisés	197
6.1.3.4	Schéma général du modèle, interactions entre les sous- modèles	197
6.2	Principes méthodologiques pour la génération du parc	200
6.2.1	Cas d'application: la métropole du Grand Lyon	201
6.2.2	Données disponibles	202
6.2.2.1	Enquêtes statistiques: Données sur les logements et les ménages	202
	Données issues des enquêtes de recensement de la population par l'INSEE	202
	Données issues des enquêtes logement	209
	Données issues des enquêtes emploi du temps	209
6.2.2.2	Données cartographiques	210
6.2.2.3	Données issues d'études sur la caractérisation des logements	211
	Le projet TABULA	211
	Le projet RAGE 2012	212
	Le projet PROMENLAB	212
	Données sur le bâti ancien lyonnais	213

	Remarques sur les données de caractérisation des bâtiments	213
6.2.2.4	Autres sources de données	213
	Données qualitatives sur les habitudes de vie des ménages	213
	Données sur les logements sociaux	214
	Données relatives au <i>Diagnostic Performance énergétique</i>	214
6.2.3	Schéma général pour la définition des entrées selon les données disponibles	214
6.3	Modèle pour les bâtis	214
6.3.1	Hypothèses générales pour la description des bâtis	214
6.3.1.1	Description géométrique du bâti	214
	Répartition des parois vitrées sur la façade des bâtis	216
6.3.1.2	Caractéristiques constructives	218
	Parois opaques & parois vitrées	218
	Volume d'air	218
6.3.2	Typologie de bâtis représentés dans le parc	218
6.3.3	Reconstruction des variables associées à chaque bâti	221
6.3.3.1	Caractéristiques constructives	221
	Parois opaques	221
	Parois vitrées	221
6.3.3.2	Nœud d'air	222
6.3.3.3	Description géométrique des bâtis	223
	Exploitation de la <i>BDTOPO</i>	223
	Calcul de l'orientation des bâtiments	225
	Synthèse des données issues de la <i>BDTOPO</i>	226
	Exploitation des études sur le parc de logements	226
6.3.4	Synthèse du paramétrage du modèle de parc de bâti	228
6.3.5	Remarques sur le modèle de bâtis pour le parc	229
6.4	Modèle pour les systèmes	237
6.4.1	Systèmes de chauffage	237
	Dimensionnement des systèmes	237
	Hypothèses pour la génération du parc de systèmes	238
6.5	Modèle pour les ménages	240
6.5.1	Modèle de présence individuel	241
6.5.2	Construction de profils de ménages à partir des profils individuels	244
6.6	Apports méthodologiques du chapitre	245

7 Études d’effacements sur un ensemble de consommateurs d’électricité pour l’usage chauffage	247
7.1 Parc de référence modélisé	248
7.2 Étude de l’influence de la durée de contrôle sur les indicateurs d’effacements pour un parc hétérogène de consommateurs (usage chauffage)	251
7.2.1 Protocole de simulation	251
7.2.2 Résultats sur la courbe de charge agrégée des consommateurs	252
7.3 Influence des modes de gestion sur la dynamique du parc	255
7.3.1 Scénarios étudiés	256
7.3.2 Évaluation des effacements réalisés sur le parc	258
7.4 Forme des effacements selon les profils de présence identifiés sur l’EDT	260
7.5 Bilan	261
8 Conclusion	263
Apports du chapitre 1	263
Apports des chapitres 2 et 3	263
Apports du chapitre 4	263
Apports du chapitre 5	264
Apports du chapitre 6	265
Apports du chapitre 7	266
Annexe A Annexes du chapitre 4	271
A.1 Synthèse bibliographique sur l’analyse des paramètres d’influence sur la dynamique des besoins thermiques par la méthode de <i>Morris</i>	271
A.2 Paramètres de référence des bâtis étudiés dans la partie 4.2.1	273
A.3 Paramètres inclus dans l’étude de la partie 4.2.3	276
A.4 Détails des jours avec signal d’effacement	280
Annexe B Relation entre les consommations de l’usage chauffage et la température de la station météo la plus proche	283
Annexe C Valeurs des U issues des différentes bases de données	293
Annexe D Élaboration d’un modèle de présence	297
D.1 Présentation de l’enquête emploi du temps 2010	297
D.1.1 Informations disponibles	297
D.1.2 Constitution d’un échantillon d’individus pour le modèle de présence	298
D.2 Modèle de présence	301

D.2.1	Identification des typologies de présence	301
D.2.1.1	Échantillon de carnets à traiter	301
D.2.1.2	Choix d'une similitude	303
D.2.1.3	Méthode de classification	306
	Paramétrage de la <i>CAH</i>	306
	Découpage de l'arbre	307
D.2.1.4	Choix retenus pour l'identification des trajectoires	315
D.3	Détails des profils de présence identifiés	315
Annexe E Détail des effacements réalisés selon les profils de présence		319
Bibliographie		323
Liste des figures		337
Liste des tableaux		345
Liste des notations		349
Index		351

Introduction

Contexte

Ce travail s'inscrit dans un contexte global d'évolution du secteur de l'électricité. Cette évolution recouvre différents aspects : évolution de la demande et des consommations, transformation du secteur amorcée depuis quelques années avec l'ouverture des marchés (contexte européen), évolution des moyens de production (dont *ENR* intermittentes) d'où une évolution en marche du réseau électrique.

Évolution de la demande électrique en France

Au cours des 10 dernières années, la consommation électrique totale en France a augmenté en moyenne de 1.4%, celle du secteur résidentiel de 1.9% [141]. On observe cependant une stagnation de la consommation totale depuis 2011, et une hausse moyenne plus faible pour le secteur résidentiel (+0.4% en 2014).

Depuis une décennie on observe que la pointe, qui dimensionne le réseau, augmente 2 à 3 fois plus vite. On observe de plus une concentration des pointes journalières (*pointes de 19 h*), soit potentiellement une augmentation des jours de tension sur une année [61].

La pointe réseau de *19h* s'explique par la structure de la demande en électricité en France : la demande électrique du secteur résidentiel représente en France de l'ordre de 30% de la consommation en électricité totale (34% en 2015, source [142]). La demande de ce secteur est caractérisée par une thermo-sensibilité importante qui s'explique essentiellement par la proportion importante des systèmes de chauffage électrique par rapport à d'autres modes de chauffage (39% en 2015, source [142]). La part thermosensible des consommations pour deux scénarios, l'un à climat *normal*, l'autre dans le cas *avec vague de froid*, est illustré sur la figure 0.0.1.

La demande annuelle du secteur résidentiel a augmenté de plus de 20TWh en 10 ans (figure 0.0.2), ce qui s'explique notamment par la multiplication des appareils domestiques

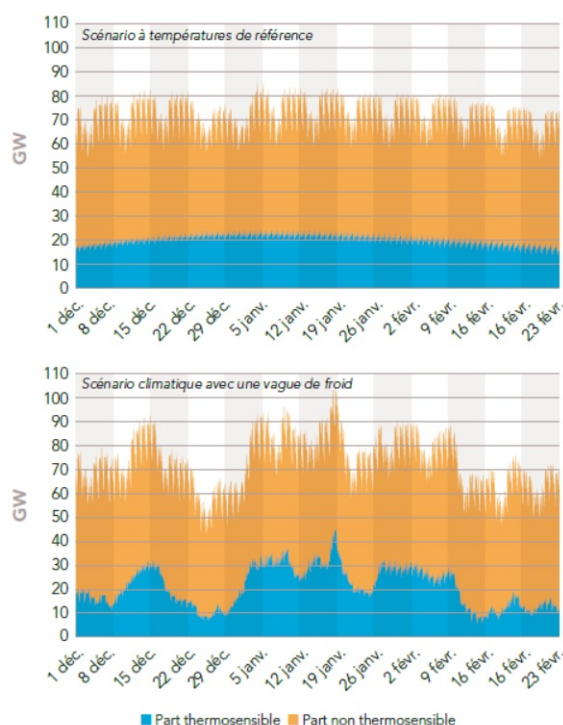


Figure 0.0.1 Part thermosensible des consommations selon deux scénarios climatiques.
Source : [142]

dans l’habitat (consommations des usages *électricité spécifique*, définis dans le chapitre 1) sans que la contribution des usages thermo-sensibles ne diminue pour autant (demande pour l’usage chauffage inchangée, demande pour l’usage ventilation et climatiseurs en hausse de 3% à 2020 selon les perspectives du bilan prévisionnel de l’équilibre offre-demande 2016 de RTE [142]). Par conséquent, la contribution de la demande du secteur résidentiel à la pointe 19h est de l’ordre de 40% à 50% [61].

Évolution des moyens de production

La *transition énergétique* implique un changement des moyens de production, avec le développement de moyens de production intermittents (solaire, éolien) qui nécessite une évolution en profondeur du réseau électrique afin de s’assurer de leur intégration. Dès lors, les enjeux sur l’adéquation entre production et demande se posent sous un angle plus général et des solutions globales ont commencé à émerger. Dans ce contexte, on peut notamment citer les projets visant à mieux intégrer ces ressources intermittentes en les couplant à des solutions de stockage, parmi lesquels les ballons à accumulation et plus encore les systèmes

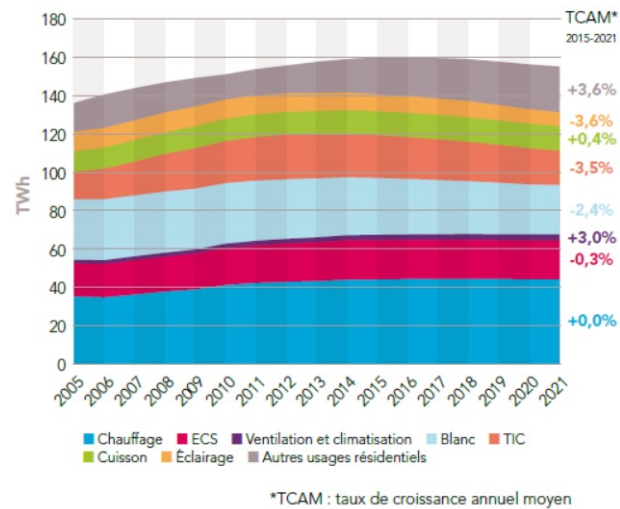


Figure 0.0.2 Perspectives d'évolution des usages de l'électricité du secteur résidentiel.
Source : [142]

thermodynamiques qui peuvent apporter une réponse pertinente. D'autres projets de ce type peuvent être cités.

Évolution du réseau et émergence de nouveaux acteurs

Évolution du système électrique La transformation du secteur des télécommunications accompagne naturellement la transition énergétique en permettant de nouveaux modes de gestion, matérialisés par le déploiement de systèmes communicants bi-directionnels, vecteur de la transformation du réseau électrique (figure 0.0.3). Ces compteurs assurent non seulement une meilleure connaissance de la demande mais permettent également le déploiement de solutions plus flexibles pour le réseau.

Ces nouvelles offres envisageables peuvent apporter une réponse à différents objectifs de modulation de la demande, tels que définis dans [64], et sont la suite naturelle aux offres de flexibilité actuellement existantes pour le secteur résidentiel : offres double tarif *heures pleines / heures creuses*, offres *jour de pointe* avec les abonnements du fournisseur historique *EJP* et *TEMPO*. À l'heure actuelle, les abonnements types *jours de pointe* offrent un gisement de flexibilité de l'ordre de 2GW [141], qu'il est possible d'activer à *J-1* et qui est en diminution depuis quelques années.

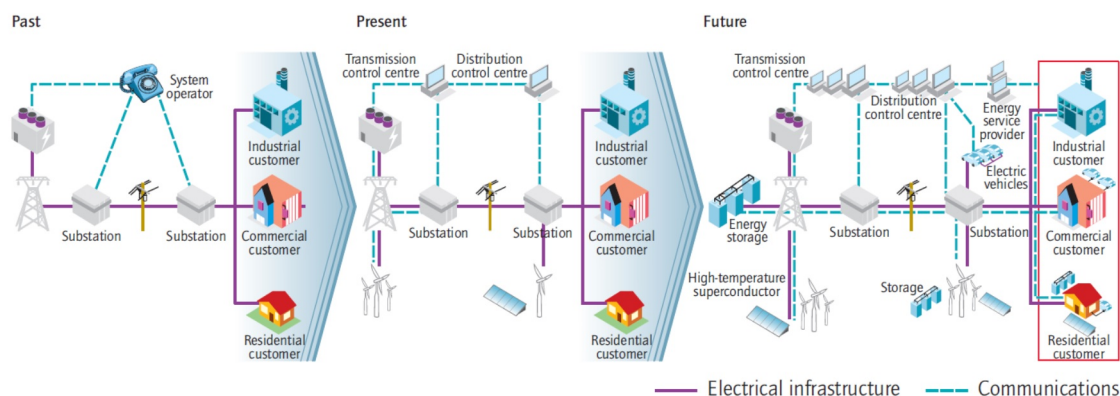


Figure 0.0.3 Évolution du système électrique. Source : [81]

Émergence de nouveaux acteurs sur le système électrique Dans ce contexte de recherche de flexibilité, l'effacement de consommation présente un potentiel intéressant. Il est défini selon l'article *L.271-1* du code de l'énergie :

Un effacement de consommation d'électricité se définit comme l'action visant à baisser temporairement, sur sollicitation ponctuelle envoyée à un ou plusieurs consommateurs finaux par un opérateur d'effacement ou un fournisseur d'électricité, le niveau de soutirage effectif d'électricité sur les réseaux publics de transport ou de distribution d'électricité d'un ou plusieurs sites de consommation, par rapport à un programme prévisionnel de consommation ou à une consommation estimée.

Cette définition introduit deux types d'opérateurs distincts : le *fournisseur* d'une part, qui est un acteur *historique* et l'*opérateur d'effacement* d'autre part, qui est un nouvel acteur du système, dont l'objectif dans ce cadre serait de capter le potentiel de flexibilité des consommateurs afin de le valoriser sur un marché. Le positionnement de cet acteur dans le système électrique est schématisé sur la figure 0.0.4. Le marché mentionné peut être de différente nature, il peut s'agir des réserves primaires et secondaires, du marché de l'énergie ou encore du mécanisme d'ajustement. L'ensemble de ces mécanismes sont représentés sur la figure 0.0.5 issue de [137].

Dans la suite du document, on appelle, sans distinction, *opérateur d'effacement* un fournisseur d'énergie ou un opérateur d'effacement réalisant des effacements. On peut dès à présent noter que le positionnement d'un *fournisseur* lui permet de capter le potentiel d'effacement de consommateurs via un éventail d'offres plus large que celui de ces nouveaux acteurs, notamment via des offres tarifaires directes (cas des offres historiques type *EJP* par exemple).

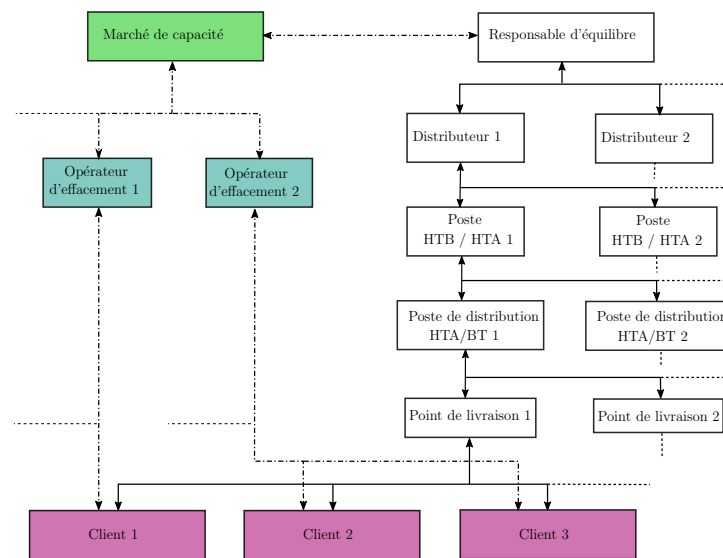


Figure 0.0.4 Positionnement de l'opérateur d'effacement dans la chaîne de valeur du système électrique. Source : [147]

L'article L.271-1 du code de l'énergie vise l'effacement de manière générale, sans distinction selon la ressource à l'origine de la baisse de charge. On opère une distinction entre les *effacements industriels* et les *effacements diffus*. Le premier type concerne les sites industriels, qui peuvent répondre à différentes sollicitations, la plus courante restant dans ce cas le signal-prix. Ce type d'effacement se caractérise par son caractère *prévisible*, la déformation de la demande étant préalablement connue en durée et en amplitude.

Le second type peut être défini, en reprenant la définition proposée par la CRE comme :

l'agrégation de capacités d'effacement éparses

Dans ce travail, on ne s'intéresse qu'aux effacements diffus réalisés sur des consommateurs résidentiels¹. Ce type de modulation de la charge a connu un grand intérêt récemment, et on dénombre une quantité importante de démonstrateurs visant à expérimenter des offres d'effacement dont les modalités sont diverses et seront présentées dans la suite. L'ensemble de ces expérimentations s'appuie sur le développement de compteurs communicants dont notamment *Linky* déployé par le gestionnaire du réseau de distribution pour le secteur résidentiel, mais des *boitiers* peuvent également être proposés directement par l'opérateur, comme

¹On exclut donc du périmètre les sites tertiaires

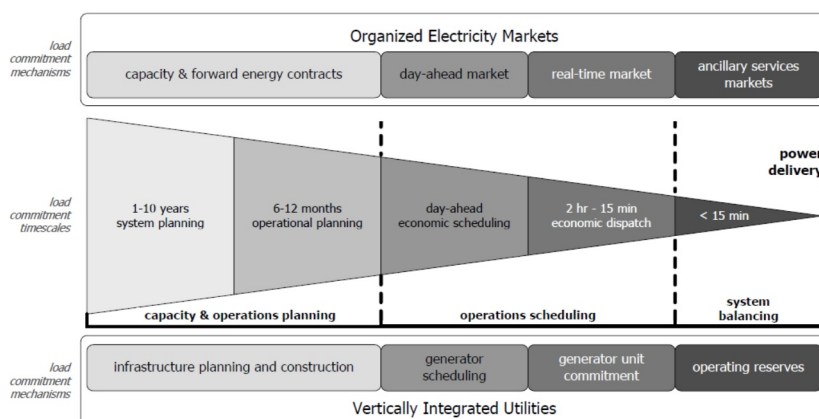


Figure 0.0.5 Mécanismes de marché. Source : [137]

c'est par exemple le cas dans le cadre du projet *MODELEC*² mené par *Direct Energie*. Dans le cas du secteur français, les données issues de ces compteurs sont *a priori* connues à 30min, toutefois des systèmes complémentaires sont envisagés par les opérateurs. Les enjeux liés au pas d'échantillonnage des données sont précisées dans la partie suivante.

Enjeux

Périmètre des effacements diffus

La première question est celle du périmètre, c'est-à-dire des usages qui peuvent être visés par une offre d'effacement. Ce périmètre dépend *a priori* des modalités de l'offre proposée et de la faisabilité technique.

En se référant au cas le plus simple d'effacement diffus, généré par le signal tarifaire *heures pleines-heures creuses*, nous savons que le potentiel concerné est essentiellement relatif aux systèmes de production d'eau chaude sanitaire à accumulation qui sont généralement asservis au signal tarifaire. Néanmoins, on peut s'interroger sur la charge globale déplacée volontairement par les ménages. Cette opération est facilitée par la possibilité de programmer certains équipements (*usages blancs* typiquement) qui est proposée sur la plupart des appareils de ce type. Les nouveaux équipements proposés sur le marché offrent aux ménages des solutions de gestion toujours plus avancées et on peut dès à présent envisager

²www.modelec.fr. L'expérimentation est brièvement présentée au chapitre 5 de ce manuscrit.

le pilotage distant de certains équipements. Dès lors, il s'agit de définir les équipements les plus intéressants du point de vue de l'effacement. Cette question nécessite une réponse globale qui suppose d'avoir une connaissance fine, infra-logement, des puissances installées et des profils de charge des équipements domestiques (donc de la dimension temporelle des usages). Dans le cas des *consommations d'électricité spécifique* par exemple, il est alors indispensable d'avoir une meilleure connaissance des *comportements et habitudes de vie des ménages*. Les travaux en cours sur la désagrégation des profils de charge des logements actuels pourraient apporter des éléments de réponse quantitatifs intéressants.

À l'heure actuelle, seuls les usages thermiques *chauffage* et *eau chaude sanitaire* font l'objet d'expérimentations de type *démonstrateurs smart-grids* avec pilotage direct de la charge, comme mentionné dans [55].

Effets des effacements diffus au niveau local

Dans le cas où l'opérateur d'effacement est l'instance qui génère directement la modulation de la charge de chaque logement³, la possibilité pour l'opérateur de capter un nombre de ménages suffisants pour être en capacité de produire des blocs d'effacements suppose d'être en mesure de répondre aux questions relatives à l'*acceptabilité* de ce type d'offre par les ménages. S'agissant des charges thermiques, la question de la dégradation du confort se pose alors naturellement.

Pour le cas de l'eau chaude sanitaire (*ECS*), compte tenu des caractéristiques fonctionnelles des systèmes concernés, le risque d'inconfort est essentiellement lié à l'adéquation entre le dimensionnement des systèmes de stockage (cas des systèmes électriques de production d'*ECS* à accumulation) et la demande des usagers.

Dans le cas de l'usage chauffage, la notion d'inconfort est plus complexe à appréhender, elle est intrinsèquement liée aux interactions entre le bâti (performances thermiques), les systèmes installés (dimensionnement, type de systèmes) et la perception du confort et/ou sensation thermique des occupants. D'autres éléments encore plus subjectifs peuvent être invoqués, comme par exemple les motivations des ménages à souscrire à des offres d'effacements.

³Ce qui exclu *a priori* les pilotages par signal-prix

Des analyses sur l'acceptabilité des pilotages directs au niveau des ménages/logements doivent permettre d'apporter des réponses aux opérateurs en vue d'un déploiement d'offres d'effacement adaptées.

Effets des effacements diffus sur la demande agrégée

Le déploiement opérationnel de solutions d'effacement suppose d'être en mesure de délimiter et de décrire les effets de ce type de contrôle au niveau agrégé. Cette question est en effet centrale pour la valorisation et la définition de la *rémunération* des acteurs du système électrique. La question des *effets de bord* associés à l'effacement diffus se pose notamment en terme de dynamique de recouvrement et d'effet en puissance (associé à la fin de la période de contrôle).

Dans le cadre de ce travail, on propose d'évaluer les effets des effacements au niveau agrégé à partir d'indicateurs en énergie et en puissance qui sont définis dans le chapitre 3.

Organisation du manuscrit

Dans ce travail, on propose d'évaluer les produits d'effacements réalisés sur un ensemble de consommateurs, chacun étant défini par le triplet {bâtiment, systèmes, ménage}.

Définition 1. [*produits d'effacements*] Déformation de la courbe de charge d'un ensemble de consommateurs suite à l'envoi d'un signal par un opérateur. Un produit d'effacement est caractérisé par une modulation de la charge d'amplitude P_{eff} pendant une durée Δt par rapport à la situation où l'opérateur n'aurait pas envoyé de signal de pilotage (pilotage par extinction/allumage ou pilotage du signal de commande des systèmes, détaillé dans le chapitre 3).

Cette évaluation repose sur la recherche d'un modèle physique explicite de type *bottom-up* permettant de simuler des courbes de charge réalistes de certains usages électriques (usages thermiques de l'électricité). Deux voies ont été explorées dans le cadre de ce travail : d'une part l'étude des variables d'influence sur les effacements de consommation en s'appuyant sur les données issues d'une expérimentation (chapitre 5) et d'autre part l'élaboration d'un modèle global (chapitre 6) permettant de reproduire une partie de la diversité observée sur les courbes de charge des clients expérimentateurs.

L'ensemble des consommateurs inclus dans le périmètre d'analyse est restreint à des ménages et les flexibilités recherchées sont issues de l'usage chauffage. Une analyse des besoins et des habitudes associées à cet usage est proposée dans le chapitre 1, les modèles

physiques utilisés sont décrits dans le chapitre 2. On s'intéresse dans le chapitre 3 aux outils permettant de caractériser le foisonnement des courbes de charges puis on détaille les indicateurs pertinents du point de vue des effacements.

Afin d'analyser un échantillon {bâtiments, systèmes, ménages}, il est nécessaire de caractériser la dispersion des caractéristiques du bâti (enveloppes, expositions, ...) et les éventuelles corrélations entre le ménage (mode de vie, choix des équipements, ...) et les systèmes (caractéristiques techniques).

La construction du modèle global a été décomposée en plusieurs étapes :

1. Recherche d'un modèle physique pertinent pour la problématique de l'effacement permettant, à partir d'un pas d'échantillonnage des signaux de l'ordre de quelques minutes, de réaliser des simulations et études sur des durées de l'ordre de quelques heures. En particulier, il faut représenter la sensibilité des systèmes aux sollicitations à temps caractéristiques courts et prendre en compte les caractéristiques dynamiques de la régulation des systèmes. Les modèles utilisés sont détaillés dans le chapitre 2. Une analyse paramétrique est proposée dans le chapitre 4
2. Exploitation des données issues d'expérimentations. Dans le chapitre 5, nous analysons notre capacité à identifier les dynamiques de la boucle de régulation du chauffage à partir d'une connaissance partielle des sollicitations sur le système
3. Synthèse d'un modèle global permettant de représenter la dynamique d'un parc de consommateurs d'usages thermiques de l'électricité. On propose de reconstruire la dynamique d'un parc en réconciliant plusieurs sources de données. La méthodologie proposée est détaillée dans le chapitre 6. Quelques cas d'étude sont présentés dans le chapitre 7 afin d'illustrer la réponse d'un parc à des signaux de pilotage direct

Chapitre 1

Caractérisation des usages domestiques de l'électricité

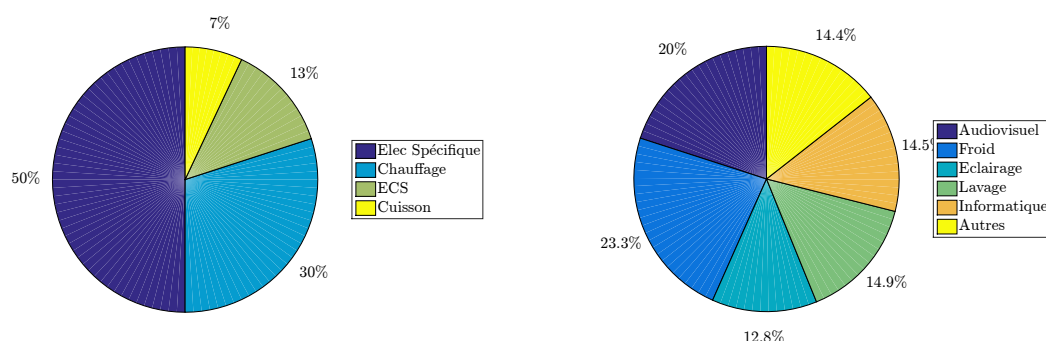
Sommaire du chapitre

1.1	Définir la consommation d'électricité des ménages	12
1.1.1	Classification des usages domestiques de l'électricité. Classification des flexibilités de la demande électrique dans le cas du secteur résidentiel	13
1.1.2	Actions de pilotage de la demande mises en œuvre dans ce travail	16
1.2	Caractérisation de l'usage chauffage par les ménages	18
1.2.1	Difficultés liées à l'estimation d'une température de référence . .	21
1.2.2	Approche spatio-temporelle de la gestion de la consigne	23
1.3	Conclusion du chapitre : hypothèses générales sur les modes de gestion	33

Résumé

Dans la première partie du chapitre, on rappelle les principaux éléments de la littérature sur la caractérisation de la flexibilité des usages domestiques.

Dans la seconde partie du chapitre on s'intéresse plus en détail à l'usage chauffage et on propose une revue de littérature sur les modes de gestions des appareils de chauffage électriques. Dans la dernière partie du chapitre, on précise les hypothèses retenues dans la suite du travail sur la dynamique de gestion de la consigne.



(a) Répartition des consommations pour le secteur résidentiel par usage (b) Détail des usages du poste *Électricité spécifique*

Figure 1.1.1 Répartition de la consommation en fonction des usages (Globale et Électricité spécifique) – Source des données : EDF

1.1 Définir la consommation d'électricité des ménages

La classification généralement utilisée pour définir la consommation d'électricité des ménages est celle utilisée par EDF et le CEREN. On représente sur la figure 1.1.1 la répartition des consommations du secteur résidentiel selon les 4 catégories usuelles : chauffage, ECS, Cuisson, électricité spécifique (données CEREN 2008), ainsi qu'une vision plus détaillée pour l'usage *électricité spécifique*.

Afin de mettre en évidence le potentiel d'effacement des équipements domestiques, la première étape est d'identifier les équipements pour lesquels il est possible de modifier au moins un des paramètres caractérisant l'appel de charge :

1. L'instant où l'équipement est sollicité
2. La durée d'utilisation de l'équipement
3. La puissance appelée par l'équipement lorsque celui-ci est connecté au réseau

Il peut également être nécessaire de prendre en compte le potentiel d'action de l'utilisateur ainsi que les paramètres comportementaux du ménage ayant une influence sur le ou les mode(s) de fonctionnement des équipements.

On appelle usage de l'électricité une activité permettant de répondre à un besoin et nécessitant des équipements consommant de l'électricité pour sa réalisation (l'usage *chauffage* par exemple). Un ou plusieurs équipements peuvent être associés à un usage. Pour l'exemple de l'usage chauffage, les équipements d'intérêt sont les systèmes de production de chaleur associés : convecteur, radiateur, plancher chauffant, ...

1.1.1 Classification des usages domestiques de l'électricité. Classification des flexibilités de la demande électrique dans le cas du secteur résidentiel

Dans le cadre des travaux sur la modélisation multi-agents dans l'habitat, Abras et Ha [3, 75] proposent de classer les services énergétiques dans l'habitat suivant qu'ils sont permanents ou temporaires, et pilotables ou non pilotables (figure 1.1.2).

Définition 2 (service énergétique). *La notion de service énergétique est relative à la demande énergétique permettant de répondre à un besoin d'un usager. On utilisera également la notion d'usage de l'électricité qui a été définie précédemment. À un service ou usage de l'électricité, on associe un ou plusieurs équipements électriques. Cette définition reprend la notion de système domotique définie par Ha dans [75].*

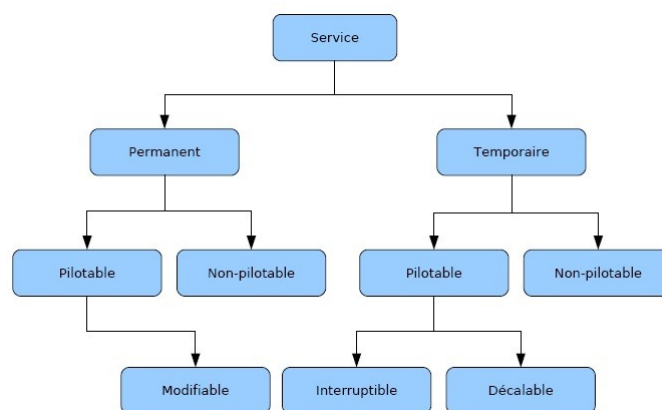


Figure 1.1.2 Classification des services énergétiques (Source : [75])

Les 4 degrés de liberté des équipements pouvant contribuer à la modulation de la charge agrégée (point de vue réseau) sont [75] :

- Différable ou Accumulable (D ou A) : l'instant de démarrage est modifié mais pas le besoin du ménage. L'asservissement tarifaire des ballons à accumulation est l'exemple typique de service proposé aux ménages lié à la possibilité de différer la production d'eau chaude (possibilité de décaler la consommation de l'équipement par rapport à l'usage du ménage). La distinction que nous opérons entre différable et accumulable repose sur la quantité d'énergie consommée par l'équipement suite au pilotage : elle n'est pas modifiée dans le premier cas (ex. usages blancs de l'électricité différée en heures creuses) mais peut l'être dans le second.

Tableau 1.1 Équipements électriques liés à l'usage chauffage

Équipement	Degrés de liberté			
	D	A	M	I
Convecteur			✓	✓
Panneau rayonnant			✓	✓
Accumulation	✓	✓		
Ballon ECS	✓	✓		✓

- Modulable (en temps ou/et en puissance) (MT, MP ou MTP) : la modulation de la charge peut être temporelle (modification du cycle ou de la durée de fonctionnement) ou en amplitude. On considère donc dans ce cas que le pilotage résulte nécessairement en une modification de la consommation énergétique
- Interruptible (I) : le cycle de fonctionnement est modifié du fait d'une coupure volontaire pendant une période donnée. L'interruption correspond généralement à un déplacement de charge (donc à consommation globale équivalente). Les appareils équipés de batteries peuvent être attachés à cette catégorie. Les équipements de type *gros électroménager blanc* peuvent être attachés à cette catégorie

Les équipements pilotables peuvent posséder une ou plusieurs de ces caractéristiques. Cette classification montre immédiatement l'intérêt des systèmes de chauffage électrique et de production d'eau chaude sanitaire (ECS par accumulation) dans le cas des effacements diffus [4]. **Les usages qu'il est possible de piloter à distance dans la suite de ce document sont les équipements de chauffage électriques (seuls les équipements de type *radiateurs et convecteurs* sont pris en considération, voir chapitre 2) et les systèmes électriques de production d'eau chaude sanitaire. Il s'agit des équipements domestiques dont le potentiel agrégé mobilisable actuellement est le plus intéressant.** D'autres équipements dont la diffusion n'est actuellement pas suffisante dans le parc français pourraient être intégrés dans la suite. C'est le cas de systèmes de chauffage plus performants que ceux retenus pour ce travail (pompes à chaleur, planchers chauffants,...) ainsi que d'usages plus récents (véhicule électrique par exemple).

Pour le cas du chauffage électrique, les types de services envisageables avec les équipements retenus dans le périmètre d'étude¹ sont donnés dans le tableau 1.1.

¹Équipements largement diffusés dans le parc de logements dans le cas français dont les systèmes de chauffage sont électriques

Un produit d'effacement (définition ??) étant caractérisé par l'instant de sollicitation, la durée de fonctionnement et l'appel de puissance évité, les équipements modulables sont les plus intéressants à valoriser. Du point de vue du réseau, les équipements différables ou interruptibles résulte en une moindre flexibilité de la charge, ils permettent de mettre en œuvre une diminution momentanée de la puissance appelée lors des moments de tension sur le réseau (typiquement aux heures de pointes). La construction de blocs d'effacements à partir de ce type de service nécessite de maîtriser d'autant mieux le phénomène d'agrégation des charges.

Pour un objectif de modulation de la charge globale donné [64], on recherchera donc le type de service puis les équipements les plus intéressants.

L'évaluation du potentiel d'effacement d'un équipement suppose d'être en mesure de caractériser celui-ci. Représenter la demande d'un ensemble de consommateurs d'électricité (et donc *a fortiori* d'équipements) nécessite de caractériser le parc d'équipements disponibles. Dans le cas de travaux de modélisation *bottom-up*, Grandjean [70] a établi une liste exhaustive des caractéristiques techniques utiles des équipements (à modéliser) :

- classe énergétique
- puissance nominale ou installée
- puissance de veille
- rendement en fonction du niveau de charge
- rendement en fonction des conditions extérieures
- Cycle(s) Unitaire(s) de Puissance (voir définition dans [70])
- durée(s) du (des) cycle(s) de fonctionnement
- mode(s) de fonctionnement
- puissance de recharge
- durée de recharge
- consommation *au plus juste*²

²Adaptation dynamique de la consommation : fonction intégrée pour certains équipements. C'est le cas par exemple pour les machines à laver le linge qui disposent parfois d'une fonction *pesée du linge* afin d'adapter le cycle de lavage

- capacité de l'équipement, niveau(x) de charge possible(s), taille.

La caractérisation de chaque équipement pilotable du parc reprend au moins en partie ces éléments. *La diversité technique des équipements pilotés d'un ensemble de consommateurs est donc caractérisée par la description de ces éléments.*

Si seuls certains équipements sont pilotés, un modèle plus simple de reconstruction *bottom-up* de la demande pour les usages non contrôlés à distance peut être envisagé, par exemple en définissant des lois de distribution pour les profils de charge [147] [50].

La littérature existante permet de choisir des lois adéquates selon les équipements (usages) et de définir les paramètres de ces lois pour un nombre de plus en plus important d'équipements. Un modèle comportant une dizaine d'équipements (dont les appels de charge sont typiques ou contribuant à la consommation de base des foyers) peut rapidement être mis en œuvre. L'ajustement des paramètres temporels (instant de démarrage des équipements) est indispensable afin de s'assurer du réalisme des profils de demande totale (usages pilotés à distance ou non).

1.1.2 Actions de pilotage de la demande mises en œuvre dans ce travail

Dans le cadre de ce travail, on ne s'intéresse qu'aux équipements domestiques pilotables à distance par un opérateur d'effacement, soit encore un agrégateur. Par conséquent, on ne cherche pas à évaluer le potentiel d'effacement des équipements associé à un signal tarifaire, et donc la sensibilité des consommateurs au prix.

Ce type de signal d'effacement (par exemple *critical peak pricing*) est attractif du point de vue réseau compte tenu de l'évolution structurelle de la demande du secteur résidentiel : augmentation de la part de consommation *usages spécifiques* au détriment des autres usages (figure 1.1.1). Dans le cas français, ce type d'option est par exemple proposé aux ménages afin de lisser la demande journalière (et donc la pointe 19h) en hiver durant les 22 jours *les plus contraints* dans le cas des abonnements *TEMPO* et *EJP* proposés par le fournisseur historique. Toutefois, le potentiel d'effacement mobilisable via des incitations tarifaires a fortement diminué au cours des 20 dernières années (environ 2 GW actuellement, le triple dans les années 1990 [141]). De nouvelles offres pourraient permettre de faire évoluer cette capacité, et/ou permettre de bénéficier de nouveaux types de blocs d'effacements.

Pour les effacements issus d'un pilotage direct des équipements, le *comportement* des ménages a potentiellement un effet négatif sur le potentiel d'effacement mobilisable par un opérateur sur son parc. C'est par exemple le cas des actions de type *dérogation* aux

pilotages (cette possibilité garantit aux occupants la possibilité de reprendre le contrôle de leur équipement à tout moment). L'effet des occupants se traduit également par un *bruit* dans les sollicitations (par exemple ouverture/fermeture des fenêtres pendant une phase de contrôle de système de refroidissement du bâti en été,...).

Ce type d'effet n'est pas pris en compte dans la suite, il nécessite en effet une meilleure connaissance des comportements des ménages par rapport à des effacements que l'état actuel de nos connaissances. L'exploitation de données issues d'expérimentation ne permet pas de répondre à cette question (ou en tout cas partiellement). On montre les limites liées à l'exploitation de données issues d'une expérimentation *smart-grids* dans le chapitre 5. Nous savons de plus que les individus volontaires pour s'impliquer dans ce type d'expérimentation sont plutôt issus de sous-groupes ayant des comportements spécifiques et par conséquent les parcs de consommateurs ainsi formés ne sont pas représentatifs des échantillons cibles ou prioritairement intéressants du point de vue du potentiel de flexibilité agrégé à disposition de l'opérateur. Dans les expérimentations *smart-grids*, on note par exemple souvent chez les participants une forte motivation issue de *valeurs* liées à l'écologie (qui paraît sur-représentée par rapport à la population totale), or Dujin et. al. [53] observent que ces valeurs sont souvent mises à mal par une recherche de confort...

Dans la suite, on ne s'intéresse qu'aux effacements liés à des signaux de pilotage direct de l'agrégateur. On suppose que le signal de contrôle de l'opérateur ne modifie pas le comportement des ménages, c'est-à-dire la demande électrique des autres usages du foyer est inchangée et les individus ne modifient pas la gestion des appareils pilotés. Les hypothèses liées à des formes de signaux avec anticipation (par exemple *signal de pré-chauffe* sont gérées directement par l'opérateur).

La figure 1.1.3 représente les différents moyens mobilisables par des actions de maîtrise de la demande dont le pilotage direct fait partie. Ce type de mécanisme de gestion de la demande qui constitue le périmètre d'étude dans la suite de ce document est représenté par les encadrés de couleur rouge sur la figure.

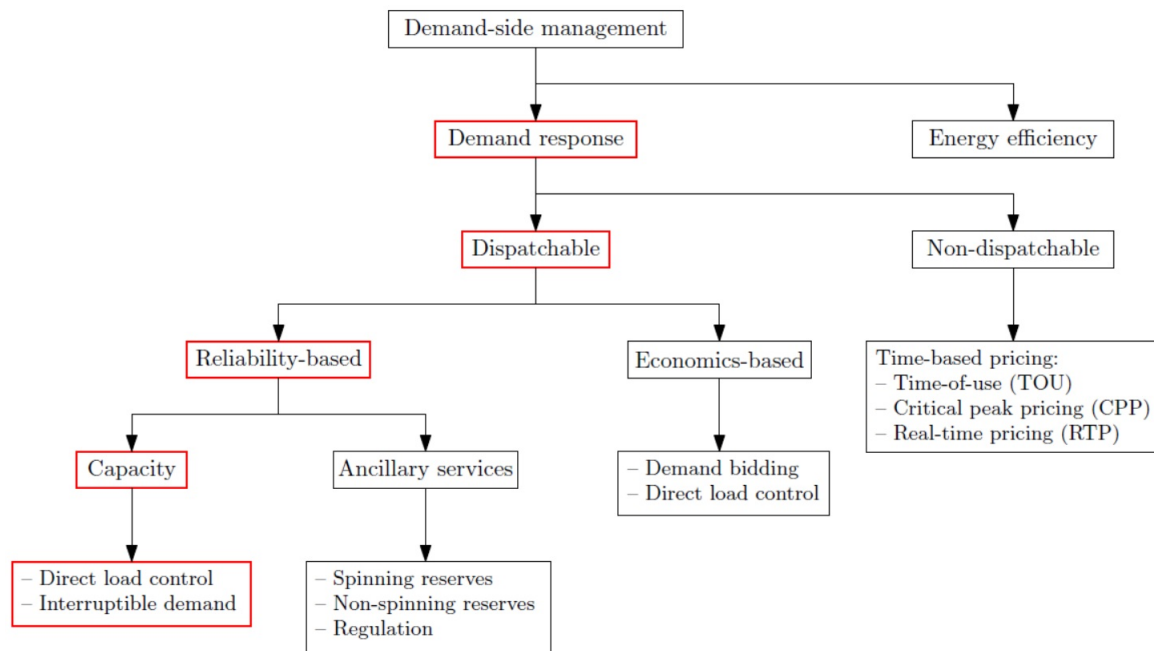


Figure 1.1.3 Mécanismes de maîtrise de la demande. Source de la figure : [147]

1.2 Caractérisation de l'usage chauffage par les ménages

Du point de vue des ménages, l'usage chauffage se traduit par la définition d'une commande sur les appareils c'est-à-dire d'un scénario de consigne.

Un scénario de consigne consiste en une série d'ordres pouvant être soit des ordres de coupures ou relance (consigne à préciser également dans ce cas) soit des changements dans la température de consigne demandée.

La définition des scénarios de consigne suppose de définir à la fois des niveaux de température demandés par les occupants et un ou des *modes de gestion* des systèmes de chauffage.

Définition 3 (mode de gestion). *On désigne par mode de gestion le calendrier des heures de changement de régime du chauffage relativement à une zone thermique demandé par les utilisateurs. Ces changements de régime correspondent soit à l'allumage/extinction des systèmes, soit à un changement de consigne.*

Définition 4 (niveaux de température). *On appelle niveaux de température l'amplitude des consignes définies par les ménages au niveau de leurs systèmes (gestion locale ou centralisée).*

Ainsi, deux questions se posent pour la modélisation des scénarios de consigne :

- Quels sont les modes de gestion adoptés par les ménages?
- Quels sont les niveaux de température associés?

De nombreuses études (voir par exemple [23, 40, 71]) ont montré l'influence prépondérante du scénario de consigne sur les besoins et les consommations énergétiques liés aux usages thermiques dans les logements (en chauffage et en refroidissement).

Booth et. al. [23] ont donné une estimation de l'incertitude associée à la méconnaissance de la fraction des logements chauffés à partir de l'exploitation des consommations de l'usage chauffage pour des logements de type *appartements* situés en Grande-Bretagne dont les systèmes de chauffage sont composés d'une chaudière et de radiateurs à accumulation.

Une analyse en composante principale a permis d'identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur les consommations énergétiques annuelles parmi lesquels la part de logement chauffée et la température de consigne sont ressortis comme ayant le plus d'influence.

Les paramètres des lois relatives à ces variables ont ensuite été déterminés par inversion bayésienne. Les valeurs moyennes de la fraction de logement chauffée par rapport à la surface totale des appartements sont respectivement de 53% (valeur *a priori*) et 49% (valeur *a posteriori*).

Ces observations sont à mettre en perspective avec la problématique identifiée de l'*effet rebond*³ limitant l'efficacité ou plutôt le niveau des économies attendues suite à des travaux de rénovations (voir [10]).

Pour simplifier, on considère que les niveaux sont associés à la perception du confort thermique des occupants du ménage (et éventuellement des variables ci-après) tandis que les modes de gestion sont relatifs à un impératif économique, aux systèmes de valeurs, croyances, intentions des individus (dans le sens proposé par Zhao et. al. [191]) et la connaissance et/ou la perception du mode de fonctionnement des systèmes et de la performance énergétique du bâti que peuvent avoir les ménages (voir à ce sujet l'étude de Kempton [93] sur la perception du fonctionnement des systèmes de chauffage).

En choisissant une température de consigne fixée pour l'ensemble des ménages du parc (c'est-à-dire un niveau uniforme sur l'ensemble du parc), les résultats obtenus sur le potentiel d'effacement agrégé risquent d'être largement sous-estimés (il semble que la température

³L'*effet rebond* mentionné ici fait référence à l'écart entre prévisions de consommations et consommations mesurées suite à des *actions de MDE*.

de consigne soit tendanciuellement au dessus de la valeur normative de 19°C suggérée par l'ADEME⁴. En ordre de grandeur, la diminution de la consigne de 1K (passage de 20 °C à 19 °C) se traduit par une diminution de la consommation pour l'usage chauffage de 7% selon l'ADEME⁵.

En choisissant un scénario normalisé avec des horaires de changement de consigne fixés, la diversité du parc reproduite est peu réaliste. En effet, les effacements de consommation dans le secteur résidentiel ayant pour effet une perte de foisonnement momentanée au niveau du parc (indicateurs définis dans le chapitre 2), l'évaluation des effets de différentes stratégies de contrôle suppose de reproduire la demande dynamique de cet ensemble de consommateurs. Nous étudions dans le chapitre 4 la sensibilité des résultats aux relances du matin et du soir, et on montre qu'il est indispensable de décrire au mieux les modes de gestion des ménages et de s'assurer de la représentativité de ces scénarios à l'échelle du parc.

Une solution plus satisfaisante est donc de construire des profils types de ménages ou d'individus au niveau du parc. Ce type d'approche a été choisie dans [40] par exemple où 11 profils types sont proposés (4 scénarios de consignes, ménages pouvant comporter 2 ou 5 membres). Pour chaque profil type de ménage ainsi construit les consommations énergétiques annuelles sont déterminées, et la comparaison entre les différentes variantes a permis de mettre en avant l'influence du comportement des ménages par rapport à la diversité d'origine technique et fonctionnelle des systèmes (enveloppe du bâti et système de chauffage).

La construction de ces profils-types d'occupants (niveau ménage associé à un logement) nécessite de déterminer les habitudes de consommations et d'identifier les caractéristiques ou déterminants liés à la gestion des usages contrôlables à distance par un opérateur externe (soit dans le cas présent, la *programmation* du chauffage).

Dans les sections qui suivent, on exploite les études et données existantes sur les *températures intérieures* des logements en distinguant le cas de données issues de campagnes de mesures de celles issues d'enquêtes. On donne dans la section 1.3 les hypothèses retenues dans le cadre de ce travail pour la définition des consignes. On précise tout d'abord dans la section 1.2.1 les difficultés liées à la réconciliation entre ces différentes sources de données.

⁴<http://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/bien-gerer-habitat/>

⁵<http://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/bien-gerer-habitat/chauffage-climatisation>

1.2.1 Difficultés liées à l'estimation d'une température de référence

Le problème du niveau de température se pose à la fois dans une dimension spatiale et temporelle. L'effet *spatio-temporel* de la gestion de la commande est d'autant plus marqué dans le cas des systèmes électriques de chauffage qui offrent au ménage la possibilité d'une gestion locale de la consigne (pièce par pièce) très simple [54].

Avant d'exposer les travaux dont nous disposons pour l'analyse des température de consigne dans les logements du parc résidentiel français, on propose de faire une synthèse succincte des difficultés identifiées pour l'intégration de données relatives à la consigne dans les modèles pour la simulation des consommation électrique.

1.2.1.1 Données issues de campagnes de mesures

Si on suppose que les données de température de consigne proviennent de données mesurées, plusieurs questions se posent quant à la/les température(s) disponibles :

- **quelle température mesure-t-on?** Celle-ci dépend du choix du capteur et on observera un écart selon que la température mesurée est plutôt une température d'air ou une température se rapprochant de la température opérative ou *ressentie* par les occupants (définie par l'équation (??), chapitre 2)
- **quel emplacement pour le capteur?** Les résultats des études *in situ* sont potentiellement influencés par l'emplacement de la sonde. A ce sujet, la figure 1.2.1 illustre les difficultés rencontrées dans un contexte de déploiements de solutions de pilotage direct à grande échelle. Une sonde de température a été envoyée aux ménages participant à une expérimentation *smart-grids*, accompagnée d'une explication sur le choix de l'emplacement de la sonde. Sur ces données, on observe que le capteur a été placé à proximité d'une source de chaleur (utilisée lorsque le ménage est présent) qui introduit un biais sur la mesure⁶. Ce type de bruit rend l'exploitation des données terrains relatives à des mesures de températures à *grande échelle* particulièrement complexes et atteste de la complémentarité entre les approches de types enquêtes et mesures
- **une ou des températures?** A moins que les ménages aient une gestion spatialement uniforme dans un bâti assimilable à une seule zone thermique (nous avons vu que cette hypothèse est peu réaliste, et on donne des éléments quantitatifs dans la partie

⁶Cette hypothèse a été confirmée en exploitant l'ensemble de la séquence - 3 mois de données - qui était accessible dans le cadre de ces travaux. Des éléments de précision sur l'expérimentation et les signaux mesurés sont donnés dans le chapitre 5

1.2.2), il est nécessaire d'identifier les stratégies de *zonage* dans l'habitat et de proposer une méthode de calcul de température équivalente pour ajuster le modèle de bâti monozone utilisé dans les simulations (détaillé dans le chapitre 2). Les méthodes les plus courantes pour cela sont la pondération par les volumes de zones ou par les surfaces [17]. Au vu des incertitudes liées à la description géométriques des bâtis du parc modélisé (voir chapitre 6), ces deux méthodes sont équivalentes dans nos simulations

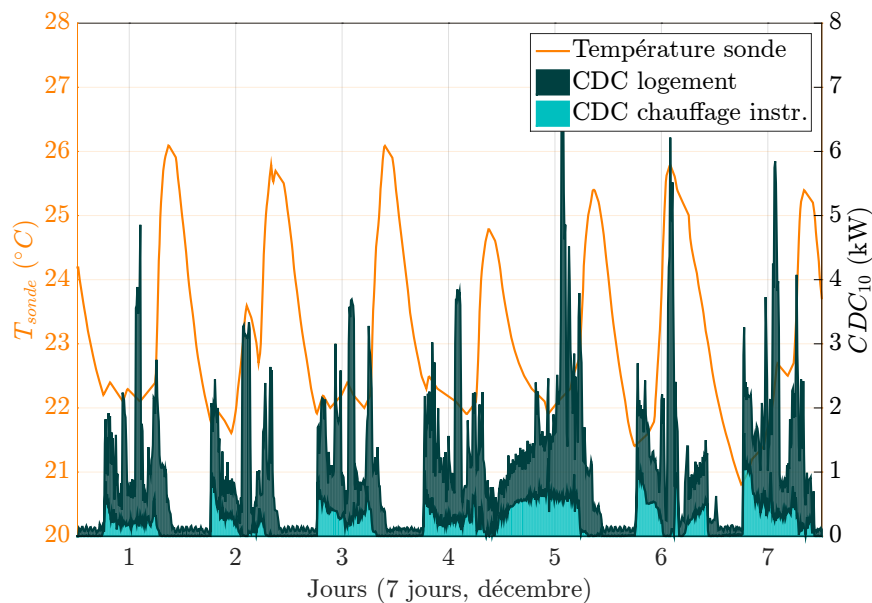


Figure 1.2.1 Exemple d'erreur de mesure de température intérieure dans les logements associée à un mauvais positionnement de la sonde. Données extraites d'une expérimentation *smart-grids*

1.2.1.2 Données issues d'enquêtes déclaratives

Si on s'intéresse à des données issues d'enquêtes (donc des données de nature déclarative), il importe, au delà des biais liés purement au format des questionnaires, de prendre en considération les biais liés directement au type de données recueillies :

- Dans l'enquête *Residential Energy Consumption Survey* [58], notée *RECS*⁷ dans la suite, de nombreux détails sont demandés aux individus enquêtés sur l'existence et le type de thermostats présents dans le logement.

⁷données consultables : <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2009/index.cfm?view=microdata>

Or, Peffer et. al. [131] relèvent qu'il existe très souvent chez les ménages une forme de méconnaissance du type de thermostat installé et des fonctionnalités disponibles. Cette observation est alimentée par l'incohérence entre plusieurs sources de données de nature déclarative. D'autre part, les données sur les niveaux de consigne issues des enquêtes sont centrées sur les températures demandées (*réglage visible*), ce qui permet d'avoir la même référence pour l'ensemble des individus interrogés mais n'assure pas de représentativité de la diversité *effective* au sein d'un parc de consommateurs.

Enfin, l'objectif de représentativité statistique de l'échantillon interrogé oblige à autoriser une plus grande marge d'incertitude sur les réponses fournies⁸

- BrisePierre [25] relève que dans les réponses aux questions sur leur(s) température(s) de consigne, certains ménages *plutôt insatisfaits* de la température dans leur logement ont tendance à donner un niveau supérieur à celui qui serait mesuré dans les pièces. En effet, par effet de substitution, les enquêtés répondent finalement à la question "quelle température souhaiteriez-vous avoir dans le logement?". A contrario, les ménages dont la température intérieure est plutôt au dessus de la norme de 19°C ont tendance à *abaisser la température dans leur réponse* de façon à se rapprocher de la norme préconisée. Allibe [10] parle à ce sujet d'effet de *désirabilité sociale*. Bien qu'il soit impossible de quantifier ces biais, on notera que l'effet combiné de ces deux phénomènes produit un effet lissant sur les distributions des températures déclarées, qui pourrait être un élément de discussion intéressant relativement à la consigne de 19°C souvent choisie comme valeur par défaut.

1.2.2 Approche spatio-temporelle de la gestion de la consigne

Les études portant tant sur les niveaux de températures de consigne des ménages dans leur logement que sur les températures intérieures observées sont assez peu nombreuses. En outre, bien qu'il ait été établi qu'il existe une tendance vers une uniformisation des températures dans les logements, la caractérisation de ce phénomène reste encore à explorer et à préciser dans sa dimension spatiale *macro* (uniformisation des modes de consommation à l'échelle régionale, nationale, ...), sa dimension spatiale *micro* (c'est-à-dire au niveau d'un logement) ainsi que d'un point de vue temporel.

Compte tenu de l'hétérogénéité des méthodes de collecte des données, des spécificités structurelles des parcs de logements nationaux et de l'incertitude liée à la définition des

⁸Questionnaire fourni aux personnels chargés de collecter les réponses consultable en ligne : http://www.eia.gov/survey/form/eia_457/form.pdf

consignes, nous avons choisi de nous concentrer exclusivement sur l'exploitation de données issues d'études menées en France. On inclut toutefois quelques études basées sur l'exploitation des données de *RECS* [58], qui représente une source de données riche. Ces études donnent donc un aperçu des paramètres qui pourraient être précisés par l'exploitation d'une telle base d'information.

Campagnes de mesures sur le parc français Cette étude est très limitée puisqu'il n'existe quasiment pas d'étude publique à grande échelle⁹.

Les principaux résultats de ce paragraphe sont issus d'une campagne de mesure menée par l'OQAI¹⁰ conjointement avec plusieurs partenaires¹¹ entre 2003 et 2005. L'objectif de l'étude était d'observer la qualité de l'air intérieur dans des logements (et notamment le niveau de certains polluants) ainsi le suivi de la température intérieure n'était pas l'objectif essentiel de la campagne mais l'un des indicateurs de suivi. Un document spécifique a été publié à l'issue de l'enquête par le CGDD¹² [132].

La température intérieure a été relevée dans 373 logements durant une semaine d'hiver. Ces logements sont répartis sur l'ensemble du territoire français, 3 types de système de chauffage sont présents dans l'échantillon (en sus, le cas d'absence de système de chauffage est observé) et 3 époques constructives¹³. Compte tenu de la faible durée de la campagne de mesures et de l'effectif de chaque groupe *régional* (de l'ordre d'une dizaine de logements par département), il n'est pas possible d'évaluer l'impact des conditions climatiques externes sur les températures mesurées dans le logement. Les conditions de mesures dans les *pièces de vie* et dans les *chambres* ne sont pas tout à fait les mêmes mais les sondes sont identiques. Dans l'ensemble des pièces les mesures ont été relevées au pas de 10 minutes.

Nous n'avons pas eu accès à l'enquête complète; les résultats présentés dans la suite sont extraits du rapport [132]. Plusieurs analyses de la variance et plusieurs régressions ont permis de retenir, pour chaque type de pièce considérée (chambre, séjour, cuisine) les déterminants significatifs (critère statistique) de la température, tels que reproduits dans le tableau 1.2. Il est intéressant de noter que cette étude économétrique a permis de montrer que le type de combustible est un déterminant de la température dans la chambre mais pas dans le séjour, ce qui est en accord avec [53]. Parmi les variables identifiées, on notera que la présence

⁹Nous n'avons pas eu accès aux données collectées par le CEREN par exemple

¹⁰OQAI : Observatoire pour la Qualité de l'Air Intérieur, <http://www.oqai.fr>

¹¹Une présentation des projets de recherche conjoints est consultable à l'adresse : http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/fichiers_telechargeables/Journees_techniques/JT8_BBD_-_Mickael_DERBEZ_-_OQAI.pdf

¹²CGDD : Commissariat Général au Développement Durable, <http://www.developpement-durable.gouv.fr>

¹³La description détaillée des effectifs pour chaque variable est disponible dans le rapport

Tableau 1.2 Synthèse des déterminants statistiquement significatifs sur la température intérieure mesurée selon l'affectation de la pièce - Tableau reproduit de [132]

	Chambre	Cuisine	Séjour	Chambre-Séjour
Déterminants	Date construction		Date construction	Date construction
	Type chauffage		Type chauffage	Type chauffage
	Type combustible			Type combustible
	Travaux menuiseries			
		Cheminée	Cheminée	
		Revenu	Revenu	Revenu
	Nb pers ménage	Nb pers ménage		Nb pers ménage
	Age	âge	Age	Age
	Zone climatique	Zone climatique	Zone climatique	Zone climatique

ou non d'une cheminée est une variable d'influence (usage chauffage multi-énergie, d'où éventuellement un effet de substitution lors des effacements). Enfin, pour les pièces *séjour* et *chambre*, il semble que la période constructive du bâti soit un déterminant de la température, ainsi que l'âge de la personne de référence. Ces résultats sont cohérents avec les principaux paramètres d'influence connus (voir la revue de littérature très complète sur le sujet dans [181]).

Enquêtes nationales sur les températures dans les logements Une autre étude intéressante dans le cadre de ce travail est l'enquête *Maîtrise de l'énergie* conduite par l'ADEME en partenariat avec *TNS Sofres*. Nous avons eu accès aux bilans de l'enquête pour les années 2009 à 2013¹⁴, mais pas aux données collectées. Les résultats sont issus d'un sondage effectué auprès de 10000 participants et portant plusieurs axes. Nous avons reproduit le résultat¹⁵ de la réponse à la question "A quelle température en moyenne est chauffé votre logement?" pour les années 2009 à 2013 sur la figure 1.2.2.

Ces bilans fournissent de plus quelques indications sur les déterminants de cette température moyenne déclarée mais nous n'avons pas trouvé d'analyse détaillée de ces valeurs. On retiendra que la température déclarée est stable sur les 5 années représentées. La valeur moyenne est en accord avec celles des pièces *cuisine* et *chambre* de l'enquête précédemment

¹⁴https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-tns_sofres-barometre_10_000_menages_2013-phase_1.pdf

¹⁵Résultats issus des bilans publiés et non de l'exploitation des données

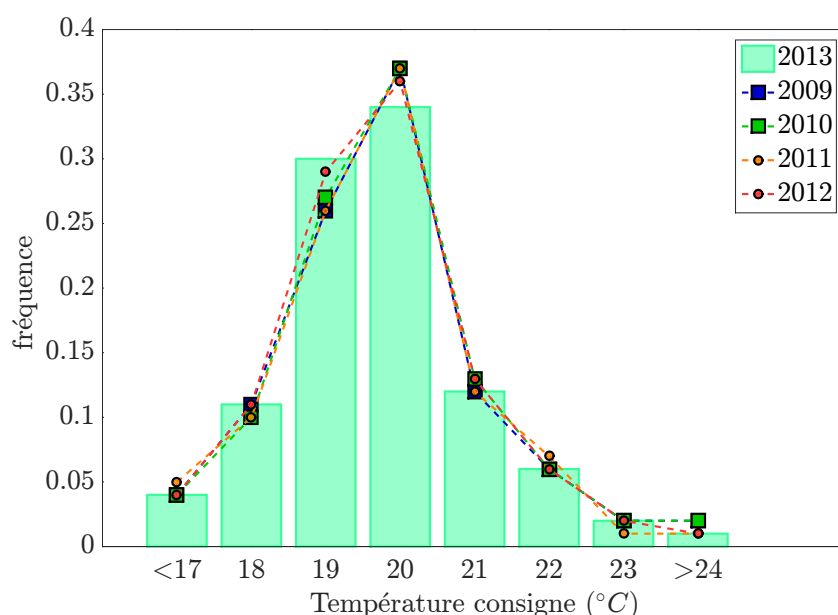


Figure 1.2.2 Répartition des températures moyennes de consigne déclarées dans les logements - Source des données : *Maitrise de l'énergie, Bilan 2011 et 2013*

présentée, en revanche, on relève un écart de l'ordre du degré pour la pièce identifiée *séjour*, alors que les mesures de l'*OQAI* ont eu lieu quasiment 10 ans auparavant ¹⁶.

Présentation de quelques études de cas En s'intéressant à quelques études plus complètes mais portant sur un nombre restreint de logements ou ménages, on peut espérer identifier des habitudes et des pratiques spécifiques. Toutefois, l'intérêt de cette analyse demeure limitée par la difficulté voire l'impossibilité d'intégrer les pratiques ainsi identifiées dans les modèles utilisés dans le cadre de ce travail (voir chapitre 2).

Les études présentées dans ce paragraphe s'inscrivent dans trois cadres distincts :

- Deux études portent sur le suivi de la qualité de l'air dans des logements ciblés (caractéristiques thermiques, systèmes)
- On présente les données sur le suivi de la température intérieure dans 23 logements soumis à des effacements de consommation dans un cadre expérimental

¹⁶La plupart des auteurs soulignent que la température de consigne aurait plutôt tendance à augmenter qu'à diminuer

- On exploite les résultats d'une enquête s'inscrivant dans une expérimentation de solution de rénovation (*MDE*)

Suivi de la qualité de l'air dans quelques logements basse consommation Dans le cadre de recherches sur la qualité de l'air, le CSTB a développé une méthodologie et un outil d'évaluation de la qualité de l'air intérieur [47], lequel a été mis en œuvre pour le suivi de 7 maisons basse consommation¹⁷ [46]. Puis, deux de ces logements ont fait l'objet d'une étude plus approfondie [48]¹⁸. L'objet de ces deux études dépasse largement le cadre d'analyse de ce travail, et on ne présente ici que les résultats concernant l'évolution de la température intérieure dans les logements qui a été suivie durant 2 à 3 ans (3 ans pour les deux logements sélectionnés pour l'étude complémentaire). Des enquêtes auprès des 7 ménages sont venues compléter les observations mesurées. Les résultats disponibles dans les rapports [46] et [48] sont reproduits sur la figure 1.2.3 (pour les logements suivis durant plusieurs saisons, la température indiquée est la température moyenne relevée). La moyenne des mesures issue du rapport [132] est également indiquée pour information¹⁹. On notera que sur les trois ans, et pour chaque pièce, la température moyenne durant la saison de chauffe est très variable²⁰ et ce même au sein d'un logement donné, la variation étant de l'ordre de 2°C. Sur une même saison, l'amplitude de variation pour une pièce donnée est de l'ordre de 5°C.

Dans le cadre des mesures d'incitation à la rénovation du parc français²¹, EDF a réalisé une étude de suivi de la qualité de l'air dans 7 logements rénovés en Alsace durant l'hiver 2012-2013 [156]. Les caractéristiques physiques, les systèmes de chauffage ainsi que les solutions de rénovations qui ont été effectués²² sont différents selon les logements, les 7 cas sont donc bien distincts. Les relevés de températures intérieures (chambre et salon) sur les deux semaines de mesures indiquent que seul l'un des ménages applique une stratégie de gestion de la consigne spatialement uniforme tandis que pour les autres cas, la gestion est *zonée* (distincte selon les pièces).

Cette étude est à mettre en perspective avec une autre étude également réalisée par EDF [155] portant sur le même nombre de logements, dont l'objectif est similaire mais ciblant des logements ayant un système de chauffage au bois utilisé soit en appoint (3 logements), soit en tant que moyen de chauffage principal (4 logements). Seule la mesure de la température

¹⁷Label *Passivhaus* ou *BBC*

¹⁸Pour les caractéristiques des logements étudiés, se reporter aux rapports

¹⁹Pour l'espace *cuisine*, nous avons affiché la moyenne de la pièce *cuisine*. La température moyenne pour la pièce *séjour* était de 20.6°C.

²⁰L'analyse de la différence $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$ pourrait apporter des éléments de précisions

²¹Faisant suite aux travaux issus du *Grenelle environnement*

²²Le rapport contient une description détaillée des logements

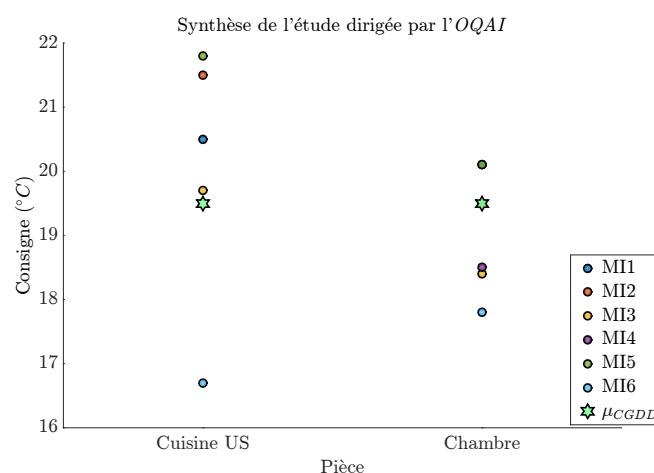


Figure 1.2.3 Températures moyennes mesurées pour plusieurs pièces dans 6 logements instrumentés (notés MI1 à MI6) dans le cadre de l'étude de l'OQAI. La moyenne issue de l'enquête de l'ADEME est indiquée par une étoile bleue. Sources des données : [46] et [48]

intérieure dans la pièce de vie - où se trouve le système de chauffage au bois - a été suivie. Cette étude montre l'existence d'une stratégie temporelle de gestion de la consigne. Toutefois, compte tenu de la difficulté de régulation de ce type de système [177], cette observation reste à confirmer.

Exploration des données de températures intérieures relevées dans le cadre d'une expérimentation de pilotage direct de charges thermiques Nous avons eu accès à des relevés d'une température intérieure pour 23 logements expérimentant une solution de pilotage direct distant de certaines des voies²³ de chauffage, aux index de consommation de ces voies et aux programmes de pilotage du chauffage définis par les ménages sur l'écosystème disponibles dans l'expérimentation (interface permettant le pilotage distant des voies contrôlés par l'agrégateur). Le cadre expérimental est décrit dans la section 5.1 du chapitre 5.

Les données analysées sont mesurées avec un capteur indépendant de celui des systèmes, et il n'est pas possible de proposer une méthode robuste d'identification de la fonction $T_c = f(T_m)$ où T_c est la consigne au niveau des systèmes, T_m la mesure disponible avec les données disponibles (voir chapitre 5).

L'interprétation des mesures de températures *intérieures* disponibles est complexe, d'autant que l'emplacement du capteur et l'environnement de celui-ci est inconnu (voir paragraphe 1.2.1.1 et figure 1.2.1). De manière qualitative, on observe que les évolutions

²³Chaque voie est reliée à un unique équipement (de chauffage)

de la température mesurée sont cycliques journalières, ce qui souligne l'importance de la dynamique des individus (activités, présence dans le logements) sur la demande de chauffage.

Il ressort de l'exploitation de cet échantillon que, parmi les ménages ayant des *programmes*, la gestion du chauffage est spatio-temporelle : le caractère spatial est lié à l'affectation des pièces de logements et le caractère temporel à l'activité (présence/absence/nuit²⁴).

L'effet de ce mode de gestion est particulièrement visible sur la courbe agrégée chauffage (moyenne, jours avec absence de signal de contrôle) qui est structurée par une pointe du matin, une le soir, une diminution de la demande le matin et durant la nuit, ce qui traduit le caractère non stationnaire des besoins de chauffage. Le rapport des pointes minimale et maximale (indicateur défini dans la partie 3.1.1 par l'équation (??)) moyen sur une journée est de 5.

Afin d'illustrer ces remarques, on représente sur la figure 1.2.4 la courbe de charge agrégée de l'usage chauffage instrumenté des 23 logements disponibles pour un jour de semaine quelconque, en l'absence de signal d'effacement. Compte tenu de la taille de l'échantillon, aucune représentativité de forme n'est assurée.

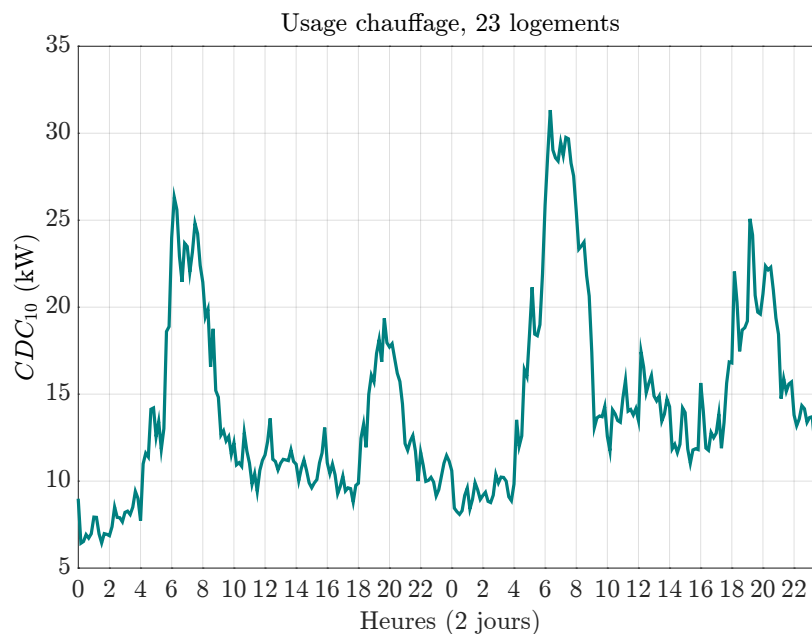


Figure 1.2.4 Courbe de charge (période de mesure 10 minutes) agrégée de l'usage chauffage de 23 logements participants à une expérimentation *smart-grids* pour deux jours consécutifs quelconques

²⁴Sur les quelques programmes disponibles, deux modes au moins sont différenciés

On peut également remarquer à partir de la figure 1.2.4 la prépondérance de l'effet de relance du *matin* par rapport à celle du *soir*, qui peut s'expliquer par l'analyse des programmes définis par les ménages sur l'*energy box* mise à disposition dans le cadre de l'expérimentation : plus de la moitié des ménages ont définis des programmes d'*allumage et extinction* planifiée des équipements selon l'heure de la journée, et quelques ménages parmi eux ont des programmes différenciés pour certains jours (jours de semaine hors mercredi, mercredi, week-end).

La demande moyenne est faible mais l'écart-type entre logement est important, ce qui souligne la diversité des habitudes et éventuellement des bâtis (performances thermiques intrinsèques).

Études sur les impacts de solutions de rénovations Afin d'étudier l'impact d'opérations de rénovations sur les consommations électriques, Raynaud [140] a exploité les données de deux enquêtes réalisées en Meuse et Haute-Marne d'une part et en PACA d'autre part. Les ménages intégrés dans le périmètre étaient essentiellement des propriétaires de *maisons individuelles* construites avant la première réglementation thermique pour respectivement $\sim 60\%$ et $\sim 20\%$ des échantillons. Le niveau de détail pour les logements construits après 1975 n'est pas le même dans les deux enquêtes. Les systèmes de chauffage installés peuvent être au gaz, fioul, GPL, bois ou électricité. Plusieurs systèmes sont intégrés pour chaque cas (pour les systèmes électriques, essentiellement des convecteurs et radiateurs dans le cas *avant travaux*). Ces enquêtes comprenaient un volet *questionnaire ménage* dont une partie était dédiée à la connaissance des habitudes de gestion des appareils de chauffage (*avant travaux*).

Pour la première enquête, 45% des ménages interrogés étaient au moins partiellement absents durant la journée, 36% dans la seconde enquête. Les histogrammes des températures déclarées, en distinguant *pièces de vie* et *autres pièces*, sont reproduits sur les figures 1.2.6 et 1.2.5 (figures de gauche).

Les niveaux de températures demandées dans les pièces de vie sont tendanciellement supérieurs à ceux définis dans les autres pièces, ce qui est cohérent avec les études présentées auparavant.

Les modes de gestions observés (fréquences) sont reproduits sur les graphiques de droite : 3 modes avec intermittence de type *réduit* sont identifiés, plus de la moitié des ménages interrogés déclarent réduire la consigne au moins durant la période nocturne.

Approximativement 25% des ménages ont déclarés ne jamais réduire la consigne de chauffage (absence ou période nocturne). Dans chaque échantillon, plus de la moitié des

ménages ont déclaré qu'au moins une personne était présente dans le logement au cours de la journée [140], ce qui est certainement un facteur déterminant des fréquences observées.

Ces données sont en accord avec l'étude entropique des niveaux de consigne relevés sur les thermostats de 96 logements en Californie qui atteste de l'existence de modes de gestion temporelle similaires pour le chauffage et la climatisation [185]. La méthode par analyse d'entropie proposée permet en effet de mettre en avant l'existence de surfaces $T_{\text{cons}}.Durée$.

L'analyse des données issues de l'enquête RECS [58] souligne l'existence d'au maximum 3 modes de régulation de la température significatifs au niveau régional dans les logements dont les systèmes sont équipés de thermostats [187]. L'effet de régionalité observé des niveaux de température est faible.

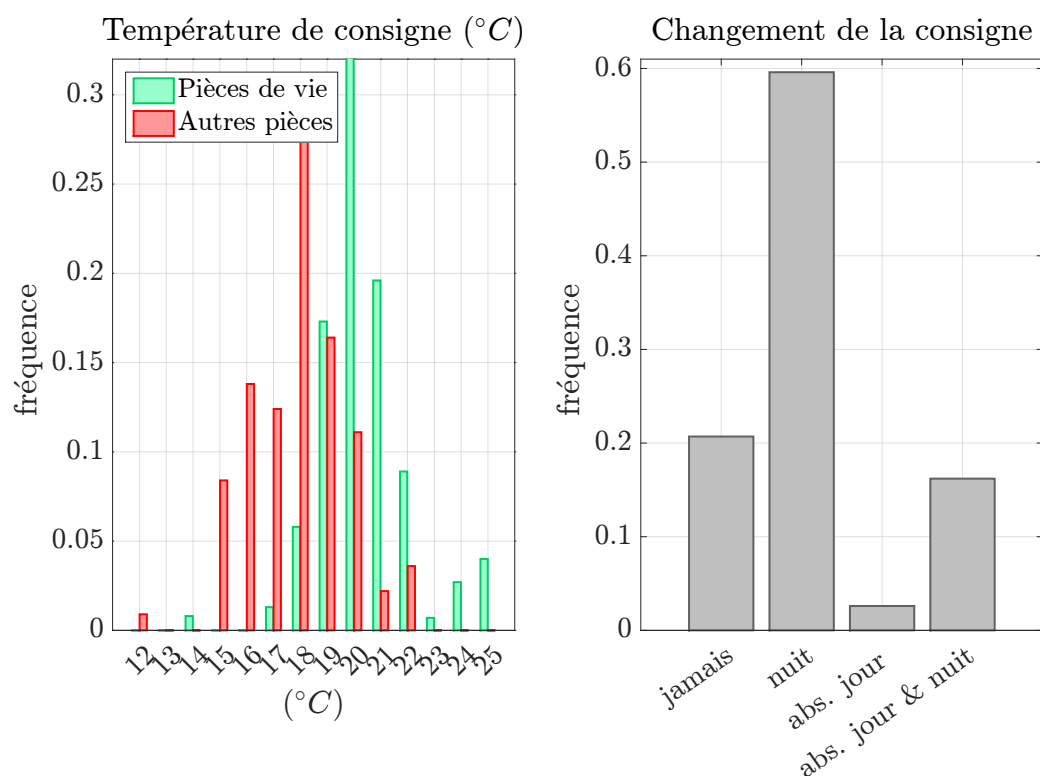


Figure 1.2.5 Températures de chauffage déclarées et modes de gestion du chauffage (périodes avec réduit de consigne) pour un échantillon de ménages (~ 100 ménages) participant à une opération de rénovation de leur habitat (avant opération) dans les départements *Meurthe et Moselle*. Graphiques extraits de [140]

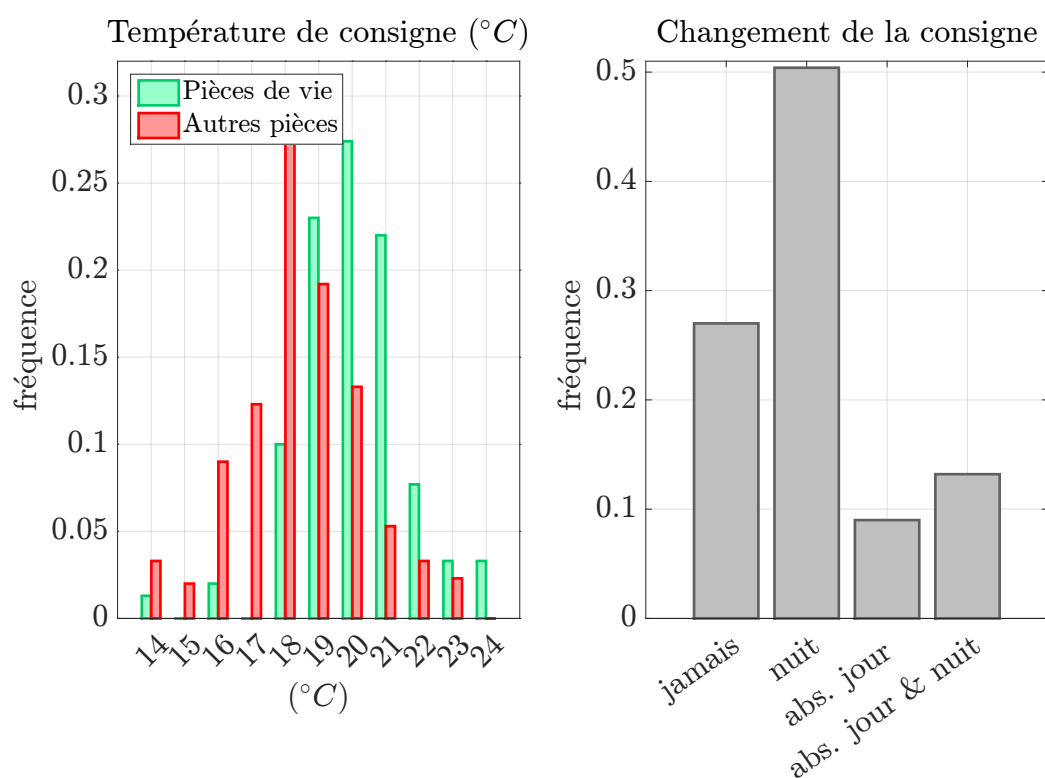


Figure 1.2.6 Températures de chauffage déclarées et modes de gestion du chauffage (périodes avec réduit de consigne) pour un échantillon de ménages (~ 100 ménages) participant à une opération de rénovation de leur habitat (avant opération) dans la région *PACA*. Graphiques extraits de [140]

1.3 Conclusion du chapitre : hypothèses générales sur les modes de gestion

L'apport des éléments détaillés dans les sections 1.2.1 et 1.2.2 est essentiellement qualitatif. On retrouve l'une des limites de l'approche de modélisation choisie dans le cadre de ce travail [116].

On observe sur l'ensemble des études et données exploitées qu'il existe une hétérogénéité des niveaux de consignes définies par les ménages ou mesurées dans les logements (en considérant que les consignes sont atteintes, c'est-à-dire que les systèmes sont correctement dimensionnés).

Cette diversité peut être définie à différentes échelles :

- Au niveau du parc, en considérant une seule température pour chaque logement (par exemple pondérée ou définie selon une pièce de référence)
- Au niveau du logement, en s'intéressant à la variabilité spatiale et temporelle des consignes

Pour la suite, on retiendra que la gestion de la consigne dans les logements est spatio-temporelle. En ce qui concerne le caractère spatial, l'exploitation de la campagne de mesure de l'OQAI [132] montre que les déterminants communs à l'ensemble des pièces sont relatifs aux caractéristiques des systèmes de chauffage (type de systèmes, type de combustible). L'ensemble des campagnes incluant plusieurs points de mesures par logement (pour différentes pièces) montre que les températures dans les pièces de vie sont supérieures à celles relevées dans les autres pièces, ce qui peut s'expliquer par l'affectation de la pièce (recherche de confort) et également par les apports internes dans le cas de données issues de mesures *in situ* (activités et dimension sociale associée à l'espace de vie). Des éléments sociologiques riches sur ces aspects peuvent être consultés dans [163].

Les résultats des enquêtes présentées dans [132, 140] montrent tous que la distribution des consignes dans un parc décrit par l'association de logements équipés de systèmes et de ménages pourrait être définie par une loi normale $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ dont les paramètres sont à déterminer. Les valeurs des paramètres généralement choisis sont $\mu = \{19^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 21^\circ\text{C}\}$ et un écart type $\sigma = 2^\circ\text{C}$. On considère qu'un écart d'un degré sur la consigne se traduit par une variation de consommation d'environ 7%, ce qui est un ordre de grandeur intéressant pour s'assurer de la cohérence des modèles. L'étude d'effacements de charges thermiques

Tableau 1.3 Niveaux de consigne des systèmes de chauffage selon l'activité des usagers retenus pour définir les loi de commandes des systèmes par les ménages

	Confort	Confort dégradé	Extinction
Présence active individu	✓		✓
Absence individu	✓	✓	✓
Repos individu	✓	✓	✓

ne nécessite pas nécessairement de connaître la valeur a priori de ce paramètre qui est un paramètre d'ajustement intéressant pour décrire un parc (ensemble de consommateurs). Ce paramètre traduit la diversité dans le parc via le cyclage des appareils. Nous pensons qu'il est fortement corrélé aux performances thermiques des logements du parc à piloter. Nous ne disposons pas d'éléments suffisants pour valider cette hypothèse.

Cette analyse bibliographique nous a permis de donner une synthèse des caractéristiques relatives aux modes de gestion des appareils de chauffage. Elle ne nous a en revanche pas permis de définir des déterminants pour expliquer les choix de température de confort dans l'habitat, c'est-à-dire pour proposer des typologies de *ménages-gestionnaires de la consigne des équipements de chauffage*.

On précisera ainsi dans les chapitres 4 et 6 les méthodes choisies pour définir les modes de pilotages des appareils de chauffage par les ménages.

Les données issues d'expérimentations (section 1.2.2) montrent que la plupart des ménages diminuent la consigne ou éteignent leurs systèmes de chauffage (électrique ou non) à certains moments de la journée selon la présence et les activités dans le logement. Les cas possibles de gestion temporelle retenus dans la suite sont synthétisés dans le tableau 1.3. Le niveau *confort* correspond à la consigne de référence qui sera définie dans la suite, le niveau *confort dégradé* correspond à la réduction de la consigne par rapport au niveau de référence.

Chapitre 2

Approche théorique : modèles retenus pour les simulations

Sommaire du chapitre

2.1	Modèle pour l'enveloppe du bâtiment	36
2.2	Réduction du modèle de bâti de référence	41
2.2.1	La méthode d'Eitelberg	42
2.2.2	Les méthodes modales	42
2.2.3	La réduction en base équilibrée	44
2.2.4	Méthode de réduction retenue	48
2.3	Modélisation des systèmes de chauffage intégrés au bâti	49
2.3.1	Modélisation du corps de chauffe de l'émetteur	49
2.3.2	Modélisation du régulateur	52
2.3.3	Modélisation du capteur de température	54
2.4	Dimensionnement des systèmes	54

Résumé

Dans ce chapitre on présente dans un premier temps les modèles de référence utilisés pour les bâtis et les systèmes. On détaille les hypothèses permettant de construire le modèle de thermique du bâtiment. Ce modèle est de type boîte blanche, et on précise les approximations utilisées pour la simulation des logements. Le modèle est associé à des systèmes pour l'usage

chauffage.

Les hypothèses de modélisation des systèmes intégrés au bâti font l'objet de la seconde partie de ce chapitre. Les modèles sont validés par le calcul des consommations annuelles de l'usage chauffage dans le chapitre suivant.

2.1 Modèle pour l'enveloppe du bâtiment

La modélisation des transferts thermiques dans le bâtiment a fait l'objet de nombreuses études par le passé et a permis le développement d'un grand nombre d'outils de simulation thermique dynamique dans le bâtiment (TRNSYS, EnergyPlus, ...). Une comparaison intéressante entre ces différents modèles peut être trouvée dans [171]. Dans le cadre de ce travail, on cherche un modèle thermique suffisamment simple pour pouvoir être déployé rapidement sur un grand nombre de bâtiments. Ce modèle doit cependant être capable de reproduire correctement le comportement dynamique d'un bâtiment pour des pas de temps faibles. En effet, nous cherchons à valoriser des effacements de consommation qui peuvent être faits sur des courtes durées (par exemple 20 minutes, 30 minutes, .. jusqu'à 2 heures).

On retient donc une approche de type *boîte blanche* pour construire un modèle de référence, et on s'appuie sur les hypothèses classiques de linéarisation des échanges thermiques permettant de construire un modèle linéaire, ce qui permet de simuler très rapidement un grand nombre de systèmes régulés {bâti - système de chauffage}. Ce travail de modélisation s'appuie très largement sur les éléments de modélisation du thermique du bâtiment très bien détaillés dans [171]. On rappelle très succinctement dans les paragraphes suivant les principales hypothèses permettant de linéariser le comportement du système *bâti* puis la méthode pour réduire l'ordre de chaque système.

Soit le système constitué du bâtiment, hors systèmes. On note $\mathcal{D}$ le domaine délimitant l'enveloppe du bâtiment. Le bâtiment, constitué de l'ensemble des parois, des meubles et de l'air se trouvant à l'intérieur est le siège d'échanges de chaleur avec l'environnement extérieur $\bar{\mathcal{D}}$, comme représenté sur la figure 2.1.1. On écrit un bilan de flux pour un volume élémentaire $V \subset \mathcal{D}$ délimité par la surface $\Sigma = \partial V$. Pour un point M de V on note $T(M, t)$ la température au point M à l'instant t . On note $\rho(M)$ la masse volumique au point M , $c(M, t)$ la capacité thermique massique au point M à l'instant t , $p(M, t)$ la puissance volumique reçue au point M à l'instant t de sources externes. L'équation de conservation de

l'énergie dans le volume V s'écrit :

$$\iiint_V \rho(M)c(M,t)\frac{\partial T}{\partial t}(M,t)dV = \iiint_V p(M,t)dV + \Phi^{(\Sigma)}, \quad (2.1.1)$$

où $\Phi^{(\Sigma)}$ représente le flux thermique à travers Σ . $\Phi^{(\Sigma)}$ est décomposé en plusieurs termes [43] :

$$\Phi^{(\Sigma)} = \Phi_{\text{conv}} + \Phi_{\text{rad}} + \Phi_{\text{cond}} + \Phi_{\text{m}} + \Phi_{\text{ext}},$$

où Φ_{conv} , Φ_{rad} , Φ_{cond} et Φ_{m} représentent respectivement les flux thermiques d'échange par convection, radiation, conduction et mélange. Ils dépendent de nombreux paramètres et les hypothèses simplificatrices pour chacun de ces termes sont données dans la section suivante. Le terme Φ_{ext} est défini par :

$$\Phi_{\text{ext}} = \iint_{\Sigma} \phi_s(M,t)d\Sigma, \quad (2.1.2)$$

où ϕ_s représente une densité surfacique de puissance reçue à travers Σ .

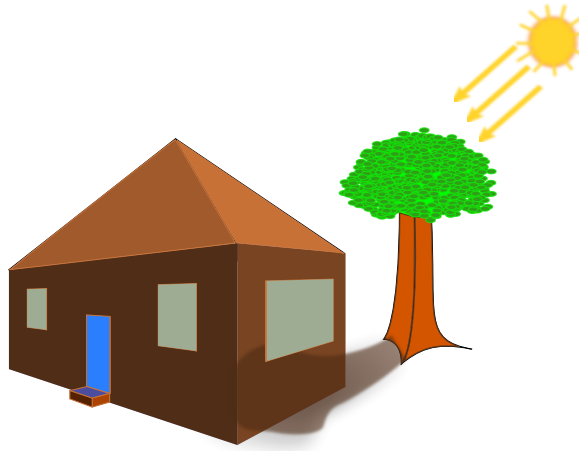


Figure 2.1.1 Système étudié : bâti dans son environnement

Pour écrire les conditions de bords de type mixte pour chaque paroi délimitant le volume $\mathcal{D}$, on reprend les hypothèses de [43], [44] :

1. **Surface de parois en contact avec l'extérieur** : On prend en compte le rayonnement solaire *CLO* (Courtes Longueurs d'Onde), le rayonnement *GLO* (Grandes Longueurs d'Onde). Une partie du rayonnement reçu sur la surface se réfléchit tandis qu'une

autre partie est absorbée par la paroi (échanges superficiels). Les surfaces de parois échangent également par convection avec l'air extérieur. Seuls les échanges par radiation entre les parois sont pris en compte.

2. **Surface de parois en contact avec l'intérieur** : Les surfaces de paroi échangent par rayonnement GLO avec les autres surfaces et l'ensemble des éléments se trouvant dans le local. Ces surfaces reçoivent un rayonnement CLO (direct et diffus) à travers les parois transparentes et une partie de la chaleur émise par des sources extérieures. Enfin on prend en compte les échanges convectifs entre l'air et les parois.
3. **Parois internes** : On suppose que les échanges se font uniquement par conduction à travers les différentes couches constituant la paroi. On exclut donc le cas où une source serait localisée au sein d'une paroi.
4. **Air à l'intérieur du local** : L'air échange par convection avec les différents éléments se trouvant dans le local (parois et meubles), et reçoit de la chaleur des systèmes de chauffage. On suppose de plus qu'il existe un terme de mélange avec l'air extérieur afin de prendre en compte le renouvellement de l'air.

L'approximation du champ de température dans le volume $\mathcal{D}$ par un système d'état linéaire suppose que :

1. Les différents éléments, en particulier les parois peuvent être décomposés en sous-éléments, appelés *couches*, qui sont supposés **homogènes et isotropes**. On suppose que les caractéristiques thermiques des matériaux sont stationnaires et que les contacts entre les différentes couches composant une paroi sont parfaits (donc il n'y a pas de résistance superficielle)
2. On suppose les variables d'état de l'air du local homogènes. Compte tenu de la faible conductivité de l'air, on néglige la conduction dans l'air. On pourra donc modéliser le domaine fluide par un *nœud d'air*
3. On fait l'hypothèse de *transferts conductifs unidimensionnels* au sein de chaque paroi du domaine. On note x la direction dans laquelle se font les transferts
4. Les échanges à l'intérieur des couches élémentaires se font uniquement par conduction et il n'y a pas de sources internes de chaleur à l'intérieur des couches

Les termes liés aux échanges conductifs sont ensuite linéarisés.

Pour les échanges radiatifs (rayonnement GLO et transferts thermiques entre surfaces à l'intérieur du local), on utilise l'approximation suivante :

$$T_i^4 - T_j^4 \sim (T_i + T_j)^3(T_i - T_j) \quad (2.1.3)$$

L'approximation pour la linéarisation des échanges radiatifs entre parois est basée sur les travaux de [28, 29, 125, 180]. Pour le rayonnement GLO côté externe, nous avons repris le modèle explicité dans [38]. Il a été démontré dans [162] que celle-ci n'introduit pas d'erreur trop importante au vu de l'ordre de grandeur des écarts de température des parois.

Pour le rayonnement CLO, direct et diffus reçu sur les parois externes et transmis à travers les parois vitrées, nous avons repris les hypothèses de [169], en supposant que le coefficient de transmission du verre pour le flux solaire direct est constant. La projection des flux surfaciques sur chaque paroi du bâti se fait selon la même méthode que celle décrite dans [38]. Pour la répartition des flux solaires sur les parois internes, nous nous sommes appuyés sur les résultats de [178] et [148], qui ont comparé plusieurs méthodes de répartitions (conditions différentes selon l'étude) des flux solaires directs dans les pièces dont les surfaces vitrées étaient conséquentes, et nous avons finalement considéré que 60% du flux solaire direct est absorbé par le plancher et que le flux restant est distribué sur les parois au prorata de leur surface, ce qui est une approximation satisfaisante pour les logements relativement anciens modélisés, et qui nous permet d'éviter de calculer les facteurs de formes [169] (ce qui serait trop complexe à l'échelle d'un parc dont il est difficile de caractériser suffisamment précisément l'environnement pour qu'un tel niveau de précision soit justifié).

Afin de résoudre le système modélisant le bâti, on discrétise l'équation de la chaleur dans les parois lourdes et on écrit le couplage avec le nœud d'air et le couplage entre les parois (transformation étoile-triangle et après écriture du nœud de parois équivalent vu de chaque paroi opaque), en reprenant la méthode de discrétisation développée par exemple dans [123], [124] et en considérant les développements de Taylor à l'ordre 2. L'hypothèse de contact parfait entre les couches permet d'écrire l'égalité des flux à chaque interface, comme détaillé dans [171]. L'équation d'état permettant de modéliser l'évolution du champ de température linéarisé du volume $\mathcal{D}$ s'écrit sous la forme :

$$C\dot{T} = AT + BU \quad (2.1.4)$$

Par convention, dans toute la suite, $T_1 = T_{air}$. C désigne la matrice des capacités de chaque élément de chaque couche, elle est donc diagonale et inversible. A est la matrice d'état ou matrice d'évolution; par construction, elle est tridiagonale. B est la matrice de commande ou matrice des sollicitations; enfin, U est le vecteur des sollicitations : $U = [P, T_e, AI, I_{dir}, I_{diff}]^t$.

Le système décrivant la dynamique du bâti s'écrit finalement sous la forme :

$$\begin{aligned} CT &= AT + BU \\ Y &= JT + DU \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

La capacité du nœud d'air est adaptée de façon à prendre en compte de manière partielle l'inertie des différents objets se trouvant dans le local. L'effet de l'inertie des meubles est montrée par exemple dans [133, Sarte et al.], pour un modèle thermique similaire à celui utilisé dans ce travail. La plage de valeurs que l'on peut trouver dans la littérature pour cette capacité fictive est large (variation de 1 à 40 selon [37]).

Dans la suite, on prend comme observateur (équation (2.1.5)) la température d'air et la température opérative approximée par la moyenne entre la température d'air et la température superficielle des parois pondérées par leur surface respective.

En remarquant que A est une matrice symétrique réelle, et C une matrice diagonale, on pose le changement de base : $X = C^{1/2}T$ (voir [123]) et le système peut alors s'écrire sous forme d'état :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= C^{-1/2}AC^{-1/2}T + C^{-1/2}BU \\ Y &= JC^{-1/2}X + DU \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

Ce choix de changement de base permet de conserver les propriétés de A puisque $C^{-1/2}AC^{-1/2}$ est également symétrique réelle définie négative (car le système est stable), ce qui intéresse numériquement.

Pour ne pas alourdir les notations, on garde dans la suite les mêmes notations pour le système de (2.1.6) que pour (2.1.5), c'est-à-dire que le système d'état considéré est :

$$\begin{aligned} \dot{T} &= AT + BU \\ Y &= JT + DU \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

Choix du schéma numérique La simulation nécessite de discrétiser le système d'EDO (??). Pour cela, on choisit un schéma d'Euler explicite :

$$\frac{dT(t = n\Delta t)}{dt} = \frac{T((n+1)\Delta t) - T(n\Delta t)}{\Delta t} \quad (2.1.8)$$

Les conditions CFL assurent la convergence de ce schéma pour une couche élémentaire $\mathcal{C}$ si $\frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2} < \frac{1}{2}$ où a représente l'effusivité du matériau

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}.$$

Chaque couche peut avoir un pas de discrétisation différent, en effet, on adapte le pas de discrétisation en fonction du type de matériau de chaque couche et en fonction de la position de la couche dans le mur (pour les couches les plus externes d'une paroi, on choisit un pas plus faible que pour les couches situées vers le centre du mur). On doit donc s'assurer que les conditions CFL sont vérifiées pour l'ensemble des couches. Comme le pas de temps est fixé, il est suffisant d'avoir :

$$\frac{a\Delta t}{(\min_{\mathcal{C}} \Delta x)^2} < \frac{1}{2}$$

où $\min_{\mathcal{C}} \Delta x$ désigne le plus petit pas de discrétisation utilisé.

2.2 Réduction du modèle de bâti de référence

Le modèle de bâti linéaire ainsi construit repose sur la discrétisation de chaque paroi en couche élémentaire puis sur le couplage de chaque élément du bâti. Le système linéaire de l'équation (??) est d'ordre élevé, et pour réduire les temps de simulation d'effacement diffus sur un large ensemble de bâtis, on propose de réduire l'ordre de chaque système élémentaire. La réduction de système linéaire a fait l'objet de nombreux développements depuis les années 80 et diverses méthodes ont été proposées. Par exemple, la méthode de *Marshall* est basée sur le fait qu'au pas de temps de la simulation, certaines dynamiques du système (dans un sens à définir) ne sont pas observables.

De manière générale, réduire le système d'état de l'équation (??) revient à rechercher un nouveau système, équivalent de celui-ci dans un sens à préciser, qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{T}_r &= A_r T_r + B_r U \\ Y &= J_r T_r + D_r U \end{aligned}$$

où l'ordre r du nouveau système est tel que $r \ll n$, n étant l'ordre du système (système donné par l'équation (2.1.7)).

Dans les parties suivantes, on rappelle brièvement les méthodes de réduction existantes.

2.2.1 La méthode d'Eitelberg

La méthode d'Eitelberg est la plus ancienne à avoir été utilisée en thermique du bâtiment. Elle consiste à chercher un système réduit sous la forme:

$$\begin{aligned}\dot{T}_r &= A_r T_r + B_r U \\ Y &= J_r T_r + D_r U\end{aligned}$$

en projetant les états observables les plus influents sur la sortie du système : $T_r = RT$ où T_r est le vecteur réduit des états et R la matrice de projection. L'observabilité des états réduits impose $J_r R = J$. Pour déterminer A_r et B_r , on minimise l'erreur du système réduit au sens de la norme $\mathcal{L}_2$ c'est-à-dire qu'on minimise la fonctionnelle I définie par :

$$I = \int_0^\infty \|\dot{T}_r - A_r T_r - B_r U\|_2 dt. \quad (2.2.1)$$

Eitelberg suggère de plus d'imposer que les gains statiques vers les états du système réduit soient égaux à ceux du système non réduit, ce qui se traduit par :

$$B_r = A_r R A^{-1} B.$$

Dans ce cas, l'équation (2.2.1) se résoud plus simplement (voir [134] pour une démonstration complète).

2.2.2 Les méthodes modales

Les méthodes modales reposent sur l'écriture du système dans la base modale. On effectue d'abord le changement de base $\Psi = PT$ tel que A soit diagonale dans la nouvelle base; on note $A = P^{-1}DP$.

Dans la nouvelle base, le système devient alors :

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} \dot{\Psi}_1 \\ \dot{\Psi}_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{pmatrix} u \\ Y &= \Omega_1 \Psi_1 + \Omega_2 \Psi_2 + D_c u\end{aligned} \quad (2.2.2)$$

Le système réduit recherché s'écrit

$$\dot{\Psi}_1 = D_1 \Psi_1 + \Gamma_1 u$$

$$\hat{y} = \Theta \Psi_1 + K u$$

Différentes variantes de réduction modale ont été proposées, elles se distinguent essentiellement par le choix des matrices de l'équation d'observation.

La méthode de Marshall La méthode de Marshall consiste à tronquer les valeurs propres de la matrice d'évolution. Le système étant stable, $\text{Re}(Sp(A)) \subset]-\infty; 0[$. Et on a

$$\forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad \tau_i = \frac{-1}{\text{Re}(\lambda_i)}$$

On classe les valeurs propres par ordre décroissant et on ne garde que les constantes de temps observables compte tenu du pas d'observation (simulation). Une bonne approximation est de considérer que tous les temps caractéristiques vérifiant $\tau_i < \frac{\Delta t}{3}$ peuvent être agrégés [38]. Un autre choix peut être de tronquer au niveau de la discontinuité dans les valeurs propres ou temps caractéristiques. On note $n - r + 1$ le nombre de modes pouvant être agrégés.

On pose :

$$D_1 = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{r-1} \end{pmatrix} \quad D_2 = \begin{pmatrix} \lambda_r & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (2.2.3)$$

Alors les dynamiques correspondant aux modes de D_2 peuvent être agrégées. Ces dynamiques correspondent par construction à la partie Ψ_2 du vecteur d'état : $\Psi_2 = -D_2^{-1} \Gamma_2 u$. Avec cette condition, on détermine les matrices Θ et K par :

$$K = -\Omega_2 D_2^{-1} \Gamma_2$$

$$\Theta = \Omega_1$$

L'inconvénient majeur de cette méthode est que la troncature se fait uniquement sur l'observation des constantes de temps, donc certains modes n'agissant pas ou très peu sur la sortie car non sollicités par la commande u vont être conservés. Dans la méthode de

Michaïlesco les valeurs propres sont classées suivant un critère énergétique. Cette approche est basée sur la méthode de Litz [105] et suppose que le système soit mono-sortie [121]. La matrice d'observation est ensuite déterminée en minimisant l'erreur de réduction sur la grandeur observée au sens de la norme trace. Enfin, la matrice de couplage direct est déterminée en imposant l'égalité des gains statiques entre les deux systèmes.

2.2.3 La réduction en base équilibrée

Cette méthode est basée sur les travaux de Moore [118]. Rabenstein [138] en a explicité une variante dans le cadre de la thermique du bâtiment.

On considère le système donné par la représentation d'état de l'équation (2.1.6). Les grammiens de commandabilité $\mathcal{W}_c$ et d'observabilité $\mathcal{W}_o$ sont données respectivement par :

$$\mathcal{W}_o = \int_0^\infty e^{tAt} C C^t e^{At} dt$$

$$\mathcal{W}_c = \int_0^\infty e^{At} B^t B e^{tAt} dt$$

Ces deux grammiens peuvent être déterminés via la résolution des équation de Lyapunov dont ils sont solutions (voir [87] pour la résolution) :

$$A\mathcal{W}_c + \mathcal{W}_c^t A + B^t B = 0$$

$$A\mathcal{W}_o + \mathcal{W}_o^t A + {}^t C C = 0$$

L'idée générale de la méthode est de rechercher les modes *les plus commandables et les plus observables* et de négliger ceux qui sont le moins observable et le moins commandable puisque ceux-ci auront peu d'influence sur la sortie. Pour cela, on calcule la décomposition en valeurs singulières de la matrice $\mathcal{W}_c \mathcal{W}_o$ et on effectue le changement de base vers celle-ci, que l'on appelle *base équilibrée*.

L'algorithme de Laub, adapté de celui de Moore et sensiblement plus performant, permet de calculer une réalisation équilibrée pour le système (2.1.1) :

1. Calcul des grammiens de commandabilité et d'observabilité
2. Calcul de la décomposition de Cholesky de $\mathcal{W}_c$: $\mathcal{W}_c = L^t L$
3. Calcul des valeurs singulières de ${}^t L \mathcal{W}_o L$ et d'une base de vecteurs propres associés :

$${}^t L \mathcal{W}_o L = U \Sigma^2 {}^t U$$

avec :

$$U^t U = I_n \quad \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \quad \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket, \sigma_i \geq \sigma_{i+1} \quad (2.2.4)$$

4. Changement de base : la matrice de passage vers la base équilibrée est $T = \Sigma^{-1/2t} U L$
On note A_b, B_b, J_b les matrices du système dans la base équilibrée.

On cherche ensuite l'ordre r du système réduit en analysant les valeurs singulières du système, ce qui permet d'identifier un système dominant [118].

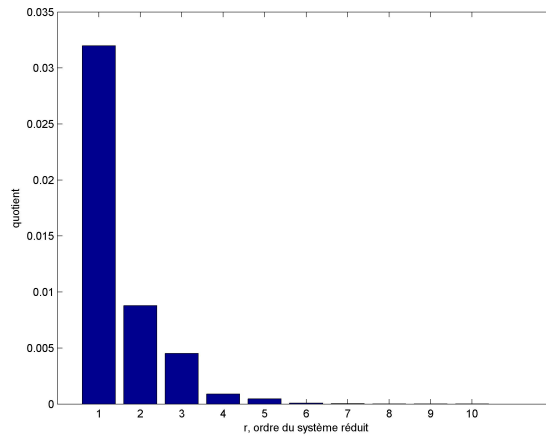


Figure 2.2.1 Evolution du quotient du critère de Moore pour l'enveloppe du bâtiment de référence

L'évolution du quotient de l'équation (??) pour un bâtiment type, avec un ordre de réduction r variant de 1 à 10 est tracé sur la figure 2.2.1. Pour $r = 4$, ce quotient est de l'ordre de 10^{-3} , pour $r = 6$ il est de l'ordre de 10^{-4} et on observe que la condition de Moore est vérifiée.

Une fois l'ordre r déterminé, on peut réécrire le système en distinguant les états les plus commandables et observables (ceux dont les directions sont données par les r premières composantes de U des autres) :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{\hat{X}}_1 \\ \dot{\hat{X}}_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} \\ A_{12} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{B}_1 \\ \hat{B}_2 \end{pmatrix} u \\ Y &= \begin{pmatrix} \hat{C}_1 & \hat{C}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{pmatrix} + \hat{D}u \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

Avec $\hat{A}_{11} \in \mathcal{M}_{r,r}(\mathbf{R})$, $\hat{A}_{21} \in \mathcal{M}_{r,n-r+1}(\mathbf{R})$, $\hat{A}_{12} \in \mathcal{M}_{n-r+1,r}(\mathbf{R})$, $\hat{A}_{22} \in \mathcal{M}_{n-r+1,n-r+1}(\mathbf{R})$,
 $\hat{B}_1 \in \mathcal{M}_{r,1}(\mathbf{R})$, $\hat{B}_2 \in \mathcal{M}_{n-r+1,1}(\mathbf{R})$, $\hat{C}_1 \in \mathcal{M}_{1,r}(\mathbf{R})$, $\hat{C}_2 \in \mathcal{M}_{1,n-r+1}(\mathbf{R})$

On note également pour la suite $\Sigma_1 = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ et $\Sigma_2 = \text{diag}(\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_n)$

Le système réduit est alors directement déterminé en tronquant le système (2.2.5) :

$$A_r = A_{11} \quad B_r = B_1 \quad C_r = C_1 \quad (2.2.6)$$

Cette méthode fournit une approximation satisfaisante du système; en particulier, l'erreur d'approximation tend vers 0 lorsque $\omega \rightarrow \infty$, cependant, la troncature du système ne permet pas d'assurer la conservation des gains statiques [12].

Approximation par perturbations singulières (à partir de la base équilibrée) Liu et Anderson [106] ont proposé une méthode d'approximation alternative à partir de l'écriture du système dans la base équilibrée, permettant d'avoir une meilleure approximation en basse fréquence que la troncature directe du système.

On considère la norme $\|X(j\omega)\|_\infty = \sup \hat{\sigma}(X(j\omega))$ (plus grande valeur singulière de X) et le système (2.2.5). Liu et Anderson ont établi la majoration suivante de l'erreur d'approximation :

$$\|C(pI - A)^{-1}B - C_1(pI - A_{11}^{-1}B_1)\|_\infty \leq 2(\sigma_{r+1} + \dots + \sigma_n) \quad (2.2.7)$$

L'inégalité (2.2.7) a permis d'établir le résultat suivant [106] : Si le sous-système (A_{22}, B_2, C_2) est stable et est de dynamique rapide c'est-à-dire s'il vérifie les conditions :

1. $\text{Re}(\sigma(A_{22})) < 0$
2. $\min_i |\sigma(A_{22})| > \max_j |\sigma(A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})|$

Où $\sigma(A)$ désigne la décomposition en valeurs singulières (SVD) de A .

Alors le système réduit défini par :

$$\begin{aligned} A_r &= A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21} \\ B_r &= B_1 - A_{12}A_{22}^{-1}B_2 \\ C_r &= C_1 - C_2A_{22}^{-1}A_{21} \\ D_r &= D - C_2A_{22}^{-1}B_2 \end{aligned} \quad (2.2.8)$$

est une bonne approximation du système (2.1.4), il fournit en particulier une meilleure approximation en basses fréquences que le système directement tronqué.

Enfin, la condition (2) n'est pas nécessaire pour que (2.2.8) soit une bonne approximation du système; en effet, le système de référence et le système (2.2.8) vérifient :

$$\|C(pI_n - A)^{-1}B + D - C_r(pI_r - A_r^{-1})B_r - D_r\|_\infty \leq 2(\sigma_{r+1} + \dots + \sigma_n)$$

$$\|C(pI_n - A)^{-1}B - C_r(pI_r - A_r^{-1})B_r\|_\infty \leq 4(\sigma_{r+1} + \dots + \sigma_n)$$

Donc tant que $\sigma_{r+1} + \dots + \sigma_n$ reste petit, ie tant que $\text{tr}(\Sigma_2)$ est faible, (2.2.8) est une bonne approximation du système.

Rabenstein a appliqué cette méthode dans le cadre de la thermique du bâtiment et propose de plus une méthode pratique pour déterminer l'importance d'un état par rapport aux autres. En notant e_i les vecteurs de la base canonique ($i \in \llbracket 1; n \rrbracket$), l'importance de l'état i est donnée par (la démonstration complète se trouve dans [138]) :

$$q_i = \frac{{}^t e_i \mathcal{W}_o e_i}{{}^t e_i \mathcal{W}_c^{-1} e_i}$$

Cette méthode fournit donc une approximation satisfaisante du système cependant, comme mentionné dans [38], il n'y a pas d'interprétation physique simple des modes dans la base équilibrée. De manière imagée, on peut dire que les valeurs singulières représentent l'énergie liée à chaque état qui est transmise par les entrées (commandabilité) et observée par les sorties (observabilité).

Cette méthode permet donc d'approximer le système en négligeant les états les moins commandables et les moins observables qui ont donc une contribution faible sur la réponse du système, et qu'on qualifie d' *états redondants*. [45] en déduit que les états conservés sont ceux qui :

- sont le plus facilement excitables pour un signal énergétique donné en entrée du modèle
- ont la plus grande influence sur les sorties observées

Réduction au sens de la norme de Hankel Plus généralement, des variantes reposant sur l'écriture du système dans la base équilibrée, utilisant la norme de Hankel, ont été développées, initiées par [66]. On trouvera un exposé théorique détaillé des méthodes de réduction en base équilibrée dans [193] ou dans [192]. En particulier, on retiendra qu'on peut restreindre le domaine dans lequel on cherche un modèle réduit du système à une gamme de fréquences déterminées [186].

On trouvera par exemple un cas d'étude par décomposition en valeurs singulières (SVD) pour un bâtiment constitué de 3 zones thermiques dans [188] et un exposé complet de cette

méthode dans [121] ainsi que des exemples d'application à la thermique du bâtiment. En particulier, dans le cas des système MISO, la méthode *HLM* développée dans la thèse semble intéressante : elle consiste à réduire le système modélisant un bâtiment au sens de la norme de Hankel, en normalisant au préalable les entrées, de façon à s'affranchir d'un biais inhérent à la méthode introduit par le fait que les gains statiques relatifs à différentes entrées peuvent être très différents les uns des autres. En particulier, on notera que

$$GS_P \ll GS_{T_e}$$

où GS_P et GS_{T_e} désignent respectivement les gains statiques relatifs aux sollicitations en puissance et en température extérieure. Une fois la réduction effectuée, les entrées sont remises à l'échelle. La méthode, testée pour deux systèmes MISO et un système MIMO donne de meilleurs résultats qu'une simple réduction au sens de la norme de Hankel.

Bien que le lien entre l'écart entre le système de référence et le système réduit au sens de la norme de Hankel et l'erreur de mesure sur la sortie au sens de la norme $\mathcal{L}_1$ ou $\mathcal{L}_2$ ne peut être facilement établi, les exemples numériques montrent que le comportement dynamique des systèmes réduits donnent des résultats satisfaisants en terme d'erreur de sortie.

Outre les méthodes reposant sur l'écriture du système en base équilibrée, d'autres familles de méthodes peuvent être intéressantes, comme par exemple la méthode d'Arnoldi ou celle de Lanczos. On pourra trouver un résumé détaillé de ces méthodes dans [154] ou dans [97].

Gugercin et al. [74] ont comparé les méthodes de type *SVD* (réduction en base équilibrée, approximation par perturbation singulière et réduction au sens de la norme de Hankel) avec des méthodes de types *moments* (méthodes d'Arnoldi, de Lanczos et de Krylov) et ont conclu que les méthodes de type *SVD* donnent de meilleurs résultats si la réduction est appliquée sans contrainte sur une bande de fréquence (réduction pour $f \in [0; +\infty[$). Enfin soulignons que la réduction au sens de la norme de Hankel donne les résultats les moins bons parmi les méthodes de type *SVD* si l'on regarde l'erreur d'approximation au sens de la norme $\mathcal{L}_2$ bien que l'erreur au sens de la norme $\mathcal{H}_\infty$ soit la plus petite avec cette méthode. On retrouve donc ici le problème soulevé dans la thèse de [121] de la difficulté d'estimer l'erreur d'approximation commise en réduisant le système au sens de la norme de Hankel.

2.2.4 Méthode de réduction retenue

Compte tenu des méthodes présentées dans la partie précédente et en particulier des conclusions présentées dans [63], on choisit de réduire le système en utilisant la base équilibrée. Les travaux de Gauvrit et. al. montrent en effet que ce choix est adapté à la problématique de ce travail et donnent des éléments pour le choix de l'ordre.

La méthode HLM développée dans [121] peut également être intéressante dans le cas d'étude puisque tous les systèmes étudiés sont *MISO* et certains sont des systèmes *MIMO* : il s'agit soit des systèmes multi-zones, soit, dans le cas de l'étude en simulation que nous avons menée, des systèmes où on souhaite suivre à la fois l'évolution de la température d'air et de la température opérative de la pièce.

Une fois le modèle pour l'enveloppe établi, on cherche à coupler le système {bâtiment} avec les systèmes permettant de satisfaire les besoins des ménages, notamment liés aux usages thermiques. Les équipements les plus intéressants du point de vue de l'effacement sont en effet les systèmes de chauffage et les systèmes de production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS). On présente ici les choix de modélisation pour ces deux systèmes.

2.3 Modélisation des systèmes de chauffage intégrés au bâti

Dans le cadre de cette étude, on cherche à valoriser des effacements de consommation électrique, on ne considère donc que des consommateurs dont le système de chauffage est électrique. [37] propose une revue des systèmes de chauffage électrique. Ici on s'intéresse uniquement aux convecteurs et radiateurs électriques, qu'on désigne par le terme *émetteurs de chaleur* dans la suite du document.

Les éléments des systèmes de chauffage qu'il est nécessaire de modéliser sont au nombre de trois :

1. Modélisation de l'émetteur (corps de chauffe)
2. Modélisation du régulateur intégré
3. Modélisation du capteur de température

Le diagramme fonctionnel de l'ensemble composé du système {bâtiment} muni de sa régulation de chauffage est représenté sur la figure 2.3.1. Le signal u_P est un signal de type *tout ou rien*: $u_P \in \{0, 1\}$.

On détaille dans les sections suivantes les hypothèses de modélisation des trois éléments des systèmes de chauffage.

2.3.1 Modélisation du corps de chauffe de l'émetteur

Le corps de chauffe est la partie de l'émetteur en contact avec l'air du local dont la surface est portée à une température plus ou moins élevée et qui échange de la chaleur avec [35] :

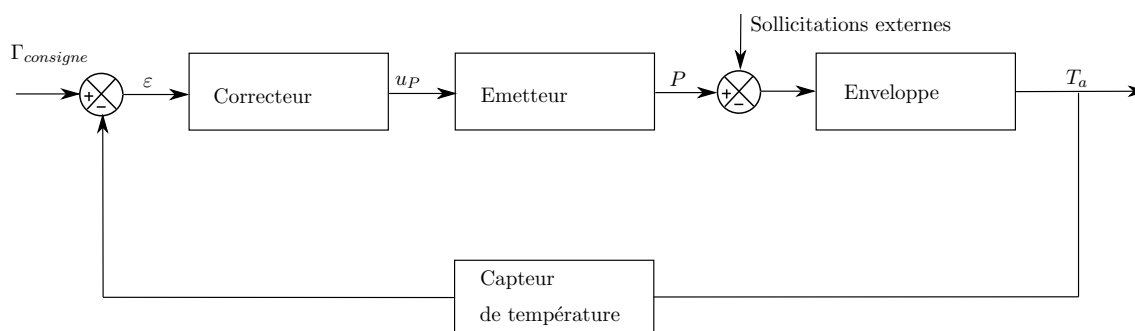
Figure 2.3.1 Diagramme fonctionnel du système *bâti* muni de sa régulation

Tableau 2.1 Valeurs des parts convective et radiative pour les deux types d'émetteur étudiés

Émetteur	Part convective	Part radiative
	α	$1 - \alpha$
Convecteur	95%	5%
Radiateur	60%	40%

- L'air du local par convection
- Les parois et les meubles du local par rayonnement grandes longueurs d'onde

Dans les modèles de thermique du bâtiment, on distingue les radiateurs des convecteurs par la part de chaleur échangée par rayonnement [18]. On note α la fraction de la puissance émise échangée par convection avec l'air. La connaissance et/ou l'estimation de la répartition entre part convective et part radiative dépasse le cadre de ce travail. Sauf mention contraire, on a fixé le paramètre α dans la suite de l'étude en choisissant des valeurs standards trouvées dans la littérature [18], lesquelles se trouvent dans le tableau 2.1.

Dans le cas du convecteur électrique, la part radiative est négligeable par rapport à l'apport de chaleur reçue par convection. Le corps de chauffe de l'appareil (une résistance électrique) possède une inertie faible et la surface extérieure du convecteur n'est pas très chaude (par rapport au cas du radiateur). Le modèle de bâtiment étant seulement un modèle thermique, il n'est pas utile de modéliser plus en détail l'émetteur. Du fait de sa technologie, on peut considérer que le rendement du système est unitaire.

Le comportement d'un émetteur de chaleur type convecteur, possédant une inertie très faible, peut donc être modélisé par un premier ordre, comme c'est par exemple le cas dans SIMBAD [79, 119] ou dans [128], de constante de temps de l'ordre de la minute (constante de temps identifiée dans [128] d'une minute, constante de temps prise égale à trois minutes dans [119]) et de gain statique égal à la puissance nominale du système global, tel que représenté à la figure 2.3.2.

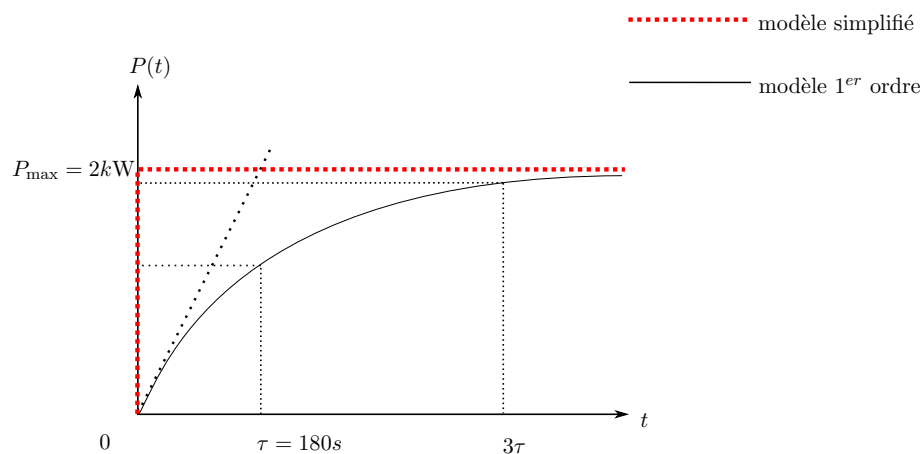


Figure 2.3.2 Modélisation d'un émetteur

Dans un premier temps, on considère que la dynamique du convecteur est négligeable par rapport à celle du système, et on ne tient pas compte de cette dynamique. Le modèle simplifié utilisé dans la suite est représenté sur la figure 2.3.2. Les mêmes hypothèses sont supposées acceptables pour le cas des panneaux rayonnants à défaut de pouvoir proposer un modèle plus précis. Avec cette hypothèse, on peut simuler le comportement de l'ensemble avec un pas de temps de 60 s (donc de l'ordre de grandeur de la constante de temps du convecteur) ce qui permet de réduire considérablement les temps de calcul d'un parc de bâtiment (chapitre 6).

Remarque 2.3.1. Dans le cas d'un système type "radiateur" (panneau rayonnant), la part radiative est nettement plus importante que dans le cas du convecteur. Le corps de l'émetteur est plus chaud, et la grille placée devant l'émetteur permet d'une part que se fassent des échanges thermiques par radiation entre le corps de chauffe et la pièce et d'autre part entre le corps de chauffe et la grille et entre la grille et la pièce. Dans le cadre de ce travail il est difficile d'estimer la température de l'émetteur avec une précision satisfaisante afin d'intégrer un modèle plus précis pour ce type de système. En effet, ne connaissant pas

avec précision les dimensions et les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés (ni d'ailleurs la variabilité de ces caractéristiques suivant les modèles), le modèle d'émetteur qui en résulterait pourrait tout aussi bien être source de plus d'erreurs dans les simulations.

Il serait néanmoins intéressant de tenir compte, pour l'évaluation de l'inconfort, de la dissymétrie du champ de température créée du fait de l'existence du système de chauffage. Pour cela il est nécessaire de tenir compte d'une part de la température de l'émetteur et d'autre part de celle de la grille. Cette évaluation n'est pas possible compte tenu des choix de modélisation simplifiée effectués dans le cadre de ces travaux : absence de modèle aérodynamique zonal, prise en compte très simplifiée du renouvellement d'air et impossibilité de décrire l'environnement des pièces où les émetteurs de chaleur sont installés.

L'inertie des émetteurs de chaleur type *convecteur* et *radiateur* électrique modélisés dans le cadre de ce travail est supposée nulle. On suppose qu'il n'existe donc pas de retard associé à la montée en température du corps de chauffe des émetteurs. La distinction entre les deux types de chauffage installés dans les bâtiments s'opère donc dans les modèles via la valeur du paramètre représentant la part convective du transfert de chaleur entre le système et son environnement.

2.3.2 Modélisation du régulateur

Pour les modèles les plus anciens, le thermostat est électromécanique et le régulateur est donc un simple comparateur à hystérésis avec ou sans différentiel ¹. Le différentiel est de l'ordre de 2 K.

Dans les modèles plus récents, le régulateur peut être [177] :

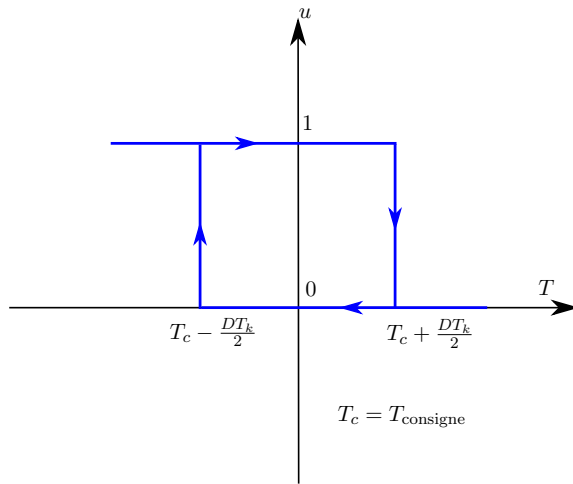
1. Un régulateur Tout Ou Rien, noté *TOR*, avec différentiel (relai). Le thermostat étant électronique dans ces modèles, le différentiel est plus faible (typiquement de l'ordre de 1 K)
2. Un correcteur Proportionnel, qui assure une meilleure sensation de confort pour les occupants grâce à l'effet de lissage de la température intérieure. Si la bande proportionnelle est trop petite, le régulateur est en fait un *TOR*; si elle est trop grande, on observera une augmentation de l'écart permanent entre la consigne et la température mesurée, ce qui n'est pas satisfaisant pour les occupants.

¹Les systèmes sans différentiel étant très anciens, nous avons supposé que ceux-ci sont devenus inexistantes et sortent donc du cadre de l'étude

3. Un correcteur Proportionnel Intégral, qui assure une meilleure régulation que le cas précédent grâce à l'action de l'intégrateur : la commande en sortie du correcteur est non seulement proportionnelle à l'écart entre la consigne mesurée mais également à l'intégrale de cet écart.
4. Un correcteur Proportionnel Integral Dérivée. L'action Dérivation permet de moduler la puissance en fonction de la vitesse de variation de l'écart de température entre la consigne et la température mesurée par le capteur.

Il faudrait en principe modéliser l'ensemble de ces régulateurs cependant nous n'avons pas de données permettant d'estimer les taux de diffusion de chacun de ces appareils dans le parc de logement. D'autre part, les courbes de charge sont exploitées (observées) sur des pas de temps de l'ordre de 10 minutes (voir chapitre 3), ce qui est cohérent avec la précision du modèle thermique de bâti, ainsi simuler la dynamique du régulateur obligerait à simuler les systèmes à un pas de l'ordre de la seconde, ce qui augmenterait le temps de calcul sans pour autant nous permettre d'observer les phénomènes liés à l'effacement plus précisément.

On conserve donc pour la suite un pas de simulation de l'ordre de la minute pour le système régulé. Dans ce cas, la dynamique du régulateur n'est observable que sur les instants de déclenchements/extinction; c'est ce qui a été montré expérimentalement dans [56]. Compte tenu de cette remarque, une régulation de type *TOR* (figure 2.3.3), avec une bande morte relativement faible (on choisit $DT_K = 1\text{ K}$) est largement suffisante.



Loi de commande $u \in \{0, 1\}$:

$$\begin{cases} \text{Si } T_a < T_c - \frac{DT_k}{2}, u = 1 \\ \text{Si } T_a > T_c + \frac{DT_k}{2}, u = 0 \\ \text{Sinon } u \text{ inchangé} \end{cases} \quad (2.3.1)$$

Figure 2.3.3 Régulateur *Tout ou Rien*

2.3.3 Modélisation du capteur de température

On suppose qu'il s'agit d'un capteur standard, type PT100 dont la précision est au dixième de degré, et on suppose que le capteur est parfait. On considère donc simplement que celui-ci relève la valeur de la température intérieure à chaque $t = k\Delta t$ où Δt est le pas d'échantillonnage du capteur. La mesure est immédiatement transmise au comparateur, et celui-ci envoie la valeur de l'écart entre la consigne et la mesure au correcteur.

Compte tenu de la position de la sonde de température dans les convecteurs et radiateurs, la température mesurée est plus proche d'une température d'air que de la température opérative dans la pièce (voir la définition de la température opérative donnée dans la section 3.2.4, équation (??)). On suppose que la régulation se fait sur la température d'air et non sur la température opérative. Lorsque les données sur la consigne exploitées sont d'origine déclaratives et basées sur une température affichée (par exemple), la température de confort demandée pourrait être plus proche d'une température opérative et il existe donc un décalage entre la grandeur régulée par les ménages et celle régulée d'un point de vue systèmes. Toutefois, compte tenu de la forme du modèle de bâti retenu, cette erreur est quasiment constante, ainsi tant que les données exploitées sont toujours de même nature, une étape d'ajustement en puissance du modèle permet de corriger en grande partie l'erreur qui serait ainsi introduite.

Pour simplifier la modélisation on ne prend en compte aucun retard pour le bloc capteur + comparateur.

On suppose que la régulation se fait sur la température d'air. La consigne définie par les ménages est relative à cette température, bien que ce ne soit pas la *température ressentie* par les individus qui est plus proche d'une température opérative.

2.4 Dimensionnement des systèmes

Une fois le choix des types de systèmes effectué, il est nécessaire, afin d'intégrer ces systèmes au {bâti}, de proposer une méthode de dimensionnement. L'objectif de cette section n'est pas de dimensionner les équipements en vue de leur intégration dans des logements neufs mais de représenter les équipements effectivement installés dans un ensemble de logements. Ainsi il est souhaitable de représenter les effets du sur et/ou sous dimensionnement des équipements.

Pour les systèmes de chauffage, on choisit d'adapter les méthodes de calculs des besoins de chauffage définies dans les différentes *RT* pour dimensionner les systèmes [37] :

$$P_i = (U_f S_f + U_p S_p + \dot{m} C_{air})(T_{conf} - T_{base}) + U_{pl} S_{pl}(T_{conf} - T_{sol}) + \Phi_{rel} \quad (2.4.1)$$

$$P_{\text{installée}} = \left\lfloor \frac{P_i}{\alpha_\epsilon} \right\rfloor \alpha_\epsilon \quad (2.4.2)$$

avec :

P_i : Puissance à installer

$P_{\text{installée}}$: Puissance de chauffage effectivement installée. Elle est sous-estimée dans les modèles car on ne modélise pas l'ensemble des pièces du logement. Le coefficient α_ϵ est donc un paramètre d'ajustement influent pour le modèle

α_ϵ : Précision pour le calcul des puissances installées. Coefficient d'ajustement du modèle permettant de rendre compte du fait que les puissances nominales des systèmes de chauffage électrique sont *échelonnées*. Sauf mention contraire, nous avons pris dans la suite $\alpha_\epsilon = 500\text{W}^2$

U_f : Coefficient d'échange global des parois vitrées

U_p : Coefficient d'échange global des parois opaques en contact avec l'environnement extérieur

U_{pl} : Coefficient d'échange global du plancher bas

S_f : Surface totale des parois vitrées

S_p : Surface totale des parois opaques en contact avec l'environnement extérieur

S_{pl} : Surface totale du plancher bas

$\dot{m}$: Débit de ventilation et infiltrations

C_{air} : Capacité thermique de l'air

T_{conf} : Température de consigne de référence

T_{base} : Température de référence de la zone climatique où se trouve le logement (basée sur les données issues de la *RT*)

T_{sol} : Température de référence au niveau du sol

Φ_{rel} : Facteur de surdimensionnement. Il a été supposé nul dans la suite (une forme de surdimensionnement est toutefois intégrée dans les modèles du fait de l'approximation des puissances installées à α_ϵ près)

²Il s'agit donc d'une approximation au niveau d'un logement. Nous n'avons pas suffisamment d'éléments d'analyse disponibles afin de discuter de cette hypothèse.

Ce choix se justifie pour les bâtis du parc connaissant la période au cours de laquelle ils ont été construits. Pour les logements construits antérieurement à la première réglementation thermique, on conserve la même méthode à défaut de connaissances plus précises qui auraient pu justifier une autre variante.

Enfin, afin de s'assurer du réalisme des appels de charges par rapport à ce qui est observable en pratique, on impose une valeur seuil de dimensionnement *a posteriori* de 120Wm^{-2} . Elle est justifié par la règle *empirique* de 100Wm^{-2} *relaxée*. Par conséquent, pour certains logement du parc, il est possible d'observer un phénomène de saturation du chauffage, et le niveau de consigne choisi par les ménages peut ne jamais être atteint, en particulier dans le cas de conditions climatiques *rigoureuses*.

Chapitre 3

Indicateurs et outils d'analyse de courbes de charges du secteur résidentiel

Sommaire du chapitre

3.1 Outils pour l'analyse du foisonnement de courbes de charges	59
3.1.1 Facteur de charge	59
3.1.2 Coefficient de foisonnement - f	60
3.1.3 Demande maximum après foisonnement - $ADMD$	61
3.1.4 Relation entre f , $ADMD$ - Dimensionnement de réseaux basse tension	62
3.1.5 Intérêt des indicateurs f_N et $ADMD_N$ dans le cadre d'effacement de charges thermiques	63
3.2 Mise en place d'outils pour l'évaluation des effacements	64
3.2.1 Méthode de restitution de la référence dans le cas de scénarios simulés	64
3.2.2 Indicateurs retenus pour l'évaluation des effacements en énergie .	67
3.2.3 Indicateurs retenus pour caractériser la déformation de la courbe de charge associée à un effacement	70
3.2.4 Analyse de l'effet des effacements sur le confort thermique dans les logements	78
3.3 Conclusion	79

Résumé

Dans ce chapitre, on définit le cadre d'analyse permettant l'évaluation d'effacements de consommations réalisés sur un ensemble de consommateurs.

On rappelle dans la section 3.1 les principaux indicateurs utiles pour l'analyse de courbes de charges agrégées du secteur résidentiel. Ces indicateurs ont été utilisés pour l'étude du dimensionnement de réseaux; ils permettent de donner une vision d'ensemble de la diversité d'un parc. L'intérêt de ces grandeurs dans un contexte d'évaluation de stratégies de pilotage direct est discuté dans la partie 3.1.5.

Dans la seconde partie du chapitre, on détaille les mécanismes et les dynamiques d'un pilotage direct de charges thermiques de l'habitat, c'est-à-dire l'effet de perte de foisonnement qui peut être observé à la fin de la phase de contrôle par l'opérateur d'effacement.

On définit plusieurs indicateurs permettant d'évaluer les effets des effacements en énergie (partie 3.2.2), en puissance (partie 3.2.3) et on définit un indicateur simplifié pour l'évaluation de la dégradation du confort dans l'habitat au cours d'un effacement.

Notations générales du chapitre Dans toute la suite, les simulations sont effectuées à $\Delta t = 60 \text{ sec}$ et les courbes de charges sont observées à Δt_{obs} , avec $\Delta t_{\text{obs}} = 10 \text{ min}$ ou $\Delta \text{postedet}_{\text{obs}} = 30 \text{ min}$. On note CDC_m une courbe de charge moyennée à $\Delta t_{\text{obs}} = m \text{ min}$ (par exemple CDC_{10} désigne une courbe de charge à 10 minutes, et un point de la série représente la puissance moyenne appelée sur 10 minutes). Pour une simulation sur une durée $\Delta T_s = K \Delta t_{\text{obs}}$, $K \in \mathbb{N}$, avec $\Delta t_{\text{obs}} = m$, la série CDC_m est définie par:

$$CDC_m(t_k) = \frac{1}{\Delta t_{\text{obs}}} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t_{\text{obs}}} CDC(t) dt, \forall k \in \llbracket 0, K \rrbracket, t_k = k \Delta t_{\text{obs}}$$

On considère un échantillon de N consommateurs, chacun composé par la donnée d'un triplet {ménages-bâti-systèmes}. On note $CDC_i(\Delta T_s)$ la demande totale (tous usages confondus) d'un consommateur i sur une période d'observation ΔT_s et $CDC_{i,u}$ celle relative à un usage u ($u = ch$ pour l'usage chauffage, $u = ecs$ pour l'usage eau chaude sanitaire).

On note P_N les courbes de charge résultantes pour l'ensemble des consommateurs, soit par exemple :

$$P_N = \sum_{i=1}^N CDC_i \text{ (demande agrégée de l'ensemble des usages du parc de } N \text{ logements)}$$

$$P_{N,u} = \sum_{i=1}^N CDC_{i,u} \text{ (demande totale des } N \text{ consommateurs pour l'usage } u \text{).}$$

$$\mu_{\Delta T}(X_N) = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} X_N(t) dt, \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

$$\mathcal{M}ax_{\Delta T}(X_N) = \max_{t \in [T_1, T_2]} X_N(t), \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

$$\mathcal{M}in_{\Delta T}(X_N) = \min_{t \in [T_1, T_2]} X_N(t), \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

3.1 Outils pour l'analyse du foisonnement de courbes de charges

Dans les sous-sections qui suivent on rappelle les principaux indicateurs utilisés pour analyser l'utilisation des ressources réseaux.

3.1.1 Facteur de charge

Le facteur de charge $FC_{N,\Delta t}$ est défini par:

$$FC_{N,\Delta t} = \frac{\mu_{\Delta T}(P_N)}{\mathcal{M}ax_{\Delta T}(P_N)} \quad (3.1.1)$$

Il est calculé pour N consommateurs sur une période Δt et permet de donner une indication sur le caractère *chahuté* des appels de puissance [69], $\mu_{\Delta T}(P_N)$ désigne la puissance moyenne appelée sur la période Δt et $\mathcal{M}ax_{\Delta T}(P_N)$ la puissance maximale appelée sur cette même période.

Un facteur de charge unitaire traduit une utilisation constante des ressources. En complément, il peut être intéressant pour un gestionnaire de connaître l'amplitude de variation de la demande et les effets de rampe sur le réseau.

Dans le cas du secteur résidentiel, la demande journalière est structurée autour de pointes suivies de creux de consommations: les pointes du matin et du soir, correspondant respectivement au démarrage des activités dans le foyer et au retour au domicile des individus. Une troisième rampe existe le soir, à partir de 22 h, générée par les déplacements planifiés de certaines charges associés aux abonnements *double tarif* (essentiellement lié à l'asservissement

des chauffe-eaux¹).

On appelle pour la suite $RmM_{N,\Delta t}$ le rapport entre les demandes maximales, $\mathcal{M}ax_{\Delta T}(P_N)$ - et minimales, $\mathcal{M}in_{\Delta T}(P_N)$ sur la période Δt d'un groupe de N consommateurs et $R_{N,\Delta t}$ la rampe observée sur la période $\Delta t = [t_1, t_2]$ (exprimée en W). Ces indicateurs sont calculées à partir des courbes de charges individuelles à $\Delta t_{\text{obs}} = m$ minutes (mêmes notations que dans l'introduction):

$$RmM_{N,\Delta t} = \frac{\mathcal{M}ax_{\Delta T}(P_N)}{\mathcal{M}in_{\Delta T}(P_N)} \quad (3.1.2)$$

$$R_{N,\Delta t} = \mathcal{M}ax_{\Delta T}(P_N) - \mathcal{M}in_{\Delta T}(P_N) \quad (3.1.3)$$

Ces grandeurs ont été utilisées pour l'évaluation de la flexibilité de la demande résidentielle aux États-Unis au niveau de postes de distribution localisés dans différentes agglomérations (effet climat) en étudiant plusieurs modalités de contrôle et objectifs dans le travail de Corbin [33]. Les charges pilotées étaient des climatiseurs, les évaluations ont été réalisées sur les courbes de charges totales P_N (et un modèle de réseau a permis de simuler la courbe de charge des autres usages, définie comme la différence entre la charge totale simulée par le modèle réseau et la charge agrégée de l'usage climatisation obtenue par simulation thermique).

3.1.2 Coefficient de foisonnement - f

Le coefficient de foisonnement, encore appelé facteur de diversité², $f_{N,\Delta t}$ est défini par le rapport entre la pointe concomitante ou pointe réseau et la somme des pointes des N consommateurs:

$$f_{N,\Delta t}[t_1, t_2] = \frac{\mathcal{M}ax_{[t_1, t_2]} \sum_{i=1}^N CDC_i[t_1, t_2]}{\sum_{i=1}^N \mathcal{M}ax_{[t_1, t_2]} CDC_i[t_1, t_2]} = \frac{\mathcal{M}ax_{[t_1, t_2]} P_N[t_1, t_2]}{\sum_{i=1}^N \mathcal{M}ax_{[t_1, t_2]} CDC_i[t_1, t_2]} \quad (3.1.4)$$

Où $CDC_i[t_1, t_2]$ désigne la courbe de charge de l'utilisateur i restreinte à l'horizon d'observation $[t_1, t_2]$. Cet indicateur permet de caractériser l'homogénéité de la demande dans le parc sur l'horizon $[t_1, t_2]$ et il est sans dimension. Un facteur de diversité de 1 signifie que l'ensemble

¹D'autres appareils domestiques sont probablement pilotés directement par les ménages. Nous manquons d'informations quantitatives sur les habitudes domestiques et la diffusion de telles pratiques pour évaluer le profil de la charge déplacée *localement* c'est-à-dire par les ménages.

²Le facteur de diversité est parfois défini comme l'inverse du coefficient de foisonnement.

des charges se comportent de la même façon.

Le coefficient de foisonnement s'est naturellement imposé pour les calculs de dimensionnement de réseau [95]. En considérant la pointe annuelle $([t_1, t_2] = 8760 \text{ h})$, la loi de décroissance de ce coefficient en fonction du nombre de consommateurs raccordés peut s'écrire sous la forme [113]:

$$f_{N,\Delta t}[t_1, t_2] = \frac{1}{1 + \frac{k}{N}}$$

Où k est une constante à identifier, qui caractérise le foisonnement

Sargent et. al. [152] ont proposé un modèle original de prévision de la demande de consommateurs résidentiels, en distinguant les logements avec et sans systèmes de chauffage électriques, à partir du calcul des coefficients de foisonnement et des facteurs d'usages énergétiques C , définis comme le rapport entre la somme des pointes d'un groupe N et l'énergie consommée par ce groupe sur une durée Δt .

À partir de mesures de consommations horaires sur un échantillon de quelques centaines d'individus, les auteurs ont déterminé l'évolution des coefficients de foisonnement selon le type de jour (semaine, week-end), le mois et le type de consommateur (avec ou sans chauffage électrique) en fonction du nombre de consommateurs dans le groupe.

Les modèles de prévision de la charge journalière et de la pointe proposés dépendent de 5 paramètres: le type de consommateurs (groupe), le coefficient de foisonnement du groupe, le nombre d'individus dans le groupe, l'heure, le mois.

Ce cas d'étude montre l'intérêt d'une sub-division plus fine des consommateurs du secteur résidentiel selon les usages de l'électricité du foyer pour l'analyse de la diversité du groupe.

Orphelin [126] a proposé d'analyser la flexibilité de la charge de parc d'usages thermiques: ECS d'une part et climatiseurs d'autre part par l'étude du coefficient de foisonnement sur ces ensembles, de même que Grandjean [69] qui utilise ce coefficient pour l'analyse de la diversité d'usages spécifiques: téléviseurs, machines à laver le linge et sèche-linges.

3.1.3 Demande maximum après foisonnement - *ADMD*

Cet indicateur, noté *ADMD*³, est largement utilisé dans la littérature pour l'analyse du dimensionnement des réseaux et des infrastructures [14]. Il est défini par :

$$ADMD_N[t_1, t_2] = \max_{[t_1, t_2]} \frac{\sum_{i=1}^n CDC_i([t_1, t_2])}{N} \quad (3.1.5)$$

³*ADMD*: After Demand Maximum Diversity

Avec: N le nombre de consommateurs du parc, $CDC_i([t_1, t_2])$ la courbe de charge du consommateur i sur la période $[t_1, t_2]$.

Il caractérise l'impact marginal en puissance d'un usager sur la puissance de pointe [177].

En exploitant le caractère stochastique et intermittent des charges raccordées (désignant les consommateurs résidentiels), en supposant les charges indépendantes, on peut donner une borne supérieure pour l' $ADMD_N[t_1, t_2]$, notée $ADMD_\infty$, par rapport au nombre de consommateurs:

$$ADMD_\infty = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i,[t_1, t_2]}^* \quad (3.1.6)$$

où $P_{i,[t_1, t_2]}^*$ désigne la demande maximale du consommateur i sur l'horizon temporel $[t_1, t_2]$.

De cette relation, selon le théorème de la limite centrale, on déduit que la loi de décroissance de l' $ADMD$ est en $\frac{1}{\sqrt{N}}$ [20]. Cette relation a été expérimentalement retrouvée par exemple dans [98] en exploitant quelques centaines de courbes de charges horaires (consommateurs avec systèmes de chauffage électrique). Une analyse de l'évolution de l' $ADMD$ sur 120 consommateurs est également détaillée dans Vuillecard [177].

3.1.4 Relation entre f , $ADMD$ - Dimensionnement de réseaux basse tension

Le modèle de base pour le dimensionnement de réseaux basse tension (dimensionnement des postes de transformation HTA/BT) a été développée par Boggis [22], établissant une relation entre foisonnement et demande marginale de puissance d'un usager afin d'estimer la pointe réseau, notée MD , d'un groupe de N consommateurs raccordé au même poste de distribution HTA/BT :

$$MD = N \cdot DF \cdot ADMD$$

avec

MD : Demande maximale du groupe raccordé

$$DF = 1 + \frac{k}{N}$$

k une constante déterminée empiriquement, caractérisant le foisonnement

$$ADMD = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{n,[t_1,t_2]}^* \text{ (en conservant les notations du paragraphe précédent)}$$

On notera que le coefficient DF dans cette définition est l'inverse du coefficient de foisonnement introduit dans la partie 3.1.2.

Une variante possible est $DF = 1 + \frac{k}{\sqrt{N}}$, cohérente avec l'interprétation proposée dans la partie 3.1.2. McQueen et. al. [113], [80] observent que les hypothèses et les formes de modèles choisis pour l'estimation de l' $ADMD$ et du coefficient de foisonnement ne font pas consensus parmi les opérateurs réseaux⁴.

Plus récemment, le recours à ces indicateurs a par exemple permis à Boait et. al. [20] d'estimer les besoins (dimensionnement) pour des réseaux de faible envergure (*mini-grid* pour le développement de réseaux dans les pays à économie émergente). Ils ont également été utilisés par Marra et. al. [112] pour quantifier l'impact de l'intégration de véhicules électriques (VE) sur le réseau basse tension danois. L'étude proposée a notamment permis de donner une valeur seuil de diffusion à partir de laquelle la recharge des véhicules la nuit nécessitera des investissements réseaux supplémentaires.

3.1.5 Intérêt des indicateurs f_N et $ADMD_N$ dans le cadre d'effacement de charges thermiques

Dans la suite de ce travail, on s'intéresse plus particulièrement à ces deux indicateurs pour deux raisons :

- L'évaluation du foisonnement de courbe de charges résidentielles est une manière de s'assurer de la représentativité des modèles utilisés en simulation. Le coefficient de foisonnement est donc un paramètre d'ajustement intéressant, en particulier si les simulations ne portent que sur certains usages de l'électricité, comme c'est le cas dans ce travail
- L'estimation de ces coefficients à partir de données terrains est peu coûteuse pour un opérateur d'effacement dans un contexte *smart-grids*, c'est-à-dire dans le cas du pilotage de charges distribuées, et constitue un outil intéressant pour l'analyse du parc de charges (ménages, usages) disponibles. La comparaison des valeurs de ces coefficients pour des périodes avec et sans effacement donne donc une indication

⁴Études de cas en Nouvelle-Zélande

globale sur les gisements de flexibilité disponibles et l'effet de relance associé au pilotage distant d'un agrégateur. Or la connaissance et la maîtrise de ce phénomène au niveau de l'ensemble contrôlé est une question centrale pour le développement et l'implémentation de produits d'effacements par un opérateur

3.2 Mise en place d'outils pour l'évaluation des effacements

L'évaluation de l'effet de l'envoi d'un signal de contrôle chez les consommateurs d'électricité suppose de proposer une méthode d'évaluation du scénario de référence. À partir de la définition de cette référence, il est possible de proposer des indicateurs permettant de caractériser les effacements ou déplacements de consommation réalisés.

3.2.1 Méthode de restitution de la référence dans le cas de scénarios simulés

Afin de définir le scénario de référence, on rappelle le cadre général :

- Les stratégies de contrôles sont uniquement basées sur un pilotage direct des équipements:
 1. Contrôle via un signal de commande à distance *tout ou rien*, noté u_{cc} , on appelle ce type de stratégie *commande* u_{cc} dans la suite
 2. Contrôle distant de la grandeur régulée, soit la température de consigne dans le cas des usages thermiques. On note T_{cc} la consigne pilotée. On appelle ce contrôle *commande* (u_{cc}, T_{cc}) dans la suite

Deux types d'éco-systèmes⁵ sont donc envisagés: un simple *switch* équivalent au relai installé dans les tableaux électriques pour la commande des ballons à accumulation et un thermostat programmable à distance, noté *PCT* (*programmable communicating thermostat*) nomenclature *PCT Programmable Communicating Thermostat* [33]. Plusieurs solutions techniques de ce type ont été mises en œuvre dans des expérimentations *smart-grids*, elles sont essentiellement distinctes selon le fournisseur du service (directement intégré dans les équipements installés, systèmes ajoutés par un agrégateur, ...). Cette distinction n'a pas d'incidence dans le cadre de ces travaux; on suppose que les fonctionnalités sont les mêmes.

⁵Éco-système: ensemble d'équipements domestiques assujettis à une solution de pilotage direct par un opérateur.

- L'ensemble des clients reçoit le signal (moyens de transmissions parfaits) et il n'y a pas de dérogation (manque d'information pour valider ou non cette hypothèse)
- L'évènement de contrôle ne produit pas de changement dans le comportement des ménages (en particulier sur la gestion de la consigne). La consigne peut éventuellement être modifiée via le signal de contrôle en amont de la phase d'effacement par l'opérateur (écosystème de type *PCT*)

Le scénario de référence en simulation est issu du même paramétrage que le cas avec effacement, mais aucun signal de contrôle n'est envoyé ($u_{cc}(t) = 0 \forall t$ et T_{cc} n'est pas défini).

On note respectivement X_{ref} et X_{eff} un signal en l'absence de pilotage distant et dans le cas avec effacement.

Parmi les problématiques soulevées par les effacements diffus de consommation se posent notamment les questions relatives au *report* et à l'*effet de relance*, ces deux notions sont définies dans la suite du paragraphe.

On définit trois phases au cours d'un effacement, tel que représentées sur la figure 3.2.1 où on a schématisé les courbes de charge de l'usage chauffage uniquement d'un ensemble de N ménages, pour les cas avec et sans stratégie de pilotage:

1. **Phase ante contrôle $p1$:** période de pré-contrôle avant la période où on cherche à diminuer la demande réseau: des scénarios d'effacement avec une phase de préchauffe peuvent être envisagés. On note E_{p1} l'énergie surconsommée au cours de cette phase par rapport à la référence
2. **Phase de contrôle $p2$:** phase durant laquelle la demande dans le cas du scénario avec contrôle est inférieure à celle en l'absence du signal d'effacement. La différence en énergie entre les deux scénarios est notée E_{p2}
3. **Phase post contrôle $p3$:** phase de récupération au bout de laquelle l'état⁶ des deux systèmes (ayant ou non reçu le signal d'effacement) est équivalent. La période de *recouvrement en énergie*, ou plus simplement *recouvrement* désigne cette phase.

On note E_{p3} l'énergie surconsommée durant cette phase par rapport au scénario de référence. On propose d'évaluer l'équivalence entre les états thermiques des deux systèmes en traçant la différence des index à 30 minutes entre les deux courbes depuis le début de l'effacement, tel que schématisé à la figure 3.2.2 (seules les phases $p2$ et $p3$

⁶état thermique des systèmes régulés

sont représentées, la phase de recouvrement débute immédiatement à la fin du contrôle). La fin de l'effacement théorique correspond au temps au bout duquel l'évolution de l'écart entre les deux index demeure toujours inférieur à un seuil ϵ . Cette définition est en accord avec les indicateurs utilisés pour caractériser l'effet de relance suite à une coupure sur le réseau de distribution [95].

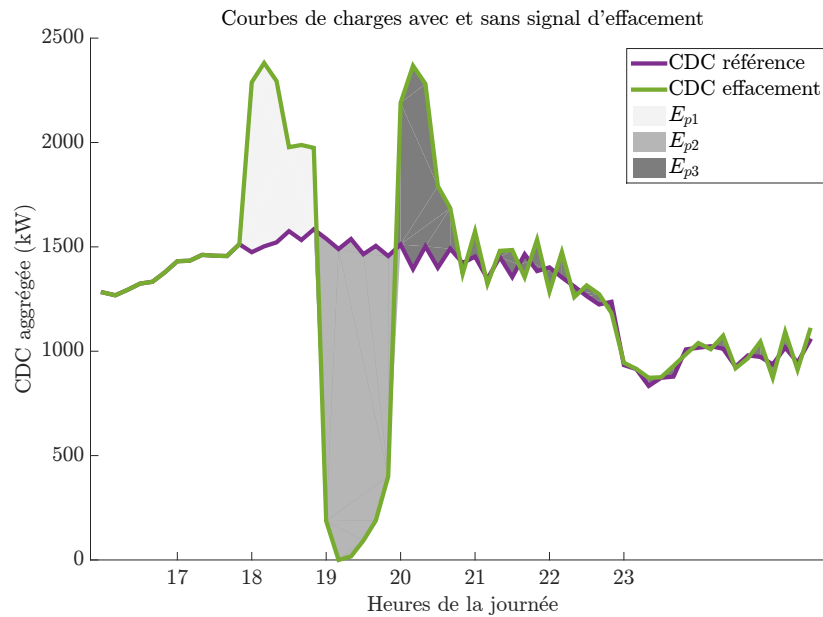


Figure 3.2.1 Représentation des différentes phases d'un effacement

Pour chaque usage, les évaluations se font à l'échelle agrégée d'ensembles {ménages-bâti-systèmes} en exploitant les courbes de charge des équipements pilotés. On prend en compte dans les simulations deux sources de diversité: il peut s'agir de diversité fonctionnelle et technique (bâti, systèmes) ou de diversité d'origine comportementale (scénarios de consigne, scénarios d'occupation). Le modèle thermique des logements ne permet pas de quantifier, au niveau d'un ménage, la perte de foisonnement des équipements puisque le modèle ne contient qu'une à deux zones thermiques par logement.

A l'échelle d'un ensemble de systèmes, sous l'hypothèse de contrôle uniforme de la température dans les logements, la dynamique est en partie reproduite ⁷.

L'hypothèse d'uniformité spatiale des températures (ou la définition d'une température moyenne équivalente) est sans doute une limite majeure de l'approche de modélisation

⁷La pratique du cloisonnement n'est pas modélisée mais, si elle existe et sous les hypothèses de gestion uniforme de la consigne et d'invariance des comportements, elle devrait introduire une erreur constante dans le modèle

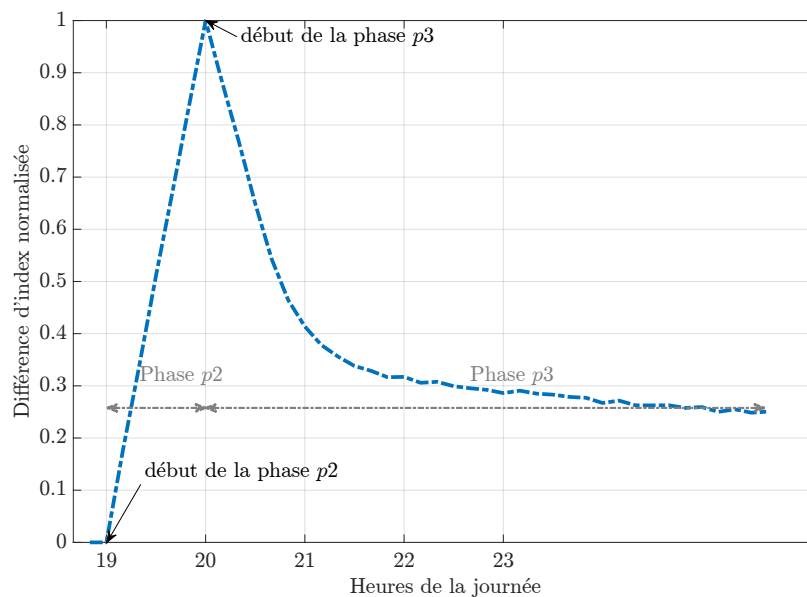


Figure 3.2.2 Évolution de l'écart entre les index normalisés

choisie (chapitre 2). Comme cela a été détaillé dans le chapitre 1, nous manquons de données pour alimenter des modèles de logements plus détaillés au niveau d'un parc. On notera qu'en pratique, lorsqu'on suppose que le scénario de consigne est le même pour l'ensemble des logements, et que le parc décrit est essentiellement composé de logements similaires (caractéristiques constructives) alors le modèle de thermique conduit à l'apparition d'un phénomène d'oscillations de la courbe de charge globale lors de la relance des appareils de chauffage, qui est du au re-synchronisme des équipements. Bien que ce phénomène puisse exister sur les réseaux [152], il est peu probable qu'il soit durablement visible au vu de la diversité des consommations d'un parc de logement (voir par exemple [157] pour l'influence du nombre d'occupants, [57] pour l'influence de l'occupation sur la demande électrique pour l'usage chauffage).

Une fois l'instant de fin d'effacement déterminé, les écarts en énergie entre les deux scénarios sont calculables et il est possible de proposer des indicateurs pour caractériser les effacements à partir de la comparaison entre les deux scénarios.

3.2.2 Indicateurs retenus pour l'évaluation des effacements en énergie

Définition 5 (Indicateurs énergétiques). *Ils sont donnés par le calcul des différences en énergie entre la courbe avec effacement et la courbe de référence sur les trois phases*

de l'effacement: E_{p1} , E_{p2} et E_{p3} . Par convention, ces écarts en énergie sont comptées positivement:

$$E_{pi} = |E_{ref}(pi) - E_{eff}(pi)|, i \in \llbracket 1, 3 \rrbracket \quad (3.2.1)$$

Définition 6 (Report). Le report $R\%$ correspond à la quantité relative d'énergie déplacée du fait de la stratégie d'effacement évaluée. Il est calculé en tenant compte des trois phases d'un effacement définies dans la section 3.2.1:

$$R\% = \frac{E_{p1} + E_{p3}}{E_{p2}} \quad (3.2.2)$$

Caractérisation de la phase de recouvrement énergétique Le recouvrement désigne la phase pendant laquelle la demande avec effacement est supérieure à celle sans ordre de pilotage distant. Dans le cas d'un signal u_{cc} , le tracé de la différence des consommations énergétiques par pas demi-heure permet de visualiser la dynamique d'évolution de cette phase, comme représentée sur la figure 3.2.2. L'écart tracé sur la figure a été normalisé par rapport à celui mesuré à l'issue de la phase $p2$. Dans le cas d'un écosystème PCT , le recouvrement est défini par rapport aux trois phases d'un effacement définies dans la partie 3.2 (voir remarque 3.2.1).

Définition 7 (Durée du recouvrement). La phase de recouvrement est définie par la durée pendant laquelle l'écart relatif de la demande entre les cas avec et sans effacement est supérieure à un seuil α_r . On note Δt_{α_r} la durée du recouvrement à la précision α_r . A l'issue de cette phase, on a donc:

$$\forall t > t_{fin}(\alpha_r), \frac{|CDC_{30,ref} - CDC_{30,eff}|}{CDC_{30,ref}} < \alpha_r \quad (3.2.3)$$

On définit deux grandeurs de recouvrement d'intérêt τ_i et $\Delta R_i \%$:

- Le recouvrement à 1h, τ_{1h} qui représente la quantité d'énergie surconsommée durant la première heure de la phase 3 de l'effacement par rapport au report total durant cette même phase $\frac{E_{p3}}{E_{p2}}$. Par exemple, si $\tau_{1h} = 0.7$ alors 70% du report a lieu durant la première heure
- Le recouvrement à 2h, τ_{2h} qui est la même quantité que précédemment allant jusqu'à deux heures après le début de la phase 3
- Le temps au bout duquel le recouvrement atteint 80% du report total $\frac{E_{p3}}{E_{p2}}$, $\Delta R_{80\%}$, exprimé en heures

- Le temps au bout duquel le recouvrement atteint 95% du report *total* $\frac{E_{p3}}{E_{p2}}$, $\Delta R_{95\%}$, exprimé en heures

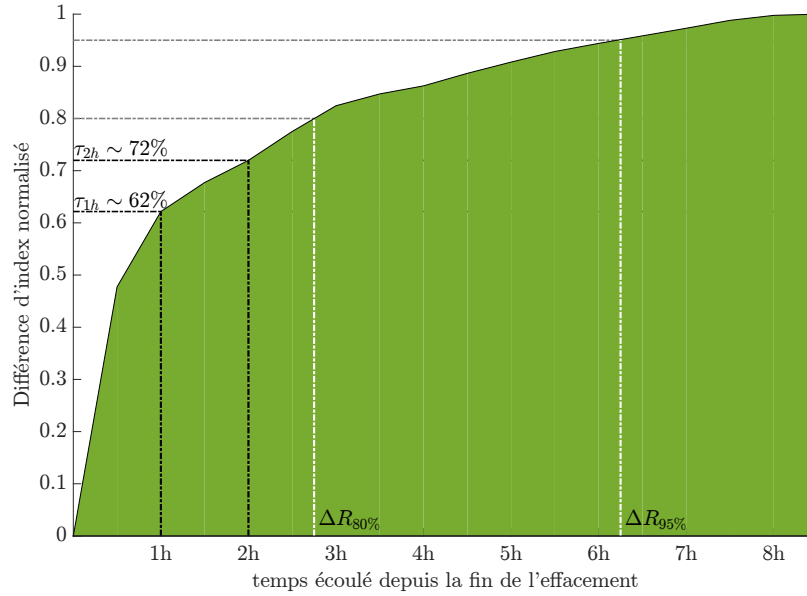


Figure 3.2.3 Représentation de l'évolution de la phase de recouvrement

Les quatre indicateurs ainsi calculés sont représentés sur la figure 3.2.3. Les travaux sur l'évaluation de la flexibilité au niveau d'un poste de distribution conduits dans le cadre de l'expérimentation *Grennlys* font état du caractère déterminant des deux premières heures de la phase 3 [16], de même que les résultats du travail de Da Silva [37], ce qui justifie le choix de ces indicateurs énergétiques.

Remarque 3.2.1 (Interprétation des indicateurs dans le cas d'une stratégie avec préchauffe).

Dans le cas d'un pilotage avec une stratégie de préchauffe (cas chauffage), c'est-à-dire si la commande u_{cc} est non nulle durant la phase $p1$ et donc $E_{p1} \neq 0$, alors par définition τ_i sera supérieur au cas de stratégies $E_{p1} = 0$ et le temps depuis le début de la phase $p3$ pour atteindre $x\%$ du report théorique total sera toujours plus faible que dans les cas $E_{p1} = 0$. Par conséquent, la comparaison de stratégies avec $E_{p1} \neq 0$ selon ces grandeurs caractérisant la phase de recouvrement n'est pas informative et ne sera pas présenté dans la suite.

Dans le cas avec préchauffe, seuls le report et la durée de recouvrement sont calculés, le calcul de la durée du recouvrement est alors réalisé en tenant compte de la durée de préchauffe, en cohérence avec la définition 6 du report.

3.2.3 Indicateurs retenus pour caractériser la déformation de la courbe de charge associée à un effacement

On s'intéresse à l'effet de relance des équipements à partir de la phase $p3$ (fin de la période de contrôle) **en dehors de toute stratégie de contrôle de cet effet**.

La suite de la section est définie comme suit: on propose une analyse détaillée dans le cas d'un contrôle via u_{cc} uniquement. On donne ensuite les définitions utilisées dans la suite dans le cas général (u_{cc} ou (u_{cc}, T_{cc})). Enfin, on rappelle les principaux résultats existants dans la littérature pour le cas du contrôle des appareils de chauffage.

3.2.3.1 Effet de relance associé à un pilotage ON/OFF

Ce cas est le plus simple à modéliser, l'effet agrégé est similaire à une coupure réseau à la différence que seuls certains usages sont contrôlés et que **l'architecture est distribuée**:

- Les systèmes pilotés à distance ne concernent que les usages thermiques de l'électricité, donc la perte de diversité est moindre par rapport au cas de la coupure réseau. Toutefois, les études sur les effets d'une coupure sur un réseau basse tension ont montré que ce sont les principaux usages responsables du phénomène de pointe de relance [95, 170] et surtout de la durée du régime de saturation suivant la coupure (défini ci-après)
- Dans ce travail, on s'intéresse à des consommateurs *épars* (non nécessairement raccordés aux mêmes nœuds du réseau) ainsi les enjeux de notre étude sont liés à la maîtrise du phénomène de relance dans un but *technico-économique* et non plus uniquement *technique*⁸. D'autre part, le caractère distribué des capacités limite naturellement la comparaison entre les résultats issus de ce travail et ceux portant sur les coupures réseau. Par exemple, les effets liés aux conditions climatiques ne sont plus locaux, l'évaluation se fait donc nécessairement à l'échelle d'un parc plus étendu. Intuitivement, la diversité issue d'un parc de consommateurs soumis à une offre d'effacement d'usage(s) peut être plus importante que dans un cadre réseau uniquement. Les potentialités de flexibilité offerte à un opérateur d'effacement diffus sont plus larges que celles des opérateurs historiques (choix moins contraint des consommateurs cibles par exemple).

⁸Dans les travaux antérieurs sur les défauts réseaux, l'un des objectifs majeurs des études était de maîtriser la relance pour éviter les surcharges au niveau des postes de transformation HTA/BT

Modélisation de la courbe de charge agrégée (déformation) lors d'une relance Plusieurs modèles ont été proposés pour l'étude du phénomène de relance suite à une coupure réseau. Lang et. al. [95] distinguent 4 phases lors de la relance (issus des travaux de Audlin et. al. [11]). Les 3 premières phases étant très volatiles (durée totale inférieure à 1 min), elles ne peuvent être observées avec les systèmes de suivi installés chez les consommateurs cibles et sortent du cadre de ce travail. On ne s'intéresse donc dans la suite qu'aux phénomènes de relance liés au re-synchronisme des usages, à la fois dans le logement (effet de relance de l'ensemble des appareils pilotés) et au niveau du parc. **Seule la perte de diversité entre les logements est modélisée**⁹. On différencie deux périodes au cours de la phase $p3$ [37]:

1. Une première phase, notée $p3_A$ lié à un phénomène de saturation durant laquelle la puissance totale appelée (agrégée parc) est constante. Après une revue des modèles de $CLPU$ ¹⁰ existants, Lefebvre et. al. [98] observent que la durée de cette phase est souvent sur-estimée dans les modèles, de même que l'appel de charge observé dans les premières instants suivant la coupure
2. Une seconde phase $p3_B$ de retour progressif à l'équilibre. L'appel de charge total décroît progressivement jusqu'au retour du niveau de foisonnement qui aurait été observé en l'absence de contrôle du parc

Les 3 modèles décrivant la forme de la phase $p3$ présentés ci-après sont basés sur l'exploitation de courbes de charge agrégées des consommateurs raccordés au même poste de distribution.

Uçak et. al. [170] ont proposé un modèle sous la forme d'une loi de décroissance exponentielle pour la phase $p3$, selon 4 paramètres, tel que reproduit sur la figure 3.2.4b. Le modèle proposé, permettant de modéliser la phase $t \geq T_3$, s'écrit sous la forme:

$$\forall t \geq T_3, P(t) = P_0 + [P_r - P_0]e^{-\frac{t-t_{3A}}{\tau_d}} u(t - t_{3A}) + P_r[1 - u(t - t_{3A})]u(t - T_3) \quad (3.2.4)$$

où u désigne la fonction échelon unitaire et les paramètres sont indiqués sur la figure 3.2.4a.

Le cas d'étude présenté est relatif à une coupure de 30 minutes, avec une constante de temps pour la loi exponentielle également égale à 30 minutes. L'appel de charge maximum

⁹On rappelle que les modèles utilisés dans le cadre de ces travaux ne permettent pas de modéliser la perte de synchronisme des équipements de chauffage au sein d'un même logement

¹⁰ $CLPU$: Cold Load Pick Up: nom donné à l'effet de relance suite à une coupure sur un réseau de distribution, défini comme le rapport entre les puissances au moment de la relance et avant coupure

P_r est supposé être entre 2 et 5 fois supérieur à celui hors coupure: $P_r = \alpha_c P_0$, $\alpha_c \in [2, 5]$.

Agneholm et. al. [8] proposent une forme similaire pour modéliser la charge agrégée de l'usage chauffage de $N = 100$ consommateurs et étudient l'influence de la durée de la coupure et de la température extérieure sur les 3 paramètres du modèle: le facteur de relance, le retard et le paramètre de décroissance (temps caractéristique de retour à l'équilibre). Le parc étudié est composé pour moitié de système de type chaudière¹¹ électrique et pour moitié de systèmes type radiateur électrique. Nous avons reproduits les résultats obtenus et les paramètres du modèle de relance identifié dans le tableau 3.1. Les auteurs soulignent que sur les séries de mesures disponibles, ils n'observent plus d'évolution du recouvrement au delà de 5h après la fin de la coupure. Les séries mesurées pour des durées de coupures de 5min à 30min donne un facteur de relance P_r/P_0 dont l'ordre de grandeur est de 2 (détaillé dans l'étude).

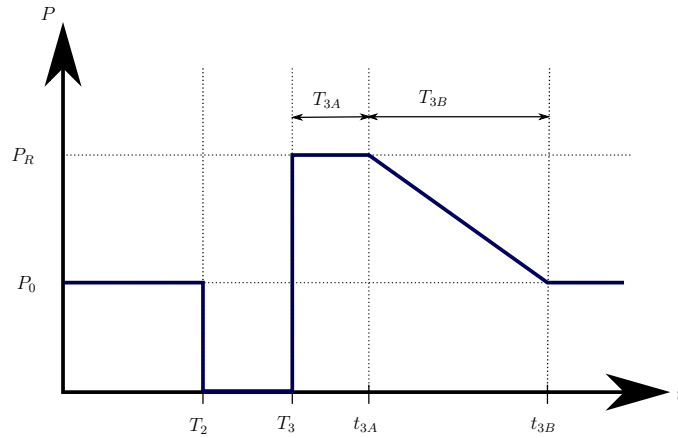
Tableau 3.1 Paramètres du modèle identifié dans [8]

T_{ext} (°C)	P_r/P_0 -	τ_d min	T_{3A} min
0	3.1 – 4.1	7 – 31	3 – 7
10	34.7 – 4.1	10 – 14	1

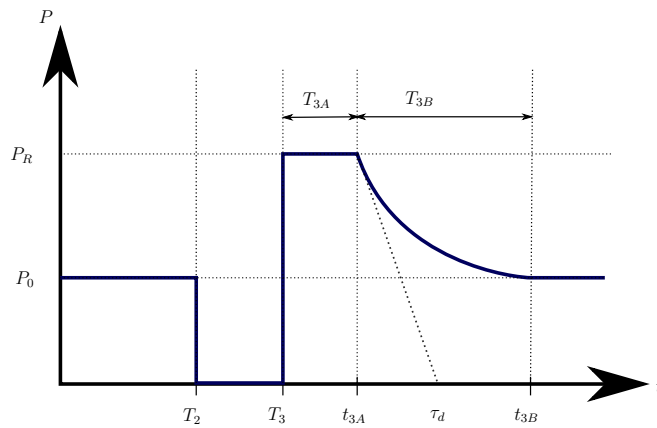
Lefebvre et. al. [98] ont cherché à évaluer la robustesse d'un modèle simplifié pour la loi de décroissance de la demande agrégée au niveau d'un poste HTA/BT durant la phase $p3_B$ sous la forme d'une droite. La forme de la relance proposée est représentée sur la figure 3.2.4a. Dans le modèle proposé, les phases $p3_A$ et $p3_b$ sont d'égales durées $T_{3A} = T_{3B}$ et le rapport en puissance P_r/P_0 dépend de la température extérieure. Les paramètres issus du modèle sont comparés avec des observations *in situ* et un modèle de type *bottom-up* de restitution des charges individuelles raccordées au poste (3 types de charge sont modélisés: usages *chauffage*, *ecs* et *autres*).

La comparaison des valeurs entre les 3 approches sur 3 séries de données (coupures de 60min et ~ 45 min) montrent que la durée de la phase $p3_A$ est surestimée par le modèle (elle est inexistante avec le modèle *bottom-up* et sur les mesures connues à 15min). Le *facteur de relance* P_r/P_0 ne dépend pas de la température extérieure, il est de l'ordre de 2 sur les

¹¹Cas de systèmes typiques installés en Suède. L'inertie de ce type de système avec circulation d'eau chaude dans les éléments de chauffe est bien supérieure à celle des convecteurs et panneaux rayonnants que nous étudions, ce qui représente une différence importante entre les deux cas d'étude



(a) Modèle de relance recherché dans [98]



(b) Modèle de relance selon [170] et [8]

Figure 3.2.4 Représentations de l'effet de relance à l'issue d'un coupure réseau

données mesurées et simulées par le modèle *bottom-up*, de l'ordre de 4 avec le modèle agrégé. Les modèles semblent résulter en une sur-estimation du rapport P_r/P_0 . Une adaptation des paramètres du modèle agrégé est donc proposée suite à cette étude selon la température extérieure et la durée de coupure: la phase de saturation p_{3A} s'étend de 0.5h à 1.5h, la phase p_{3B} de 0.5h à 5h, et le rapport des puissances P_r/P_0 est quasiment constant, de l'ordre de 2.

Cette étude bibliographique succincte nous a donc permis de préciser les phénomènes liés à la relance des équipements à l'issue de la phase de contrôle et notamment le questionnement sur l'amplitude de l'appel de charge agrégé, sa durée et plus globalement sur la forme de

cette relance. Dans la partie suivante, on définit les grandeurs d'intérêt pour quantifier le phénomène de relance sur la demande agrégée.

3.2.3.2 Définition des grandeurs associées au phénomène de relance pour le pilotage direct

Définition 8 (Charge effacée). Puissance moyenne non consommée μP_{nc} durant la phase de contrôle $p2$ de durée $\Delta T_{p2} = [t_{p2i}, t_{p2f}]$. Si le contrôle est uniquement basé sur u_{cc} , elle est constante durant la phase de contrôle. Elle est calculée par:

$$\mu P_{nc} = \frac{1}{\Delta T_{p2}} \int_{t_{p2i}}^{t_{p2f}} (P_{N,ref}(t) - P_{N,eff}(t)) dt \quad (3.2.5)$$

Définition 9 (Rebond). Rapport $R_{t_{rel}}$ entre l'amplitude de l'appel de charge suite à la relance (à l'instant t_{rel} pour lequel la demande à l'issue de la phase de contrôle est maximum), exprimé en W, immédiatement après la fin de la période de contrôle et l'appel de charge de référence (s'il n'y avait pas eu de contrôle):

$$Rb_{t_{rel}} = \frac{P_{N,eff}(t_{rel})}{P_{N,ref}(t_{rel})} \quad (3.2.6)$$

Le calcul du *rebond* est très simple en simulation. Nous verrons que la difficulté de restitution d'une courbe de référence dans le cas réel rend l'utilisation de ce coefficient peu adapté en pratique (chapitre 5).

Définition 10 (Pic de surconsommation). Rebond exprimé comme un écart relatif par rapport à la courbe de charge de référence à l'instant t_{rel} , noté $PS_{t_{rel}}$:

$$PS = \frac{P_{N,eff}(t_{rel}) - P_{N,ref}(t_{rel})}{P_{N,ref}(t_{rel})} \quad (3.2.7)$$

Définition 11 (Forme du rebond). On caractérise la forme du rebond (forme de la courbe de charge liée à la relance) par le calcul de l'évolution du facteur de diversité avec $[t_1, t_2] = 30\text{min}$, ce qui permet de proposer un indicateur ne nécessitant pas de calculer la référence. En simulation, l'écart relatif de coefficient de foisonnement entre les cas avec et sans effacement permet de rechercher des formes de modèles pour la relance selon une méthode similaire à celle du paragraphe 3.2.3.1.

Définition 12 (Facteur de relance). Rapport entre l'amplitude de l'appel de charge suite à la relance $P_{N,eff}(t_{rel})$, exprimé en W, immédiatement après la fin de la période de contrôle et l'appel de charge P_0 juste avant le début de la phase $p2$. Il s'agit de la définition usuelle

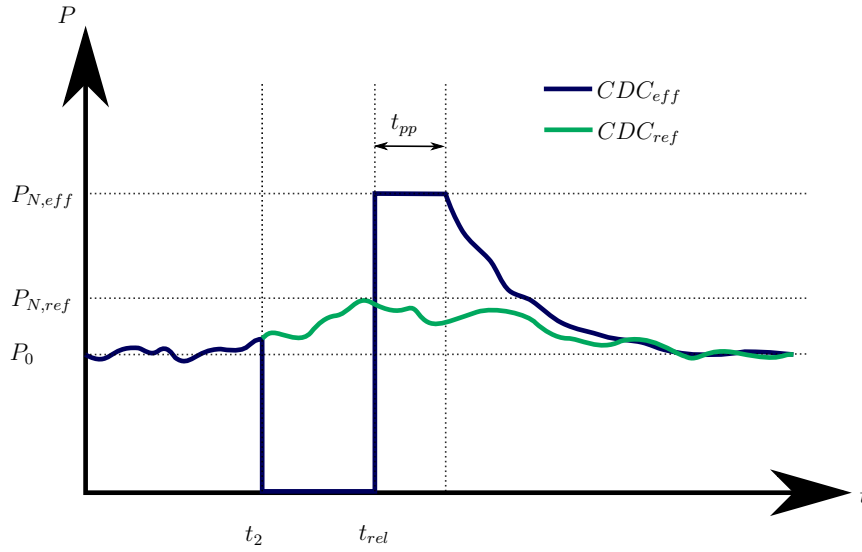


Figure 3.2.5 Représentation des grandeurs utiles à la caractérisation des effacements en puissance

donnée pour le CLPU détaillé dans le paragraphe précédent. On le note FR_m , où m désigne le pas d'observation: Fr_{10} pour le calcul relativement à CDC_{10} , Fr_{30} dans le cas des courbes de charges à 30 minutes.

On pourra remarquer que le rapport des facteurs de charge journalier (avec et sans effacement) est équivalent au facteur de relance si les effacements ont lieu au moment de la pointe journalière et en l'absence de contrôle en fin de période d'effacement.

Définition 13 (Effet de saturation). On appelle t_{pp} (temps à pleine puissance) la durée de la phase $p3_A$. Les indicateurs de durée définissant le recouvrement permettent de caractériser globalement la phase $p3$, aussi il n'est pas nécessaire de donner des indicateurs supplémentaires de durée pour la phase $p3$, on ne cherchera donc pas nécessairement de modèle générique pour caractériser la phase $p3$.

On représente l'ensemble des grandeurs introduites dans ces définitions sur la figure 3.2.5. Dans le paragraphe suivant, on présente succinctement les principaux travaux sur l'évaluation d'effacements de l'usage chauffage, en distinguant les éléments issus de modélisation des résultats obtenus par l'exploitation de données expérimentales. Cette étude bibliographique servira de référence pour l'analyse et la comparaison de certains résultats obtenus dans les chapitres suivants.

Remarque 3.2.2 (Instant de relance t_{rel}). *L'instant de relance peut être décalé dans le temps par rapport à l'instant de fin de contrôle $t_{f,cont.}$. C'est ce qui est souligné dans un rapport d'évaluation des effacements diffus publié par RTE¹² et que nous avons parfois observé sur les données terrains (voir chapitre 5). En simulation, cet effet, qui est une question centrale pour un opérateur d'effacement, n'a pas été observé (voir chapitre 7).*

3.2.3.3 Synthèse des études portant sur des effacements de l'usage chauffage

Dans ce paragraphe, on présente quelques travaux s'inscrivant dans un cadre semblable à celui de ce travail: études portant sur des effacements de l'usage chauffage, pour le cas de consommateurs du secteur résidentiel. Seuls les effacements réalisés via un pilotage direct de la charge (commandes de types u_{cc} ou u_{cc}, T_{cc}) sont présentés¹³.

Éléments issus de l'exploitation de données de démonstrateurs Le projet *Greenlys*¹⁴ est un démonstrateur *smarts-grids* permettant de tester un pilotage direct de la charge. Des ménages dans la région de Grenoble expérimentent une stratégie de pilotage de la charge des systèmes de chauffage électrique équipant leur logement. Le pilotage consiste en une réduction de la température de consigne de 1°C durant 1 heure, au maximum une fois par jour. Les données de consommation relevées toutes les 5 minutes (index logement et index des voies de chauffage) ont été exploitées pour évaluer le potentiel de flexibilité au niveau d'un poste de distribution dans le travail de thèse de Benoît [16] en supposant trois niveaux de connaissance de la charge (connaissance parfaite de chaque charge, connaissance de la charge agrégée au niveau du poste de distribution, aucune connaissance *a priori*). L'exploitation des données expérimentales (dont le relevé d'une température intérieure collectée à l'aide d'une sonde incluse dans le dispositif expérimental installé chez les ménages) a révélé que compte tenu de la qualité d'isolation des logements au périmètre de l'expérimentation, la stratégie est équivalente à une coupure simple. L'analyse des courbes d'index a alors conduit l'auteur aux hypothèses suivantes sur les effets des effacements diffus:

- La phase de recouvrement dure 2 heures
- En l'absence de contrôle en fin d'effacement, le rebond représente 140% de la puissance moyenne effacée, et peut être réduit à 100% en lissant les instants de relance (*rampe de relance* pour la fin de la période de contrôle)

¹²https://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/20160401_Rapport_report_complet.pdf

¹³Pas de cas d'étude avec signal tarifaire

¹⁴www.greenlys.fr

La déformation type de la courbe de charge agrégée identifiée à partir de l'expérimentation et utilisée dans les modèles est représentée sur la figure 3.2.6.

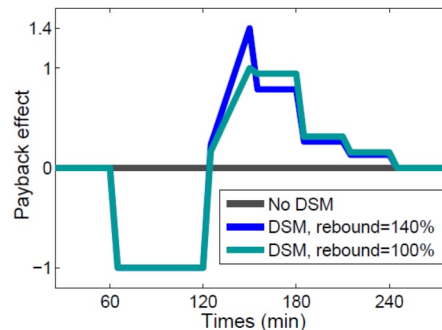


Figure 3.2.6 Formes types d'un effacement avec et sans stratégie de contrôle de la phase de la relance des équipements. Source de la figure: [16]

RTE, en sa qualité de responsable d'équilibre, a été mandaté pour préparer le cadre législatif nécessaire au déploiement de solutions d'effacement diffus. Un rapport de synthèse¹⁵ des travaux initiés par *RTE* pour répondre à cette problématique a été publié. Ces travaux s'appuient sur les données de plusieurs expérimentations d'effacements diffus produits par l'envoi de signaux de type u_{cc} . Les plans d'expériences (modalités pour la réalisation des effacements, temporalité des effacements, durée, nombre d'effacement, taille des échantillons,...) des différents projets valorisés dans le rapport ne permettent pas de comparer les résultats présentés dans le rapport. Les informations sur les simulations théoriques réalisées dans le cadre de ces travaux ne nous ont pas permis de les comparer avec les résultats issus des expérimentations (même ceux donnés selon le même plan d'expérience).

On retient que pour l'ensemble des travaux présentés, le report est inférieur à 100%, en revanche les valeurs trouvées se situent dans une plage très large (la plage la plus large est [8% – 95%]). La durée du recouvrement est également très variable (et contrainte par le plan d'expérience réalisé), allant de quelques heures à plus de 24h selon les études mentionnées dans le rapport.

Le rapport détaille plusieurs méthodes pour la construction de la courbe de référence et montre la sensibilité des résultats selon la méthode retenue. Une large partie du rapport porte sur l'évaluation d'effacements cycliques de type (10min *d'effacement* - 20min *sans contrôle*) sur des sous-groupe effacés alternativement.

Il n'est pas possible de comparer les résultats présentés dans la suite avec ceux obtenus en simulation dans le rapport, n'ayant pas suffisamment d'éléments sur le paramétrage utilisé.

¹⁵Le rapport peut être consulté à l'adresse: https://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/20160401_Rapport_report_complet.pdf

On note que les résultats de simulation donnent des taux de report bien supérieurs aux résultats obtenus par l'exploitation des consommations mesurées.

Études théoriques En modélisant les logements par des filtres passe-bas d'ordre 1, en considérant 3 types de bâtiments uniformément distribués dans un parc de 500 logements (donc en considérant 3 niveaux d'inertie), et en supposant que les consignes T_c dans le parc sont constantes au cours de la journée, distribuées selon une loi normale de paramètres $T_c \sim \mathcal{N}(19.5^\circ\text{C}, 0.55^\circ\text{C})$, Saker [150] estime le facteur de relance du parc de l'ordre de 2 si les systèmes de chauffage sont de type *radiateur*. La durée à pleine puissance (t_{pp}) est de l'ordre d'une heure pour un effacement de même durée. Une étude plus détaillée sur le dimensionnement des systèmes et la sensibilité du modèle est toutefois nécessaire pour conclure sur la robustesse des résultats.

Da Silva [37] a proposé une étude portant sur plusieurs stratégies d'effacement déployées sur un parc de logements résidentiels diversifié (caractéristiques constructives, types de systèmes de chauffage, apports internes). Les simulations du parc ont été effectuées avec un modèle thermique similaire à celui construit dans le chapitre 2. Dans le cas d'un contrôle via le signal u_{cc} , et d'un effacement de 2 heures, le facteur de relance issu du scénario simulé est de l'ordre de 1.5, le temps à pleine puissance légèrement inférieur à la durée de l'effacement. Ces travaux ont montré la sensibilité des effacements au dimensionnement du parc (les principales conclusions de l'analyse de sensibilité locale issue de ce travail sont présentés dans la section 4.1.2 du chapitre 4).

3.2.4 Analyse de l'effet des effacements sur le confort thermique dans les logements

On rappelle que:

- le modèle de thermique unitaire (un seul logement) ne permet de reproduire que partiellement l'évolution de la température intérieure dans le logement
- compte tenu des incertitudes sur les bâtiments à représenter, il n'est pas envisageable de développer un modèle plus détaillé (typiquement un modèle zonal) à l'échelle d'un ensemble de consommateurs ¹⁶

¹⁶Le manque d'informations sur les modes de gestions de la consigne ne permet pas de paramétrer un tel modèle pour un ensemble de consommateurs

Dans ce cadre, l'évaluation de l'inconfort thermique dans le logement est nécessairement limitée. L'utilisation de la température opérative, plus proche de la température effectivement ressentie par les individus que la température du nœud d'air ¹ a semblé plus pertinente. On appelle dans la suite T_{op} la température d'une zone thermique définie par :

$$T_{op} = \frac{1}{2}(T_{air} + \frac{1}{S_{tot}} \sum_{i \in K} T_i S_i) \quad (3.2.8)$$

avec T_{air} la température du nœud d'air, S_i la surface de la paroi i , T_i la température du nœud de surface de cette paroi, $S_{tot} = \sum_{i \in K} S_i$, K le nombre de paroi dans la zone.

Si le bâti comprend plusieurs zones thermiques alors la température opérative est la moyenne pondérée par les surfaces des températures opératives dans chaque zone, il en va de même si nécessaire pour la température d'air¹⁷ dans le bâti en accord avec la définition proposée par exemple dans [114].

On appelle *degré heures d'inconfort*, DH , la quantité [37]:

$$DH = \int_{t \in p1 \cup p2 \cup p3} \max(T_{op}(t) - (T_c(t) - T_{lim}), 0) dt \quad (3.2.9)$$

Cette quantité est calculée à partir des évolutions de la température opérative moyennée sur 10 minutes telle que définie par l'équation 3.2.8 et s'inspire de la définition du TO (voir [173], définition rappelée dans la partie 4.1.2 de ce manuscrit). T_c désigne toujours la température de consigne définie par les ménages même si la stratégie de contrôle étudiée repose sur le contrôle de la température (cas T_{cc}). La température limite T_{lim} pour le calcul doit être définie en prenant en compte les informations disponibles sur les systèmes de régulation: constantes de temps, l'amplitude de la bande morte (régulateurs TOR). Sauf mention contraire, on suppose dans la suite $T_{lim} = 2$ K.

Cet indicateur de confort est calculé pour chaque logement, et on donne si nécessaire sa distribution dans le parc (ou ensemble de systèmes) simulé.

3.3 Conclusion

Nous avons rappelé les différents indicateurs permettant de caractériser le foisonnement de courbes de charge de consommateurs d'électricité (secteur résidentiel). Ces indicateurs

¹⁷Compte tenu du modèle de bâtiment, la pondération en volume est quasi identique à une pondération par les surfaces au sol. Le choix de pondération par les surfaces simplifie les calculs.

peuvent être utilisés pour caractériser le foisonnement des courbes de charges d'usages spécifiques, comme c'est le cas par exemple dans [69, 126].

Nous avons rappelé les mécanismes liés à l'effet de relance, puis dans la dernière partie du chapitre nous avons proposé des définitions pour les grandeurs utiles permettant d'évaluer des produits d'effacement (périmètre d'un ensemble de consommateurs. Ces indicateurs sont utilisés dans la suite de ce travail.

Chapitre 4

Études paramétriques sur des effacements types

Sommaire du chapitre

4.1	Revue des méthodes d'analyse des paramètres d'influence	83
4.1.1	Méthodes pour l'analyse de sensibilité	83
4.1.2	Pratique de l'analyse de sensibilité dans le cadre de la simulation thermique du bâtiment	83
4.2	Analyse paramétrique pour l'effacement	86
4.2.1	Hypothèses pour la construction des modèles de bâti de référence	87
4.2.2	Hypothèses sur le choix des sollicitations extérieures	88
4.2.3	Définition des variables d'intérêt	90
4.2.4	Approche retenue	94
4.2.5	Résultats de l'analyse paramétrique	95
4.2.6	Synthèse du criblage de <i>Morris</i>	100
4.3	Influence de la diversité comportementale sur quelques effacements types	102
4.3.1	Construction de scénarios de présence	104
4.3.2	Construction des stratégies de gestion des systèmes à partir des scénarios de présence	111
4.3.3	Apports internes	115
4.3.4	Analyse succincte de la diversité issue du modèle de présence . . .	116
4.3.5	Analyse de l'impact de différentes stratégies d'effacement	120

4.3.6	Résultats sur les indicateurs d'effacement dans le cas du scénario avec réduit	121
4.4	Conclusions du chapitre	134
4.4.1	Influence des caractéristiques constructives	134
4.4.2	Hypothèses liées à la gestion des systèmes	134
4.4.3	Perspectives	135

Résumé

Dans ce chapitre, on propose d'identifier l'effet de différents paramètres des systèmes modélisés sur une série d'effacements.

Après une revue des principales méthodes d'analyse de sensibilité disponibles, nous proposons d'évaluer l'influence de certains paramètres du modèle global {bâti - systèmes - ménages}. Nous avons regroupé ces variables en quatre catégories afin de donner une image de leur influence sur le potentiel d'effacement d'un client.

A défaut de pouvoir définir un indicateur global de l'effet d'un effacement, on conduit l'étude suivant 4 indicateurs définis dans le chapitre 3 : l'impact en énergie (report), les économies d'énergie, l'impact sur le confort et l'effet de relance (ou temps passé à pleine puissance).

Dans un second temps, on propose une évaluation des effacements réalisés pour un ensemble de systèmes {bâti - systèmes - ménage} dans le cas d'un pilotage direct des appareils de chauffage électriques. Pour cette étude locale, on considère plusieurs bâtiments types permettant de prendre en compte les paramètres du bâti les plus influents identifiés dans la première partie à l'aide du criblage par la méthode de *Morris*. On associe aux ménages des scénarios d'occupation dynamiques calculés à partir de l'exploitation de l'enquête emploi du temps et des scénarios de gestion du chauffage déduits des scénarios de présence suivant une heuristique définie dans la partie 4.3.2. La comparaison en simulation entre différents modes de gestion nous a permis d'évaluer l'effet de ces modes sur les indicateurs d'effacement. L'évaluation est réalisée pour plusieurs cas d'effacement définis par l'instant d'envoi du signal et la durée de l'évènement.

4.1 Revue des méthodes d'analyse des paramètres d'influence

On opère une distinction dans la littérature existante entre les méthodes d'analyse de sensibilité et l'objectif de ces analyses vu au travers des indicateurs retenus ainsi que des paramètres d'intérêt retenus dans le périmètre d'analyse.

4.1.1 Méthodes pour l'analyse de sensibilité

Parmi les méthodes d'analyse de sensibilité classiquement utilisées pour l'étude des charges thermiques (chauffage, climatisation,..) on relève les méthodes *locales* par opposition aux méthodes *globales*. Dans le premier cas, l'étude est menée autour d'un point de référence de l'espace des paramètres du modèle, ce qui permet d'avoir une première information sur les facteurs les plus influents sur la sortie sans nécessiter de lourds moyens calculatoires (le nombre d'évaluations nécessaires du modèle est faible par rapport aux méthodes globales). En revanche, ces méthodes ne permettent pas d'évaluer les interactions entre les différents paramètres d'entrée dès lors que ces relations ne sont pas linéaires. Les méthodes d'analyse de sensibilité globales permettent de dépasser partiellement cette limite. Les deux familles de méthodes d'analyse de sensibilité globale les plus populaires sont les méthodes par criblage - la méthode de *Morris* [120] étant l'une des plus utilisées - et les méthodes de décomposition de la variance (voir [159]). On pourra se référer à [85] ou [151] pour une revue détaillée des méthodes globales d'analyse de sensibilité ainsi qu'une représentation synthétique des différentes méthodes présentées [41], [85]. La mise en œuvre de ces méthodes d'analyse de sensibilité est également explicitée dans [86] pour la méthode de Sobol et dans [27] pour la méthode de *Morris*.

Ces méthodes ont été déployées dans le cadre de la simulation thermique du bâtiment pour répondre à différents objectifs qui font l'objet de la section suivante. Une revue des méthodes d'analyse de sensibilité appliquées à la thermique du bâtiment est disponible dans [168]. Cette revue a motivé le choix d'utiliser la méthode de *Morris* dans la suite. Dans la section suivante, on rappelle les principaux résultats identifiés dans la littérature pour cette méthode essentiellement.

4.1.2 Pratique de l'analyse de sensibilité dans le cadre de la simulation thermique du bâtiment

Dans le cadre de la thermique de bâtiment, les travaux existants répondent à des objectifs divers tels qu'identifiés par Vanrolleghem [175]. Dans cette section, on présente quelques travaux s'inscrivant dans un cadre semblable à celui de ce travail. Pour cela, on s'appuie sur

la description des systèmes étudiés, les paramètres d'entrée choisis et la fonction d'évaluation (ou sortie).

Wit [184] a proposé une comparaison entre deux méthodes de *screening* (méthode de bifurcation séquentielle et méthode de *Morris*) pour identifier les paramètres d'influence sur le confort thermique dans un bâtiment de bureau. La notion de confort est approchée dans ce cas par le calcul du *TO* qui est défini comme le nombre moyen d'heures dans l'année où le *PDD* [59] est supérieur à 10%. Il s'agit d'un indicateur couramment utilisé aux Pays-Bas (voir à ce sujet [173], [174]). Dans cette première étude, 81 paramètres liés aux caractéristiques des matériaux, aux sollicitations extérieures et aux scénarios d'occupation sont considérés et les deux méthodes envisagées aboutissent à l'identification de 12 paramètres comme étant les plus influents sur l'indicateur de confort choisi. Une analyse de sensibilité a ensuite permis de quantifier l'influence de ces 12 paramètres sur la sortie du modèle. Les auteurs concluent que, pour le cas d'étude présenté, le choix de la méthode de *screening* a peu d'influence sur les paramètres identifiés, cependant la méthode de *Morris* offre plus de flexibilité puisque le nombre de niveaux à étudier pour chaque variable peut être choisi librement. Par la suite, une analyse de sensibilité plus détaillée a également été développée [42], suivant le même indicateur de sortie, et en utilisant uniquement la méthode de *Morris* pour l'identification des variables d'influence. Pour choisir le pas de discrétisation de $[0, 1]$ pour chaque variable d'intérêt puis les trajectoires à parcourir, les auteurs suggèrent de prendre un multiple de l'intervalle de confiance à 95% de la variable de façon à interpréter les coefficients plus simplement. 10 paramètres parmi les 89 variables candidates sont identifiés comme les plus influents sur le confort.

Plus récemment, Corrado [34] a proposé une étude portant sur une maison individuelle située en Italie. L'objectif est d'identifier les paramètres d'influence sur les besoins énergétiques annuels et d'estimer leur contribution sur la variabilité de la consommation du logement. Parmi les indicateurs de sortie retenus, on notera notamment ceux relatifs aux consommations énergétiques relatives aux besoins en ECS et en chaleur (hiver) et froid (été) et un indicateur de performance énergétique du bâti similaire à la notion française de *DPE*¹. 129 paramètres d'entrée sont inclus dans l'analyse. Ils concernent les caractéristiques constructives et géométriques du logement, les données climatiques, les scénarios de consigne et d'occupation du logement. L'application de la méthode de *Morris* a permis d'identifier 5 facteurs ayant le plus d'influence sur la performance énergétique du logement. La définition de lois de distribution pour les paramètres identifiés a ensuite permis d'estimer la sensibilité

¹<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Diagnostic-de-Performance,855-.html>

du modèle.

Brohus [26] s'est intéressé à l'écart entre les consommations prédites et mesurées pour une maison individuelle située au Danemark. La variable d'intérêt considérée est donc la consommation énergétique annuelle du logement. Deux approches sont proposées : dans la première, un criblage par la méthode de *Morris* permet d'identifier les paramètres les plus influents parmi 57 variables candidates (variables similaires à celles des études précédentes), puis dans un second temps d'évaluer la sensibilité du modèle par rapport aux 10 variables les plus influentes identifiées (propagation d'incertitude dans le modèle). Une seconde approche est proposée (*facteurs d'incertitude partiels*), elle consiste à évaluer l'influence sur la consommation énergétique annuelle (dont la distribution est supposée suivre une loi normale) des différents paramètres en supposant qu'ils suivent une loi log-normale, une loi normale tronquée ou bien une loi uniforme. Cette seconde approche permet de quantifier les effets de chaque paramètre pris indépendamment sur la sortie.

Garcia Sanchez [62] propose d'étudier la sensibilité des besoins de chauffage d'un immeuble collectif constitué de 32 logements, modélisé par 24 zones thermiques, en calculant les effets élémentaires tels que définis dans la méthode de *Morris* à l'ordre 1 et 2 (dérivées partielles). 24 paramètres sont initialement intégrés à l'étude qui sont essentiellement relatifs aux caractéristiques géométriques et à l'environnement du bâti (restreints aux 12 paramètres identifiées comme les plus influents pour l'analyse des effets d'ordre 2). Plusieurs grandeurs d'intérêt sont envisagées : le besoin énergétique annuel pour l'immeuble, ce même besoin ramené au volume du bâtiment, la température moyenne durant l'été (période juillet-août) et enfin la monotone de charge à 1000 h. Plusieurs cas d'étude sont présentés suivant entre autres les bornes choisies pour les intervalles de variation des paramètres candidats. L'analyse des effets élémentaires à l'ordre 2 ne semble informative que pour les paramètres dont le comportement à l'ordre 1 peut être considéré comme fortement non linéaire. Compte tenu des choix de modélisation pour le modèle de thermique (chapitre 2), le calcul de ces effets n'est pas adapté au cadre de cette étude.

L'analyse de sensibilité et en particulier la méthode de *Morris* a été également régulièrement utilisée pour identifier les variables les plus influentes sur les consommations annuelles de maisons labellisées *BBC*. Cette première analyse permet ensuite de conduire une analyse plus fine (par exemple par la méthode de Sobol) en ne gardant que les paramètres les plus influents sur la sortie identifiée par la méthode du *screening* choisie. On pourra par exemple

se référer à [176], [161], ou [19] pour plus de détails.

Enfin, dans un cadre très similaire à celui de ce travail, à savoir l'évaluation d'effacements de consommation diffus, Da Silva [37] a conduit une analyse de sensibilité locale sur la base d'indicateurs d'effacements similaires à ceux proposés dans ce chapitre, incluant 11 variables d'intérêts et 4 types de maisons individuelles (relatives à 4 périodes constructives). Parmi les 11 variables envisagées, 4 ont été identifiées comme étant les plus influentes : le coefficient d'échange convectif intérieur, la capacité du *noeud d'air*, le débit de ventilation et les gains internes. Ces résultats ont permis de souligner la prépondérance de la dynamique de l'air par rapport à celle des parois lourdes lors des effacements. Suivant la même méthode Katipamula [91] a proposé d'évaluer 4 stratégies d'effacement (pilotage de systèmes de climatisations résidentielles, les stratégies sont équivalentes à celles proposées dans la partie 4.3.5 avec une phase de contrôle de 2h ou 6h) sur un ensemble de systèmes (modèle thermique simplifié type R_2C_2 , modélisation de la régulation des systèmes de climatisation par des régulateurs *TOR*) définis par 6 variables d'intérêts (surface habitable, coefficient d'échange global UA , capacité équivalente C , largeur de la bande morte du thermostat, puissance installée). Seuls les résultats moyens des ensembles de consommateurs sont présentés, ils permettent de mettre en exergue l'influence de la stratégie d'effacement sur les indicateurs liés à l'effacement (dont notamment l'effet rebond dans le cas d'un signal *ON/OFF* synchrone pour l'ensemble des ménages). Une analyse similaire sera proposée dans la seconde partie du chapitre.

Nous avons synthétisé les résultats des criblages de *Morris* des études issues de l'analyse bibliographique dans le tableau A.1 de l'annexe A.1. Ce tableau montre qu'une dizaine de paramètres parmi ceux nécessaires à la description d'un ensemble {bâti-occupants} ont le plus d'influence sur des indicateurs annuels tels que le confort ou les besoins énergétiques. Dans [184], 12 paramètres expliquent 94% de la variabilité de la sortie du modèle (indicateur de confort pour les besoins annuels en refroidissement). En ce qui concerne l'évaluation des effacements, on peut s'attendre à retrouver certains des paramètres déjà identifiés bien que dans le cas d'étude, la sortie (ou variable d'intérêt) est une image de la dynamique rapide du système régulé.

4.2 Analyse paramétrique pour l'effacement

On restreint l'étude au cas de maisons individuelles isolées (non mitoyennes) et on se donne deux maisons de référence, l'une *plutôt ancienne* et l'autre de type *récent*, en se basant sur les données des différentes réglementations thermiques. La maison ancienne est définie par

Tableau 4.1 Paramètres géométriques de référence des bâtis étudiés

Description géométrique	
Maison individuelle isolée, une seule zone thermique	
Localisation	$lat = 4.7108^\circ$, $long = 45.5723^\circ$
Surfaces	$S_{hab} = 100\ m^2$ Rapport d’élongation : $e = 1.57$ Hauteur sous plafond : $h = 3\ m$ Toit double pente : $\theta = \pi/4$
Surfaces vitrées	20 % de la surface verticale Fenêtres équiréparties sur les 2 côtés <i>longs</i>

rapport à la *RT75* tandis que la maison plutôt récente est supposée avoir été construite à la fin des années 90 (*RT89*) : ainsi on définit des caractéristiques constructives typiques de ces deux périodes.

Si on raisonne en besoin, on obtient pour chaque cas une évaluation en énergie des besoins de chauffage qui est cohérente avec les valeurs connues pour ce type de logement, ce qui nous assure que la diversité des caractéristiques constructives simulée est réaliste (voir figure 4.2.5 où nous avons représenté la distribution des consommations énergétiques annuelles de l’usage chauffage issues du criblage de *Morris*). Les détails sont donnés dans le paragraphe suivant : description des bâtis, des scénarios d’occupation, et des sollicitations extérieures (température extérieure, flux solaires).

Cette première étape réalisée, on détaille ensuite les quatre catégories de paramètres dont on souhaite étudier l’influence sur les indicateurs liés à l’effacement (partie 4.2.3).

4.2.1 Hypothèses pour la construction des modèles de bâti de référence

On considère une maison individuelle isolée de $100\ m^2$, constituée d’une seule zone thermique, occupée par un ménage de trois individus. Le tableau 4.1 regroupe l’ensemble des détails liés à la description de la géométrie du bâti de référence. Les paramètres des différentes couches constituant les parois sont donnés dans le tableaux 4.2 et les détails dans l’annexe A.2. Le modèle utilisé pour la simulation de la maison est celui décrit dans le chapitre 2.

Tableau 4.2 Coefficients d'échanges globaux ($Wm^{-2}K^{-1}$) pour les bâtis de référence

Période constructive type	RT75	RT89
Murs extérieurs	$U = 0.92$	$U = 0.54$
Parois vitrées	$U = 5.78$	$U = 3.2$
Plancher bas	$U = 0.86$	$U = 0.38$
Plancher intérieur	$U = 0.82$	$U = 0.63$
Toiture	$U = 0.38$	$U = 0.24$

4.2.2 Hypothèses sur le choix des sollicitations extérieures

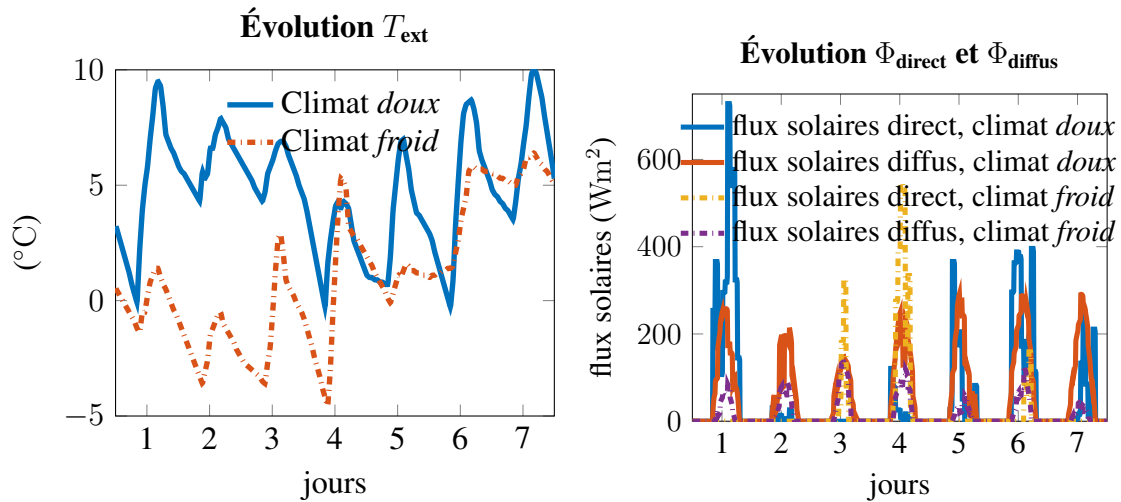
On choisit de simuler une saison de chauffe. Partant d'un état d'équilibre du système au début de la simulation, lequel est atteint en considérant des sollicitations extérieures constantes durant la phase d'initialisation (flux solaires nuls, température extérieure et consigne constante, absence de gains internes), on simule 22 semaines de chauffe correspondant à la période hivernale, au cours desquelles on définit x jours avec évènement d'effacement.

Pour cette première analyse, un seul type d'effacement est considéré, il s'agit d'un effacement d'une heure, débutant à 19h. L'ordre d'effacement est un signal tout ou rien, ainsi l'envoi de l'ordre a pour effet de couper l'ensemble des systèmes de chauffage du bâtiment. Compte tenu des choix de modélisation - le bâtiment n'est constitué ici que d'une seule zone thermique - il n'est pas possible d'étudier le cas où seule une partie des appareils de chauffage serait pilotée à distance.

Données pour le climat Les données sont issues de *meteonorm*². Nous avons choisi une température extérieure et des flux solaires moyennés sur un historique de 10 ans au niveau des stations météorologiques disponibles. Les données utilisées dans la suite sont issues de la station de Lyon, elles ont été interpolées à partir des données météoFrance à 10 minutes en utilisant le logiciel *meteonorm*, puis au pas de la simulation par la méthode des splines, conformément au choix effectué dans le logiciel. Les sollicitations sont ensuite projetées sur chaque paroi de chaque bâtiment comme détaillé au chapitre 2. Un exemple de données pour deux semaines (non consécutives) sont représentées sur les figures 4.2.1a et 4.2.1b.

Scénarios de consigne et scénarios de présence

²<http://www.meteonorm.com/>



(a) Exemple de séries temporelles climatiques (T_{ext}) (b) Exemple de séries temporelles climatiques (flux solaires directs et diffus)

Figure 4.2.1 Sollicitations liées aux conditions climatiques dans le cas de référence

Scénario de consigne Pour simplifier l'étude, on considère le scénario conventionnel de la réglementation thermique comme scénario de présence de référence. On note pour la suite $t_{relance}$ l'heure en fin d'après-midi à partir de laquelle à lieu la relance et $t_{d,red}$ l'heure de retour à la consigne de confort dans le cas où le scénario de consigne est composé de deux niveaux : l'un pour le cas où les individus sont présents et actifs dans le logement - la consigne de température, dite température de confort, associée est notée T_c dans la suite du document - et l'autre lorsque le ménage est absent ou dans l'état de sommeil. Ce second niveau peut être soit un réduit de i_r °C par rapport à la température de confort, noté $T_r = T_c - i_r$, soit correspondre à la coupure des systèmes de chauffage c'est-à-dire à l'évolution libre du système {bâti}. Nous avons représenté les scénarios de consigne et relatifs aux apports internes issus de la réglementation thermique sur les figures 4.2.2 et 4.2.3. Les paramètres pour les jours avec ordre d'effacement (jours de semaine hors mercredi) sont $t_{relance} = 17h$, $t_{d,red} = 10h$, $T_c = 19$ °C, $i_r = 3$ °C. Le cas échéant, les paramètres sont indiqués sur la figure pour les autres jours. On détaille dans la section 4.2.3 les paramètres d'intérêt et leur plage de variation retenus pour l'analyse.

Scénario de présence et apports internes Conformément au choix pour le scénario de consigne, le modèle de présence de référence pour cette section est le scénario conventionnel de la RT (figure 4.2.2). Ce scénario de consigne déterministe simule le cas d'un ménage où l'ensemble des individus quitte le logement, y revient et va se coucher à la même heure, suivant deux types de journée (jours ouvrés, week-end). Le scénario de consigne est

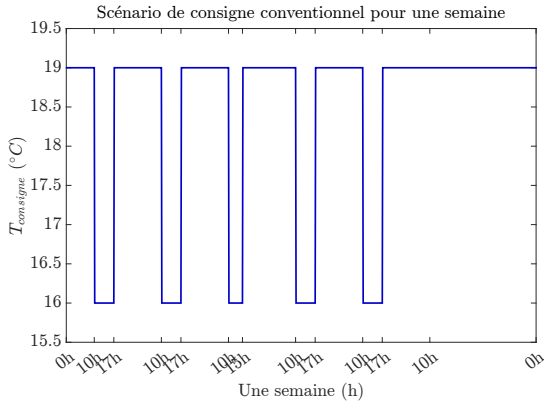


Figure 4.2.2 Scénario conventionnel issu de la RT pour la consigne

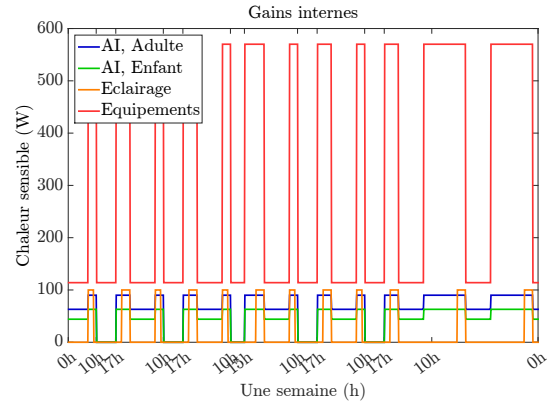


Figure 4.2.3 Scénarios conventionnels issus de la RT pour les apports internes

une image directe sur la consigne de ce scénario. Les mêmes notations qu’au paragraphe précédent sont donc adoptées.

On appelle $AI_{rt}(t)$ les apports internes totaux dans la zone issus du calcul de la RT avec le logement et le type de ménage sélectionnés. Ils résultent de la somme de plusieurs sources d’apports internes (représentés selon le schéma conventionnel sur la figure 4.2.3) : apports internes dus aux occupants AI_{occ} , aux équipements hors éclairage AI_{eq} et ceux dus à l’éclairage artificiel AI_{lu} . Compte tenu des hypothèses conventionnelles pour le calcul de ces gains, cette variable est à valeurs discrètes, et on note α_{AI} un coefficient de pondération de AI_{rt} (voir partie 4.2.3). Les gains internes $AI(t)$ sont donc définis par :

$$AI = \alpha_{AI} AI_{rt} = \alpha_{AI} (AI_{occ} + AI_{eq} + AI_{lu})$$

On notera qu’en pratique les apports dus aux équipements et à l’éclairage artificiel sont directement liés à l’occupation et aux activités dans le logement et donc à AI_{occ} (fonction de la présence dans le logement).

4.2.3 Définition des variables d’intérêt

Compte tenu de la littérature existante (section 4.1.2) et des différents types de signaux d’entrée du modèle global, nous avons retenu quatre catégories de paramètres :

1. Paramètres liés aux sollicitations extérieures
2. Paramètres liés aux modes d’occupation et aux modes de gestion du chauffage
3. Paramètres liés à la description physique des bâtis

4. Paramètres liés au choix des systèmes de chauffage

La synthèse de la revue de la section 4.1.2 a permis d'identifier un premier jeu de variables candidates parmi les nombreux paramètres nécessaires pour la construction du système ainsi que le domaine de variation de ces variables. Ces variables sont reproduites dans les tableaux de l'annexe A.3. Au total, 48 variables ont été sélectionnées pour l'évaluation. Afin de réduire le nombre de variables à étudier et s'assurer du réalisme des systèmes construits, certaines variables sont communes à plusieurs éléments (par exemple les coefficients d'échanges convectifs sont les mêmes sur l'ensemble des parois ayant les mêmes caractéristiques). On notera que la variabilité des paramètres peut être associée à plusieurs phénomènes (diversité, incertitude, approximation liée au modèle, ...) qu'on ne cherche ni à analyser, ni à quantifier, l'objectif étant d'évaluer les effets d'effacements de consommation sur des courbes de charges réalistes et donc pour cela de caractériser la sensibilité des indicateurs d'effacements aux différents paramètres.

Sollicitations extérieures - données liées au climat Afin de lisser les évaluations, chaque indicateur est moyenné sur un ensemble de jours avec signal d'effacement. On simule une saison de chauffe allant du 30 octobre au 1er avril (soit 22 semaines complètes), dont le premier jour est un lundi. On retient 22 jours avec effacement au cours de la saison en excluant les jours de week-end et en sélectionnant les jours où la température extérieure moyenne entre 15h et minuit est la plus faible. La conséquence de ce choix simpliste des jours avec signal d'effacement est la proximité entre ces jours³ (voir les détails dans l'annexe ??).

On limite artificiellement la période d'évolution du recouvrement en fixant une borne supérieure t_{max} correspondant à la date de début de contrôle du jour $i + 1$ pour le calcul de la durée $\tau_{i,\infty}$ théorique du recouvrement du jour i . Si l'ensemble des effacements sont du type (1 h, 19 h), sans stratégie de pré-contrôle, alors la durée maximale théorique de la phase de recouvrement est de 23 h.

Afin de tenir compte de manière extrêmement simplifiée des masques solaires, on note α_Φ un coefficient de réduction des flux solaires (le coefficient étant unique, il est le même pour toutes les parois). En outre, pour chaque variante proposée, on suppose que la température

³Une autre possibilité aurait pu être de choisir, à partir du scénario de référence, les jours où la consommation *le soir* est la plus importante, toutefois, compte tenu des modèles (présence et thermique), cette variante introduit peu d'écart par rapport à l'approche adoptée

Tableau 4.3 Paramètres d'intérêt des scénarios de présence et consigne pour l'analyse et bornes de variations éventuelles

Paramètre	Variable	Borne min	Borne max
Consigne	T_c	19 °C	22 °C
Réduit	i_r	2	-
Instant relance soir	$t_{relance}$	17 h	20h
Instant réduit matin	$t_{réduit}$	10h	-
Pondération AI	α_{AI}	0.8	1.2

extérieure locale peut varier de $\pm 1K$ par rapport à la température de la station météo [176].

Pour une analyse détaillée de l'influence des sollicitations extérieures et une étude de cas portant sur une maison individuelle labellisée *BBC*, on pourra se reporter à [67].

Scénario de consigne et de présence Pour étudier l'influence de la dynamique des occupants sur les indicateurs d'effacement, au vu de l'analyse bibliographique (section 4.1.2) et du choix du modèle de gestion de la consigne de référence, les paramètres dont on étudie l'influence sont reproduits dans le tableau 4.3 dans lequel leur domaine de variation est également précisé (si le paramètre est inclus dans le criblage, autrement, la valeur de référence est donnée). Étant donné que la seule stratégie d'effacement proposée dans cette première étude est une coupure simple et que le niveau de la consigne est inclus dans les paramètres du criblage, le réduit i_r est fixé à 2°C.

On notera que l'effet de $t_{relance}$ a un impact direct sur deux séries temporelles : celle de la consigne et celle des gains internes. On a en effet supposé que l'ensemble des activités des individus sont synchrones, et que les heures de changement de consigne correspondent aux heures de changement d'activité. La figure 4.2.4 synthétise ces hypothèses. Les domaines hachurés sur la figure correspondent aux domaines d'évolution possibles des séries compte tenu des valeurs dans le tableau 4.3.

Paramètres liés au bâti Les paramètres d'intérêt identifiés sont relatifs aux caractéristiques thermiques des parois opaques (isolants,...), des parois vitrées, aux coefficients d'échanges convectifs linéarisés, à la dynamique de l'air... Ces paramètres sont détaillés dans le tableau A.4 de l'annexe A.3.

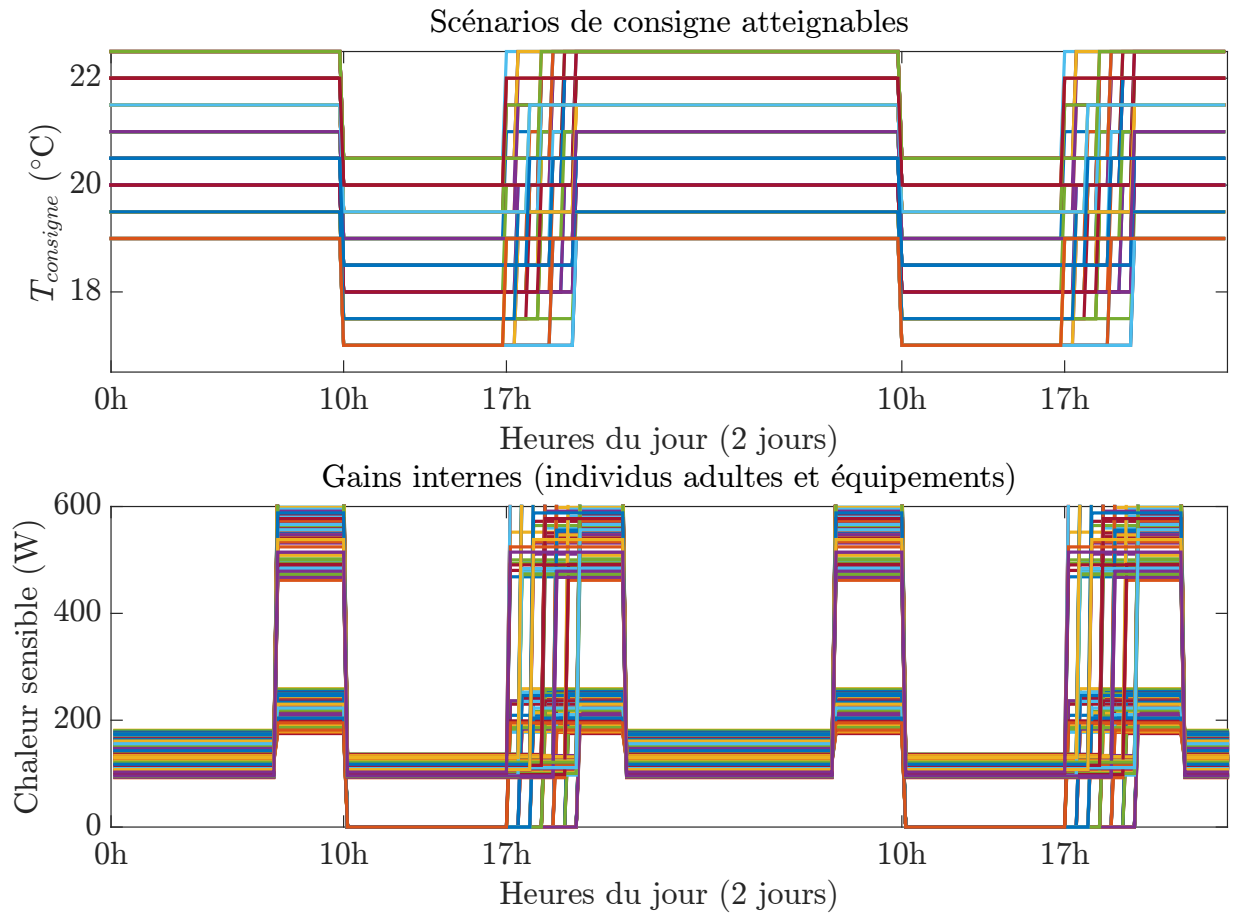


Figure 4.2.4 Synthèse des scénarios de consigne et gains internes possibles

Paramètres liés aux systèmes Au vu des modèles de systèmes choisis au chapitre 2, la diversité technique est issue du type de corps de chauffe (radiateur ou convecteur), du type de régulation du système et du choix de dimensionnement. On rappelle qu'on ne modélise que des régulateurs de type *TOR* et on introduit un paramètre lié à l'amplitude de la bande morte. Enfin, on ajoute un coefficient de pondération de la puissance de chauffe installée $P_{\max}$ noté α_{rel} . L'utilisation de ce coefficient permet de prendre en compte de façon simplifiée plusieurs sources de diversité : les cas de sur - voire - sous dimensionnement des systèmes, l'incertitude liées aux hypothèses de simulation (une seule zone thermique chauffée par un unique système). Les paramètres d'intérêt identifiés et leur domaine de variation sont reproduits dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Paramètres d'intérêt pour les systèmes de chauffage et bornes associées

Paramètre	Variable	Borne min	Borne max
Type émetteur	α_{rad}	0.05	0.5
Régulation TOR : Bande Morte	BM	0.25 K	1 K
Facteur de puissance	α_{rel}	0.8	1.2

4.2.4 Approche retenue

On cherche à étudier l'influence de 48 variables continues pour 2 périodes constructives en simulant 22 jours avec évènement au cours d'une saison de chauffe. Pour chaque cas, on représente l'influence sur 4 indicateurs de sortie introduits au chapitre précédent :

- l'énergie non consommée $E_{nc} = E_{p2} - E_{p3}$ (kWh) (avec le signal d'effacement choisi pour cette partie, $E_{p1} = 0$)
- le report théorique $R_{\%} = \frac{E_{p1} + E_{p3}}{E_{p2}}$ ($E_{p1} = 0$)
- le temps à pleine puissance t_{pp} (h)
- les degré-heures d'inconfort DH (°C.h)

La méthode de *Morris* est appliquée au système et les effets élémentaires sont évalués à l'ordre 1. La méthode est par exemple décrite dans [27, 62, 85]. On caractérise l'influence de chaque variable par le tracé des graphiques $\{\mu_k^*, \sigma_k\}$, où μ_k^* désigne la moyenne absolue de l'effet élémentaire de la variable d'entrée k et σ_k l'écart-type des effets élémentaires liés à la variable k .

Pour chaque variable k , le graphique $\{\mu_k^*, \sigma_k\}$ permet de classer les variables en trois catégories [27, 85] :

- celles ayant des effets négligeables
- celles ayant des effets linéaires et sans interaction
- celles ayant des effets non linéaires et/ou avec interaction

Les paramètres choisis sont donnés dans le tableau 4.5. L'implémentation a été effectuée en reprenant les travaux et les codes de calculs développés dans le cadre d'un projet européen

Tableau 4.5 Paramètres choisis pour le criblage de Morris

Paramètre	Nom	Valeur
Nombre de paramètres étudiés	k	48
Nombre de trajectoires	r	10
Nombre de niveaux	p	8
Pas	Δ	$\Delta = \frac{p}{2(p-1)}$

au *Joint Research Centre*⁴. L’interprétation des graphiques reprend les travaux de [34], [62].

4.2.5 Résultats de l’analyse paramétrique

4.2.5.1 Sensibilité des consommations énergétiques annuelles pour l’usage chauffage

Les consommations surfaciques annuelles des ensembles {bâtis-systèmes-ménages} calculées avec les paramètres de référence et la construction de $r = 10$ trajectoires en faisant varier les 48 paramètres inclus (selon les 4 catégories définies dans la section 4.2.3) dans l’analyse de *Morris* sont représentées sur la figure 4.2.5 pour les deux types de bâtiments représentés.

En considérant comme fonction de sortie la consommation énergétique surfacique pour l’usage chauffage sur une saison hivernale, les paramètres d’influences issus du criblage de *Morris* identifiés en traçant le graphique (μ^*, σ) sont cohérents avec les paramètres identifiés dans la littérature (figure 4.2.6). On retrouve notamment l’importance des paramètres liés aux scénarios d’occupation (température de consigne, paramètres liés à la gestion dynamique des systèmes (i.e *consigne avec réduit*)) et aux caractéristiques des couches isolantes des parois.

⁴<https://ec.europa.eu/jrc/en/samo>

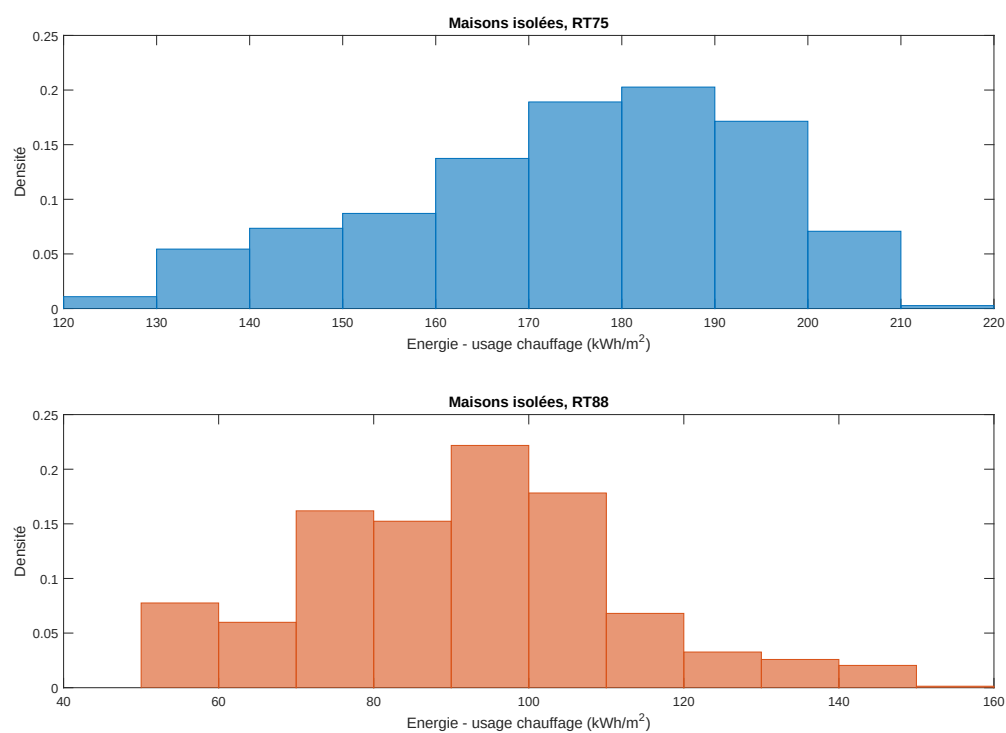


Figure 4.2.5 Distributions des consommations énergétiques annuelles surfaciques des systèmes simulés pour l'analyse de *Morris*

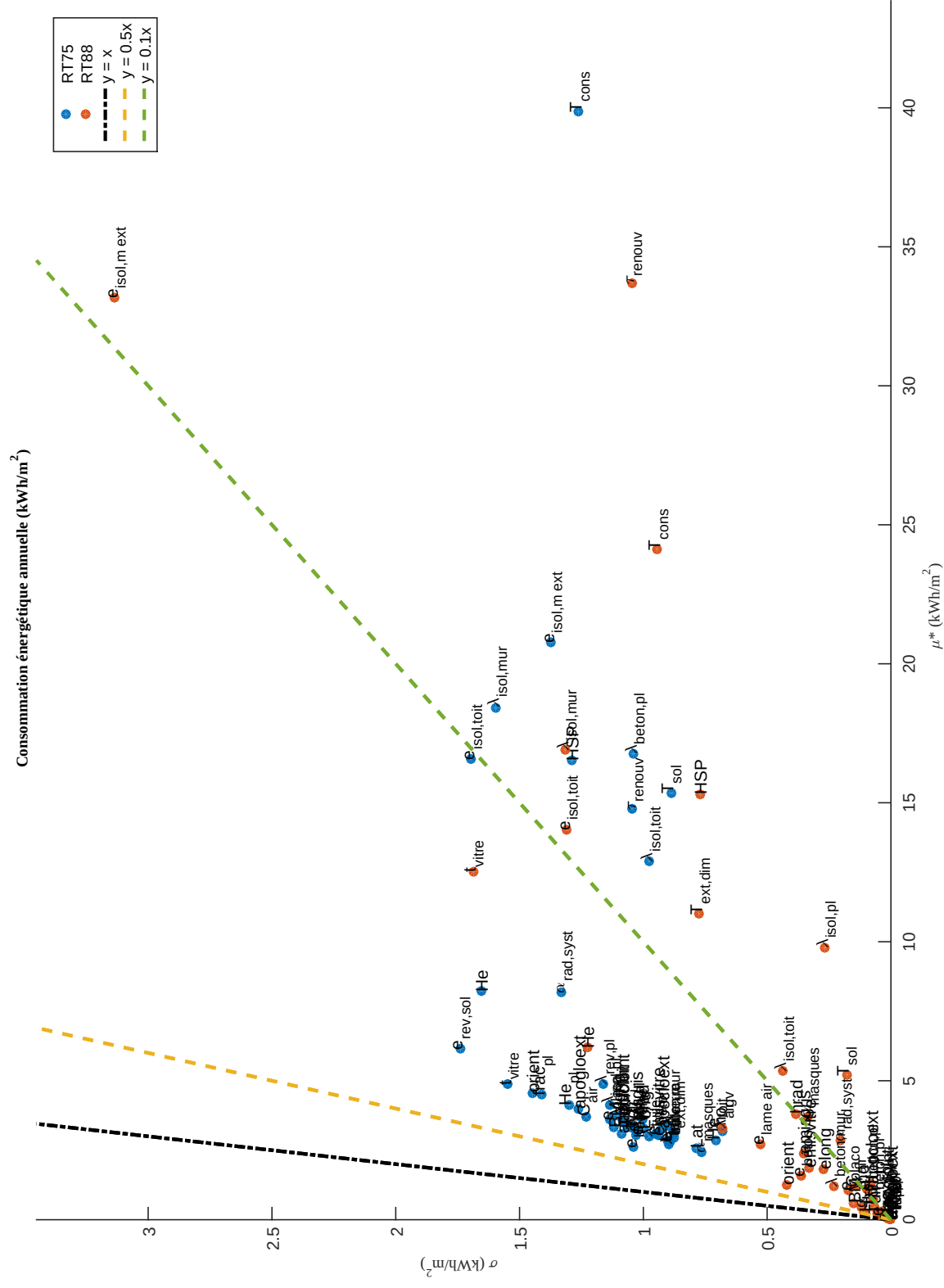


Figure 4.2.6 Graphique (μ^* , σ) lorsque le critère d'évaluation est la consommation énergétique annuelle pour l'usage chauffage

4.2.5.2 Évaluation selon les indicateurs caractérisant les effacements

Les résultats obtenus pour les 4 indicateurs choisis avec les maisons individuelles de type *ancienne* et *récente* sont représentés sur la figure 4.2.7. Sur chaque figure, la première bissectrice ainsi que les droites $\sigma = 0.5\mu^*$ et $\sigma = 0.1\mu^*$ sont tracées pour faciliter la lecture. Chaque point est relatif à l'une des variables étudiées (la correspondance des noms est donnée dans le tableau A.4 de l'annexe A.3). A titre indicatif, on a tracé les distributions de chaque indicateur pour l'ensemble des simulations sur la figure 4.2.8, ainsi que les évolutions de la puissance moyenne appelée et de la température moyenne pour l'ensemble des systèmes simulés sur la figure 4.2.9, et ce pour les deux types de bâtis (récent, ancien).

Les distributions représentées sur la figure 4.2.8 montrent l'influence des caractéristiques constructives sur les effacements : pour les logements les plus anciens et donc les plus déperditifs, les économies sont plus importantes et le report généralement plus faible par rapport à des logements les plus récents.

On pourra noter un effet de saturation important des systèmes dans le cas des logements de type *RT75*. Ce phénomène est dû au choix de dimensionnement des systèmes.

On peut voir à partir de la figure 4.2.9 que la définition du scénario de consigne influe sur la forme de la courbe de charge modélisée (trois jours sont de type *mercredi* où le changement de consigne du soir se produit plus tôt que les autres jours) ainsi que sur l'évolution de la température moyenne dans le logement, ce qui met en évidence la prépondérance des hypothèses liées aux scénarios de gestion sur l'évaluation des effacements et montre donc l'influence de ces hypothèses dans le cas où les évaluations sont réalisées sur un ensemble de consommateurs.

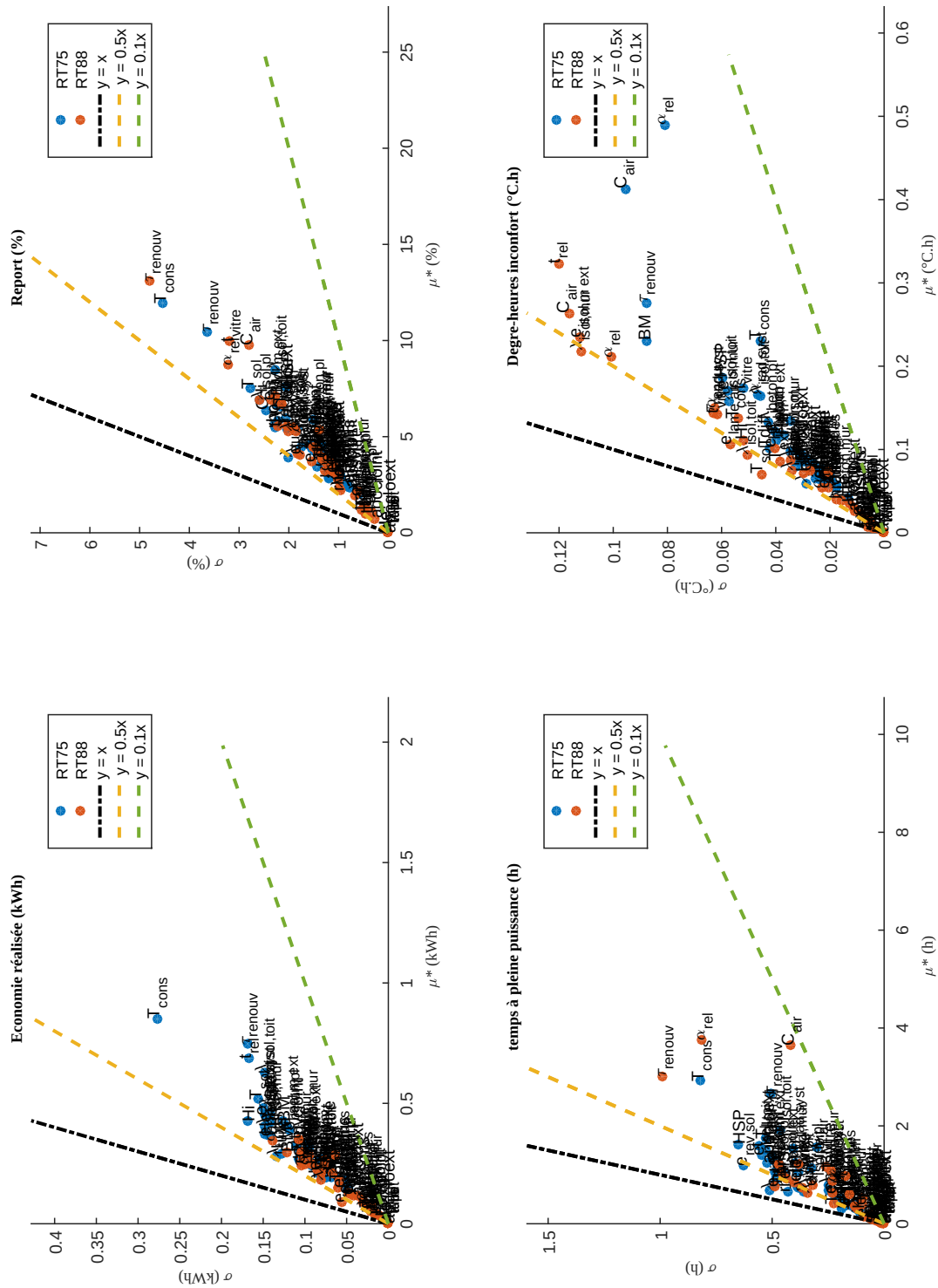


Figure 4.2.7 Résultat du criblage de Morris, indicateurs moyens sur les 22 effacements, systèmes avec une régulation TOR, deux périodes constructives type

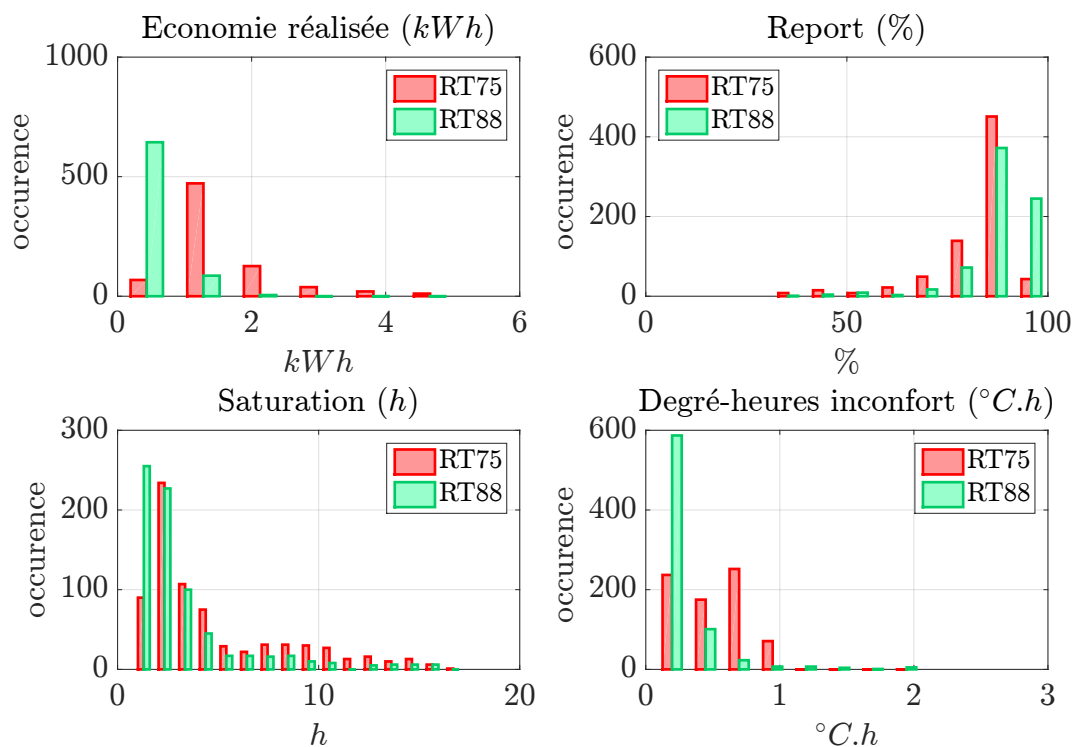


Figure 4.2.8 Distribution des indicateurs de sortie compte tenu des hypothèses de l'étude paramétrique

4.2.6 Synthèse du criblage de *Morris*

On retrouve des variables similaires à celles des évaluations en besoin de chauffage présentées dans la section 4.1.2. Pour les variables relatives aux matériaux, on retiendra notamment l'importance de l'épaisseur des couches d'isolant et l'épaisseur du matériau lourd pour les parois opaques.

L'évaluation portant sur des dynamiques de type *relance*, on retrouve parmi les paramètres d'influence ceux relatifs à la dynamique de l'air : la capacité du *noeud d'air de la zone thermique*, le taux de renouvellement d'air.

Enfin, les paramètres liés au scénario d'occupation sont déterminants. Dans le cas le plus défavorable pour ce qui est du potentiel d'effacement, le changement de consigne se produit durant la phase d'effacement, ce qui conduit, compte tenu des hypothèses, en particulier celle sur le scénario de référence, à une dégradation de l'ensemble des indicateurs. A contrario, dans le cas le plus favorable, le changement de consigne s'assimile à une "phase de pré-chauffe" du bâtiment et pour un bâtiment plutôt récent l'évolution de température

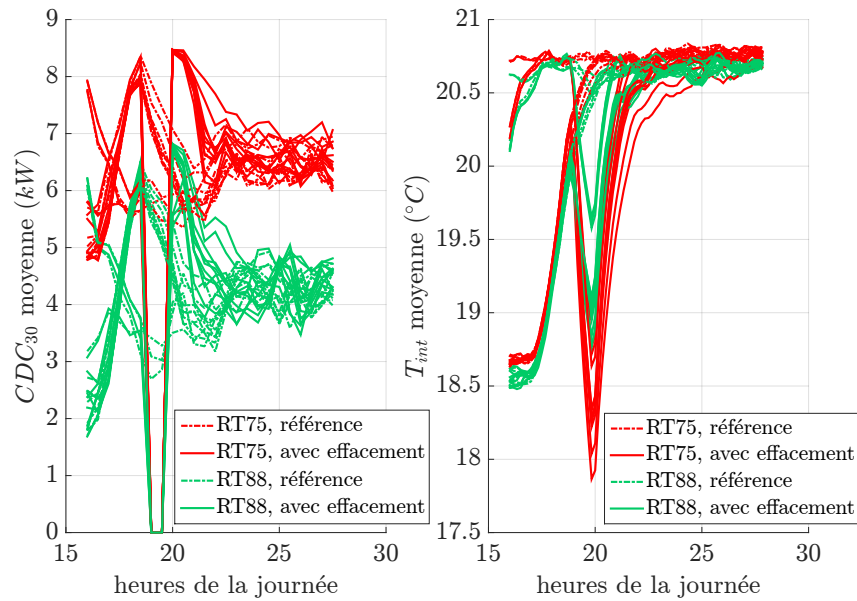


Figure 4.2.9 Évolution de la courbe de charge moyenne et de la température intérieure moyenne pour les 22 jours avec effacement

dans la zone thermique est suffisamment lente pour que l'effacement soit peu impactant. Du point de vue de l'aggrégateur, la puissance effacée dans ce cas est cependant très limitée.

Les paramètres identifiés comme les plus influents à l'issue de l'analyse sont répertoriés dans le tableau 4.6 (il n'y a pas de hiérarchie des paramètres).

Afin de proposer une première évaluation de l'influence de ces paramètres sur les effacements réalisés, on construit pour chaque période constructive des bâtiments types (inertie lourde, inertie légère), ce qui permet d'illustrer la sensibilité des effacements réalisés aux paramètres identifiés comme les plus influents (tableau 4.6) en limitant le nombre de simulations nécessaires. A partir du scénario de gestion conventionnel de la *RT*, le criblage de *Morris* montre que les paramètres caractéristiques de ce scénario sont des variables ayant une forte influence sur les indicateurs caractérisant un effacement. Ainsi, on propose dans la seconde partie de ce chapitre de caractériser plus précisément, à l'aide d'études de cas, l'influence des hypothèses relatives aux ménages sur des effacements réalisés sur un ensemble de consommateurs (systèmes {bâti - systèmes - ménages}). La proposition de scénario dynamique rend les heures de la journée non équivalentes pour le potentiel d'effacement

Tableau 4.6 Paramètres les plus influents issus criblage de *Morris*

Nom	Paramètre	Économie	Report	tpp	DH
Température de consigne	T_{cons}	✓	✓	✓	✓
Instant relance soir	t_{relance}	✓	✓	✓	✓
Facteur de dimensionnement des systèmes	α_{rel}	✓	✓	✓	✓
Bande morte du thermostat	BM	✓	✓		
Taux de renouvellement d'air	τ_{renouv}	✓	✓	✓	✓
Épaisseur des couches d'isolant	$e_{\text{ep, iso}}$	✓	✓	✓	✓
Épaisseur de la paroi lourde des murs extérieurs	$e_{\text{ep, béton}}$	✓	✓		
Taux de vitrage	τ_{vitre}	✓	✓		
Forme du bâti	élongation, orientation, HSP			✓	✓

agrégé : ainsi plusieurs heures de début d'effacement sont envisagées.

Enfin, on considère plusieurs stratégies de contrôle, définies dans la section 4.3.5 permettant de rendre compte de l'effet du pilotage sur les effacements réalisés.

4.3 Influence de la diversité comportementale sur quelques effacements types

Dans la première partie de ce chapitre, pour simplifier l'étude, nous avons considéré un coefficient d'apports internes moyen pour chaque ménage. De plus, nous avons supposé l'unicité du scénario de consigne pour chaque ménage. Or le criblage de *Morris* a permis de montrer que les paramètres caractérisant ces scénarios sont des paramètres d'influence pour les indicateurs d'effacement étudiés, ce qui justifie de la nécessité de mieux les modéliser, c'est-à-dire reproduire au mieux la diversité d'origine comportementale dans le modèle de simulation thermique.

L'étude bibliographique de la section 1.2.1 du chapitre 1 nous a permis de montrer la difficulté de caractériser les modes de gestion du chauffage des ménages. Notamment, on retient la difficulté de définir :

- La distribution des températures de consigne dans le logement

- La nécessité de distinguer ou non différentes zones dans le logement (et dans ce cas, envisager l'adaptation du modèle afin de tenir compte de températures différenciées suivant les pièces du logement)
- L'existence ou non de plusieurs modes de gestion type : scénario avec consigne constante, avec plusieurs consignes (à préciser), avec coupure des systèmes, mixte (réduit et coupure)
- Les distributions de ces scénarios dans le parc et donc indirectement la caractérisation des ménages associés à ces scénarios

Dans cette partie, on propose d'évaluer le potentiel d'effacement pour plusieurs séries de ménages dont les modes de gestion sont différenciés. Pour cela, on se donne 3 types de scénarios et, pour une série donnée, on suppose que l'ensemble des ménages utilisent le même type de scénario choisi parmi :

1. Scénario avec réduit
2. Scénario avec coupure
3. Scénario mixte

On envisage 3 modèles d'occupation, permettant de construire 3 scénarios de gestion de la consigne par les ménages. Le premier est un modèle statique⁵ et construit à partir du scénario conventionnel défini dans les *RT* (la référence choisie est le scénario décrit dans la *RT2012*).

Le second scénario, qualifié de *profilé*, est construit en supposant que la distribution des instants de relance suit une loi uniforme dont on définit les paramètres dans la partie 4.3.1.2.

Le dernier modèle constitue un scénario dynamique construit de manière simplifiée à partir de l'exploitation de l'enquête emploi du temps 2010 de l'*INSEE* [*INSEE2010*] (voir section 4.3.1.3). À partir de ces trois scénarios, on illustre la déformation de la demande agrégée pour l'usage chauffage dans la partie 4.3.4.

On considère des bâtis typiques des périodes constructives *RT75* et *RT89* dont les paramètres géométriques sont ceux définis dans la partie 4.2.1. Les caractéristiques constructives globales de ces bâtiments sont données dans le tableau 4.7 (les paramètres détaillés sont détaillés dans l'annexe A.2).

⁵Statique ici dans le sens où il s'agit d'un scénario périodique (hebdomadaire), qui est le même pour l'ensemble des ménages

Tableau 4.7 Coefficients d'échanges globaux ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}$) pour les bâtis types étudiés

Période constructive type	<i>RT75</i>	<i>RT75</i>	<i>RT89</i>	<i>RT89</i>
Type d'inertie	légère	lourde	légère	lourde
Murs extérieurs	$U = 0.92$	$U = 0.92$	$U = 0.54$	$U = 0.54$
Parois vitrées	$U = 5.78$	$U = 3.2$	$U = 3.2$	$U = 3.2$
Plancher bas	$U = 0.86$	$U = 0.86$	$U = 0.38$	$U = 0.38$
Plancher intérieur	$U = 0.82$	$U = 0.82$	$U = 0.63$	$U = 0.63$
Toiture	$U = 3.8$	$U = 0.38$	$U = 1.83$	$U = 0.24$

Pour la typologie *inertie légère*, la couche d'isolant des murs extérieurs est placée côté intérieur, pour le cas de l'*inertie lourde*, la couche d'isolant est placée côté extérieur. Les épaisseurs d'isolant sont les mêmes quelque soit le type pour une période constructive donnée. Dans le cas de l'*inertie légère*, la toiture est supposée non isolée.

Pour les paramètres liés à la dynamique de l'air, nous avons fixé $C_{\text{noeud,air}} = 10C_{\text{air}}$ et $\tau_{\text{renouv}} = 0.6 \text{ vol.h}^{-1}$ dans le bâti type *RT75*, $\tau_{\text{renouv}} = 0.4 \text{ vol.h}^{-1}$ dans le bâti type *RT89*.

4.3.1 Construction de scénarios de présence

On suppose que chaque logement (ensemble {bâti - systèmes de chauffage }) est occupé par des ménages composés d'individus de types *adultes* (1 ou 2 par logement) et *enfants* qui gèrent les consignes des systèmes (modèle simple de pilotage des systèmes par les occupants) et qui effectuent des activités auxquelles on associera des apports internes (liés à l'activité de l'individu et aux dégagements de chaleur associés aux équipements requis pour les activités). Dans les 3 sous-parties qui suivent, on donne les différents modèles de présence. Ces modèles permettent ensuite de construire les scénarios de consigne (partie 4.3.2 et d'évaluer les apports internes (agrégés pour l'ensemble des sources modélisées) dans la partie 4.3.3.

4.3.1.1 Scénario conventionnel

Il s'agit du scénario défini pour une semaine (distinction de 3 types de jours : semaine hors mercredi, mercredi, week-end) dans la section 4.2.2.

4.3.1.2 Scénario profilé

Dans le cas de ce scénario, on raisonne au niveau des ménages, on se place dans le cas limite où les 3 états de présence des individus d'un même ménage sont parfaitement synchrones. Les 3 états considérés sont : présence active - *PA*, présence au repos - *PR* - et absence - *AB*. On suppose que :

- L'heure de passage de l'état *présent, actif (PA)* à l'état *présent, repos (PR)* $t_{PA \rightarrow PR}$ suit une loi uniforme : $t_{PA \rightarrow PR} \sim \mathcal{U}[22, 23]$ (h)
- L'instant de retour au domicile le soir et donc l'instant de relance des systèmes t_{rel} du soir suit une loi uniforme : $t_{rel} \sim \mathcal{U}[17, 19]$ (h)
- L'instant de passage de *repos* à *actif* le matin et donc l'instant de relance du matin $t_{réduit}$ suit une loi uniforme : $t_{réduit} \sim \mathcal{U}[7, 10]$ (h)

Ces hypothèses reviennent à construire un scénario de gestion agrégé dans lequel les instants de changements de consigne sont des rampes dont la pente est donnée par les bornes extrêmes des lois.

4.3.1.3 Scénario dynamique

Les simulations se font dans ce cas au niveau individuel, en supposant que les instants de changement d'état de présence des individus ne dépendent que de l'appartenance à un type prédéfini d'individus et de ménage. Ainsi le changement d'état d'un individu n'influe pas directement sur le changement d'état d'un autre individu du ménage (avec un aménagement pour les individus de type *enfant* qui est détaillé dans la suite).

Caractérisation des individus On utilise les données issues de l'enquête Emploi Du Temps de 2010 [INSEE2010] pour construire des scénarios de présence pour chaque individu d'un ménage donné. Ces scénarios peuvent comprendre 2 états (présent au domicile et absent) ou 3 (présent et actif (*PA*), présent et au repos (*PR*), absent (*AB*)). Dans la suite, on considère que les scénarios comportent 3 états (notés respectivement *PA*, *PR* et *AB*), ce qui permet d'exploiter le modèle de présence sans avoir besoin d'un modèle d'activité associé pour la simulation thermique.

On propose dans un premier temps de construire des ménages types en se basant sur un choix *a priori* de variables explicatives. Ce choix sera rediscuté dans l'annexe D.

En exploitant l'enquête emploi du temps belge de 2005 Aerts [6] a identifié 3 caractéristiques

des individus comme variables explicatives de 7 profils d'occupation : *le type d'emploi, le jour de la semaine, l'âge de l'individu*. Les profils d'occupation sont identifiés à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique effectuée en utilisant la similarité de *Levenshtein* (la méthode est détaillée dans l'annexe D).

Afin de proposer une première évaluation de l'influence des modes de gestion sur les produits d'effacement réalisés, on propose une première approche basée sur les résultats de profilage établis dans [6] et utilisant l'enquête emploi du temps *INSEE 2010* [INSEE2010]. Nous avons donc repris les mêmes variables, les niveaux (choix du découpage en intervalle pour la *conversion* de chaque variable en variable discrète) associés étant issus d'hypothèses liées au format de l'enquête et à la structure des données disponibles⁶, comme indiqué dans le tableau 4.8. Les profils sont ensuite reconstruits directement à partir des carnets issus de l'enquête emploi du temps, et on définit un profil moyen pour chaque état et chaque type. Ainsi rien ne garantit la représentativité des profils construits. Le profil moyen reconstruit est en revanche nécessairement très similaire à celui calculé sur les données brutes.

Aerts [6] a ajouté la variable *nombre d'enfants*, allant de 0 à 2, comme variable nécessaire pour la reconstruction des ménages. Avec ces hypothèses, nous pouvons donc construire au maximum 105 comportements moyens types au sein de la population. En éliminant les cas impossibles et ceux ne se produisant pas suffisamment pour que l'effectif soit statistiquement exploitable, il reste 13 comportements moyens types pour deux jours types, soit 26 profils moyens, lesquels sont relativement semblables. La figure 4.3.2 montre les distributions des états représentant le fait *d'être au domicile* (états *PA* et *PR*) suivant les variables explicatives sélectionnées *a priori* construites à partir des données brutes de l'EDT.

Une limite évidente de cette approche est le choix *a priori* des variables explicatives. On remarquera d'ailleurs que certains profils moyens ainsi reconstruits sont très similaires, ce qui veut dire que la diversité des scénarios d'occupation sera d'autant plus sensible à la taille des ménages (par exemple par rapport aux profils types identifiés dans [6]). Le taux de présence moyen par ménage, pour des ménages ayant entre 1 et 4 individus (voir paragraphe suivant), déterminé à partir des scénarios de présence individuel des types *adultes* et des hypothèses définies dans cette partie sont tracés sur la figure 4.3.3, ce qui illustre l'effet taille du ménage.

Pour chaque typologie, on reconstruit un modèle de présence par chaîne de Markov d'ordre 1 (le principe de la construction d'un tel modèle est détaillé par exemple dans [126], [183]). La figure 4.3.1 rappelle le principe d'un tel modèle avec 3 états de présence distincts.

⁶Les niveaux ont été choisis en prenant en considération les effectifs pour chaque type qui en résulterait

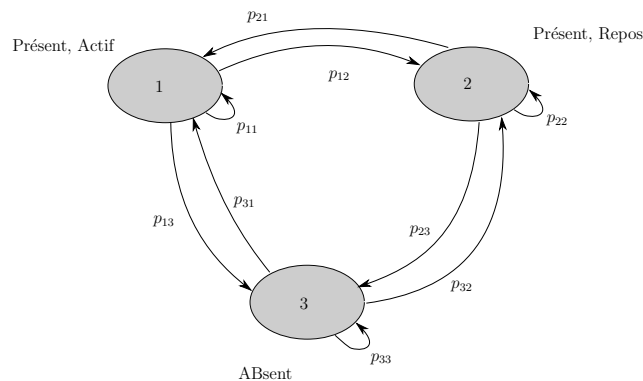


Figure 4.3.1 Représentation des transitions entre les 3 états du modèle de présence. Figure adaptée de [6]

Tableau 4.8 Variables explicatives identifiées dans [6] (niveau individu et ménage) reprises pour le modèle de présence de cette section et nombre de modalités associées

Variable	Niveaux (le premier désigne le niveau de référence)
Age	[40, 54], [−, 18], [19, 24], [25, 39], [55, 64], [65, 75],]75, −[
Jour	lundi-vendredi , samedi, dimanche
Emploi	Actif - temps plein , Actif - temps partiel, inactif, retraité, étudiant

La similarité entre les profils moyens reconstruits montrent clairement les limites de l'approche retenue dans cette partie et justifie la nécessité d'une analyse plus approfondie afin d'identifier d'éventuelles variables explicatives de comportements types. Cette remarque va dans le même sens que [6], [183]. Toutefois, bien que l'approche choisie implique que les profils ne soient pas nécessairement représentatifs, ce modèle permet une première évaluation de l'influence du modèle de comportement sur les effacements simulés (comparaison des évaluations avec celles obtenues avec les deux autres modèles).

Reconstruction de ménages À partir des données issues du recensement de la population [INSEE2008], on construit des profils de ménages utilisant les 13 types d'individus sélectionnés. Pour cela on exploite la base de données *ménages* de l'enquête suivant les variables référencées dans le tableau 4.9.

On appelle *taille du ménage* le nombre d'occupants dans un ménage donné. On construit un ensemble de ménages-types identifiés représentatif à l'échelle nationale. On se limite dans cette partie à des ménages comprenant entre 1 et 4 membres (cf. tableau 4.9), ce

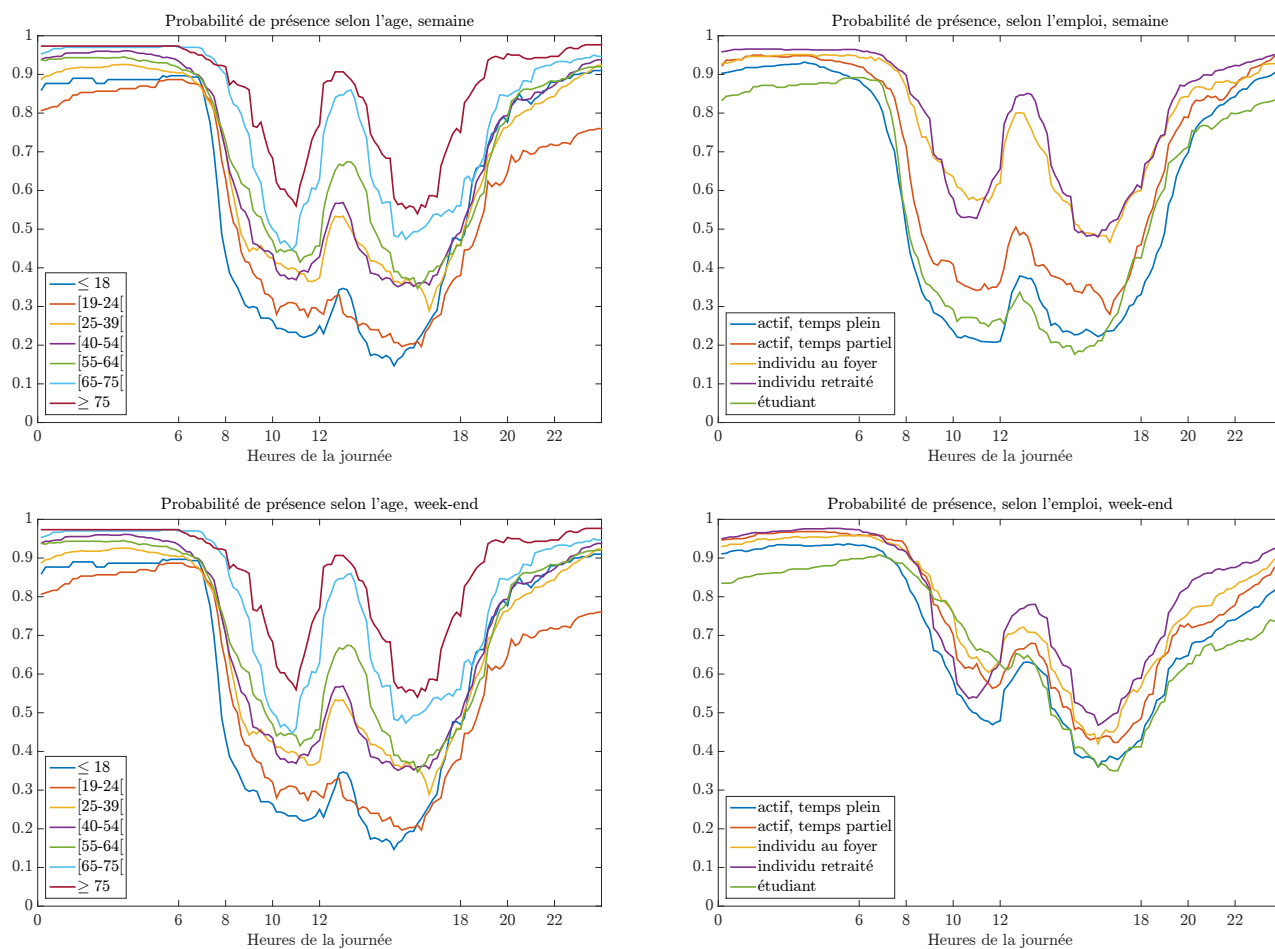


Figure 4.3.2 Distribution de l'état être au domicile suivant les variables *age*, *emploi*, *jour* (*ouvré*, *week-end*). Exploitation des données de l'EDT - Source [INSEE2010]

Tableau 4.9 Variables nécessaires pour simuler l'occupation d'un ménage

Nom	Variable	Niveaux
N_{hab}	Nombre d'occupants	$N_{hab} \in \llbracket 1, 4 \rrbracket$
<i>typmen15</i>	Type de ménage	voir tableau 4.10
Ag ad.1	Age adulte de référence	$[-, 18]$, $[19, 24]$, $[25, 39]$, $[40, 54]$, $[55, 64]$, $[65, 75]$, $]75, -[$
Emploi ad.1	Type d'emploi adulte 1	Actif - temps plein, Actif - temps partiel, inactif, retraité, étudiant
$N_{enfants}$	Nombre d'enfants	$N_{enfants} \in \llbracket 0, 3 \rrbracket$
Ag ad.2	Age second adulte	$-$, $[-, 18]$, $[19, 24]$, $[25, 39]$, $[40, 54]$, $[55, 64]$, $[65, 75]$, $]75, -[$
Emploi ad.2	Type d'emploi adulte 2	0 (non existant), Actif - temps plein, Actif - temps partiel, inactif, retraité, étudiant

Tableau 4.10 Typologie des ménages possibles(variable *typmen15* du tableau 4.9)

10	Personne seule active
11	Personne seule inactive
21	Famille monoparentale, parent actif
22	Famille monoparentale, parent inactif et au moins un enfant actif
23	Famille monoparentale, tous inactifs
31	Couple sans enfant, un actif
32	Couple sans enfant, deux actifs
33	Couple sans enfant, tous inactifs
41	Couple avec enfant, un membre du couple actif
42	Couple avec enfant, deux membres du couple actifs
43	Couple avec enfant, couple inactif et au moins un enfant actif
44	Couple avec enfant, tous inactifs
51	Autre ménage, un actif
52	Autre ménage, deux actifs ou plus
53	Autre ménage, tous inactifs

qui est cohérent avec la surface de la maison type utilisée dans ce chapitre (voir figure 4.3.4). La figure 4.3.5 donne une image synthétique des ménages construits suivant les variables explicatives sélectionnées *a priori* (les valeurs nulles signifient l'absence de ce caractère). Pour chaque individu de chaque ménage, un scénario d'occupation est simulé, puis le scénario global du ménage est construit, ce qui permet, compte tenu des règles précédemment détaillées d'en déduire le scénario de changement de consigne. Le scénario moyen de présence au niveau du ménage (états au domicile et *actif* ou *au repos*), pour l'ensemble des ménages modélisés est donné sur la figure 4.3.3 selon la *taille du ménage*. La distinction entre les ménages comportant 1 et plusieurs individus est observable sur le profil moyen, en revanche, dès lors que le nombre d'individus est supérieur à 2, les profils sont très similaires. Ceci s'explique largement⁷ par les hypothèses choisies pour la construction du modèle de présence (indépendance des individus de type *adulte*).

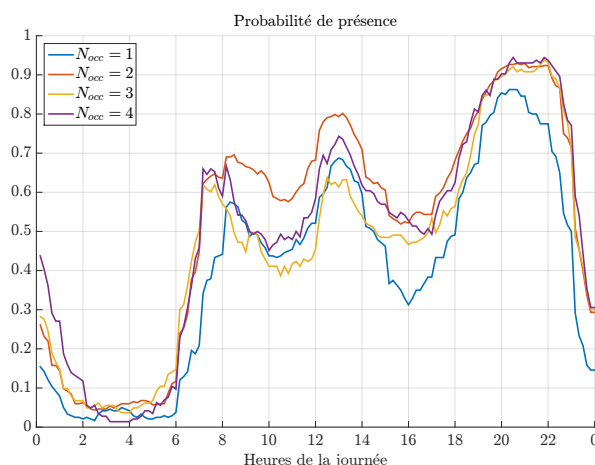


Figure 4.3.3 Profil de présence au niveau ménage pour différentes *taille de ménage*. Exploitation des données brutes issues de l'EDT. Source : [INSEE2008]

Compte tenu de l'ensemble des hypothèses nécessaires pour construire les scénarios de présence des ménages, on détermine empiriquement le nombre de ménages qu'il est nécessaire de simuler afin d'assurer la convergence du modèle de présence. Ce nombre d'évaluations nécessaires est une image de la variabilité générée par le modèle.

Le critère retenu est l'évolution du scénario de consigne moyen sur une semaine (les niveaux de consigne et modes de gestion sont définis dans la partie suivante). Les hypothèses pour le choix de la température de confort sont précisées pour chaque type de scénarios dans la section 4.3.2.

⁷Les ménages peuvent être composés de 1 ou 2 individus de types adultes et éventuellement des individus de types *enfant*, lesquels n'ont pas d'influence sur le scénario de présence

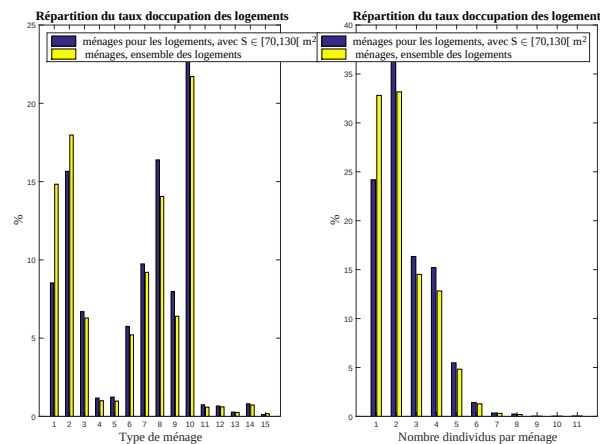


Figure 4.3.4 Distribution du type et de la *taille* du ménage occupant un logement de surface $S \in [70; 130[\text{ m}^2$ par rapport à l'ensemble des ménages (source des données : [INSEE2008])

4.3.2 Construction des stratégies de gestion des systèmes à partir des scénarios de présence

4.3.2.1 Consigne fixée

Dans le cas le plus simple, on suppose que la consigne est statique pour un ménage donné. Par conséquent, en supposant que l'unique niveau de consigne est indépendant des caractéristiques des ménages, seuls les gains internes dépendent de l'activité dans le logement. Pour les logements considérés (les logements les plus anciens sont les plus sensibles) les consommations pour l'usage chauffage sont dimensionnées pas les conditions climatiques (température extérieure essentiellement pour les heures entourant un effacement - voir partie 4.3.5). L'attribution d'un niveau de consigne selon le profil type du ménage n'a pas été prise en compte mais une forme de diversité est prise en compte en se donnant une loi de distribution pour définir ces niveaux (voir les paragraphes suivants).

4.3.2.2 Instants de changement de consigne

Pour chaque ménage, on suppose dans le cas de scénario dynamique que les activités des individus sont indépendantes, donc les scénarios de présence également ⁸, et qu'il existe un lien hiérarchique entre les individus de type *adulte* et ceux de type *enfant* : seules les entrées-sorties du logement, les heures de coucher et de lever des adultes sont prises en

⁸Voir annexe D sur le modèle de comportement pour les détails sur cette hypothèse

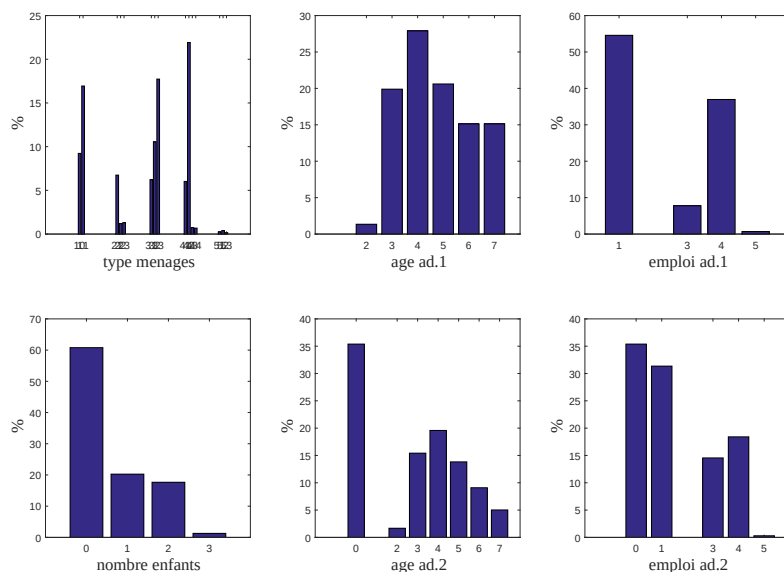


Figure 4.3.5 Distributions des variables caractérisant les ménages simulés

compte⁹. L'heure de passage en mode *confort* le matin correspond à celle du premier *adulte* levé, le passage en mode réduit dans la journée ne peut se produire que si l'ensemble des *adultes* quittent le logement durant 2 heures¹⁰. Si un adulte est présent pendant au moins deux heures alors $T_c(t) = T_{\text{confort}}, \forall t \in [0, T], T \geq 2h$. Enfin, le passage en mode *éco* pendant la nuit correspond à l'heure de coucher du dernier *adulte* présent. Les occupants identifiés de type *enfant* ne peuvent pas être dans l'état *présent* si l'ensemble des *adultes* sont absents. Les scénarios sont corrigés *a posteriori* afin de vérifier cette hypothèse, ce qui introduit nécessairement un biais par rapport aux résultats de l'enquête Emploi Du Temps.

Pour le cas du modèle avec scénario profilé, un unique scénario de présence est attribué au ménage et le scénario de consigne est directement déduit de celui-ci.

4.3.2.3 Scénario avec réduit

Les notations sont celles introduites dans la section 4.2.2. On suppose que l'unique mode réduit s'apparente au mode *eco* pré-programmé sur les systèmes de chauffage standards disponibles dans le commerce et que ce mode correspond à $T_{\text{confort}} - 2$, avec T_{confort} égale à la température de consigne de référence.

⁹Les individus de type *enfant* influent donc uniquement sur les apports internes et jamais sur la consigne

¹⁰hypothèse standard dans le cadre de ce travail en l'absence d'information plus précise

Pour un ménage donné, on suppose que le niveau de température de consigne *de confort* est fixé quelque soit l'activité, le jour, etc. (unicité du niveau associé à chaque ménage, hypothèse donnée dans le chapitre 1).

Pour un ménage, le scénario avec réduit ne comporte donc que deux niveaux, et est caractérisé en amplitude par la seule donnée de la température de consigne de référence ¹¹.

Nous avons vu dans la section 1.2.2 qu'il existe une hétérogénéité des consignes selon les ménages. Nous savons également qu'il existe un lien de causalité entre certains déterminants ou caractéristiques individuelles et au niveau du ménage et la température de consigne moyenne¹² dans le logement. À titre d'exemple, les variables : *âge, nombre d'enfants* ont une influence sur les choix de température de confort dans le logement. Toutefois, nous n'avons pas d'éléments qui permettraient de caractériser ce lien qui demeure difficile à appréhender que ce soit au travers d'études sociologiques ou en vue de son intégration dans les modèles de restitution des consommations de l'usage chauffage [176] : on connaît au mieux le sens de la déformation associée à certaines variables¹³.

Le choix de la température de confort a été supposé indépendant des types d'occupants et de ménages, on suppose qu'en moyenne la consigne T_{confort} est de 21°C, avec un écart-type σ de 2°C. La régulation se fait sur la température d'air.

Pour la suite, nous avons supposé que :

$$T_{\text{confort}} \sim \mathcal{N}(21, 2) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\mathcal{Min} T_{\text{confort}} = 17^\circ\text{C}$$

$$\mathcal{Max} T_{\text{confort}} = 24^\circ\text{C}$$

Avec les hypothèses proposées, le scénario de consigne est subordonné à la définition du scénario de présence. On représente sur la figure 4.3.6 la variabilité des scénarios de consigne simulés avec le modèle dynamique de présence (μ est la moyenne, σ l'écart-type pour 1000 ménages simulés). Le choix de la loi (c'est-à-dire de la variabilité du niveau de

¹¹Cette hypothèse est d'autant plus discutable pour les logements dont les performances thermiques sont les plus dégradées

¹²pondérée par les surfaces des zones du logement par exemple

¹³Par exemple, si les individus sont plus âgés que le niveau de référence défini dans le tableau 4.9, alors la température de consigne est généralement plus élevée.

consigne T_{confort} dans l'ensemble simulé a pour effet de déformer le scénario de présence moyen (figure 4.3.7). Cette déformation est très sensible à l'hypothèse de réduction de la consigne en cas d'absence de plus de 2 h qui produit un effet lissant.

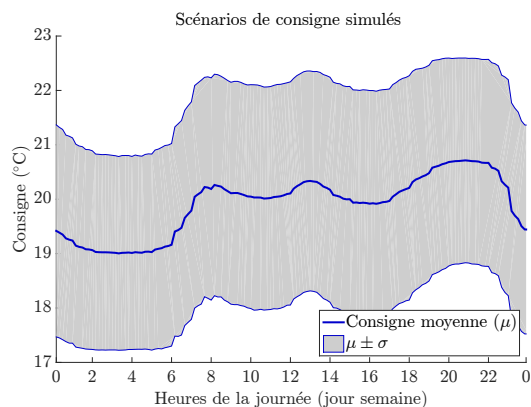


Figure 4.3.6 Variabilité des scénarios (présence et consigne) simulés pour 1000 ménages

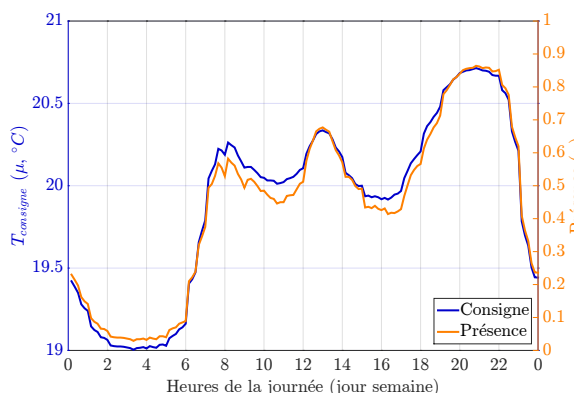


Figure 4.3.7 Scénarios de présence et de consigne moyen, cas avec réduit, 1000 ménages simulés

Le scénario de consigne moyen issu du modèle de présence dynamique d'un jour de semaine pour N ménages est tracé sur la figure 4.3.8 avec une distribution des consignes uniforme. Chaque couleur représente un nombre de ménage simulé, compris entre 50 et 650, par pas de 100. Environ 250 simulations sont nécessaires pour assurer la convergence des modèles de présence et de consigne (l'évolution des deux scénarios pour un jour de semaine selon le nombre de ménages simulés est tracée sur la figure 4.3.8). Cette diversité est cohérente avec celle estimée dans la cadre de travaux dont l'approche est similaire à celle proposée [88]. L'hypothèse de lissage de la gestion de la consigne implique que le modèle de présence est dimensionnant par rapport au modèle de consigne, comme nous l'avons déjà souligné dans l'interprétation de la figure 4.3.6.

4.3.2.4 Scénario avec coupure

Les hypothèses sont les mêmes que pour le scénario avec réduit en remplaçant les périodes où la consigne est à $T_{\text{confort}} - 2$ par l'arrêt des systèmes de chauffage. Ainsi, durant ces périodes, le bâti évolue en boucle ouverte.

4.3.2.5 Scénario mixte

On suppose dans ce cas que les systèmes sont coupés par le ménage durant les périodes d'absences diurnes et que la consigne est en mode *éco* pendant les périodes d'activité *sommeil*.

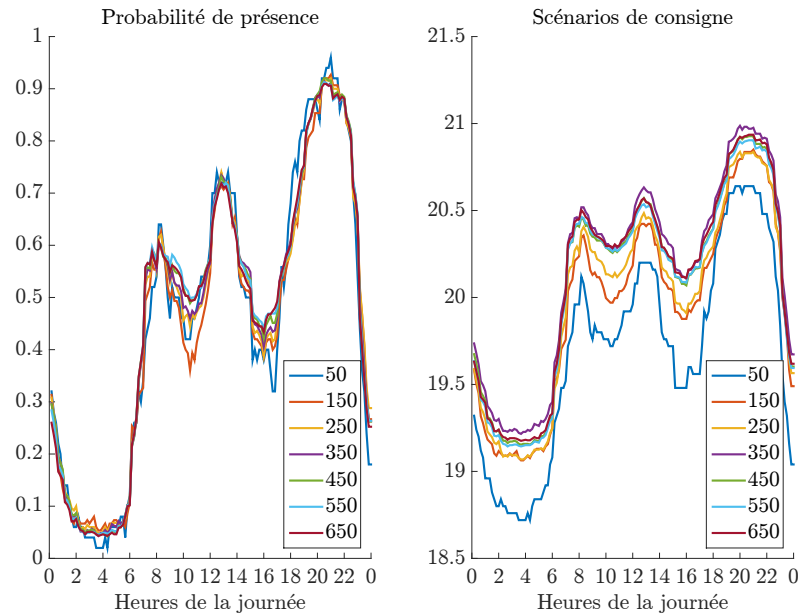


Figure 4.3.8 Évolution des scénarios moyens selon le nombre de ménages simulés

Ce cas n'est intéressant que pour les bâtiments les moins performants (peu inertes), pour lesquels la consigne *eco* est atteinte durant les périodes de réduit.

4.3.3 Apports internes

Dans le cas du scénario statique, les gains internes sont calculés selon les mêmes hypothèses que dans la partie 4.2.2.

Dans le modèle avec simulation dynamique des modes de gestion, les scénarios d'apports internes sont calculés à partir des scénarios de présence au niveau du ménage. Afin de s'assurer que les scénarios dynamique et conventionnel d'apports internes sont équivalents en moyenne¹⁴, on applique la méthode développée dans ce paragraphe.

Le scénario issu de la *RT* est hebdomadaire périodique, ainsi le plus petit motif pour s'assurer de la correspondance moyenne entre les deux scénarios est la semaine (dans le scénario *RT*, elle est composée de trois jours distincts, pondérés par 4 – 1 – 2, dans le scénario probabiliste simulé, on distingue deux jours, avec les poids 5 – 2).

¹⁴Ce qui permet d'ajuster le modèle relatif aux apports internes en énergie

On simule le parc national de ménages issu de l'exploitation de l'enquête Emploi Du Temps 2010, restreint aux ménages dont le logement est chauffé à l'électricité et on calcule les gains internes moyens $\bar{AI}_{RT_{hebd0}}$ du parc avec les hypothèses du scénario règlementaire. Dans un second temps, on note ai_a et ai_i les coefficients associés aux dégagements de chaleur sensible d'un adulte moyen en activité et inactif. On suppose que pour un individu jeune, ces dégagements sont pondérés par $\alpha_{kid} = 0.7$. On calcule les gains internes moyens du parc avec ces hypothèses et le scénario conventionnel. On recherche la valeur des deux paramètres minimisant l'écart en énergie entre les deux modèles pour une semaine de simulation ($\Delta t_{sem} = 168h$). On utilise pour cela la fonction $\mu_{\Delta t_{sem}}(AI_{dyn}) = f(ai_a, ai_i)$ où $\mu_{\Delta t_{sem}}$ désigne la moyenne sur une semaine et AI_{dyn} les apports internes dus à l'occupation, avec le modèle *dynamique* de présence.

$$(ai_a, ai_i) = \text{Min} \frac{|\mu_{\Delta t_{sem}}(AI_{dyn}) - \mu_{\Delta t_{sem}}(AI_{RT})|}{\mu_{\Delta t_{sem}}(AI_{RT})}$$

Les apports de chaleur sensible moyens dus aux occupants dans le cas du scénario règlementaire et issu de l'exploitation de l'enquête *emploi du temps 2010* sont représentés sur la figure 4.3.9. Compte tenu de la méthode d'ajustement, le passage du scénario conventionnel au scénario *dynamique* revient à générer de la diversité au sein de l'échantillon en déplaçant la quantité de chaleur totale disponible à la fois entre les ménages et entre les individus types. Nous avons trouvé $[ai_a, ai_i] = (95 \text{ W}, 60 \text{ W})$, ce qui est cohérent avec les valeurs de référence.

La méthode est la même dans le cas du scénario *profilé*.

4.3.4 Analyse succincte de la diversité issue du modèle de présence

Pour chaque période constructive, on simule la consommation du même ensemble de ménages avec les 3 modèles de présence présentés dans la partie 4.3.2. Pour le scénario statique, on suppose que la consigne est la même pour l'ensemble des ménages, prise égale à la consigne moyenne choisie dans les deux autres cas. Pour les deux autres modèles, les simulations ont été effectuées avec l'hypothèse de réduit (période d'absence et de repos).

On calcule le facteur de diversité pour l'ensemble des systèmes sur une journée, pour un hiver (mêmes données climatiques que dans la section 4.2.2). La figure 4.3.10 montre l'évolution du facteur de diversité¹⁵ pour les trois scénarios de gestion de consigne avec les maisons individuelles type *RT75, inertie légère* et *RT89, inertie lourde* (le facteur de diversité

¹⁵Les deux modèles de présence n'étant pas calibrés (par exemple en volume en considérant que l'énergie consommée sur l'ensemble des systèmes est la même), seuls les indicateurs adimensionnés sont pertinents.

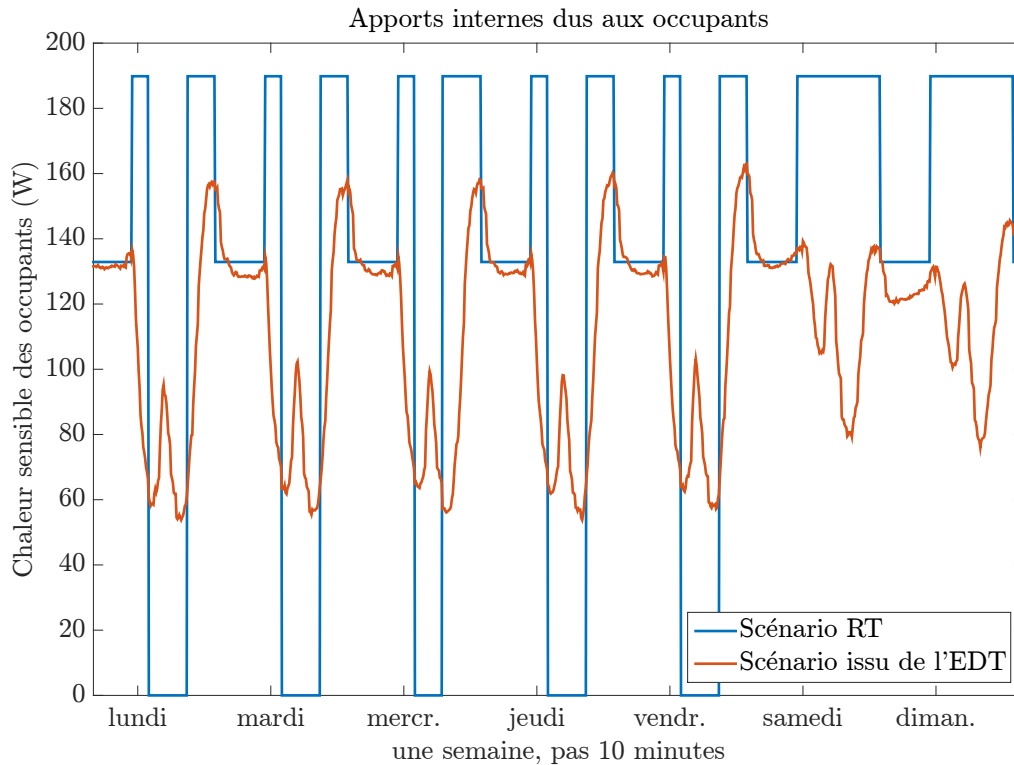


Figure 4.3.9 Scénarios moyens simulés (*dynamique* et *conventionnel*), ménages construits à partir des données de l'enquête [INSEE2010]

est défini par l'équation (??), il permet de caractériser le foisonnement de courbes de charge). On montre sur la figure 4.3.10 l'évolution de ce coefficient sur une journée.

Les lignes épaisses de couleur bleue représentent l'évolution du coefficient moyen pour chaque cas, calculé sur une saison du chauffe. Les aires grisées représentent les valeurs possibles pour cet indicateur au cours de la saison, c'est-à-dire la variabilité du fait de l'ensemble des sollicitations extérieures prises en compte dans les modèles. Comme attendu, l'amplitude de variation est comparable (même climat pour les trois simulations). Les courbes en noir montrent les valeurs extrêmes du coefficient, et les courbes en traits discontinus bleus fins représentent l'écart-type à la moyenne.

Le facteur de diversité pour le cas de la simulation avec une unique température de consigne pour chaque ménage présente peu de variations au cours de la journée (cas *scénario statique*). A contrario, dans le cas du scénario *profilé*, compte tenu des hypothèses, la relance du soir se traduit par une perte de diversité importante. Les hypothèses de gestion de la consigne *avec réduit* choisies conduisent à un effet de relance plus marqué le matin par

rapport au soir dans le cas du modèle dynamique. On peut également observer que nous retrouvons une plus forte sensibilité de l'activité (présence) dans les logements plus récents par rapport aux logements moins bien isolés, qui est particulièrement marquée dans le cas du modèle de présence dynamique et consigne avec réduit (figures 4.3.10c et 4.3.10f).

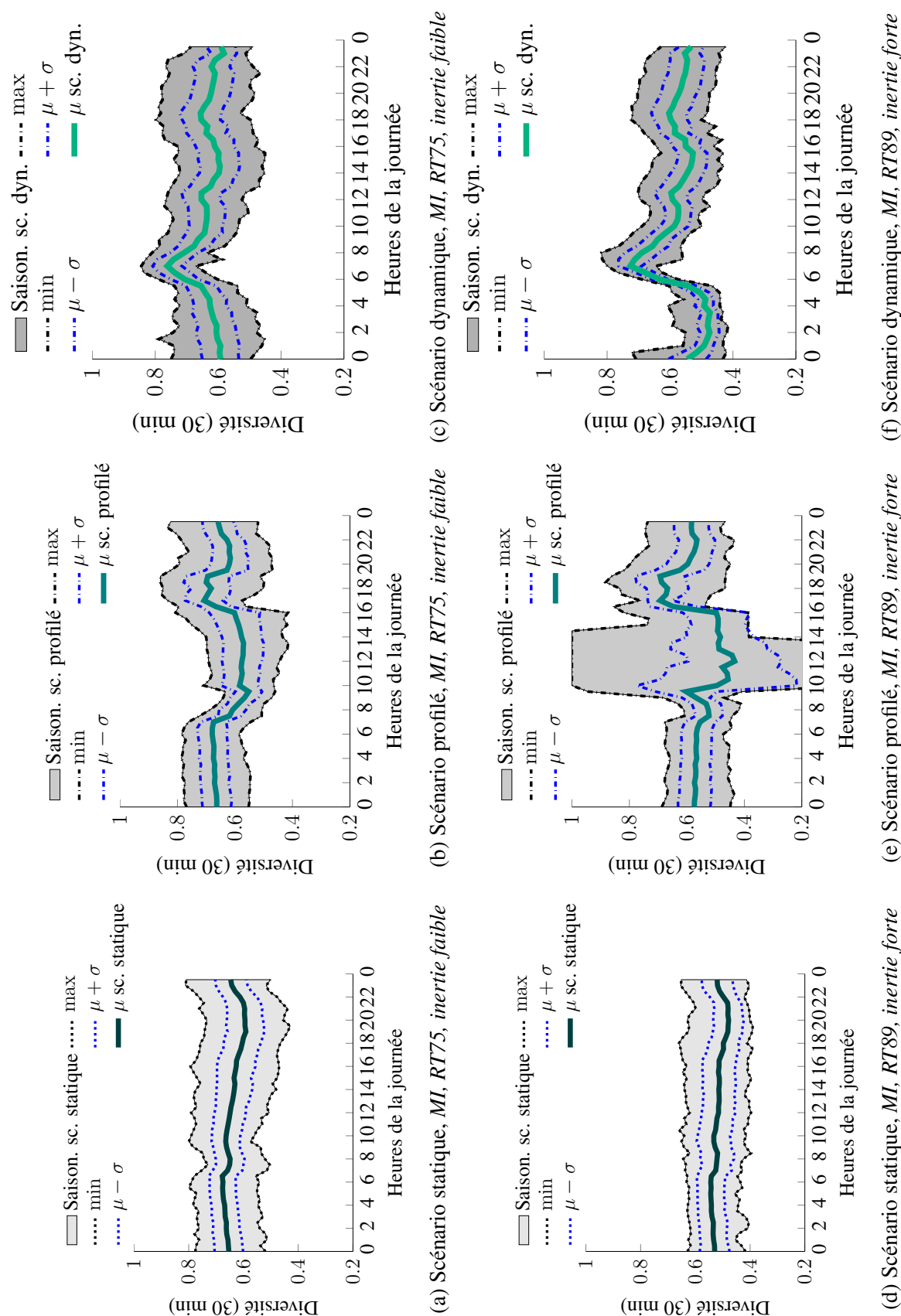


Figure 4.3.10 Évolution du facteur de diversité pour 2 périodes constructives, 3 modèles de présence et gestion de consigne

4.3.5 Analyse de l'impact de différentes stratégies d'effacement

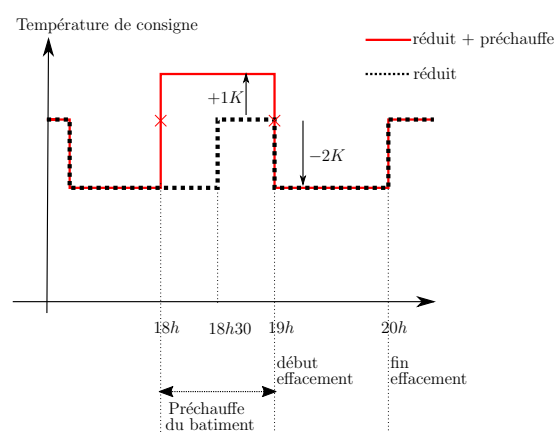
Pour chaque type de bâti, on simule l'ensemble des ménages modélisés. On se place toujours dans le cas d'un pilotage direct et on considère 3 effacements types, définis dans le tableau 4.11. Compte tenu des profils de présence moyen et des scénarios de consigne proposés dans cette partie, environ la moitié de la population est présente lorsque le signal d'effacement de E1 est envoyé. A 20h, pour la quasi totalité des ménages, au moins un *adulte* est présent (voir par exemple la figure 4.3.3), ainsi les horaires des effacements simulés correspondent bien aux heures où la demande est la plus importante

On s'intéresse à trois stratégies de contrôle des appareils de chauffage (tableau 4.12) : la première, notée *S1*, correspond au pilotage direct des équipements à partir d'un signal *tout ou rien*. La consigne n'est donc pas modifiée dans ce cas, les systèmes sont alors éteints.

Pour les stratégies 2 et 3, notées respectivement *S2* et *S3*, on suppose qu'il est possible de piloter à distance la consigne. Durant la phase de contrôle *p2*, la consigne est alors passée en *mode éco*, ce qui correspond, selon les hypothèses de 4.3.2 à une diminution de la consigne de 2°C.

Dans la stratégie *S2*, la consigne est augmentée de 1°C par rapport à la consigne pendant l'heure qui précède l'évènement. Pour cette phase de préchauffe, on se place dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire qu'on suppose que la température de consigne dans les logements au moment de l'effacement est accessible ¹⁶ et constitue la référence par rapport à laquelle la consigne de préchauffe est définie. Il s'agit donc bien d'une surchauffe par rapport à la température de confort.

Exemple de scénario de consigne modifié selon les stratégies *S2* et *S3*



Au total, pour chaque bâti type, 9 variantes d'effacement sont étudiées selon le type d'effacement (3 cas) et la stratégie choisie (3 cas) avec les mêmes hypothèses sur les séries climatiques que dans la partie 4.2.2.

¹⁶En supposant par exemple que les ménages ont accès et utilisent l'accès distant permis par les *energy box* généralement associés aux offres d'effacements

Tableau 4.11 Effacements étudiés

Numéro de référence	Durée	Heure de début d'effacement
E1	1h	$t_{\text{on}} = 18h$
E2	1h	$t_{\text{on}} = 19h$
E3	2h	$t_{\text{on}} = 18h$

Tableau 4.12 Stratégies de contrôles considérées

Numéro de référence	Signaux de contrôle	Définition du contrôle
S1	ON / OFF	Pilotage direct ON/OFF durant l'effacement
S2	T_{cons}	Préchauffe du bâti 1h avant l'évènement, passage en mode réduit ($T_{\text{cons}} - 2$) durant l'effacement
S3	T_{cons}	Passage en réduit ($T_{\text{cons}} - 2$) durant l'effacement

4.3.6 Résultats sur les indicateurs d'effacement dans le cas du scénario avec réduit

L'évaluation se fait sur la courbe agrégée de l'ensemble de ménages simulés, on s'intéresse aux indicateurs définis dans le chapitre 3. Les tableaux 4.13 à 4.16 synthétisent les résultats obtenus avec le scénario dynamique, consigne avec réduit pour deux périodes constructives types. Sans indication supplémentaire, les valeurs données sont calculées sur l'ensemble des ménages et l'ensemble des jours effacés :

1. Report : résultats de l'évaluation sur la courbe de charge agrégée dans le tableau 4.13
2. Caractérisation de la phase de recouvrement : on présente le taux de report durant la première et la deuxième heure (tableau 4.15) ainsi que les durées au bout desquelles on atteint 70%, 80%, 90% et 95% du report total théorique (tableau 4.16).
3. Inconfort caractérisé par le calcul de DH avec $T_{\text{lim}} = 2\text{ K}$: valeurs moyennes données dans le tableau 4.17

On s'intéresse de plus aux évolutions des grandeurs permettant de caractériser les effacements réalisés :

- Forme du rebond (évolution du facteur de diversité pour l'effacement E3 (18h,2h) reproduit figure 4.3.13)

- Évolution demi-horaire du taux de report (sur les figures 4.3.11 et 4.3.12 représentant les résultats obtenus pour les maisons de type *RT75, inertie légère* et *RT89, inertie lourde* respectivement, chaque barre représente une demi-heure à partir du début de la phase 3)
- Distribution du temps à pleine puissance (figure 4.3.17)
- Distributions des °C.h d'inconfort (figures 4.3.20 et 4.3.21 pour les périodes constructives *RT75* et *RT89* respectivement)
- Forme de la courbe de charge (moyenne à 30 minutes) (figure 4.3.15)
- Évolution de la température opérative (calculée selon la définition donnée au chapitre 2) durant la phase de contrôle (à titre illustratif, figure 4.3.18)

Tableau 4.13 Report moyen ($R_{\%} = \frac{E_{p1}+E_{p3}}{E_{p2}}$) suivant le type d'effacement, la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit

	inertie :	RT75		RT89	
		légère	lourde	légère	lourde
S1	E1	81.5%	85.1%	91.7%	92%
	E2	82.2%	85.3%	91.8%	92.1%
	E3	73.3%	80.7%	88.6%	89.8%
S2	E1	95.2%	95.8%	101.1%	100.3%
	E2	95%	95.2%	101%	100%
	E3	86.2%	88.6%	95%	95%
S3	E1	82.3%	85.4%	91.7%	92%
	E2	82.7%	85.4%	91.8%	92.0%
	E3	74.9%	81.2%	88.7%	89.9%

Tableau 4.14 Durée moyenne du recouvrement théorique suivant le type d'effacement, la stratégie et la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit

	inertie :	RT75		RT89	
		légère	lourde	légère	lourde
S1	E1	2.3 h	13.9 h	8.1 h	16.4 h
	E2	2.3 h	13.5 h	7.9 h	16.1 h
	E3	2.9 h	14.2 h	8 h	17.2 h
S2	E1	3.5 h	17.3 h	4.5 h	7.4 h
	E2	3.3 h	18 h	4.5 h	11.6 h
	E3	3.6 h	17.3 h	9.9 h	19.8 h
S3	E1	1.9 h	13.6 h	8.0 h	16.0 h
	E2	1.8 h	13.3 h	8 h	15.6 h
	E3	2.0 h	13.9 h	7.7 h	17.0 h

L'analyse des tableaux 4.13 et 4.14 montre que l'économie d'énergie, si elle existe, est de l'ordre de grandeur des déperditions à travers l'enveloppe du bâti pendant la durée de l'effacement, et ne dépend donc pas (ou bien effet non mesurable) de l'heure de l'effacement (donc de la dynamique comportementale). Dès lors, les économies potentielles ne concernent que les logements les moins bien isolés (ancien, inertie légère), et cette économie est de l'ordre d'un kWh . On notera un faible effet de surconsommation dans le cas des bâtis les plus récents. Celui-ci est du à la perte de synchronisme entre les courbes de charge moyennes à 10 minutes des cas avec et sans effacement et nous semble être une erreur liée à la modélisation.

Tableau 4.15 Durée pour atteindre 80%, 90% et 95% du recouvrement théorique suivant le type d'effacement, la stratégie et la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit

	inertie	RT75						RT89					
		légère			lourde			légère			lourde		
		$R_{80\%}$	$R_{90\%}$	$R_{95\%}$	$R_{80\%}$	$R_{90\%}$	$R_{95\%}$	$R_{80\%}$	$R_{90\%}$	$R_{95\%}$	$R_{80\%}$	$R_{90\%}$	$R_{95\%}$
$\mathcal{S}_1$	E1	1.4 h	1.6 h	2.0 h	5.2 h	8.6 h	10.9 h	3.1 h	5.3 h	6.6 h	5.6 h	9.0 h	12 h
	E2	1.3 h	1.6 h	1.8 h	5.0 h	8.4 h	10.8 h	3.0 h	5.0 h	6.5 h	5.5 h	9 h	11.8 h
	E3	1.9 h	2.3 h	2.6 h	7.0 h	10.0 h	12.1 h	4.3 h	5.8 h	6.9 h	6.9 h	10.2 h	13.0 h
$\mathcal{S}_2$	E1	1.0 h	1.3 h	1.7 h	4.9 h	8.4 h	10.7 h	3.0 h	5 h	6.3 h	5.6 h	8.9 h	11.8 h
	E2	1.0 h	1.2 h	1.5 h	4.6 h	8 h	10.5 h	3.0 h	5.1 h	6.6 h	5.5 h	8.7 h	11.6 h
	E3	1.0 h	1.5 h	1.8 h	6.5 h	9.6 h	11.6 h	4.0 h	5.6 h	6.7 h	6.8 h	10.1 h	12.8 h

Tableau 4.16 Taux de recouvrement atteint 1 heure et 2 heures après la fin de l'évènement suivant le type d'effacement, la stratégie et la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit

	inertie	RT75				RT89			
		légère		lourde		légère		lourde	
		R_{1h}	R_{2h}	R_{1h}	R_{2h}	R_{1h}	R_{2h}	R_{1h}	R_{2h}
$\mathcal{S}_1$	E1	75.1%	97.8%	58%	68.8%	59.5%	70.4%	48.2%	60.6%
	E2	79.1%	98.4%	60%	71%	62.1%	72%	49.8%	61.5%
	E3	54.8%	90.6%	41%	57.7%	46.5%	64%	36.8%	51%
$\mathcal{S}_2$	E1	88.1%	98.3%	65%	72.8%	63.2%	71.5%	50.5%	60.8%
	E2	90.3%	98.4%	66.4%	73.6%	64.2%	71.8%	51.1%	61%
	E3	86.3%	98.5%	52%	62.4%	52%	67%	39.6%	52.6%

Les tableaux 4.15 et 4.16 permettent de mettre en évidence la dynamique de la phase de recouvrement. On retiendra qu'on observe deux périodes au sein de la phase de recouvrement : une première phase d'une durée de 1 à 4 heures au bout de laquelle au moins 80% du report à lieu et une seconde phase durant laquelle l'évolution est très lente. Nous pensons que ce phénomène est lié au modèle de présence. Cette observation est en adéquation avec le comportement passe-bas du système bâti. Le scénario de présence (horaire de l'effacement) influe peu sur la dynamique du recouvrement dans le cas de la stratégie avec réduit ($\mathcal{S}_3$) : en effet, dans ce cas, une partie des systèmes se relancent durant la phase de contrôle (voir figure 4.3.15), ainsi le choix de la stratégie s'assimile à un contrôle différent de la modulation de charge produite par l'évènement d'effacement.

L'évolution du facteur de foisonnement (figure 4.3.10) souligne l'influence du modèle de comportement sur le recouvrement et montre de plus que la perte de foisonnement durant la phase 3 qui s'étale sur quelques heures est dimensionnée par le modèle de gestion des systèmes.

La perte de diversité de la courbe de charge agrégée est limitée par le modèle de gestion de la consigne, c'est ce que nous pouvons observer sur les figures 4.3.13 et 4.3.14 qui montrent l'évolution du facteur de diversité pour plusieurs types de logements, le modèle dynamique de gestion de la consigne et plusieurs stratégies d'effacements pour l'effacement de 2 h débutant à 18 h. En effet, dans le cas présenté, on suppose qu'il y a un passage en mode réduit le soir correspondant au passage de l'état *actif dans le logement* à *inactif dans le logement*. Les simulations avec les deux autres modes de gestions supposés (coupure, mixte) conduisent à la même conclusion.

La durée de la phase de recouvrement est en revanche sensible au modèle de présence choisi : si on suppose qu'il n'y a pas de gestion temporelle de la consigne alors la diversité représentée dans le modèle ne dépend plus que des caractéristiques constructives des bâtis et la durée de la phase de recouvrement est alors bien plus importante (pour un ensemble de bâtis homogènes).

La déformation de la demande générée par le pilotage distant est illustrée sur les figures 4.3.15 et 4.3.16 où on a représenté la courbe de charge moyenne pour deux types de maisons individuelles isolées (type RT75 et RT89) pour les différentes stratégies d'effacement étudiées. On peut observer que l'effet de saturation des systèmes à l'issue de la phase de contrôle et donc le rebond tel que défini par l'équation (??) du chapitre 3 n'est pas sensible au choix de la stratégie pour les 3 effacements considérés. Cette remarque est liée au choix du modèle de comportement thermique, et une confrontation de ces résultats à des évaluations *in situ* est nécessaire pour valider cet effet, ainsi que la durée à pleine puissance (ou durée avec saturation des système).

Tableau 4.17 Degrés-heures d'inconfort DH moyen ($^{\circ}\text{C.h}$) suivant le type d'effacement, la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit

	inertie :	$RT75$		$RT89$	
		légère	lourde	légère	lourde
S_1	E1	1.2 h	1.2 h	0.3 h	0.4 h
	E2	1.1 h	1.2 h	0.2 h	0.4 h
	E3	2.2 h	2.5 h	1.0 h	1.0 h
S_2	E1	0.6 h	0.8 h	0.1 h	0.2 h
	E2	0.5 h	0.9 h	0.1 h	0.2 h
	E3	1.5 h	1.8 h	0.5 h	0.7 h
S_3	E1	0.9 h	1.0 h	0.3 h	0.4 h
	E2	0.8 h	1.0 h	0.2 h	0.4 h
	E3	1.4 h	2.0 h	0.8 h	0.8 h

Le tableau 4.17 illustre l'influence de la stratégie adoptée et en particulier de la stratégie avec préchauffe sur l'indicateur global de confort choisit dans le cadre de ce travail (surfaces $^{\circ}\text{C.h}$). Les distributions de cet indicateur pour les 9 cas d'études selon deux types de bâtis sont représentées sur les figures 4.3.20 et 4.3.21; l'évolution des températures opératives moyennes pour ces mêmes simulations sont représentées sur les figures 4.3.18 et 4.3.19.

Dans le cas où le contrôle se fait sur la température de consigne (éco-systèmes *PCT - programmable communicating thermostat*, thermostat programmable à distance), on observe deux cas possibles (selon la période constructive sur les simulations effectuées) : selon que la consigne avec réduit est ou non atteinte. La caractérisation du parc contrôlé justifie ou non l'opportunité de ce type de stratégie par rapport à un signal *tout ou rien*.

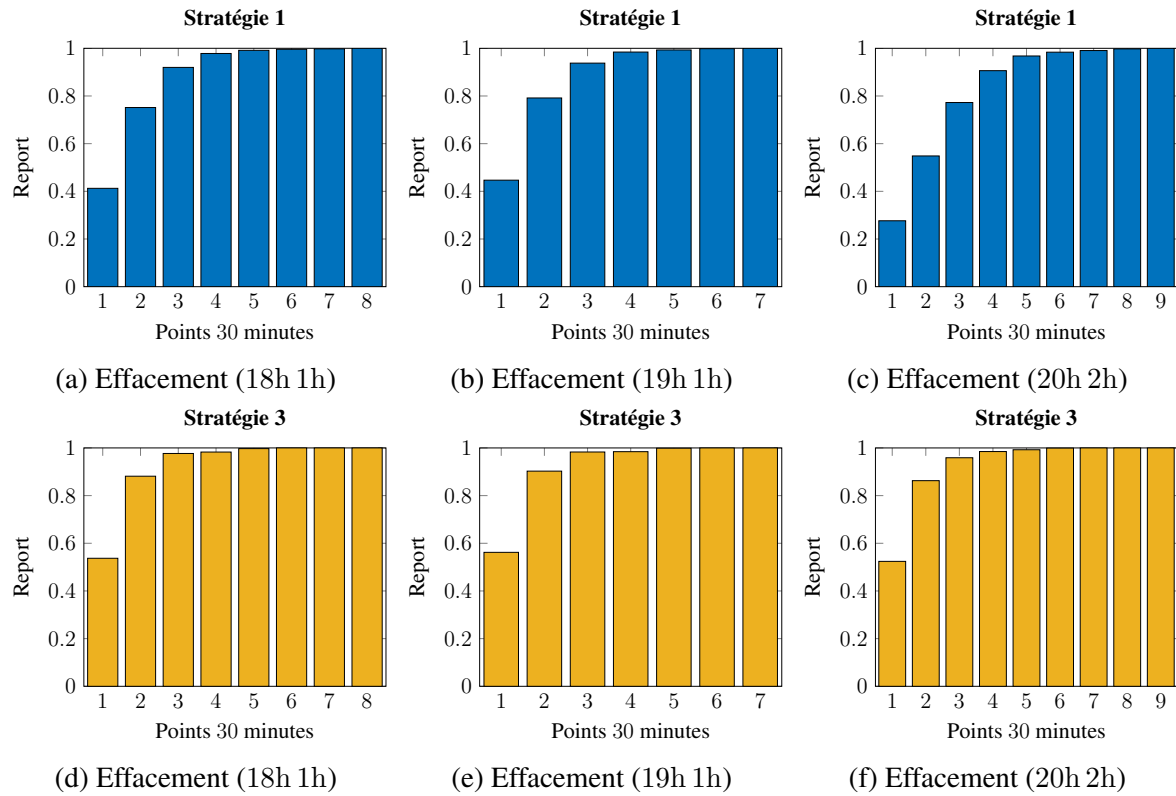


Figure 4.3.11 Évolution demi-horaire du report, modèle de présence dynamique, maison type RT75, inertie légère

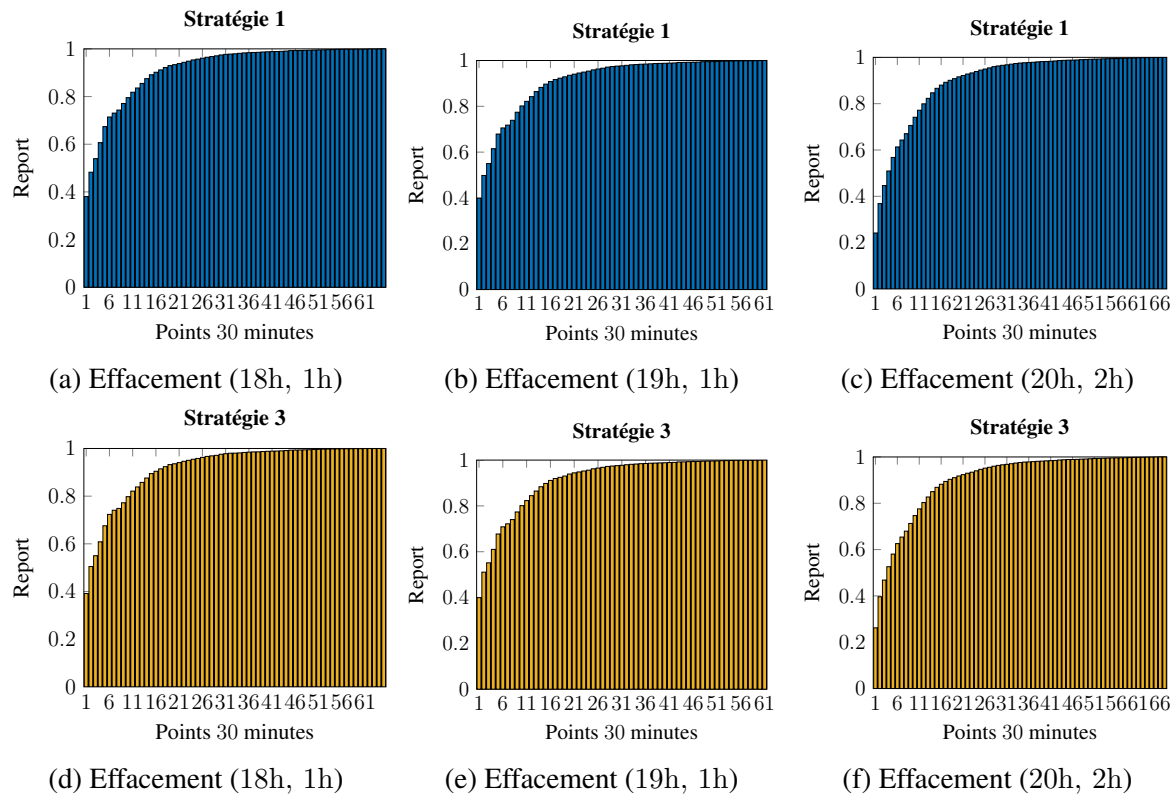


Figure 4.3.12 Évolution demi-horaire du report, modèle de présence dynamique, maison type RT89, inertie lourde

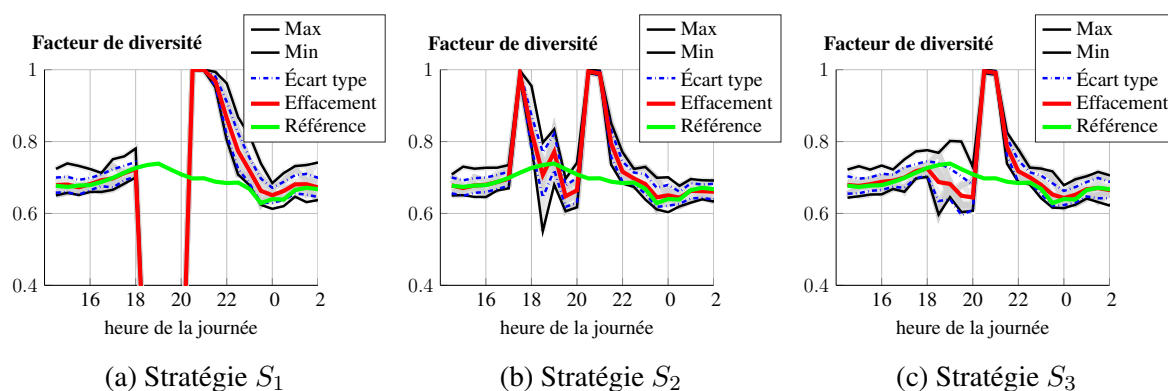


Figure 4.3.13 Facteur de diversité à 30 minutes, scénario dynamique, effacement $E3$ (18h, 2h), maison type $RT75$, inertie légère, 3 stratégies d'effacement

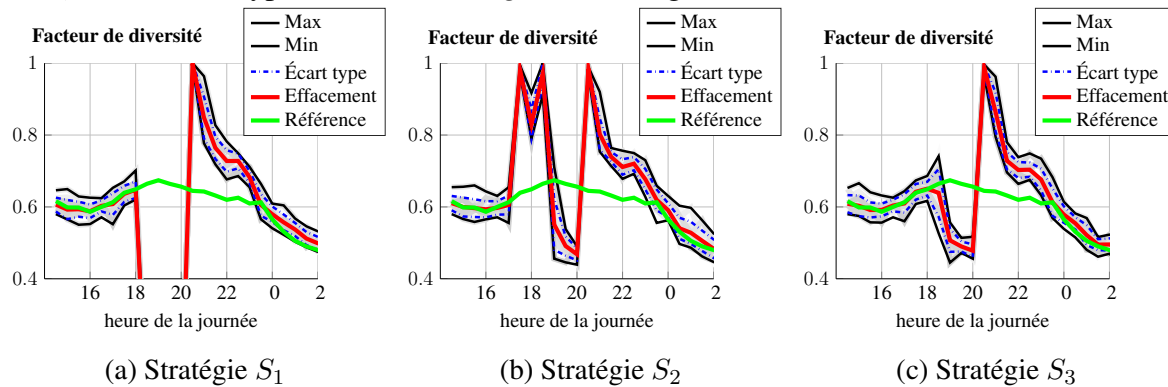


Figure 4.3.14 Facteur de diversité à 30 minutes, scénario dynamique, effacement $E3$ (18h, 2h), maison type $RT89$, inertie lourde, 3 stratégies d'effacement

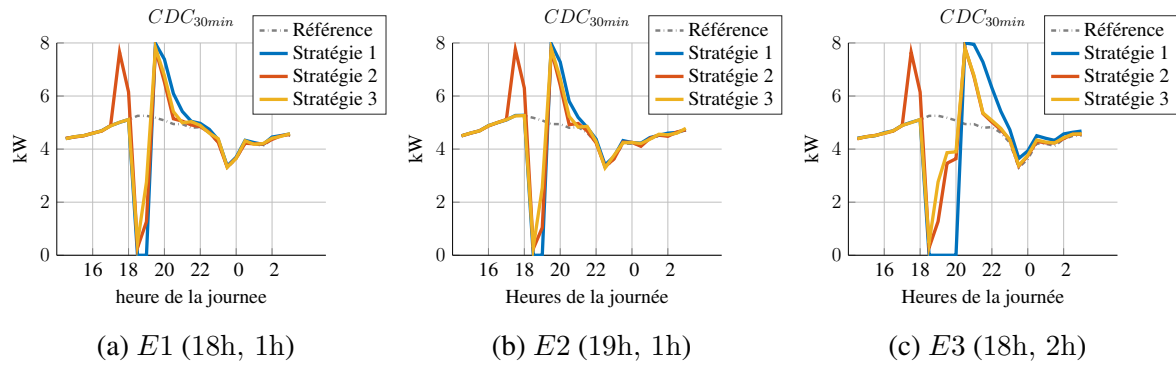


Figure 4.3.15 Courbes de charge moyennes à 30 minutes, scénario dynamique, maison type RT75, *inertie légère*, 3 stratégies d'effacement

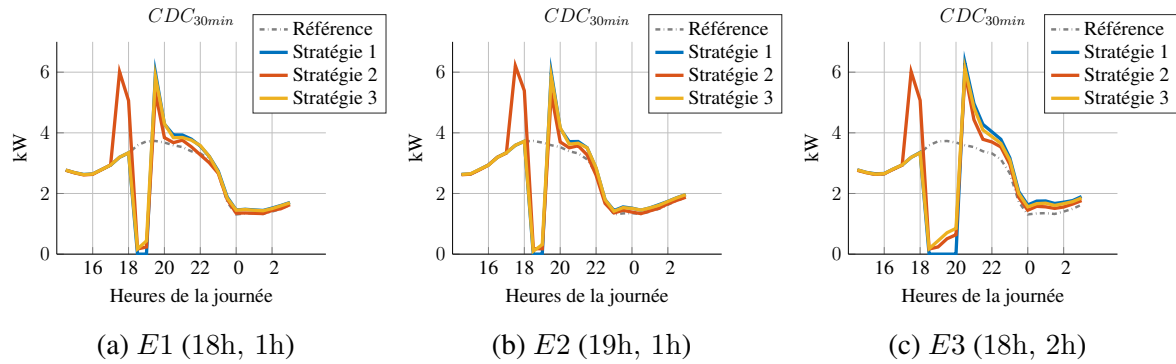


Figure 4.3.16 Courbes de charge moyennes à 30 minutes, scénario dynamique, maison type RT89, *inertie lourde*, 3 stratégies d'effacement

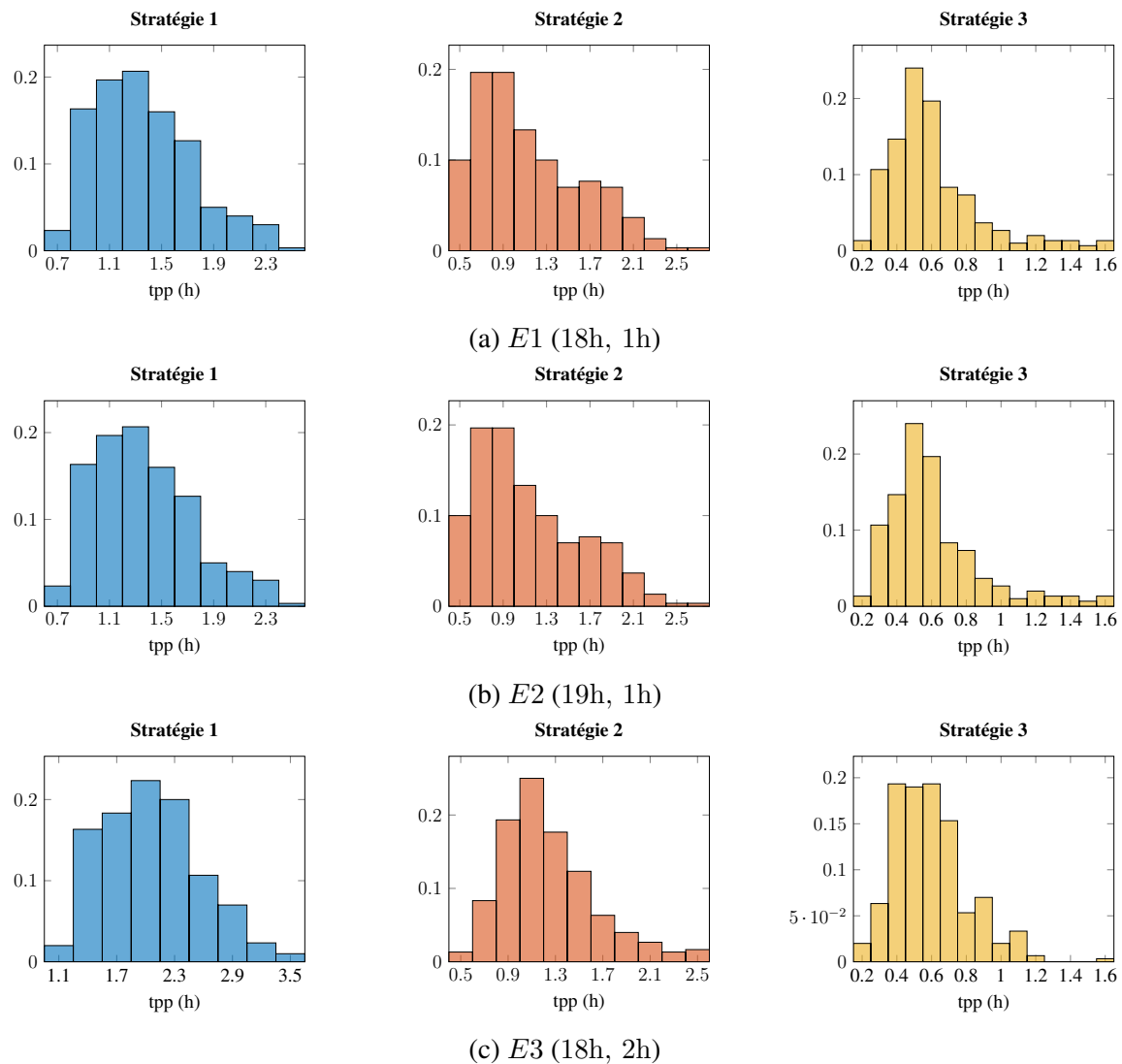


Figure 4.3.17 Distribution du temps à pleine puissance (h) pour la maison de type RT75, *inertie légère*, scénario de consigne dynamique, selon le type d'effacement (ligne) et la stratégie de contrôle (colonne)

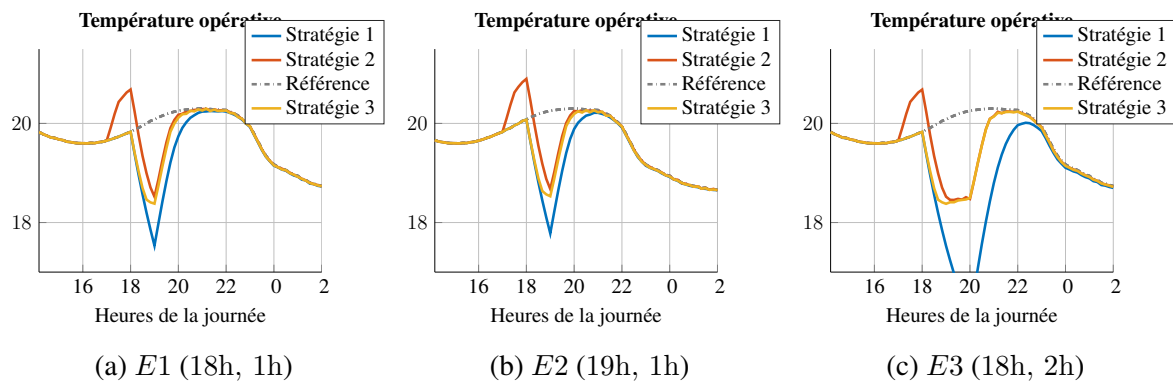


Figure 4.3.18 Évolution moyenne de la température intérieure (température opérative selon la définition de l'équation (??) pour les cas étudiés (3 effacements, 3 stratégies de pilotage), maison de type RT75, *inertie légère*

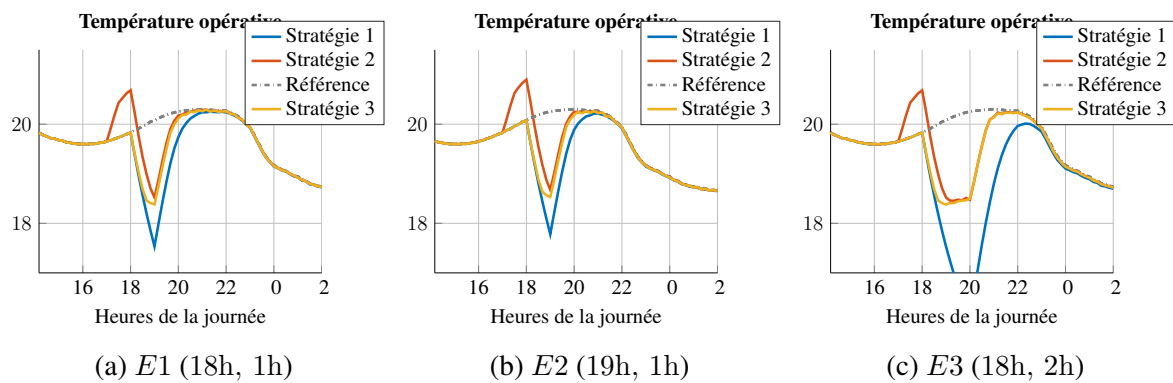


Figure 4.3.19 Évolution moyenne de la température intérieure (température opérative selon la définition de l'équation (??) pour les cas étudiés (3 effacements, 3 stratégies de pilotage), maison de type RT89, *inertie légère*

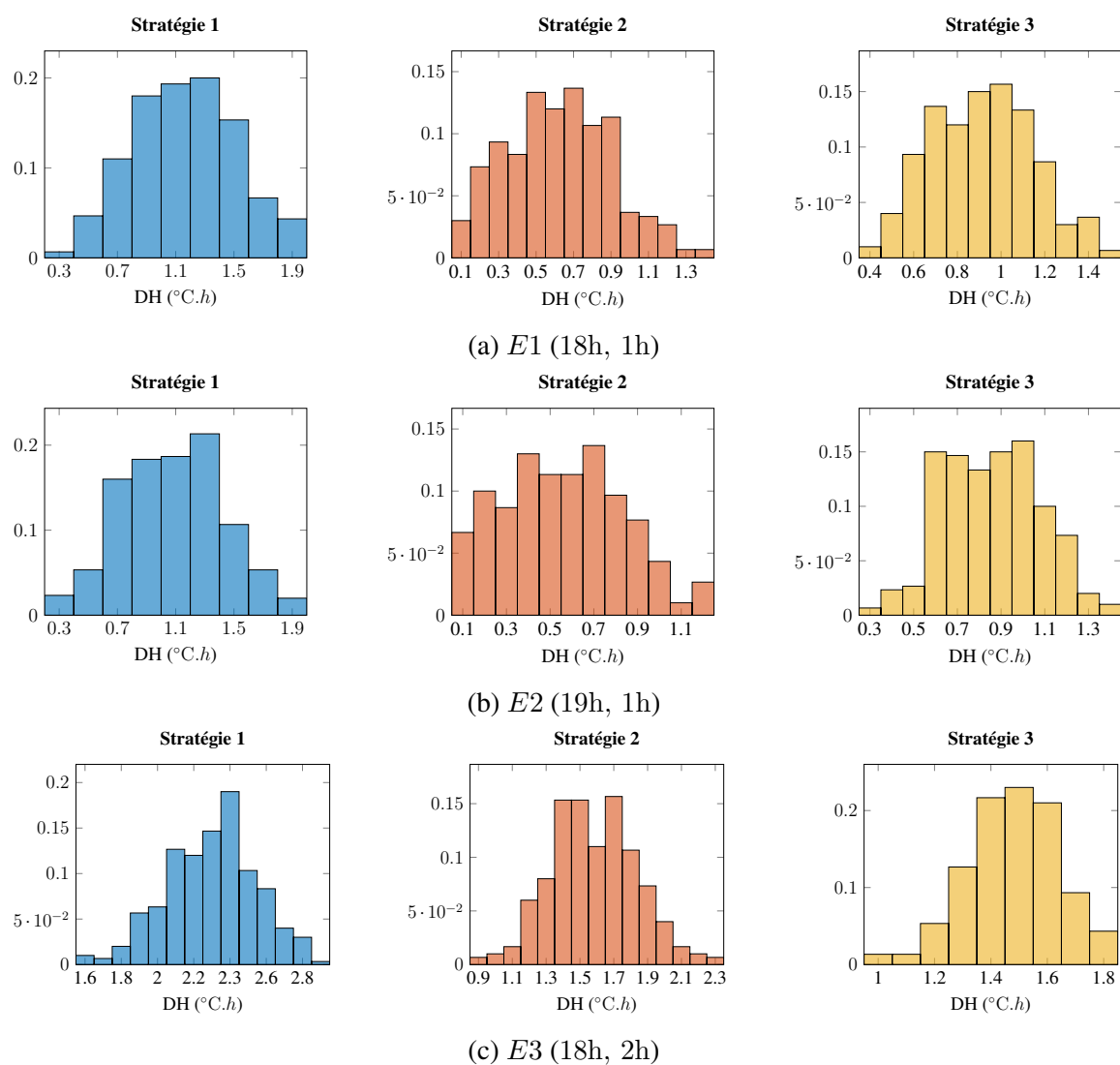


Figure 4.3.20 Distributions des $^{\circ}\text{C.h}$ d'inconfort, maison type *RT75*, *inertie légère*, modèle de présence dynamique, 3 effacements, 3 stratégies

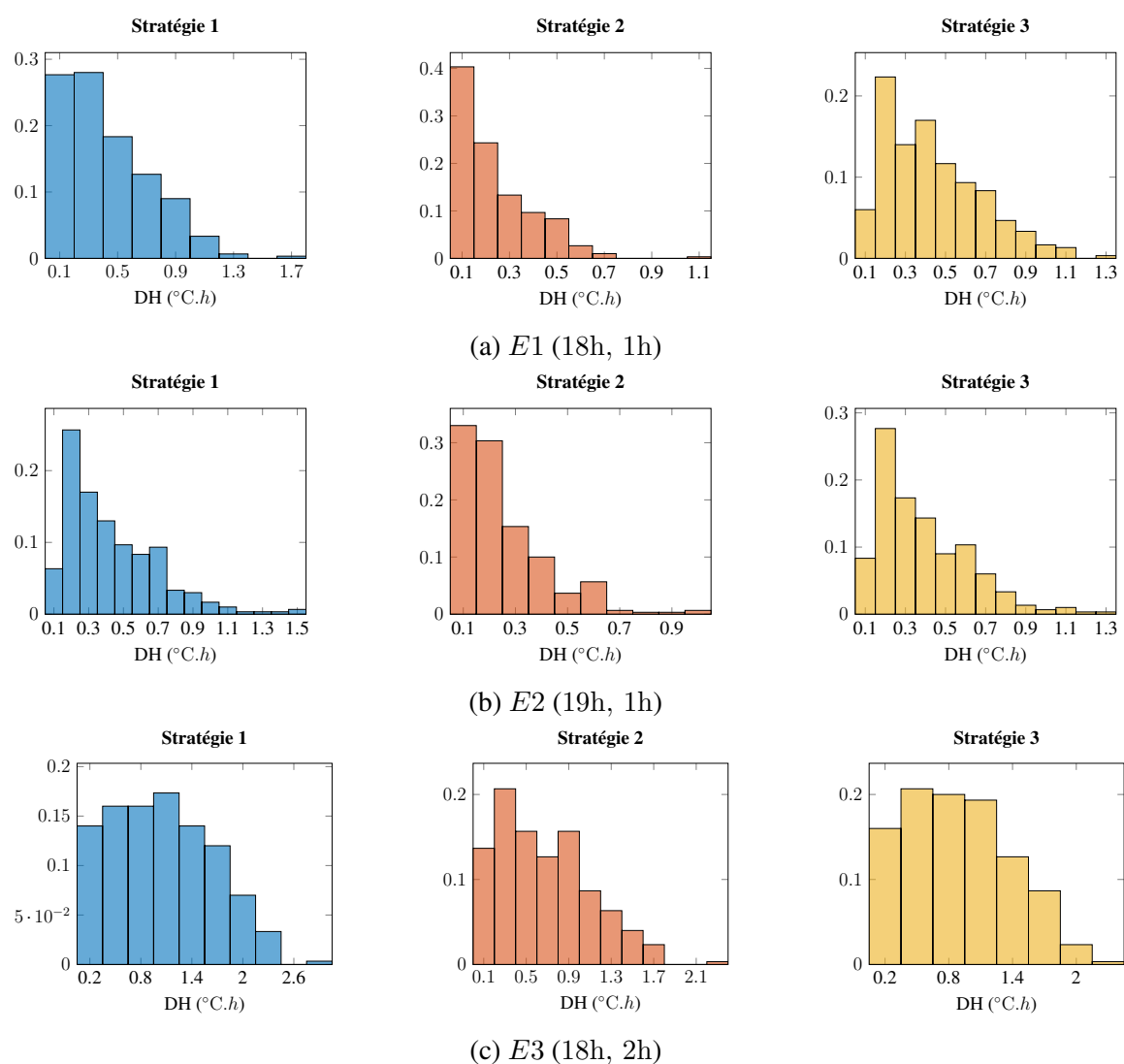


Figure 4.3.21 Distributions des $^{\circ}\text{C.h}$ d'inconfort, maison type RT89, inertie lourde, modèle de présence dynamique, 3 effacements, 3 stratégies

4.4 Conclusions du chapitre

4.4.1 Influence des caractéristiques constructives

Le criblage de *Morris* a permis de montrer que les paramètres de notre modèle ayant le plus d'influence sur les consommations énergétiques pour l'usage chauffage sont similaires à ceux trouvés dans la littérature. Il s'agit de paramètres liés à :

- L'inertie des parois lourdes (dont notamment l'épaisseur des couches d'isolant et de béton ou briques de chaque parois)
- La géométrie du bâti : taux de vitrage, description du volume chauffé (hauteur sous plafond, élongation)
- La dynamique de l'air : capacité équivalente du volume d'air, taux de renouvellement d'air, coefficients d'échanges convectifs linéarisés
- La gestion des systèmes : niveaux de consigne, instants de relance (dynamique au niveau de l'échantillon)

L'évaluation sur un ensemble de ménages pour un type de bâti donné (section 4.3) a mis en évidence la prépondérance des caractéristiques constructives sur la caractérisation du report (taux) et la dynamique de la phase de recouvrement. Ainsi, pour une évaluation sur un périmètre élargi de consommateurs, il est nécessaire de caractériser le parc de bâtis. Une fois cette étape réalisée il sera possible de poursuivre l'analyse en recherchant les gisements d'effacement du parc modélisé.

L'évaluation de différentes stratégies de pilotage direct a montré que les bâtis les plus anciens sont d'autant plus sensibles au choix du signal de contrôle. A l'inverse, les effets d'un effacement sont modérés pour les bâtis les plus récents mais la perte de diversité qui en résulte est d'autant plus marquée.

4.4.2 Hypothèses liées à la gestion des systèmes

Les études de cas de la partie 4.3 ont montré que l'évaluation de la perte de diversité suppose d'être en mesure d'évaluer et de caractériser la diversité d'origine comportementale.

Les résultats des évaluations du report et de la durée de la phase de recouvrement sont sensibles aux choix de modélisation de la gestion des systèmes. Dans le cas limite où l'ensemble des ménages régulerait les systèmes avec la même consigne, on observe un phénomène oscillatoire dont l'évolution dépend de la diversité fonctionnelle du parc et des

sollicitations externes (climat notamment). Dès lors que nous supposons que le scénario de gestion est de type *dynamique*, la période de recouvrement est limitée à quelques heures après l'effacement, et cette période de retour à l'équilibre dépend alors essentiellement des caractéristiques du bâti. La gestion dynamique des équipements se traduit par l'introduction de non-linéarités dans les modèles et déforme la courbe de charge par rapport au cas d'un parc homogène en consigne. La prise en compte de scénarios dynamiques est donc une étape indispensable pour s'assurer du réalisme d'un parc de consommateurs pour l'usage chauffage.

Il est donc nécessaire à ce stade de confronter les résultats issus de simulations à des données expérimentales afin d'identifier des profils de demande réalistes. D'autre part, il serait intéressant de poursuivre le travail de modélisation des ménages en recherchant l'existence de typologies de ménages ayant des comportements (scénarios de présence et surtout scénarios de gestion de la consigne) similaires. Des typologies d'individus ont été recherchées à partir de l'exploitation de l'enquête emploi du temps *INSEE 2010* [INSEE2010] pour la valorisation des effacements au niveau d'un ensemble de consommateurs. Les principales étapes de construction du modèle de présence sont données dans l'annexe D. En associant les typologies de ménages aux bâtis présents dans le parc nous serons ensuite en mesure de proposer des méthodes d'identification des flexibilités de la courbe de charge agrégée.

4.4.3 Perspectives

Les études de cas de ce chapitre ont permis de souligner les effets de modulation de la charge produite par les effacements. Pour les cas étudiés, la quasi-totalité de l'énergie non consommée durant la phase de contrôle est reportée et les économies réalisées s'apparentent aux déperditions à travers l'enveloppe. L'évolution de la phase de recouvrement dépend essentiellement de la constante de temps longue du système étudié et du mode de gestion des appareils.

En supposant que les occupants diminuent à minima la consigne durant la période nocturne, l'essentiel du report a lieu durant les premières heures de la phase de recouvrement et est borné par l'instant de changement de consigne.

L'effet de saturation au niveau local (logement) est déterminé au premier ordre par les performances thermiques des bâtis et le dimensionnement des systèmes.

Le report observé dépend largement du mode de gestion des systèmes choisi et des performances thermiques du bâtis. Au niveau agrégé (évaluation de la dynamique parc), on peut donc s'attendre à ce que le report soit dimensionné par la structure du parc et la forme de la demande en consigne.

Afin de représenter un ensemble de consommateurs sujet à des effacements, il est donc nécessaire de proposer non seulement une représentation réaliste du parc de logement mais également la diversité d'usages des équipements, ce qui fera l'objet des développements du chapitre 6.

Chapitre 5

Exploitation de données issues d'expérimentations

Sommaire du chapitre

5.1	Données disponibles issues d'une expérimentation	139
5.1.1	Présentation de l'expérimentation	139
5.1.2	Caractérisation des consommateurs de l'échantillon global	141
5.1.3	<i>Nettoyage</i> des données	142
5.1.4	Caractérisation des consommations individuelles et de l'aggrégat	144
5.1.5	Caractérisation du foisonnement journalier des courbes de charges	147
5.2	État de l'art des méthodes d'estimation de la courbe de référence à partir de données terrain	149
5.3	Analyse de quelques effacements - méthodes	151
5.3.1	Caractérisation des effacements à partir de l'exploitation des index de consommation des logements	151
5.3.2	Consommations d'ECS pour les logements équipés de ballons électriques	159
5.3.3	Index pour l'usage chauffage	172
5.4	Conclusion du chapitre	189

Résumé

Dans ce chapitre on exploite les données issues d'une expérimentation de pilotage de charges thermiques. Après une brève présentation des données disponibles, on s'intéresse à deux séries de données.

La première série de données concerne un échantillon d'expérimentateurs d'une centaine de logements, dont les données mesurées à disposition sont uniquement les relevés d'index globaux. On associe à chaque logement la température extérieure relevée dans la station météorologique la plus proche.

La seconde série concerne un nombre limité de clients (25) pour lesquels les données accessibles sont les suivantes: une température mesurée dans le logement, les index des voies de chauffage pilotées, les index de consommation totale du logement et si un pilotage distant des appareils de chauffage est programmé par les ménages, celui-ci est connu.

Dans un premier temps, l'exploitation des données issues de l'expérimentation a permis de caractériser la variabilité des courbes de charge et des consommations individuelles puis de la courbe de charge agrégée d'une centaine de ménages.

Après un état de l'art des méthodes existantes de reconstruction de la courbe de référence, on propose une méthode d'évaluation simplifiée afin de construire une référence permettant de caractériser les effacements réalisés. La méthode pour la construction d'une référence est contrainte par les données disponibles, qui n'ont pas permis de mettre en œuvre les méthodes déjà connues et brièvement introduites dans la partie 5.2. Par conséquent, la représentativité et la validation des évaluations proposées dans ce chapitre ne sont assurées qu'à la condition de valider la méthode d'estimation de la courbe de référence, ce qui n'a pas été possible avec les données à disposition.

Cette analyse d'effacements à partir des courbes de charge totales logement permet néanmoins de donner des éléments de caractérisation de la dynamique globale d'un parc agrégé de consommateurs résidentiels dont les *comportements* (approchés par l'existence de stratégies de pilotage des équipements) sont prépondérants aux horaires d'effacements, comme cela a pu être mis en avant en simulation dans le chapitre 4 par l'étude de l'influence du modèle de présence.

Les index des voies de l'usage *ECS* d'une centaine de ballons à accumulation étaient également disponibles. À partir de ces données, on montre dans la partie 5.3.2 qu'il est possible d'ajuster un modèle simple de ballon de manière à reproduire la dynamique globale du parc instrumenté. À partir de ce modèle, on montre la déformation de la charge créée par l'envoi d'un signal de commande distant durant les *heures creuses* (choix imposé du fait de la structure des données disponibles).

Dans une dernière partie du chapitre, on cherche à caractériser plus finement les effets des effacements sur 25 logements pour lesquels les index des voies pilotées sont disponibles. À partir de ces données, un travail d'identification d'un modèle thermique du bâtiment a été proposé. Les raisons de l'impossibilité d'identifier un modèle dynamique avec les données disponibles sont présentées dans la partie 5.3.3.

5.1 Données disponibles issues d'une expérimentation

5.1.1 Présentation de l'expérimentation

Les données exploitées sont issues de l'expérimentation *MODELEC*¹ dont l'objectif est de

*tester une solution d'effacement de consommation chez des clients résidentiels
couplée à une solution technologique de gestion de la consommation*²

Dans le cadre de l'expérimentation, des stratégies de pilotage direct de certaines charges thermiques (chauffage et ECS) chez des participants volontaires ont été testées. Ceux-ci sont avertis quelques heures avant l'envoi du signal de l'horaire et la durée du pilotage distant. Cette commande consiste en un signal du type *ON/OFF*, c'est-à-dire une commande u_{cc} (le pilotage ne modifie pas la consigne).

L'échantillon brut des individus disponibles (dans le cadre de ces travaux) est composé de 216 participants dont on connaît les caractéristiques qui sont présentées dans le tableau 5.1.

Les données exploitées sont les index globaux (index de consommation au niveau d'un logement) relatifs à chaque plage tarifaire ainsi que ceux de certaines des voies d'usages spécifiques, enregistrées sur la période *Décembre 2014 - Février 2015* soit 90 jours de données. Un boîtier installé chez les participants permet de collecter les index globaux toutes les 5 minutes si une consommation est enregistrée (sensibilité d'un W.h). Par conséquent,

¹<http://www.projet-modelec.fr>

²Les participants ont la possibilité de piloter à distance les appareils instrumentés dans le cadre de l'expérimentation et ont accès à une interface leur permettant de suivre leur consommation

Tableau 5.1 Caractéristiques connues des individus de l'échantillon

Caractéristique	Valeur
Lieu d'habitation	Code postal du logement
Type d'abonnement	Base, HP/HC
Puissance souscrite	6, 9, 12, 18 <i>kVA</i>
Type de logement	Maison ou appartement
Surface habitable (déclarée) du logement	<i>m</i> ²
Système ECS	Chauffe eau électrique ou non
Nombre d'individus dans le logement	Nombre entier
Nombre de pièces du logement	Nombre entier

l'absence de donnée signifie ou bien l'absence de consommation ou bien une défaillance du système de collecte. Une étape de *nettoyage des données* a donc été nécessaire. Ce processus est détaillé dans la section 5.1.3.

Pour chaque logement, 1 à 4 voies sont instrumentées et pilotées à distance. Ces voies correspondent à certains usages spécifiques (ECS et chauffage) et les données sont enregistrées toutes les 10 minutes si une consommation est détectée (même sensibilité).

Dans l'échantillon global (216 logements), 30 logements ne sont pas inclus³ dans l'expérimentation, tandis que les 186 autres logements ont été soumis à divers effacements, définis par l'heure d'envoi du signal de contrôle et la durée du contrôle. On note par exemple (18h, 1h) un effacement d'une heure débutant à 18 h.

Les programmes d'effacements ont été construits en subdivisant l'échantillon en 4 sous-groupes dont les consommations journalières sont comparables (critère énergétique permettant de définir *a priori* des sous-groupes semblables selon ce critère).

Dans la suite on exploitera plus particulièrement les données issues de 5 jours avec pilotage: il s'agit de 5 jours consécutifs d'une semaine de janvier au cours desquels un ordre d'effacement a été envoyé à l'ensemble des participants à 18h30. La durée de l'effacement est d'une heure. Pour le jour 5, un second ordre d'effacement est envoyé aux logements de l'un des sous-groupes à 22h pour une durée d'une heure.

³Ils ne reçoivent pas de signaux de pilotage direct. Ces logements peuvent en revanche être exploités pour la construction des indicateurs en l'absence de contrôle ou pour la construction d'une courbe de charge de référence.

5.1.2 Caractérisation des consommateurs de l'échantillon global

La figure 5.1.1 synthétise les distributions de données disponibles pour les individus de l'échantillon. Connaissant le code postal de chaque logement, on associe à celui-ci la température extérieure de la sous-station météorologique la plus proche. Les données de températures extérieures sont issues de *MeteoFrance*⁴ et les historiques sont donnés au pas tri-horaire.

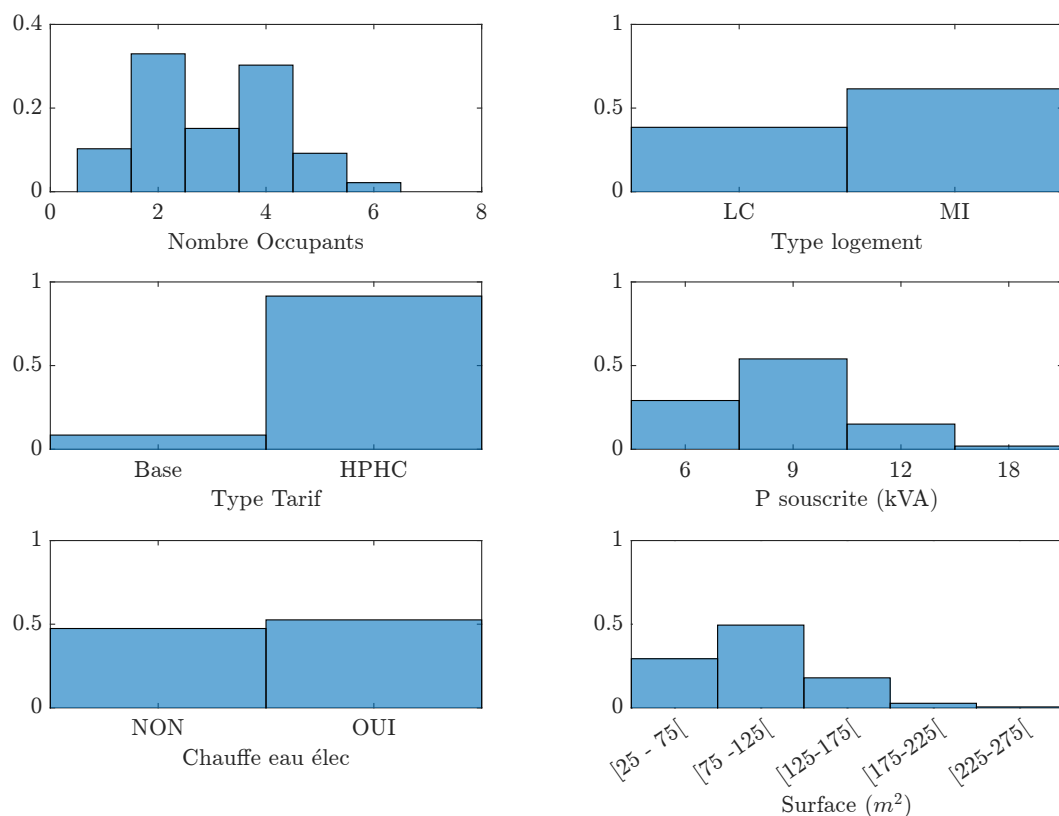


Figure 5.1.1 Distributions des caractéristiques des participants de l'échantillon utiles dans le cadre de ce travail

L'échantillon de participants disponibles présente quelques spécificités et n'est donc pas représentatif du parc résidentiel français. Globalement, les participants occupent plutôt des logements de type *maisons individuelles*, et par conséquent, la surface des logements est assez importante (1/3 de *petits logements* de surface inférieure à $70m^2$, 1/3 des logements dont la surface dépasse $100m^2$). La quasi totalité des participants a souscrit un abonnement avec

⁴www.meteofrance.fr

deux tarifs (désigné par *HP/HC* dans la suite). Cette sur-représentation des abonnements *double tarif* dans l'échantillon a pour effet une perte importante de foisonnement de la courbe de charge agrégée au moment du passage en *heures creuses*. Enfin, on notera que les chauffe-eaux électriques de plus de la moitié de l'échantillon ont été instrumentés ⁵.

5.1.3 Nettoyage des données

Dans la suite, on conserve les notations introduites dans le chapitre 3 et on désigne par CDC_{30} et CDC_{10} les puissances moyennes appelées à 10 et 30 minutes respectivement.

5.1.3.1 Données des index globaux

Pour chaque client, on exploite les relevés de chaque index donné à 5 minutes, lissé sur 10 minutes⁶. Les instants d'enregistrement des données n'étant pas tout à fait périodiques, les index sont tout d'abord linéairement interpolés à la minute. Pour chaque logement, on détermine les instants de mesure les plus fréquents et on reconstruit alors la courbe d'index à pas fixe à 10 minutes. Dans la plupart des séries de données, les deux index sont relevés au moment du changement tarifaire. Lorsque cela n'est pas le cas (peu fréquent), l'énergie est affectée proportionnellement à la période d'incertitude⁷.

La qualité hebdomadaire est évaluée pour chaque série de données par le rapport entre le nombre de points de mesures effectivement disponibles et le nombre de points théoriques pour chaque jour.

Ce critère ne donne pas d'indication sur la temporalité des données *manquantes*, aussi pour les jours et les logements où la qualité des données est inférieure à 5% selon ce critère, une analyse supplémentaire est nécessaire. On considère que si la durée de l'interruption d'envoi des données est supérieure à 1h, alors les données ne sont pas exploitables⁸ (effet lissant sur les courbes de charges estimées).

En pratique, la consommation en *base* des logements (*a minima* les appareils en veille et la box elle-même...) fait qu'une information de consommation devrait être envoyée pour

⁵Il est possible que certains ménages soient équipés d'un chauffe-eau et que celui-ci n'était pas piloté dans l'expérimentation

⁶Filtrage nécessaire au vu des données disponibles, cohérent avec les données échantillonnées disponibles pour l'étude de la seconde partie du chapitre

⁷Un majorant de la durée avec absence de données est $2 \cdot 10$ min

⁸Il serait possible de définir des plages horaires pour ce filtrage, néanmoins, les données d'index logements disponibles étant globalement de *bonne qualité* au sens de notre critère, cette étape ne nous a pas semblé nécessaire

chaque point. Le taux de défaillance global est très faible (de l'ordre de 1%).

Le nombre de logements distincts inclus dans l'analyse n'est pas le même suivant les jours considérés. Pour certains jours, le nombre de logements à disposition après cette étape ayant été jugé trop faible pour s'assurer de la représentativité de la courbe agrégée client par rapport à celles des jours sans défaillance, les données n'ont pas été exploitées. Il n'y qu'un seul cas de ce type. Pour ce jour, la défaillance provient certainement du *concentrateur* et non des systèmes installés chez le client (*energy box* individuelle).

A partir des séries globales, on affiche les courbes journalières sur la période $8h - 7h59$ soit 89 jours complets. L'échantillon est ensuite scindé en deux: on conserve d'une part les jours où aucun ordre d'effacement n'a été émis et d'autre part les jours avec au moins un ordre (cet ordre est envoyé au moins à l'un des 4 groupes formés pour l'expérimentation).

La figure 5.1.2 permet de mettre en évidence l'effet lissant de l'échantillonnage pour un logement quelconque et sur une série de données de consommations totale logements de $\Delta T_s = 96h$ (voir aussi [16]). On peut également observer sur cet exemple la gestion temporelle du chauffage dans le logement⁹ le ménage a une stratégie de pilotage avec coupure (ou passage en *hors gel* éventuellement) lors des moments d'absence et de nuit et des habitudes de vie plutôt *régulières*¹⁰ du point de vue de sa courbe de charge.

5.1.3.2 Données d'usages spécifiques

Le système assurant la collecte des index de consommations des voies pilotées n'est pas le même que celui pour l'index global, et les données de chaque voie sont collectées au pas de 10 minutes. Si aucune consommation n'est détectée (sensibilité d'un W.h), aucun signal n'est envoyé. La procédure pour l'estimation des courbes de charge moyenne est similaire à celle proposée pour les index globaux mais une étape supplémentaire a dû être ajoutée.

Les consommations des voies d'usages spécifiques instrumentées sont régulièrement nulles (extinction des appareils de chauffage, asservissement de l'ECS). L'absence de relève en cas de non consommation permet de réduire considérablement la taille des données enregistrées mais rend la procédure de traitement des données utilisées dans ce travail plus complexe.

⁹La demande pour l'usage chauffage est en partie identifiable sur la courbe de charge totale représentée. Les instants de relance du chauffage sont facilement identifiables, ainsi que les cycles de fonctionnement à plein régime (effet de saturation)

¹⁰Évaluation qualitative

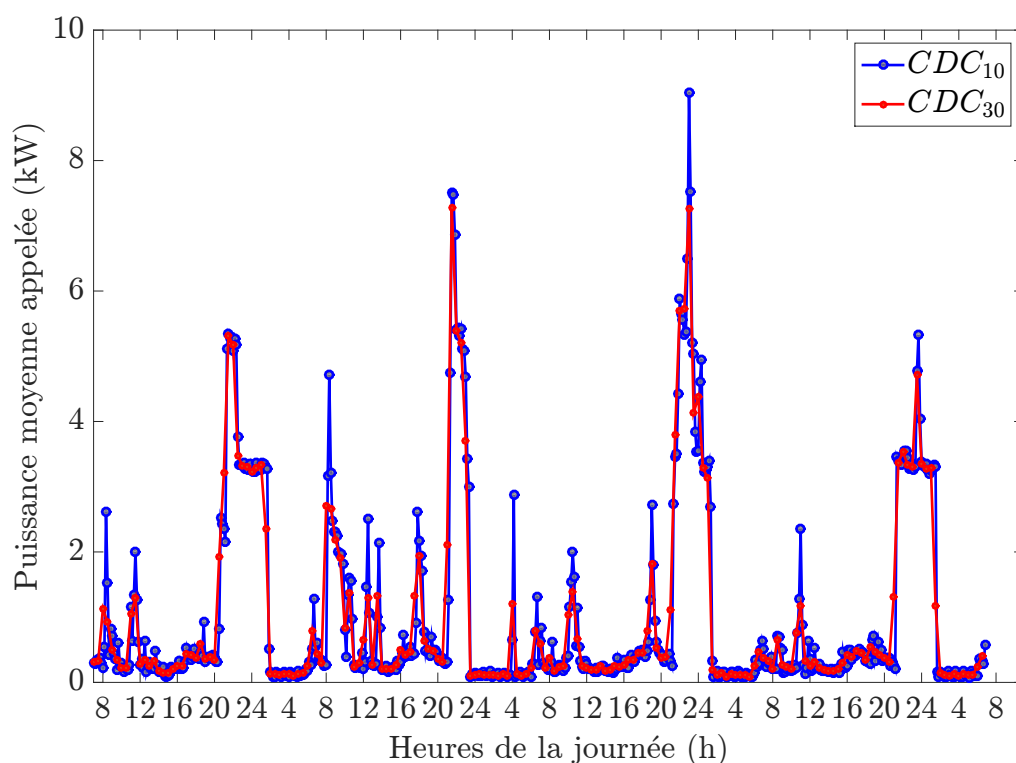


Figure 5.1.2 Courbes de charge moyennes à 10 et 30 minutes, de l'un des logements de l'échantillon, série de données sur 4 jours

Pour certains individus, les programmes enregistrés dans les *energy box* associées à l'expérimentation ont été exploités afin de réduire l'incertitude liée au traitement des données.

On suppose qu'en l'absence de données, si une extinction des systèmes a été planifiée, celle-ci a nécessairement eu lieu, et donc l'absence de données correspond à l'absence de consommation. Les instants d'allumage planifiés permettent de réduire l'erreur sur les instants de relance des systèmes (l'apport est toutefois limité par le pas d'échantillonnage). Cette étape a permis d'améliorer la fiabilité des séries de données issues de l'exploitation des index d'usages spécifiques.

5.1.4 Caractérisation des consommations individuelles et de l'agrégat

Afin de caractériser la variabilité des consommations au cours de la journée, on s'intéresse aux courbes de charge de l'ensemble des logements disponibles et valides pour les jours sans ordre d'effacement, c'est-à-dire qu'on exploite un échantillon d'environ 130 participants

(environ 3000 courbes de charges de 144 points). La figure 5.1.3 met en évidence la variabilité des consommations chez un même ménage et entre les ménages (ces observations sont en adéquation avec l'étude de Hiller [78]). Chaque colonne représente un même ménage, chaque ligne un jour donné. Le trait épais marque la séparation entre les jours de type *semaine* et ceux de type *week-end*. Certains participants se démarquent par une consommation hebdomadaire particulièrement importante (par exemple les numéros 66 et 109), tandis que pour d'autres participants, on remarquera la volatilité importante de leur consommation journalière (numéros 20, 39, 81). L'histogramme de la figure 5.1.4a permet de visualiser les consommations journalières de l'ensemble des 3000 CDC et donne donc une image de la variabilité existante dans l'échantillon. La figure 5.1.4b représente la distribution des consommations journalières totales (tous usages) *surfaciées* dans l'échantillon, ce qui permet de visualiser la variabilité des consommations corrigées de *l'effet taille* du logement.

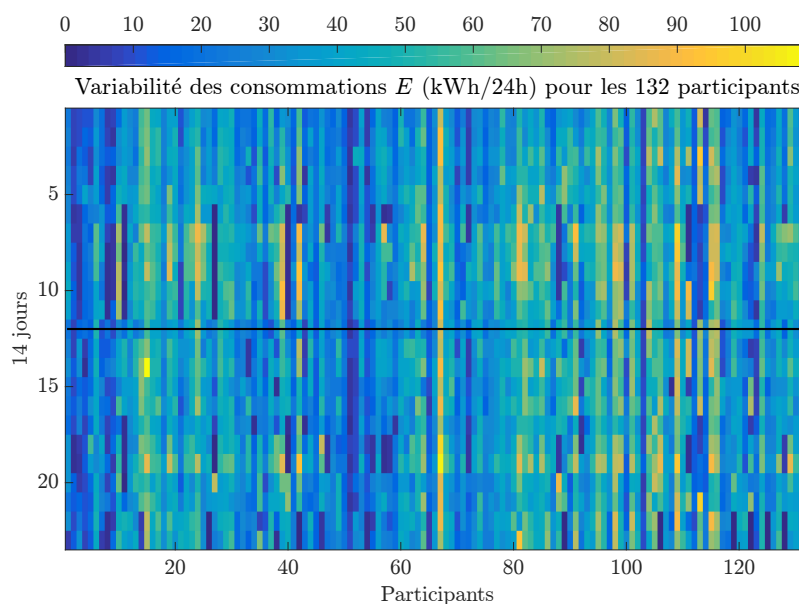


Figure 5.1.3 Consommations énergétiques journalières selon les participants et les jours disponibles

L'exploitation des 77 courbes de charges de l'usage *ecs* pour les jours sans effacement permet de caractériser la variabilité du profil lié à cet usage spécifique. Comme vu dans la partie 5.1.2, la prépondérance des abonnés en double tarif dans l'échantillon introduit une pointe importante à compter de 22h, associée essentiellement à l'asservissement des chauffe-eaux¹¹. Pour un peu plus de la moitié des participants, le chauffe-eau a été instrumenté.

¹¹Les autres équipements éventuellement pilotés par les ménages ne sont pas connus

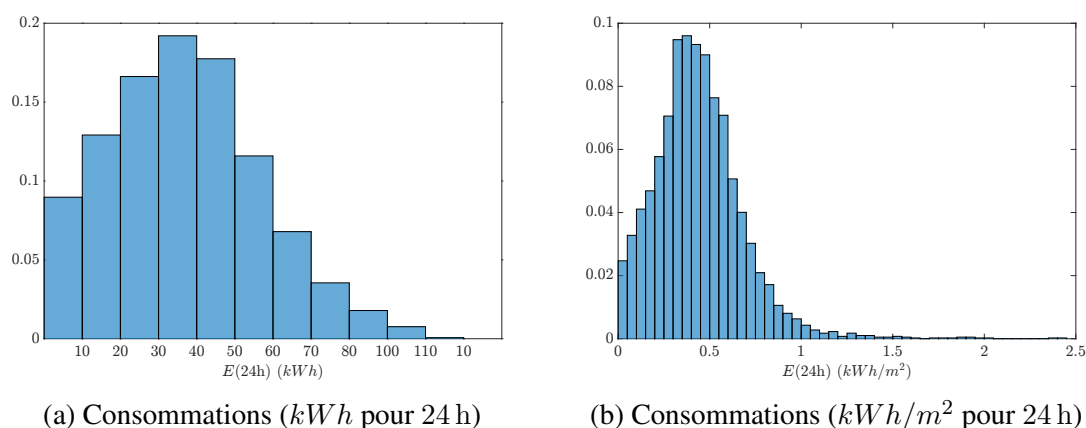


Figure 5.1.4 Distribution des consommations journalières pour les 3000 CDC de l'échantillon de référence exploité

Pour les ménages non équipés de chauffe-eau ou dont le système n'a pas été instrumenté, on suppose pour les calculs que la courbe de charge de l'usage est nulle¹².

On note $CDC_{agg.hecs}$ la courbe de charge agrégée hors usage ecs instrumenté¹³ et CDC_{agg} la courbe de charge agrégée des consommations totales pour les logements disponibles.

La variabilité de la courbe de charge agrégée $CDC_{agg,30}$ de l'ensemble des logements et celle de la série $CDC_{agg.hecs,30}$ sont données à la figure 5.1.5. Les rectangles délimitent le premier et le troisième quartile. La médiane est représentée par une ligne rouge dans chaque rectangle. La courbe en trait continu noir représente la demande moyenne sur les jours disponibles et les pointillés verticaux délimitent les valeurs extrêmes.

La comparaison des courbes de charges journalières moyenne des jours de semaine et des jours de week-end montre que la consommation des ménages est en moyenne légèrement plus importante le week-end, avec un écart-type plus important. Toutefois, la taille de l'échantillon ne permet pas de valider statistiquement l'indépendance entre les valeurs ainsi calculées. **Nous avons conservé l'ensemble des jours sans effacement dans l'échantillon des jours disponibles pour construire la courbe de référence.**

¹²Ce qui revient à supposer que l'ensemble des systèmes disponibles sont pilotés dans l'expérimentation. Cette hypothèse est certainement une limite pour la suite (c'est ce qui ressort de la figure 5.1.5, mais elle permet de poursuivre l'analyse)

¹³Une étape d'identification des appels de charges liés à l'usage ECS pour les systèmes non instrumentés pourrait être mise en œuvre, l'apport d'une telle démarche reste cependant faible compte tenu de l'ensemble des autres usages dont on ne connaît pas les modes de pilotage utilisés (par exemple déplacement des équipements blancs aux heures creuses par programmation)

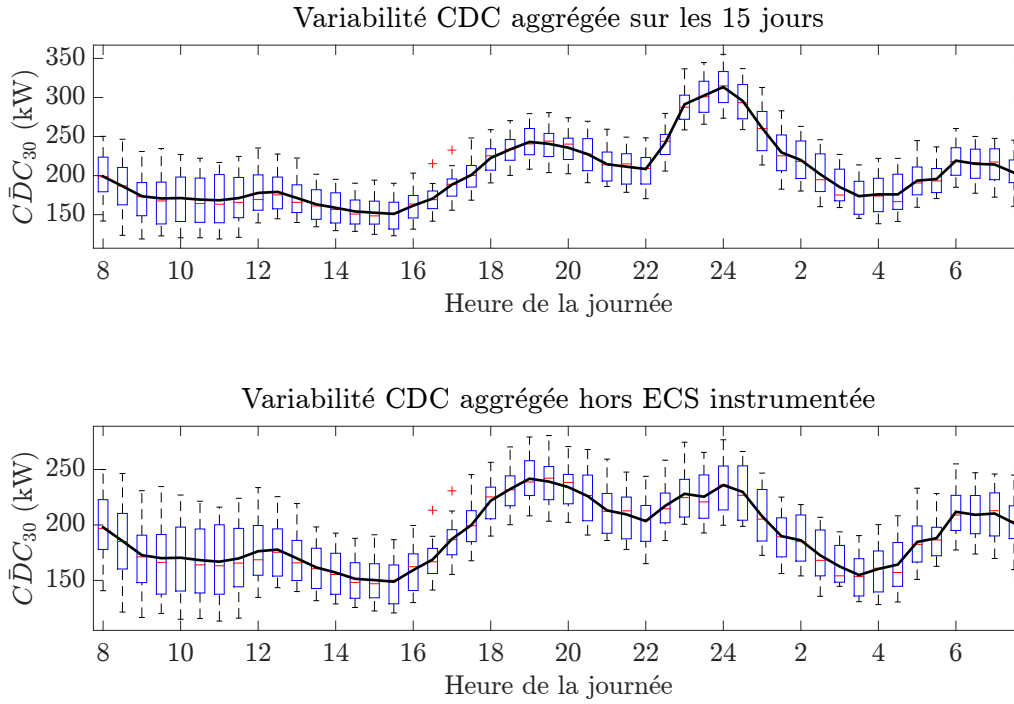


Figure 5.1.5 Variabilité journalière des courbes de charges agrégées

5.1.5 Caractérisation du foisonnement journalier des courbes de charges

Afin d'évaluer la déformation de la charge associée au pilotage direct dans un cadre expérimental, on propose dans un premier temps de caractériser la diversité dans l'échantillon de consommateurs disponibles en l'absence de signal d'effacement. On s'intéresse donc dans un premier temps à l'échantillon construit à partir des courbes de charges globales logement unitaires CDC_i où i désigne un des N_L logements disponibles. On ne considère que les N_{non} jours ne contenant pas d'ordre d'effacement sur l'horizon d'observation. On ne prend pas en compte les discontinuités introduites par les jours avec effacement dans l'échantillon, c'est-à-dire que la série temporelle représentant la courbe de charge d'un logement i est de la forme:

$$CDC_i(\Delta T) = [CDC_i(\Delta t_1), \dots, CDC_i(\Delta t_k), \dots, CDC_i(\Delta t_{N_{non}})]$$

où Δt_k désigne la période d'observation (1 jour ou moins) relative au jour k , $k \in \llbracket 1, N_{non} \rrbracket$ et ΔT la période d'observation totale issue de la concaténation des N_{non} jours disponibles

sans prendre en compte les discontinuités temporelles introduites¹⁴. On note pour chaque jour k l'horizon d'observation: $\Delta t_k = [t_{k,1}, t_{k,2}]$ selon les notations introduites dans la partie 3.1.

Les effacements étudiés dans la partie 5.3 n'ont lieu que le soir, par conséquent, nous avons choisi de réduire la période d'observation à un intervalle nous assurant que la pointe de demande se produit effectivement aux heures pendant lesquelles le pilotage a lieu: $t_1 = 16\text{h}30$ et $t_2 = 21\text{h}30$. Le choix de t_2 est contraint par les spécificités de l'échantillon disponible (figure 5.1.5). La fin des périodes de contrôle se situe au moins 2h avant t_2 , et la pointe liée à la relance à l'issue du contrôle se situe toujours dans cet intervalle (voir figures de la partie 5.3).

La diversité au sein de l'échantillon est caractérisée par les indicateurs définis dans la partie analyse de courbe de charge: le coefficient de foisonnement (équation 3.1.4) et l'ADMD (équation 3.1.5).

On note $CDC_{N_L}(\Delta t)$ la matrice des courbes de charge du parc constitué des $N_L = 186$ logements (l'indication Δt est omise pour alléger les notations dans la suite):

$$CDC_{N_L} = [CDC_1, \dots, CDC_l, \dots, CDC_{N_L}]^T$$

Afin de donner une image de la variabilité de la diversité infra-journalière (pointe du soir) de l'échantillon disponible, on suppose dans ce paragraphe que les courbes de charge infra-journalières des différents individus sont indépendantes. Cette hypothèse est en partie motivée par la disparité des individus sur le territoire. La dépendance des consommations selon d'éventuels déterminants exogènes n'est donc pas représentée avec cette hypothèse et il n'est pas possible d'évaluer son effet sur les indicateurs de foisonnement calculés.

On effectue un échantillonnage de type *bootstrap* à 1000 tirages avec remise (logements indépendants) afin de donner une image de la variabilité journalière du parc qu'il est possible d'observer avec l'échantillon initial. Les distributions ainsi obtenues pour l'ADMD et le facteur de diversité sont représentés sur la figure 5.1.6. Les valeurs moyennes obtenues pour l'agrégat de N_L individus sont cohérentes les valeurs disponibles dans la littérature (voir tableau 5.2).

¹⁴Ces discontinuités sont dues à la présence des jours avec effacement qui sont retirés de l'échantillon et éventuellement au fait que l'intervalle Δt_k est inférieur à une journée

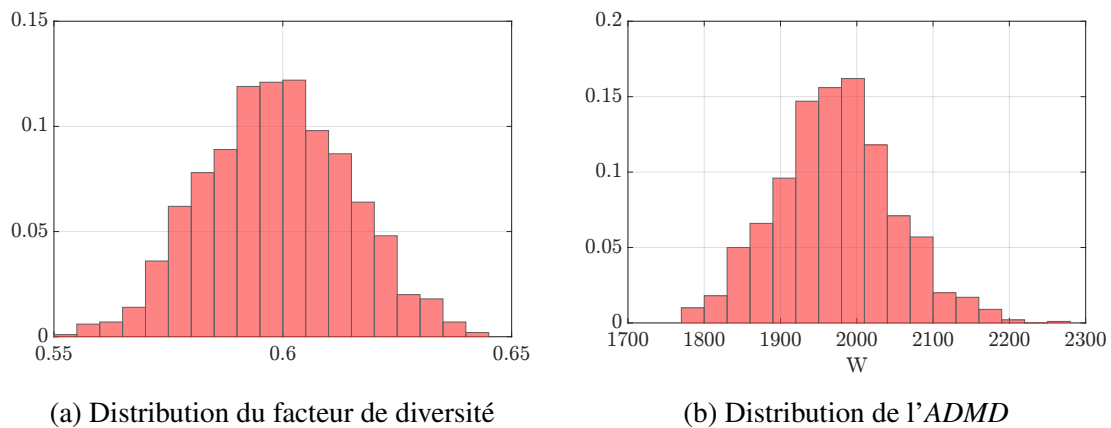


Figure 5.1.6 Indicateurs du foisonnement sur l'échantillon des N_L logements obtenus pour 1000 tirages des CDC

5.2 État de l'art des méthodes d'estimation de la courbe de référence à partir de données terrain

L'évaluation des effets d'effacements diffus (seuls les pilotages directs sont considérés) sur la demande agrégée de consommateurs a déjà fait l'objet d'un certain nombre d'expérimentations et d'études. Néanmoins, les études portant plus spécifiquement sur la quantification des économies réalisées et du volume de consommation déplacé dans le cas de charges thermiques du secteur résidentiel sont relativement peu nombreuses en comparaison avec celles portant sur les effacements de sites industriels.

Les méthodes de reconstruction de la courbe de charge de référence peuvent être subdivisées en deux groupes [76] suivant la disponibilité ou non d'un groupe de contrôle.

Des revues des méthodes existantes (*jours proches*, *calibrage climatique*, *régressions*) utilisées par les opérateurs d'effacements aux États-Unis sont disponibles dans [5, 68, 72, 92]. Pour les méthodes de type *jours proches*, l'algorithme de choix des jours diffère légèrement selon les opérateurs et l'objectif poursuivi. Une revue des difficultés liées à l'estimation de la référence est proposée dans [30] et illustrée par la comparaison des résultats issus des méthodes détaillées dans [72] à partir des données de consommations à 15 minutes de 35 bâtiments divers appartenant à un complexe universitaire.

En exploitant les données de consommations horaires d'un échantillon de 500 logements équipés de climatiseurs répartis sur 3 zones climatiques, Bode et.al [21] ont comparé une dizaine de méthodes d'estimation de la courbe de référence.

Les auteurs ont exploité les données de consommations individuelles des climatiseurs, ces mêmes données agrégées (somme des consommations de l'usage), les consommations globales du logement et les consommations au niveau d'un poste de distribution (une centaine de logements) et ont montré que les méthodes avec un groupe de contrôle donnent de meilleurs résultats (taille du groupe 4 fois supérieure à celui des logements effacés) si les critères de comparaison sont l'écart relatif et l'erreur absolue.

D'autre part, les résultats de l'étude montrent que les méthodes de construction de la référence de type *jours proches* ne sont pas adaptées au cas du secteur résidentiel (quelque soit les données utilisées). En l'absence de groupe de contrôle, les méthodes de type *régression* sont les plus satisfaisantes selon les indicateurs considérés. Ces résultats sont cohérents avec l'analyse de l'agrégation de courbes de charges du secteur résidentiel développée par Vuillecard [177], notamment compte tenu des données exploitées (index horaires).

Dans la plupart des méthodes identifiées une étape d'*ajustement* de la courbe de référence est nécessaire. La durée sur laquelle l'ajustement est effectué s'étend sur quelques heures avant l'envoi du signal de contrôle: 4h avant un événement de même durée dans [24], 10h pour un événement de 2h dans [76]). De plus, différents types d'*ajustement* [92, 117] sont couramment utilisés (additif, multiplicatif, ...).

Des méthodes innovantes ont également émergées pour l'évaluation d'effacement diffus sur le secteur résidentiel reposant sur les méthodes de partitionnement type *classification ascendante hiérarchique* [76] ou *k-means* (application à des consommateurs non résidentiels dans [189], comparaison de méthodes de partitionnement dans [129]). L'utilisation de ces techniques récentes requiert un échantillon de données bien plus conséquent que celui disponible pour être mise en œuvre et n'est donc pas plus détaillée dans ce travail¹⁵.

On propose une étude de cas portant sur quelques effacements dans la section 5.3. L'objectif de cette section est de proposer **une première évaluation directe des effacements réalisés dans le cadre du démonstrateur**. Pour cette étude, on exploite donc uniquement les données d'index à disposition pour les logements de l'échantillon après nettoyage et filtrage des séries temporelles, méthodes détaillées dans la partie 5.1.3. Ces travaux nous ont de plus permis d'identifier les limites de cette approche expérimentale.

¹⁵En particulier, il serait nécessaire d'avoir accès à un groupe de contrôle non disponible dans l'échantillon exploité

Remarquons pour la suite que **les méthodes de reconstruction de la courbe de référence sont contraintes par les informations à disposition et l'effectif de l'échantillon disponible**. En effet, certaines méthodes, comme par exemple la recherche de jours où la température extérieure était similaire à celle du jour effacé n'ont pas pu être testées au vu de l'hétérogénéité de l'échantillon (sous-échantillons d'individus similaires trop faibles).

5.3 Analyse de quelques effacements - méthodes

On propose d'évaluer quelques cas d'effacements réalisés à partir de trois séries de données d'index de consommations : les consommations globales au niveau d'un logement, les consommations d'un ensemble de chauffe-eaux pilotés (une centaine d'appareils), les index de voies de chauffage (23 logements, une centaine de voies de chauffage exploitables).

5.3.1 Caractérisation des effacements à partir de l'exploitation des index de consommation des logements

On cherche à évaluer l'effet d'un pilotage des voies de chauffage et ECS durant une heure, démarrant à 18h30. En pratique, compte tenu du faible nombre de chauffe-eaux en tarif *base*, on suppose que seules les voies de chauffage sont pilotées¹⁶. On dispose de 5 jours de semaine consécutifs pour lesquels ce type d'effacement est réalisé, chaque sous échantillon est noté EF_i , où i désigne le jour effacé (ordre chronologique).

Dans la partie 5.3.1.1, on donne les valeurs des indicateurs caractérisant la diversité de la demande pour les jours avec effacements, ce qui permet de donner des premiers éléments de caractérisation de la déformation introduite par le pilotage.

Dans la suite de cette partie, on cherche à caractériser plus précisément l'effet des effacements sur la demande agrégée, on détaille la démarche suivie pour construire une courbe de référence.

La seule méthode envisageable parmi les techniques présentées dans la section 5.2 pour construire une référence avec les données disponibles est de type *jours proches* (recherche de jours où la consommation énergétique totale du parc était similaire à celle du jour avec effacement étudié), en utilisant les données de l'ensemble des ménages pour les jours où

¹⁶Quelques logements ont des voies d'usages spécifiques pilotés qui ne sont pas les deux considérés, ce qui est négligé dans la suite.

Tableau 5.2 Indicateurs de foisonnement et diversité pour les 5 effacements (18h30, 1h), CDC à 10 minutes

Jours	$ADMD_{186,[t_1,t_2]}$ (kW)	$f_{186,[t_1,t_2]}$
Réf	1.9	0.6
EFF_1	2.7	0.72
EFF_2	2.9	0.74
EFF_3	2.7	0.72
EFF_4	2.9	0.73
EFF_5	2.9	0.75

aucun signal d'effacement n'a été envoyé.

On précise dans les 3 paragraphes de la partie 5.3.1.2 les étapes proposées de manière à construire une courbe de charge, appelée *courbe de référence*, permettant la comparaison au cas avec effacement (soit les effets d'un effacement de type contrôle u_{cc}).

Le symbole * pour une courbe de charge signifie qu'il s'agit de la référence reconstruite à partir de l'exploitation des données des jours sans signal d'effacement selon la méthode détaillée dans la partie 5.3.1.2.

5.3.1.1 Perte de diversité associée aux effacements de l'usage chauffage

La diversité structurelle du parc de consommateurs étudié dans ce chapitre a été caractérisée dans la partie 5.1.5. Étant donné que les usages pilotés sont uniquement des systèmes de chauffage et production ECS à accumulation, l'évolution des indicateurs caractérisant le foisonnement entre les jours avec et sans effacement sur la courbe de charge totale et la pointe du soir donne une indication sur la flexibilité liée à cet usage dans le parc (pour le soir et en supposant toujours qu'il n'y a pas de substitution avec un autre moyen de chauffage durant les effacements).

Le tableau 5.2 synthétise les résultats obtenus pour les 5 effacements d'une heure débutant à 18h30. Les indicateurs sont donnés en choisissant le même paramétrage que dans la partie 5.1.5: $[t_1, t_2] = [16, 21.5]$ h, les courbes de charges à 10 min, l'ensemble des consommateurs de l'échantillon, les 5 effacements 18h30 (signal envoyé à l'ensemble des voies instrumentées disponibles). Les valeurs de référence données dans le tableau sont les valeurs moyennes pour 1000 tirages selon la procédure détaillée dans la partie 5.1.5.

Ces valeurs permettent de donner un ordre de grandeur de la perte de diversité associée à des effacements (18h30, 1h) ainsi que de l'effet marginal en puissance. Pour les 1000 tirages avec *mélange* des jours sans effacement, on a les coefficients de variabilité (exprimés comme les rapports de l'écart-type à la moyenne) suivant:

$$\frac{\sigma(ADMD)}{\mu(ADMD)} = 0.02$$

$$\frac{\sigma(f)}{\mu(f)} = 0.02$$

On constate donc que les effacements génèrent une perte de diversité importante au niveau de l'agrégat, le coefficient de foisonnement est jusqu'à 25% supérieur par rapport au cas sans contrôle. Ces résultats montrent donc l'intérêt de la mise en place de stratégies de contrôle de la relance au niveau du parc afin de contrôler le phénomène.

5.3.1.2 Construction d'une courbe de référence

Procédure de sélection des jours similaires On recherche des jours où la consommation de l'ensemble des ménages est similaire à celles des jours avec effacement. L'intervalle de temps maximum pour la comparaison des consommations couvre la période allant de 8h au début de l'effacement (18h30)¹⁷. Environ 30% des jours de la période d'enregistrement disponible ne contiennent aucun ordre d'effacement, seule la moitié d'entre eux sont des jours de semaine. La distinction entre jour de *semaine* et de *week end* ne s'étant pas révélée concluante (consommation moyenne, forme de la courbe de charge), on intègre l'ensemble des jours sans ordre d'effacement dans l'échantillon des jours disponibles pour construire la référence. L'historique disponible étant limité, on conserve des jours postérieurs aux journées avec effacement dans le sous-échantillon des jours de référence, noté $EJref_i$.

Pour chaque série journalière EF_i , on détermine le nombre n_i de CDC_{10} disponibles et les logements concernés. On ne conserve que les logements dont les CDC_{10} sont complètes, c'est-à-dire qu'aucun jour étudié n'est manquant à l'issue de la procédure de traitement des données dans l'échantillon $EJref_i \cup EF_i$. Environ 130 courbes de charge unitaires logements sont communément disponibles pour l'ensemble des jours EF_i étudiés et environ 150 pour chaque jour EF_i . On choisit de conserver le maximum d'individus pour chaque événement, par conséquent les échantillons ne sont pas exactement les mêmes selon les jours

¹⁷Le choix de ce découpage des journées est motivé par les horaires d'effacements considérés et les horaires de différenciation tarifaire

effacés (influence sur la courbe de charge moyenne des 5 jours EF_i).

On calcule les consommations globales journalières E_j ($kWh/jour$) et on trace la monotone des consommations de l'échantillon $EJref_i$. On choisit alors parmi les 10 jours où la consommation est la plus importante les 3 jours pour lesquels la demande globale est la plus proche de celle du jour EF_i et on en fait la moyenne. Le nombre de jours choisi pour la construction de la référence est lié au nombre de *jours candidats disponibles*.

Méthode d'ajustement La méthode d'ajustement la mieux adaptée compte tenu de la forme de la courbe de charge est de calibrer la référence sur la rampe observable à partir de 16h. Pour cela on a testé plusieurs durées pour l'ajustement: entre le minimum vers 16h (début de la rampe) et le début de l'effacement, 1 et 2 fois la durée de l'effacement jusqu'au début de la période de contrôle et enfin une période de 10h avant l'ordre d'effacement. En augmentant la fenêtre de calcul, on obtient un effet lissant sur la courbe de référence. Compte tenu de la variabilité des courbes à 10 minutes, on a conservé le critère du double de la période effacée. Pour les courbes à 30 minutes, on choisit une fenêtre de 3h. On calcule alors l'écart moyen entre les CDC par rapport à la consommation mesurée sur la période, ce qui permet de donner un coefficient multiplicatif moyen noté α . Ce coefficient permet d'ajuster la demande avant effacement.

Évaluation des effacements La taille de l'échantillon disponible (nombre d'individus et nombre d'observations par individus) rend la procédure de construction de la référence complexe. Les horaires des effacements étudiés sont proches de l'instant de passage en tarif de nuit or l'échantillon est essentiellement composé d'individus ayant un double tarif. Par conséquent, le déclenchement des ballons et autres usages pilotés éventuels introduisent un bruit dans la courbe de charge, d'autant plus important lorsque la résolution temporelle est faible. Le processus d'ajustement ne permet pas de corriger le biais ainsi introduit. Une procédure plus fine pourrait consister à procéder par étapes successives en recherchant par itération la durée du recouvrement¹⁸ et en procédant à un ajustement sur les phases avant effacement et après la fin du recouvrement. Cette procédure serait pertinente sur un jeu de données plus important.

Une manière de corriger partiellement cet effet est de faire les évaluations avec les courbes $CDC_{agg.hecs}$, ce qui permet de lisser la pointe du passage en heures creuses¹⁹.

¹⁸Recouvrement tel que défini dans le chapitre 3

¹⁹Cette correction est partielle compte tenu du peu d'information sur les usages disponibles, comme cela a déjà été vu

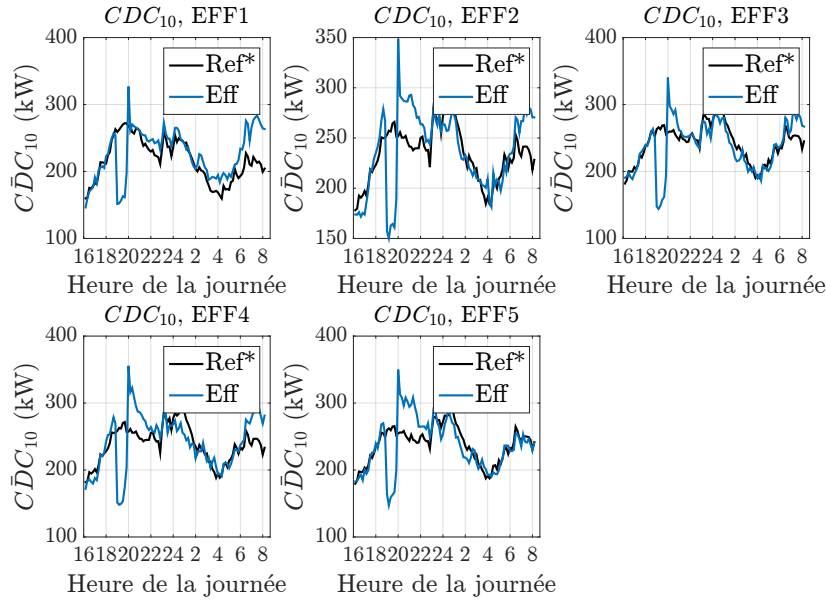


Figure 5.3.1 Évaluation des 5 jours d'effacements, estimation de la référence (noir) en recherchant des jours similaires (consommations globales), exploitation des données $CDC_{10,agg.hecs}$

On construit ainsi 2 courbes de référence, avec ou sans l'usage *ECS* synchronisée HP/HC.

Les 5 courbes $CDC_{10,agg.hecs}$ ainsi que la référence reconstruite selon la méthode décrite aux paragraphes précédents sont représentées sur la figure 5.3.1. La variabilité introduite par la relance du matin (à partir de 6h) illustre bien les limites de l'approche compte tenu des données disponibles. Afin de proposer une quantification de l'incertitude liée à la méthode de construction de la référence on trace l'évolution de l'écart relatif entre une courbe avec effacement et la référence estimée de type y (avec ou hors usage *ECS* instrumenté) données à x min:

$$\epsilon_{x \min, y}[k] = \frac{CDC_{x \min, y}[k] - CDC_{x \min, y}^*[k]}{CDC_{x \min, y}^*[k]}$$

Ce rapport est calculé à partir de 16h30 (voir la procédure d'ajustement des courbes), k désigne l'un des points de la série temporelle²⁰. On donne l'évolution de cet écart pour les courbes de charge à 10 et 30 minutes respectivement sur les figures 5.3.2 et 5.3.3. Les lignes horizontales permettent de visualiser les valeurs 10% pour la figure 5.3.2 (courbes à 10min) et 5% pour la figure 5.3.3 (courbes à 30min). La comparaison des résultats obtenus à

²⁰Par exemple, avec $x = 10$ min, $k = 60$ donne l'écart relatif à 17h30

partir des séries $CDC_{agg.hecs}$ et CDC_{agg} (respectivement hors usage ECS instrumenté et totale logement) met en évidence l'effet *déstabilisant* de la relance HC sur la méthode d'évaluation, c'est-à-dire le caractère assez peu robuste de la méthode de construction de la référence utilisée dans cette partie.

L'effet du passage HC est peu visible sur les séries à 30 minutes (figure 5.3.3). Toutefois, les figures 5.3.2 et 5.3.3 montrent également que l'évaluation des effacements à partir d'index à 30 minutes produit non seulement un lissage de la pointe du passage en HC mais, de la même façon, la pointe de relance en fin d'effacement est fortement lissée. Ceci peut s'interpréter par une diversité importante des usages, probablement d'autant plus marquée du fait de l'horaire de l'effacement.

Dès lors que le profil des usagers est bien connu, il serait possible de mettre en œuvre une stratégie de contrôle de la relance. Ce profilage devrait être recherché à partir de données échantillonnées à pas faible. Il serait intéressant, afin de poursuivre ce travail, de disposer de courbes de charge au pas de la minute voir inférieur sur un échantillon d'individus de taille au moins comparable.

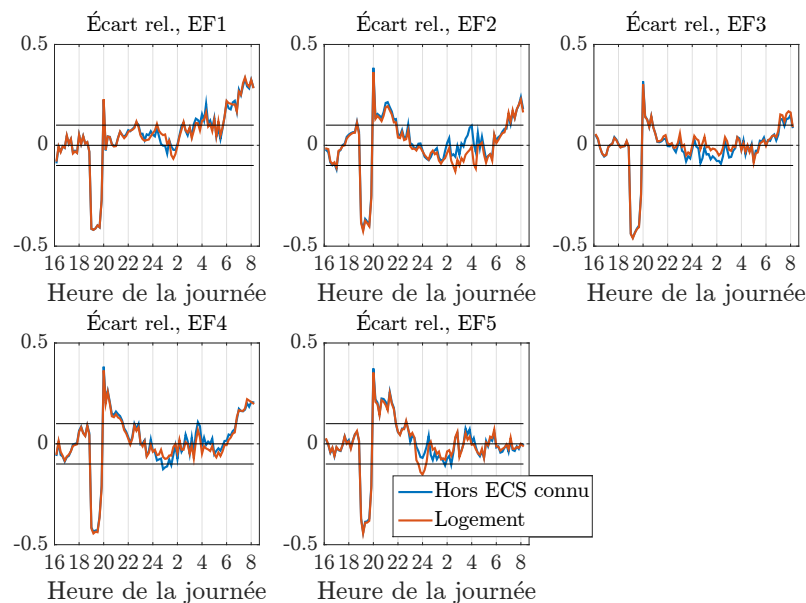


Figure 5.3.2 Écart relatif entre la référence estimée CDC_{10}^* et la courbe effacée $CDC_{10,i}$, $i \in \llbracket 1, 5 \rrbracket$ selon les données $CDC_{agg.hecs}$ et CDC_{agg} utilisées pour la reconstruction de la référence

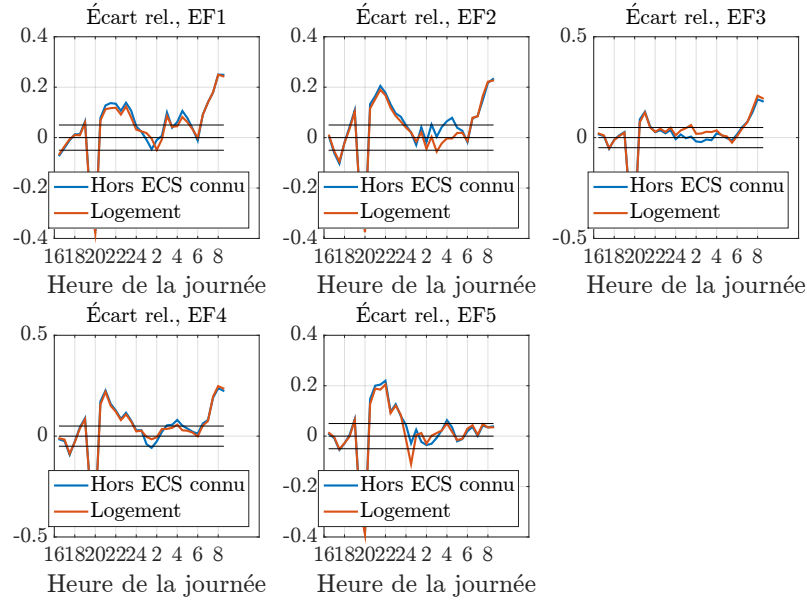


Figure 5.3.3 Écart relatif entre la référence estimée CDC_{30}^* et la courbe effacée $CDC_{30,i}$, $i \in [1, 5]$ en considérant les données $CDC_{agg.hecs}$ et CDC_{agg}

Les courbes de charges moyennes à 10 minutes montrent que le rebond (puissance appelée à la fin de l'effacement) est comparable à la puissance moyenne effacée et que la durée à *pleine puissance* est faible. Les deux étapes de la phase de recouvrement $p3$ (voir section 3.2.3.1) sont visibles sur la figure 5.3.2: on observe tout d'abord une perte de synchronisme des équipements sur une dizaine de minutes puis une phase de retour à l'équilibre thermique du bâtiment plus lente qui est observable durant 2h à 4h sur les figures 5.3.2 et 5.3.3.

Au vu de cette première évaluation, il semble que les remarques liées aux hypothèses de changement de consigne et à leurs effets sur le report vues dans le chapitre 4 sont réalistes. Toutefois, bien que les effacements soient réalisés quasiment exclusivement sur des systèmes de chauffage, l'évaluation porte ici sur des courbes de charges logement et non uniquement sur l'usage chauffage comme cela était le cas dans le chapitre précédent. Un ajustement du modèle thermique de bâti qui permettrait de valider les premières conclusions issues des simulations grâce à ces données n'est donc pas possible.

La CDC moyenne des 5 effacements permet de construire un profil moyen avec effacement. La référence est reconstruite de la même façon que pour les jours EFF_i . Les résultats pour les courbes moyennes $CDC_{agg.hecs}$ à 10 et 30 minutes sont représentés sur la figure 5.3.4.

Par construction, l'écart de consommation énergétique sur la période 16h30 – 18h30 est très faible, en revanche la pente de la rampe est sous-estimée.

L'écart relatif moyen $\mu(\epsilon)$ sur cette période est inférieur à 5%. En considérant une marge d'incertitude de 10%, les courbes d'effacement moyen permettent d'estimer que la période de recouvrement s'étend sur un peu plus de 2h. On estime à partir des index en énergie que le recouvrement énergétique est de $100\% \pm 20\%$, donc au moins de 80%.

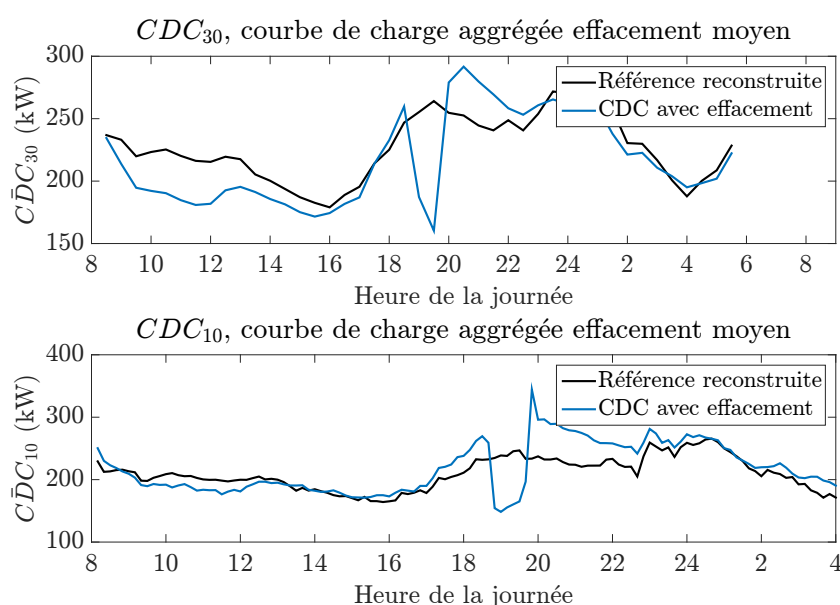


Figure 5.3.4 Effacement moyen réalisé et CDC^* en considérant les 5 jours consécutifs avec effacement

5.3.1.3 Apports et limites de l'évaluation

La méthode développée dans cette partie ne permet pas d'évaluer certains effacements. Cette limite est liée à la forme de la courbe de charge et à l'horaire de l'effacement considéré. Pour les effacements ayant lieu durant une phase *transitoire* - typiquement la rampe du soir ou du matin, la similarité des comportements des individus permet, malgré la taille de l'échantillon, de proposer une première évaluation de l'effet d'un effacement. Les résultats obtenus pour des horaires relatifs à des *creux* de consommations sont peu robustes et la méthode n'est applicable qu'après lissage temporel de la courbe. Des données plus fines (pas d'observation/de mesure) et un historique plus conséquent sont alors nécessaires pour

poursuivre la démarche.

Les quelques cas isolés disponibles d'horaires distincts le soir (comparaison d'effacements d'une heure démarrant respectivement à 17h, 17h30, 18h, 18h30, 19h) confirment l'influence de cet horaire sur l'existence d'un rebond mesurable et sur sa durée. Dit autrement, l'exploitation des données confirme le caractère prépondérant des modes de gestion du chauffage par les ménages dans le cas où une gestion temporelle dynamique du chauffage est observable.

Pour les effacements d'une heure à partir de 18h30 la déformation moyenne de la courbe de charge obtenue à partir des index à 10 minutes est similaire à celle représentée sur la figure 3.2.6. La forme de la déformation est caractéristique de la déformation observée sur un réseau à l'échelle agrégée suite à une coupure involontaire [98]. La durée du temps à pleine puissance paraît cependant plus faible qu'en simulation, ce qui est cohérent avec les remarques de la section 3.2.3.

La caractérisation de forme de la déformation de la charge est cependant limitée par les données à disposition. On peut voir sur la figure 5.3.1 qu'il est difficile de proposer une forme générique pour l'ensemble des 5 cas d'étude. Le tracé de l'effacement *moyen* (figure 5.3.4) confirme cette remarque.

Les données disponibles ne permettent cependant pas de s'assurer de la représentativité de la *référence ajustée* par rapport à laquelle les courbes avec effacement ont été comparées, ce qui constitue une limite essentielle à l'extrapolation de ces résultats.

5.3.2 Consommations d'ECS pour les logements équipés de ballons électriques

On dispose d'un échantillon d'une centaine de courbes de consommation spécifique ECS. Parmi elles, 3 sont inexploitable et 20 séries d'index sont trop partielles et ont été supprimées. Les paramètres d'intérêts pour cet usage spécifique sont synthétisés dans le tableau 5.3.

Les figures 5.3.5 et 5.3.6 montrent les courbes des charges agrégées des ballons selon le type d'abonnement à 10 et 30 minutes (effet lissant). Les courbes ont été normées chacune par leur puissance maximale de façon à faciliter la comparaison. Les échantillons utilisés pour la construction de ces courbes de charges agrégées ne sont pas les mêmes, avec des

Tableau 5.3 Caractéristiques connues des logements avec chauffe-eau électrique

Abon. \ Logement	Maison	Appartement	
Tarif unique	3	8	11
Double tarif	47	40	87
	50	48	98

effectifs très différents selon les cas, aussi la pointe journalière n'est pas du même ordre de grandeur. Pour les ballons non asservis à la plage HC, l'échantillon constitué de l'ensemble des courbes des jours sans effacement des consommateurs disponibles a été utilisé pour construire une charge agrégée, ce qui signifie que chaque consommateur est représenté autant de fois qu'il y a de jours sans ordre d'effacement. Pour les logements avec double tarif, l'ensemble de l'échantillon disponible des jours sans effacement est utilisé.

L'analyse des formes des courbes de charges de l'usage permet d'expliquer partiellement, à partir des données expérimentales, la structure de la demande.

Nous savons en effet que pour ces systèmes, les consommations sont dues d'une part au cyclage des ballons du fait des pertes et d'autre part aux puisages d'ECS, c'est-à-dire à l'interaction entre les ménages et les systèmes. La superposition des deux courbes donne par ailleurs une vision schématique du déplacement de charge associé à l'asservissement tarifaire.

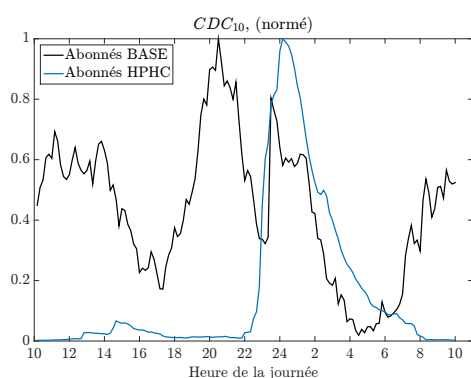


Figure 5.3.5 Courbes de consommation normalisée, à 10 min, superposition selon les abonnements

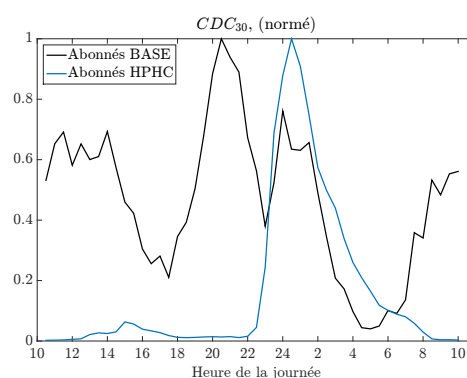


Figure 5.3.6 Courbes de consommation normalisée, à 30 min, superposition selon les abonnements

Remarque 5.3.1. *On retrouve sur la courbe de charge moyenne des ballons non asservis la dynamique des occupants au cours de la journée avec 3 phases distinctes: la pointe du matin dont la rampe se situe à 7 heures, la pointe du soir (début de la rampe identifiée à 18h sur les données) et les deux périodes de creux : après-midi et nuit.*

Les horaires des pointes identifiées sont liées aux données disponibles, par conséquent, il n'est pas certain que les pointes observées soient représentatives des pointes nationales, en revanche, la figure 5.3.6 montre que la forme de la demande est bien similaire à celle d'un échantillon de consommateurs plus important [135].

Les développements des prochains paragraphes permettent de donner des outils pour caractériser la courbe de charge agrégée d'un échantillon de consommateurs du point de vue d'un opérateur d'effacement. Les résultats obtenus sont liés à la représentativité de l'échantillon utilisé pour l'analyse des charges, en particulier celui des logements avec abonnement à tarif unique. La variabilité des profils journaliers des logements dans cet échantillon assure une représentativité partielle des résultats.

On s'intéresse dans la suite uniquement à l'ensemble de consommateurs fictifs dont le profil est représenté sur les figures 5.3.5 et 5.3.6.

Du fait de l'asservissement tarifaire, la courbe de charge totale de l'usage pour les abonnés HP/HC permet au mieux de caractériser le volume de la demande en ECS (en admettant que la consommation du fait des déperditions à travers l'enveloppe des ballon est connue) mais pas la temporalité des puisages. D'autre part, la courbe agrégée des ballons non asservis en HC montre indirectement et partiellement le caractère non stationnaire de l'activité puiser de l'eau chaude. Les courbes de charge unitaires représentant la demande d'un logement ne permettent que d'avoir une image du volume de la demande en ECS.

Pour chaque consommateur, le système observé est représenté sur la figure 5.3.7. u représente le vecteur de commande lié à un pilotage distant (asservissement tarifaire, pilotage direct par l'aggrégateur par exemple).

W_D représente la demande en ECS, c'est-à-dire les interactions entre le ménage et le système (unidirectionnelle dans le sens *ménages* -> *systèmes*, sous contrainte de confort). Le décalage du à l'asservissement rend l'ajustement d'un modèle global dans le cas de l'abonnement HP/HC plus complexe que dans le cas BASE.

Les données disponibles ne permettent pas d'étudier le cas des abonnements *base* sur un échantillon de consommateurs dont le potentiel est intéressant pour un opérateur d'effacement (capacité limitée car seuls 7 logements de ce type ont pu être instrumentés).

On propose deux étapes pour identifier le système global représentant un ensemble de consommateurs (dont les ballons sont soumis à un asservissement tarifaire):

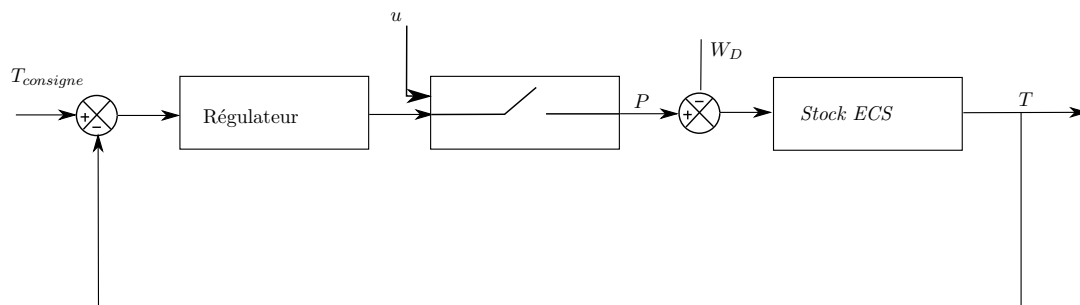


Figure 5.3.7 Schéma bloc d'un système ECS régulé

1. Recherche d'un modèle de ballon adapté et ajustement des paramètres intrinsèques à chaque système représenté avec le modèle
2. Agrégation des modèles unitaires pour la restitution de la dynamique de la charge globale

L'approche d'identification est donc de type *bottom-up* dans un premier temps. On détaille dans les deux sections suivantes les méthodes choisies pour restituer les courbes de charge de l'usage pour chaque logement.

5.3.2.1 Modèle générique recherché et définition des paramètres inconnus

Données disponibles Les seules informations disponibles sont celles contenues dans les courbes de charges à 10 minutes. Par conséquent, même pour les consommateurs avec tarif unique, il n'est pas possible d'identifier la fonction de puisage. En effet:

- Seules 7 courbes de charge de ballons différents et non asservis peuvent être exploitées pour éventuellement identifier le profil de puisage, or ceux-ci sont par nature non contrôlables et imprévisibles [94]. Dans [15], l'auteur observe à partir de mesures sur le débit que la probabilité de puisage suit une loi de Weibull, ce qui montre le caractère non stationnaire des puisages. On retrouve d'ailleurs ainsi une caractérisation de cette activité similaire à l'approche globale développée par Wilke [183]
- La courbe de charge d'un usager ne permet pas de reconstruire le profil de débit de celui-ci. Dès que la résistance de chauffe est *ON*, il n'est plus possible d'identifier les instants de début de puisage (en observant la consommation énergétique du ballon, on

peut en effet au mieux déterminer le volume soutiré équivalent - en admettant que les températures entrée et sortie soient connues)

- Du fait de l'asservissement tarifaire (quasi totalité de l'échantillon), on observe le parc en volume

La figure 5.3.8 représente la courbe de charge d'un ballon quelconque non asservi de l'échantillon à 1 minute (courbe d'un usage ECS spécifique pour lequel le courant et la tension ont été mesurés à 1 minute durant une semaine pour analyse).

On y distingue 3 types d'appels de charge selon leur durée, qu'on appelle dans la suite *petit*, *moyen*, *gros*, notés respectivement *S-A*, *M-A*, *L-A* sur la figure 5.3.8. Les petits appels de charge ne sont pas nécessairement liés à des puisages mais peuvent être dus uniquement au cyclage. La distinction entre cyclage et puisage n'est pas toujours possible. Par défaut, on sait à minima qu'un puisage a eu lieu si la durée de la phase *OFF* est strictement inférieure à t_{max} qui est la durée *OFF* en l'absence de puisage. L'analyse combinée de la courbe de charge de l'usage et celle *logement* peut permettre d'apporter des éléments de précision (détection des moments de présence), elle n'a pas été jugée informative dans le cas présent²¹.

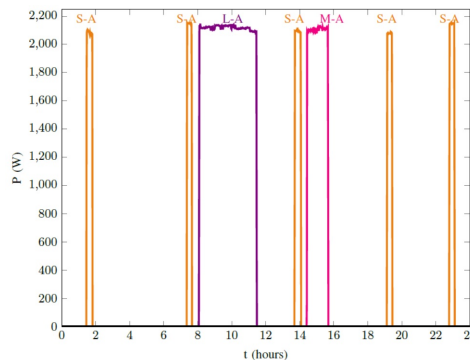


Figure 5.3.8 Courbe de charge journalière d'un ballon B

Compte tenu des informations exploitables, le modèle de ballon B_i adapté est celui d'un accumulateur idéal délivrant un courant constant lors des phases de décharges (puisages), avec une résistance R modélisant les pertes thermiques à travers l'enveloppe. Il est représenté sur la figure 5.3.9.

Ce modèle est couramment utilisé pour l'étude du pilotage de charges thermiques [77, 150]. Il a pu être ajusté pour représenter la demande nationale du parc de ballons en Allemagne dans [89].

²¹Dit autrement la résolution sur les informations sur l'usage ECS que nous pouvons extraire de l'analyse conjointe ($CDC_{logement}$, CDC_{ECS}) est du même ordre que celle obtenue avec CDC_{ECS} uniquement

L'évolution de la variable de contrôle T de ce modèle de ballon à une température homogène est donnée par l'équation:

$$C\dot{T} = Pu + R_a(T_a - T) + HW_D(T_f - T_c) \quad (5.3.1)$$

Avec:

C : Capacité thermique du volume d'eau (JK^{-1})

$H = \rho c_p$: Capacité thermique volumique ($\text{JK}^{-1}\text{m}^{-3}$)

R_a : Résistance thermique équivalente des parois (KW^{-1})

$W_D(t)$: Débit de puisage (m^3s^{-1})

T_a : Température ambiante (K)

T : Variable de contrôle (K)

T_f : Température eau froide (K)

T_c : Température de consigne (K)

P : Puissance de chauffage, de valeur nominale P_{max}

$u(t)$: Commande ON/OFF distante, $u(t) \in \{0, 1\}$

On suppose que l'ensemble des régulateurs sont du type *TOR*, les valeurs extrêmes de la bande morte sont notées respectivement T_- et T_+ , d'où la loi de contrôle de $P[t_k]$ où t_k désigne l'instant d'échantillonnage $t_k = k\Delta t$ (paragraphe 2.3.2):

$$\begin{cases} \text{Si } T < T_-, P[t_k] = P_{max} \\ \text{Si } T > T_+, P[t_k] = 0 \\ \text{Sinon } P[t_k] = P[t_{k-1}] \end{cases} \quad (5.3.2)$$

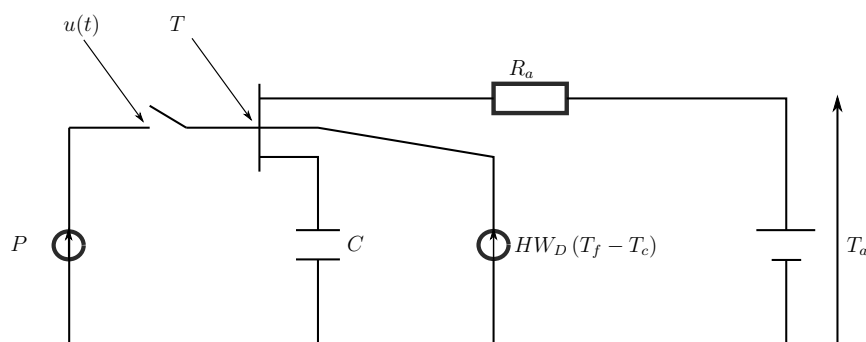


Figure 5.3.9 Schéma électrique équivalent du modèle de ballon utilisé

Hypothèses pour l'estimation des caractéristiques des ballons Afin d'identifier les paramètres recherchés, il est nécessaire de poser les hypothèses suivantes:

1. Définition d'une loi pour la température d'arrivée *eau froide* T_f : une valeur générique $T_f = 8.4^\circ\text{C}$ a été fixée pour la suite sur l'ensemble du parc. Elle correspond à la valeur moyenne des températures tabulées dans la *RT* pour les 3 mois de données disponibles (décembre, janvier, février) pour les 8 zones climatiques. Compte tenu des incertitudes liées à cette valeur, il est inutile de chercher à raffiner ce choix (par exemple en pondérant par les effectifs de chaque zone climatique)
2. Détermination d'une loi pour la température *ambiante* T_a : elle est fixée à 20°C pour tous les systèmes par manque d'information. Vu les informations qu'il est possible d'extraire avec les données disponibles, cette hypothèse est suffisante pour la suite
3. Paramétrage des régulateurs (les régulateurs sont tous supposés de type *TOR*). A 1 min, l'effet de la régulation sur la charge n'est plus observable, comme en atteste la figure 5.3.8 (données mesurées à la minute). Ainsi:
 - La bande morte, notée BM est fixée à 2K pour l'ensemble des systèmes, ce qui est un choix classique issu de la littérature (donc $T_- = T_c - 0.5 \cdot BM$ et $T_+ = T_c + 0.5 \cdot BM$)
 - La température de consigne T_c est supposée suivre une loi uniforme $\mathcal{U}_{[55,65]}$ dans [94]. Vu l'incertitude associée aux paramètres fixés par défaut dans cette partie, nous avons fixé la consigne à 60°C dans un premier temps (*homogénéité du parc en consigne*)

Avec ces hypothèses:

- le parc se caractérise par sa diversité technique (volume, puissance nominale, coefficient de pertes) et par la diversité de la demande (paysage)
- On peut réécrire l'équation (5.3.1) d'évolution de l'état du ballon en considérant que la variable d'état est l'état de charge du ballon, noté x ($x \in [0, 1]$):

$$x(t) = \frac{T(t) - T_f}{T_c - T_f} \quad (5.3.3)$$

Domaine de validité Nous savons que lorsque la charge du ballon est inférieure à 20% de la charge maximale ($x < 0.2$), la stratification (macro) dans le ballon est fortement dégradée [126]. Par conséquent, le domaine de validité du modèle pour la suite est donné par

$$x \in [0.2, 1].$$

On donne dans les paragraphes suivants la méthode suivie pour identifier les paramètres des ballons unitaires.

Détermination de la puissance nominale des ballons Le principe repose simplement sur l'analyse des monotones de charge à 30min (ce qui diminue le nombre de points à exploiter sans diminuer la précision sur l'estimation des puissances nominales compte tenu de la forme de la courbe de l'usage - exemple de courbe figure 5.3.8). Des détails sur la reconstruction des profils peuvent être consultés dans [177]. Les principales étapes sont:

- Tracé des monotones de charges individuelles pour l'ensemble des jours disponibles
- Détermination de l'asymptote horizontale: $y_0 = \mu$ où μ représente la puissance moyenne haute identifiée (voir forme des monotones représentées 5.3.10) pour chaque système
- Calcul de $P_{\max} = 100E(\frac{y_0}{100})$ (approximation à 100W)

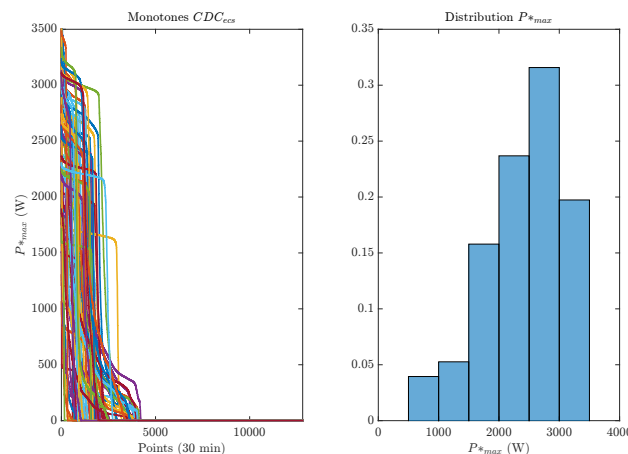


Figure 5.3.10 Forme des monotones de l'usage ECS et distribution des puissances nominales des chauffe-eaux estimées

Remarque : La figure 5.3.10 montre le principe de la méthode (monotones de charge individuelles pour l'ensemble des points 30 minutes connus) ainsi que la distribution empirique des puissances des chauffe-eaux calculées $P^*_{\max}$ dans l'échantillon. Sur la figure 5.3.11, nous avons tracé les nuages de points ($P^*_{\max}$, N.Pièces) et ($P^*_{\max}$, Surf.Hab) qui révèlent

l'absence de corrélation évidente entre ces variables. Ces données ne permettent donc pas de proposer un modèle de dimensionnement des chauffe-eaux plus fin que l'utilisation des guides publiés par l'AICVF²² avec lesquels elles ne sont pas incohérentes: elles illustrent la difficulté d'ajustement d'un parc en puissance.

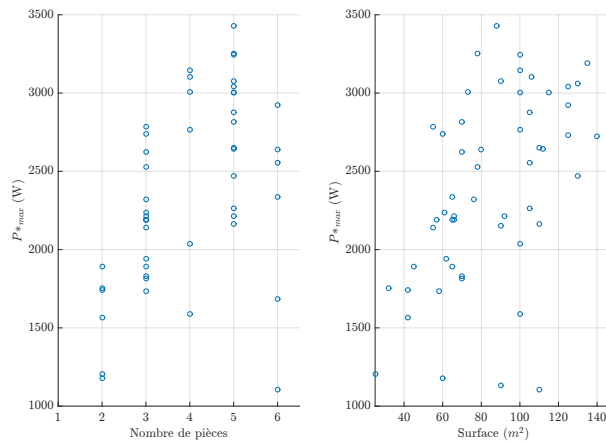


Figure 5.3.11 Nuages de points entre la puissance nominale calculée des chauffe-eaux P_{max}^* et la taille des logements (nombre de pièces et surface habitable)

Estimation des courbes de charge unitaire à 1min Pour les ballons non asservis HC ($u = 0$, pas de signal d'effacement: $u_{cc} = 0$), on a reconstruit le profil de charge à 1 minute à partir des courbes à 10 minutes et de l'estimation de la puissance nominale dans le but d'appliquer la méthode détaillée dans [51, 158] pour l'estimation du coefficient de pertes. Le principe de cette méthode repose sur l'écriture analytique de la solution de l'équation (5.3.1) et le fait que la durée minimale d'un cycle *ON*, $t_{min,ON}$ et maximale d'un cycle *OFF* $t_{max,OFF}$ ont forcément lieu lorsque $W_D = 0$. Les valeurs des paramètres liés aux pertes ainsi déterminées sur les 7 courbes disponibles ne sont pas cohérentes avec les valeurs standards connues (en particulier pour la résistance thermique R_a de l'enveloppe, la valeur trouvée est 10 fois inférieure aux valeurs typiques calculées à partir des données du tableau 5.4 dans des conditions standards).

La détermination de C_r (énergie consommée du fait des pertes thermiques à travers l'enveloppe pour une journée, dans les conditions standards définies par: $T_a = 20^\circ\text{C}$; $T_f = 15^\circ\text{C}$; $T_c = 60^\circ\text{C}$; absence de puisage) suppose d'être en mesure de différencier les puisages

²²www.aicvf.org

Tableau 5.4 Paramètres de référence attribués aux ballons selon la puissance de chauffe estimée

Volume (l)	Puissance nominale (kW)	Cr (kWh/24h)	UA (W/m ² /K)
50	1.2	0.82	0.76
75	1.2	1.05	0.97
100	1.2	1.25	1.16
150	1.65	1.48	1.37
200	2.2	1.73	1.60
250	3	2.15	1.99
300	3	2.58	1.39

du cyclage (ou de disposer de jours où le puisage est nul, ce qui n'était généralement pas le cas dans l'échantillon). Cette distinction n'est pas triviale (figure 5.3.8), et les méthodes de filtrage sont complexes. Nous avons donc préféré une méthode qualifiée de *par défaut*, détaillée ci-dessous.

Attribution de paramètres génériques aux ballons du parc Nous avons attribué à chaque ballon un volume et un coefficient de pertes *standard* selon la puissance nominale estimée²³. de celui-ci. Les correspondances sont données dans le tableau 5.4, les valeurs ont été choisies en fonction des valeurs trouvées chez les différents constructeurs.

A l'issue de ces étapes, on dispose d'un modèle de ballon associé à chaque logement, dont les paramètres sont déterminés *a priori*.

La demande est caractérisée par des instants de puisages et un débit associé à chaque puisage. Le profil de demande journalier est construit à partir des 7 courbes de charges des ballons non asservis HC.

On concentre donc les efforts pour l'identification d'un modèle de ballons *ECS* en interaction avec les ménages sur les lois de commandes en supposant les paramètres techniques connus.

²³Cela revient à exploiter le fait que les ballons à accumulation sont dimensionnés en puissance selon le volume à chauffer et en tenant compte de la plage d'heures creuses de 8h.

Étant donné que le nombre de logements distincts avec ballon instrumenté et tarif *unique* est très faible, il n'est pas possible de construire un profil journalier moyen. Afin de disposer de suffisamment de données pour poursuivre la démarche, on construit un échantillon fictif ECH^* de N courbes de charges en exploitant les N_i clients et $N_j(i)$ courbes de charges de l'usage journalière sans effacement. On a donc $N = N_i N_j(i)$ profils de puisages disponibles. La variabilité de ces profils est principalement issue de la variabilité des profils *infra-ménage*.

Par conséquent, les résultats obtenus dans la suite pourraient dépendre de l'homogénéité de cet échantillon de départ (dit autrement de la représentativité de ECH^* ou du caractère aléatoire des consommations individuelles). Parmi les 7 logements, on a observé que les consommations de 3 d'entre eux était quasiment jour-périodique (faible variabilité de la *CDC*) et imprévisible pour les autres. La représentativité de cet échantillon par rapport à l'échantillon total n'est donc pas assurée.

En ajustant le volume puisé journalier, on retrouve la forme et l'amplitude des appels de charges du parc commandé (HP/HC), ce qui revient à rechercher la loi pour la demande en *volume équivalent* 60°C, notée V_{60} .

Ajuster le parc revient à résoudre le problème inverse consistant à rechercher la loi de V_{60} permettant de simuler la distribution empirique des *CDC* d'un jour donné.

Il s'agit donc d'un problème inverse visant à ajuster un modèle d'ordre 1. Ce problème a déjà été traité dans un cadre similaire par Booth et. al. [23]. L'auteur propose une approche par inversion bayésienne pour déterminer les lois de deux paramètres (la température de consigne et la fraction de logement chauffé) permettant d'ajuster un modèle de signature énergétique, le critère de convergence étant la consommation annuelle de chauffage. Cette méthode élaborée n'a pas été reprise dans le cadre de ce travail, elle constitue un axe de développement futur intéressant.

Nous avons choisi une méthode d'ajustement simple, qui est détaillée dans le paragraphe suivant.

5.3.2.2 Méthode pour ajuster le modèle de demande des abonnés HP/HC

Afin d'identifier les paramètres de puisages pour les ballons asservis, on choisit de procéder par *essai-erreur*. Les étapes sont les suivantes:

1. Détermination de la rampe de changement tarifaire. Elle est identique à 10min quelques soit le jour choisi
2. Détermination d'une loi de puisage:
 - On utilise le profil moyen normalisé calculé à partir de l'échantillon des usagers avec abonnement *base* et on note α_{vol} le paramètre d'ajustement de ce profil. On détermine la valeur de α_{vol} permettant de minimiser l'écart entre la courbe observée et la courbe simulée sur une journée²⁴
 - Détermination des états de charges initiaux des systèmes en utilisant les volumes puisés durant la période des *heures pleines*
3. Identification des paramètres d'une loi de volume puisé en supposant que le volume puisé dans le parc suit une loi *log-normale*

Remarque 5.3.2. *Les paramètres de la loi de puisage ainsi identifiée ne représentent pas un volume de puisage réel mais un paramètre d'ajustement incluant l'incertitude sur les paramètres techniques fixés pour la construction du modèle.*

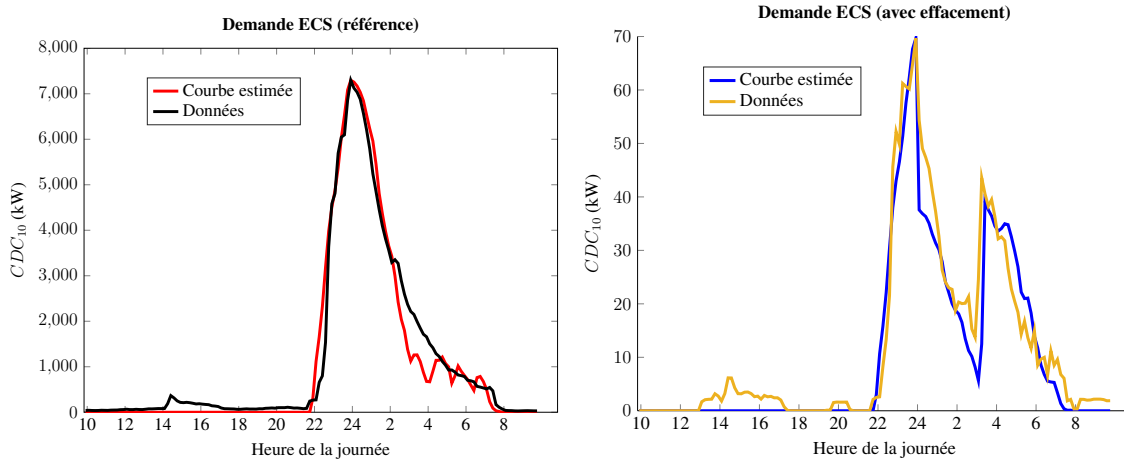
5.3.2.3 Étude de cas - ballon asservis HC

On considère deux exemples d'effacement réalisés durant la plage HC. Dans ce cas, l'estimation de l'état de charge initial (au passage en HC) est essentiel pour évaluer le potentiel de flexibilité du parc. L'exploitation de l'historique des consommations individuelles peut permettre d'évaluer la variabilité des consommations individuelles et donc de donner des bornes *adaptées* pour l'état de charge des ballons individuels.

Afin de montrer les performances du modèle dynamique, on représente 4 courbes de charge pour chaque effacement étudié (figure 5.3.12):

- La courbe de charge totale de l'ensemble des logements pour le jour effacé
- Une référence déterminée uniquement à partir des données expérimentales: en supposant que les effacements de l'usage ECS sont exactement des déplacements de charge (ce qui revient dans ce cas à négliger les pertes), on recherche, parmi l'ensemble des jours sans effacement, sur le même échantillon que celui du jour effacé, les x jours où la consommation totale du parc est la plus proche du jour avec effacement. On a

²⁴En réalité l'ajustement se fait sur la plage des *heures creuses* et on néglige l'existence des abonnés avec *heures creuses méridiennes* afin de simplifier les calculs. L'échantillon ne contient que très peu de cas de ce type.



(a) Courbe de charge agrégée, sans effacement (b) Courbe de charge agrégée, avec effacement

Figure 5.3.12 Superposition des courbes de charges réelles et simulées

choisit pour la suite $x = 3$. La référence est la courbe de charge moyenne de ces 3 jours, notée CDC_{ref}^* :

$$CDC_{ref}^* = \frac{1}{3} \sum_{jj=1}^3 CDC_{jj}$$

- La courbe de charge totale simulée CDC_{ref}^s issue de la modélisation des systèmes du même échantillon et identifiée sur CDC_{ref}^*
- La courbe de charge totale simulée CDC_{eff}^s avec effacement avec le même paramétrage que CDC_{ref}^s .

La comparaison entre CDC_{eff}^s et CDC_{ref}^s permet d'évaluer en simulation les effacements réalisés. Le paramétrage du modèle permet de s'assurer de la représentativité de la diversité de l'échantillon dans notre modèle de simulation: la diversité fonctionnelle est décrite par l'ajustement des paramètres standards donnés dans le tableau 5.4 après identification des puissances nominales des systèmes, la diversité d'origine comportementale est décrite grâce à l'identification de la loi de volume de puisage.

5.3.2.4 Bilan et perspectives

La méthode d'identification d'un modèle global représentant un ensemble de consommateurs à partir des données simulées nous permet de simuler des stratégies de pilotage direct en HC et de s'assurer de la représentativité des résultats issus de la simulation sur le parc disponible. **La connaissance des états de charges initiaux (au moment du changement de tarif) des ballons du parc permet d'évaluer le potentiel d'effacement et d'envisager des stratégies**

globales d'optimisation. Ce modèle peut donc être utilisé comme un outil d'aide à la décision pour un opérateur d'effacement.

En supposant que les paramètres techniques et fonctionnels des systèmes de production d'ECS à accumulation peuvent être fixés en utilisant des valeurs standards, il est possible d'identifier une loi de puisage (volume) à partir de l'exploitation des courbes de charges des ballons non asservis et d'ajuster un modèle de ballon d'ordre 1 sur la courbe de charge agrégée HC de l'usage ECS.

Ce modèle permet d'évaluer des stratégies de pilotage direct sur cette même période. Des travaux supplémentaires sont cependant nécessaires afin de valider la représentativité du modèle **en dehors de cette période**. Un échantillon plus important de consommateurs avec abonnement *BASE* est donc nécessaire pour poursuivre ce travail.

5.3.3 Index pour l'usage chauffage

L'exploitation directe des voies de chauffage présente plusieurs avantages. D'une part, elles représentent l'essentiel des équipements pilotés dans le cadre de l'expérimentation en HP: ainsi la valorisation des effacements à partir des courbes de charges de cet usage permet de dépasser une partie des limites liées au bruit observé sur les courbes d'index logement détaillé dans la section 5.3.1 (soit une relation directe entre le pilotage et la déformation de la courbe de charge agrégée de l'usage, à comportement des individus supposé inchangé²⁵). D'autre part, ayant accès à une mesure de température intérieure dans les logements instrumentés, la définition d'un modèle empirique liant la puissance appelée à cette température pourrait permettre de donner une évaluation du confort, ce qui revient à rechercher *a minima* un modèle de signature énergétique (Dans ce cas, un indicateur similaire au *TO*, défini dans la partie 4.1.2 peut être utilisé pour l'évaluation du confort).

L'identification de bâtiments à partir de données mesurées peut permettre de calibrer la dynamique d'un ensemble de logements simulés, c'est-à-dire s'assurer du réalisme du parc représenté et nous permettre d'évaluer l'impact d'effacements de consommation à l'échelle agrégée.

²⁵Hypothèse fondamentale donnée dans le chapitre 1: le pilotage direct par un opérateur externe est supposé ne pas modifier le *comportement* des individus par rapport à la gestion de leurs systèmes, c'est-à-dire que les ménages n'ont pas de stratégie de pilotage des équipements associée à l'envoi d'ordres d'effacements.

Dans cette partie, on cherche à identifier un modèle thermique du bâtiment permettant de représenter la dynamique des appels de charges à un pas de temps de quelques minutes afin de calibrer un modèle de parc à partir des logements ainsi identifiés.

Les séries *index des voies de chauffage instrumentées* (1 à 4 selon les logements) et *relevés de température* n'étaient disponibles que pour 23 logements de l'échantillon de départ. Après retraitement des données, seule une dizaine de logements a pu être conservée. On ne détaille pas plus cette procédure de nettoyage des données dont le principe a été introduit dans la partie 5.1.3, on retiendra que les séries de température *intérieure* sont globalement incomplètes et que pour les index des voies de chauffage, les périodes d'absence de données sont plus importantes que dans le cas des index logements (voir les remarques section 5.1.3.2). Nous avons donc été conduits à construire des *séquences* pour chaque logement x .

Définition 14 (séquence). Une séquence s_{x_i} désigne une série de données $(T_{int}, CDC_{ch,tot})$ sur une durée $\Delta_{obs}(i)$ pour un logement x .

Pour chaque logement, on sélectionne les séquences les plus longues disponibles, qui sont de 5 à 2 jours. Les données de température extérieure utilisées sont issues de l'historique tri-horaire de *MeteoFrance* pour la station la plus proche du logement x et une interpolation par splines de cette série permet d'avoir une approximation à 10 minutes. L'approximation de la température extérieure locale par celle interpolée de la station météo la plus proche est une approximation potentiellement grossière, dont la contribution dans le bruit des données n'est pas estimable (pas de données plus précises disponibles).

Un exemple de séquence de données obtenues pour l'un des logements est représenté à la figure 5.3.13.

Sur ce cas, les systèmes de chauffage étant éteints durant la période nocturne, le système évolue en boucle ouverte (*BO* dans la suite). Le second encadré met en exergue une période particulière dans les données qui correspond à 2 jours complets pendant lesquels les occupants étaient absents (ce qui est confirmé par l'analyse de l'index global des consommations) mais durant lesquels la gestion du chauffage n'a pas été modifiée. Cette séquence présente donc un intérêt particulier pour l'identification puisque une partie des sollicitations non mesurables et non observables (par exemple les apports internes) étaient limitées²⁶.

À partir de ces données, nous avons cherché à identifier un modèle thermique permettant de représenter les évolutions du système bouclé.

²⁶Aucune autre séquence de ce type n'a pu être identifiée sur les données

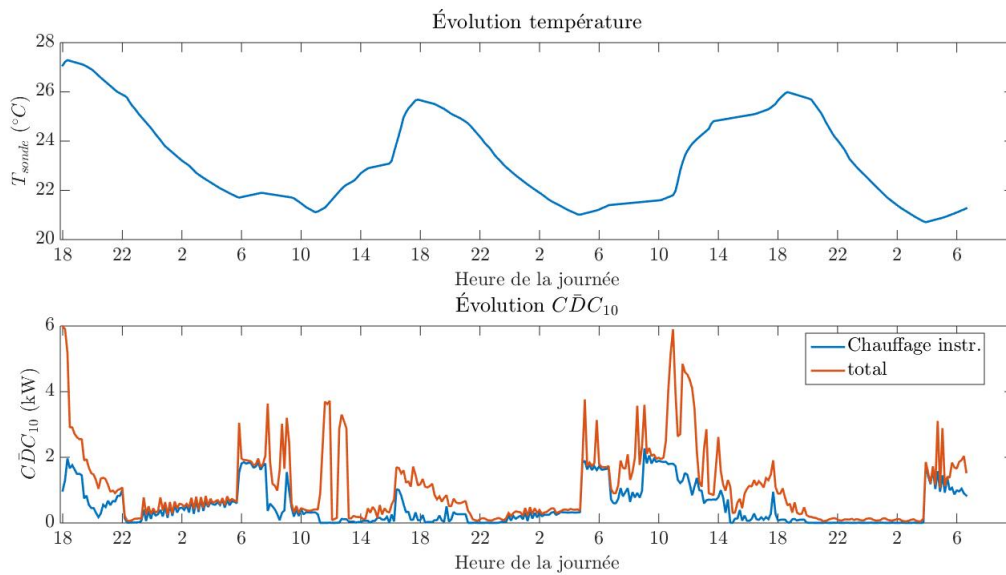


Figure 5.3.13 Exemple de séquence de données disponibles après retraitement

5.3.3.1 Modèle statique - signature énergétique

Le modèle le plus simple à rechercher est un modèle type *signature énergétique*, soit une relation linéaire de la forme

$$E(\Delta t) = \alpha(\bar{T}_{\text{int}}(\Delta t) - \bar{T}_{\text{ext}}(\Delta t))^+ + \beta$$

Où:

$$(\bar{T}_{\text{int}}(\Delta t) - \bar{T}_{\text{ext}}(\Delta t))^+ = \max(\bar{T}_{\text{int}}(\Delta t) - \bar{T}_{\text{ext}}(\Delta t), 0)$$

α, β des constantes à déterminer

Cette relation lie donc la consommation énergétique (kWh) de l'usage chauffage instrumenté $E(\Delta t)$ sur la période Δt à l'écart de température moyen observé sur la période. Cette approche a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Une comparaison détaillée de 8 variantes de ce type de modèle est proposée par Richalet [144] à partir de données simulées sur *ESP* [32] au pas de temps d'une heure et en supposant la régulation parfaite²⁷. L'auteur compare différents modèles linéaires pour trois pas d'observation: la journée, la semaine et

²⁷ Cette hypothèse revient à considérer des calculs en besoin, l'énergie consommée à un pas de temps donné est déterminée en équilibrant le bilan énergétique du système

le mois, sur une saison hivernale. Les résultats obtenus montrent que les modèles liant la consommation énergétique à l'écart de température intérieur/extérieur (ou éventuellement à la température extérieure uniquement si l'amplitude de variation de la température intérieure est faible) et aux flux solaires donnent des résultats satisfaisants pour les calculs en besoin dès lors que le pas d'observation est au moins hebdomadaire (ou inférieur) et que la séquence disponible est suffisamment longue. Pour des temps d'observations supérieurs, la corrélation entre la température et les apports solaires rend le problème d'identification mal posé. Les apports liés à l'occupation sont susceptibles d'introduire un biais dans l'estimation de la surface sud équivalente (paramètre liés aux apports solaires) et du coefficient de déperdition global (paramètre lié à la température), en particulier s'il sont supposés variables.

Ce premier modèle est satisfaisant par exemple pour la prévision annuelle ou mensuelle de charge (puisque'il s'agit d'un modèle en besoin) en revanche l'identification des paramètres sur des pas d'observation infra-horaires n'est pas pertinente au niveau désagrégué. Au niveau agrégé, le modèle de prévision des consommations utilisé par *RTE* inclus un terme permettant de tenir compte de la thermosensibilité du parc au pas horaire. Dans le modèle, la sensibilité des consommations au climat est caractérisée par un gradient thermique qui dépend du mois, du jour et de l'heure considérée [127]. L'agrégation de courbes de charges permet en effet de lisser la volatilité observée sur les courbes de charges individuelles [177] (voir également paragraphe suivant).

D'autre part, l'application de cette méthode sur les données issue de l'expérimentation est limitée par l'impossibilité d'estimer les apports solaires sur site. Nous verrons pas la suite que cette absence de données contribue au caractère mal posé du problème.

Nous avons tracé les nuages de points $(E(\Delta t), \mu_{\Delta t}(T_{\text{ext}}))$ et $(E(\Delta t), \mu_{\Delta t}(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}))$ afin de donner une première image de la sensibilité des consommations au climat pour chacun des logements²⁸. Un exemple est donné sur la figure 5.3.14, et les figures pour chaque ménage sont détaillées dans l'annexe B. Richalet [144] note que la variante $(E(\Delta t), \mu_{\Delta t}(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}))$ est acceptable dès lors que la température intérieure varie peu sur la période étudiée. Elle est discutable dans le cas présent étant donné que des modes d'intermittence ont pu être identifiés pour la plupart des courbes de charges.

En traçant les nuages de points $(E(\Delta t), \mu_{\Delta t}(T_{\text{ext}}))$ pour $\Delta t = 24h$ et $\Delta t = 168h$ nous avons sélectionné les logements pour lesquels la relation entre température et consommation semble existante. Pour les autres logements, le nuage de points observés, éventuellement

²⁸On notera qu'avec les données disponibles, on a $(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})^+ = (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$

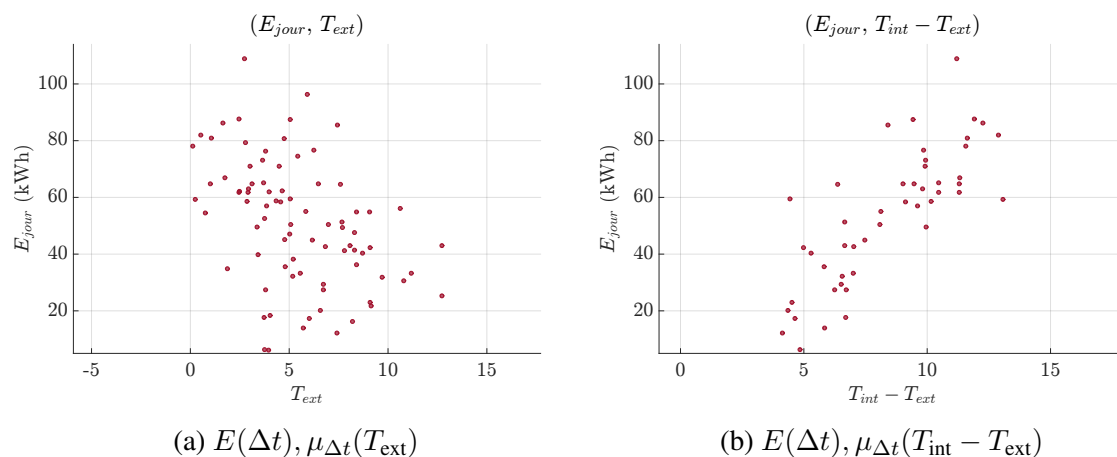


Figure 5.3.14 Exemple de nuages de points obtenus pour l'un des logements

suivi de l'estimation des paramètres des modèles ne montrent pas de corrélation convaincante entre les deux grandeurs.

On pourra remarquer que les 3 mois de données permettent au mieux de déterminer la valeur du gradient thermique mais pas la température seuil de chauffage des modèles de signature²⁹. Pour cela, il serait en effet nécessaire de disposer d'un échantillon observé sur une période supérieure à une saison de chauffe.

La qualité des données, l'incertitude sur les températures *extérieure* et *intérieure* associées au logement, l'absence de données sur les apports solaires, la connaissance très sommaire des caractéristiques du bâti, l'existence éventuelle d'autres systèmes de chauffage (insert bois, cheminée, ..) ainsi que le caractère stochastique des *comportements*³⁰ sont autant de sources d'incertitudes pouvant expliquer la difficulté à identifier ce modèle simple³¹. Dans un cadre tout à fait similaire (données disponibles) et selon une procédure comparable, Vuillecard [177] estime que seul 25% d'un échantillon de 120 courbes de charge d'usage chauffage sont exploitables si on suppose que le critère de validité est l'existence d'une corrélation ($r^2 > 0.7$) entre la puissance moyenne de chauffage (issue de l'exploitation d'index à 10 minutes) et l'écart de température *intérieur* - *extérieur* défini de la même façon que dans cette partie, ce qui souligne une fois encore les limites d'un tel modèle au niveau désagrégré.

Dans les sections qui suivent, on détaille le cadre théorique pour les procédures d'identification mises en œuvre sur quelques logements ainsi que les différentes approches considérées, à savoir deux familles de modèles:

²⁹Ce qui n'est pas gênant étant donné que ces travaux se concentrent sur les pointes journalières hivernales.

³⁰Le comportement désigne ici la gestion du chauffage dans l'habitat

³¹Les autres variantes de corrélations d'ordre 1 testées n'ont pas donné de meilleurs résultats

- Une approche *boîte noire* sous forme de fonction de transfert
- Une approche *boîte grise* où la forme du modèle est définie à partir d'une modélisation simplifiée des transferts thermiques dans le bâti et l'*aggrégation de certains* de ces phénomènes

5.3.3.2 Cadre théorique pour l'identification paramétrique

Le système considéré est le bâti muni de sa régulation (système de chauffage), c'est-à-dire un système en boucle fermée (figure 2.3.1 reproduite ci-dessous, notations introduites dans la partie 2.3). On suppose que chaque logement peut être vu comme une seule zone thermique chauffée par un *système de chauffage* type convecteur, dont la puissance appelée est la somme des puissances de chaque voie instrumentée. Les voies de chauffage sont donc vues comme un *méta-système agrégé*, ce qui constitue en soi une hypothèse forte qui a largement été discutée dans les chapitres précédents.

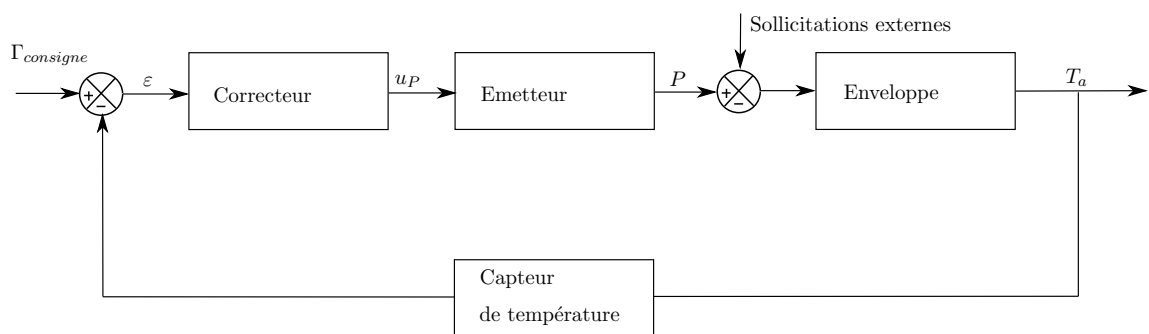


Diagramme fonctionnel du système *bâti* muni de sa régulation

Le type de régulation est inconnue, et au pas d'observation des données, la dynamique du régulateur n'est pas observable [56]. Les données étant collectées *in situ*, dans des logements occupés, il n'était pas possible de générer des séquences pour lesquelles le bâtiment est en boucle ouverte avec un signal de chauffage du type *séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS)*.

Ce type de signal d'entrée permet de s'assurer de la richesse des données pour l'identification, c'est-à-dire que le système est suffisamment sollicité dans le sens défini dans [172]. La possibilité de stimuler le système en boucle ouverte permet de dépasser une partie des limites liées à l'identification d'un système à partir de la boucle fermée.

Aux trois approches théoriques pour l'identification d'un système en *boucle fermée*, une seule est envisageable avec les données et la connaissance *a priori* des systèmes régulés: l'*approche directe* [60], [172] qui consiste à chercher à identifier le modèle de bâti sans tenir compte de la boucle de rétroaction dont le régulateur est inconnu. Compte tenu de ce choix, on peut s'attendre à ce que le bruit de mesure (ou erreur) soit fortement corrélé aux entrées du fait de la rétroaction non modélisée [190], phénomène d'autant plus marqué que le spectre des sollicitations est réduit (cas typique pour des bâtiments *performants* avec peu d'intermittence).

Pour la suite, on note: U le vecteur des sollicitations externes. Les sollicitations sont uniquement: T_{ext} et CDC_{10} , définies au début de la section 5.3.3 tandis que la sortie considérée est la température mesurée par la sonde installée dans le logement: $U = [T_{ext}, CDC_{10}]^t$ et $y(t) = T_{int}$.

La procédure d'identification suivie est celle formalisée par Ljung [107], reproduite à la figure 5.3.15. Étant donné qu'on dispose de plusieurs séquences, deux séries de validation ont été utilisées: pour les séquences les plus longues, $\frac{2}{3}$ de la séquence sert pour l'identification et le tiers restant pour la validation. Si pour un logement x aucune séquence n'est suffisamment longue, les deux séquences sont distinctes (identification et validation).

5.3.3.3 Approche boîte noire

L'approche *boîte noire* consiste à rechercher un modèle de forme polynomiale de l'une des formes reproduites dans le tableau 5.5 sans que celui-ci ne permette de mettre en évidence la physique du problème. Cette approche est détaillée et appliquée à l'identification d'un modèle de bâtiment tertiaire dans [149]. On trouvera également une analyse bibliographique détaillée sur l'application de ce type de modèle à l'identification d'un modèle de thermique du bâtiment pour la prévision de charge dans [17], suivie de la comparaison de plusieurs approches dont celles présentées ici pour l'identification des paramètres d'un bâtiment tertiaire, utilisé ensuite pour l'évaluation de plusieurs stratégies de régulation.

La mise en œuvre pratique est basée sur les résultats et méthodes présentées dans [107], [160] et [179] et implémentée sous *Matlab* [108]. Les paramètres sont estimés en minimisant l'erreur quadratique de sortie par un algorithme type *moindres carrés*.

Des modèles du type *ARMAX*, *ARX*, *BJ* ont été testés (voir tableau 5.5), ils diffèrent par le choix des polynômes du modèle et plus précisément par la représentation de la dynamique du bruit dans le modèle (pour une analyse détaillée, se référer à [179]).

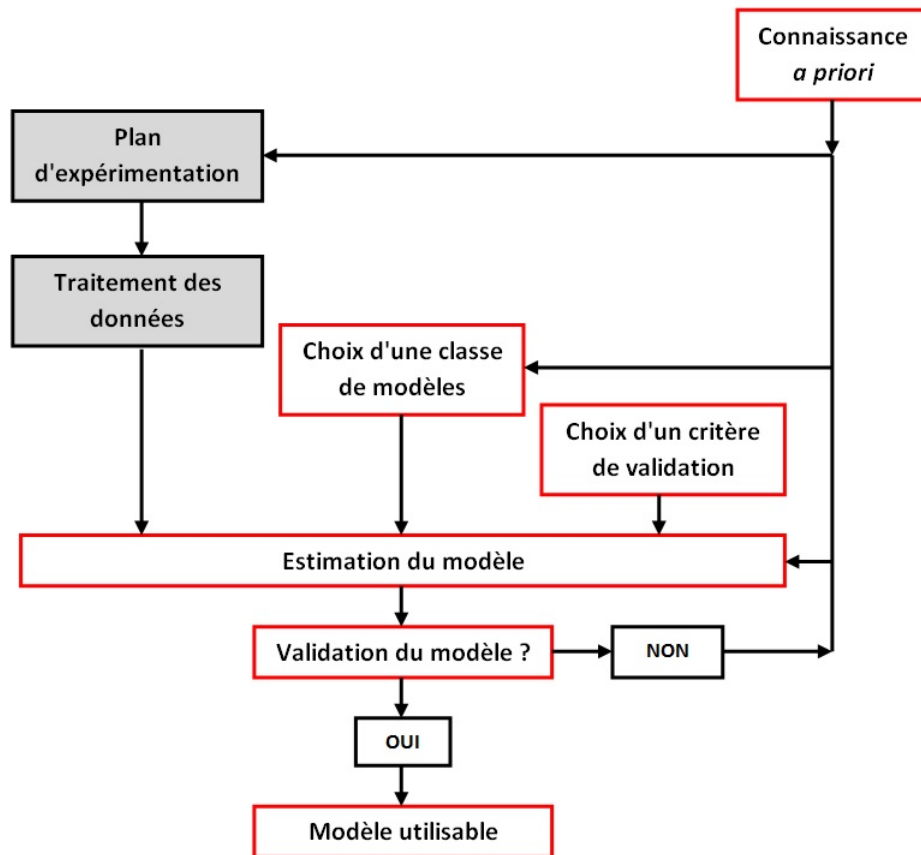


Figure 5.3.15 Étapes du processus d'identification. Adapté de [107]

Tableau 5.5 Famille de modèles *boîte noire*

	Nom du modèle	Forme du modèle	Polynômes inconnus	Remarque
FIR	Finite Impulse Response	$y = Bu + e$	B	Pas de dynamique de bruit
OE	Output-error	$y = \frac{B}{F}u + e$	B, F	Pas de dynamique de bruit
BJ	Box-Jenkins	$y = \frac{B}{F}u + \frac{C}{D}e$	B, C, D, F	Modèle de bruit indépendant de la dynamique du système
ARX	Autoregressive with exogenous inputs	$Ay = Bu + e$	A, B	Le bruit est directement couplé à la dynamique du modèle
ARMAX	Autoregressive moving average with exogenous inputs	$Ay = Bu + Ce$	A, B, C	Généralise les cas ARX et OE

On pourra noter que dans certains cas, il est possible d'établir des relations de passage entre ces modèles et une représentation semi-physique (voir par exemple [128] et [144]) cependant le passage à un système discret fait apparaître des relations non linéaires et l'opération inverse³² n'est pas toujours possible directement [166].

Pour chaque famille de modèles il est nécessaire de préciser le degré de chaque polynôme, celui-ci pouvant être différent selon l'entrée considérée ce qui rend la combinatoire importante, même avec seulement 2 entrées. Pour cela, une procédure de sélection *de la meilleure forme de modèle* a été mise en place. Compte tenu des données utilisées, il n'est pas raisonnable de chercher $n_A > 2$ où n_A désigne l'ordre de A . Les autres ordres n_P sont choisis indépendamment pour chaque polynôme P sous la contrainte $n_P \leq n_A$. Chaque modèle est ensuite estimé, et un unique modèle est sélectionné parmi les modèles dont on a pu valider les hypothèses sur le bruit (intercorrélation entre les résidus et les sollicitations, autocorrélation des résidus). Pour chaque famille, si plusieurs modèles sont validés, on choisit de conserver le modèle qui donne l'écart relatif entre mesure et prévision le plus faible.

Avec cette procédure, une centaine de modèles a été estimée mais aucun modèle n'a pu être validé par l'analyse des résidus, c'est-à-dire que l'hypothèse de bruit blanc gaussien n'est pas vérifiée. L'auto-corrélation des résidus pour un modèle *ARMAX* d'ordre³³ (2,1,1) pour l'un des logements disponibles (séries représentées sur la figure 5.3.19) est représentée sur la figure 5.3.16. Les intercorrélations entre l'erreur du modèle et les entrées sur les figures 5.3.17 et 5.3.18. Les bandes de couleur jaune matérialisent l'intervalle de confiance à 95% choisi pour critère.

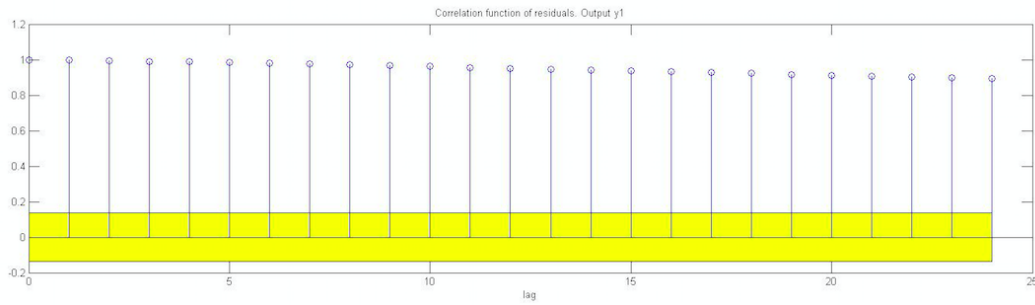
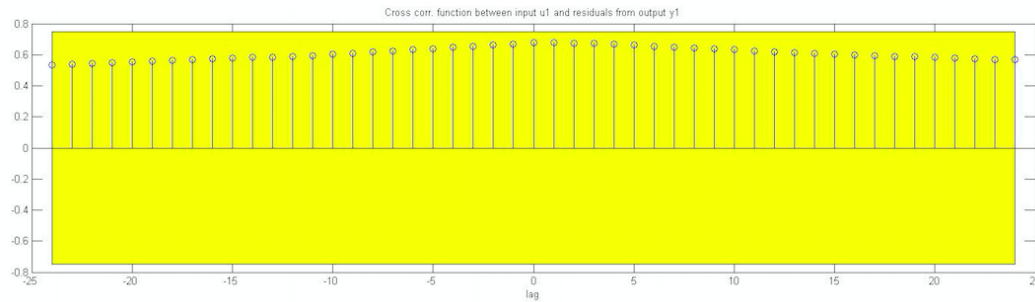
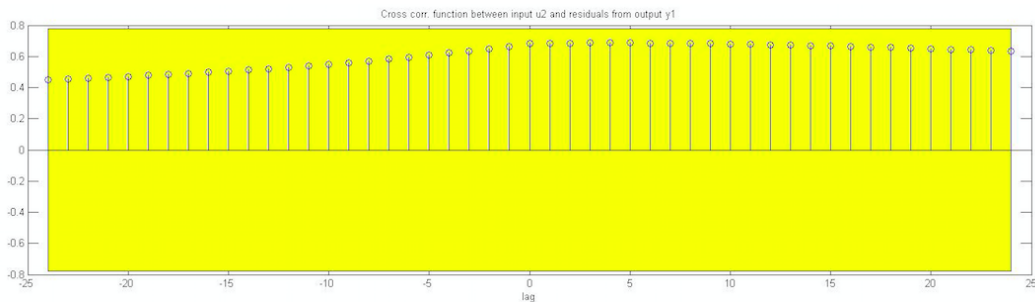
Les simulations avec les modèles paramétriques obtenus et les séquences de *validation* montrent qu'une partie de l'information *utile* est contenue dans le *bruit* (écart entre la prévision et la mesure ici) et que l'approche *directe* n'est pas adaptée (voir la figure 5.3.16 montrant l'auto-corrélation des résidus). L'analyse des coefficients trouvés par l'algorithme montre qu'en prédiction, l'état thermique du bâtiment à l'instant $k\Delta t$ est quasiment totalement expliqué par son état à l'instant précédent $(k-1)\Delta t$, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la pauvreté des signaux définis comme sollicitations d'entrée³⁴.

La recherche d'un modèle type *boîte noire* n'a pas permis d'identifier de modèle adéquat pour la prévision avec les données disponibles.

³²Écriture du modèle continu à partir de l'identification d'un modèle discret, en supposant les entrées constantes sur un pas d'échantillonnage. L'hypothèse de bloqueur d'ordre 0 n'est pas vérifiée à 10 minutes sur nos données

³³degré des polynômes indiqués dans le tableau 5.5

³⁴Une étape de *mise à l'échelle* des données permettant d'avoir des paramètres à estimer du même ordre de grandeur (convergence de l'algorithme) n'a pas amélioré les résultats de l'identification

Figure 5.3.16 Autocorrélation des résidus pour l'un des modèles *ARMAX* candidatFigure 5.3.17 Intercorrélation entre les résidus et l'entrée en puissance pour l'un des modèles *ARMAX* candidatFigure 5.3.18 Intercorrélation entre les résidus et l'entrée représentant la température extérieure pour l'un des modèles *ARMAX* candidat

5.3.3.4 Approche *boîte grise*

L'approche *boîte grise* que nous avons choisie repose sur l'analogie (Flux, température - Courant, Potentiel) et revient à chercher un modèle sous la forme d'un réseau R_x, C_y représentant la dynamique du bâti. Chaque impédance permet de représenter les transferts thermiques *aggrégés* entre les différents nœuds du système [90]. Richalet [144] a analysé les formes possibles de réseau pouvant représenter un bâtiment à deux dynamiques et a comparé les résultats d'identification obtenus avec plusieurs formes de réseau.

En considérant que chaque réseau constitue une manière différente d'agréger les phénomènes physiques, on peut dire de façon imagée que choisir le *réseau représentant au mieux les dynamiques du système* revient à chercher la meilleure combinaison de phénomènes agrégés compte tenu des données disponibles.

L'un des réseaux les plus étudiées est le R_3C_2 , proposée par Laret [96]. Ce choix se justifie par le nombre minimal de dynamiques à représenter durant les phases transitoires (régulation dynamique). On pourra d'ailleurs mentionner les travaux de thèse d'Alaoui El Azher [9] portant sur l'identification d'un modèle de thermique du bâtiment à deux constantes de temps. Le principe général de la méthode développée repose sur la recherche successive des dynamiques lente et rapide et sur l'identification des 2 constantes de temps sur leur domaine fréquentiel adéquat (une condition supplémentaire sur les gains des deux fonctions de transferts permet d'assurer la continuité de la fonction globale). Pour cela, un filtrage des séries de sollicitations est nécessaire et la réalisation pratique de ces filtres s'est avérée complexe. Compte tenu de la précision des données nécessaires à l'algorithme, cette méthode n'a pas pu être envisagée.

On ne détaille pas plus le principe de cette représentation des bâtis qui est largement utilisée dans la littérature. En modélisation, cette représentation est par exemple expliquée et utilisée dans [90]. Les réseaux à 1 ou 2 dynamiques les plus couramment utilisés (et testés en identification) sont représentés dans les tableaux 5.6, 5.7, 5.8 et 5.9 [110].

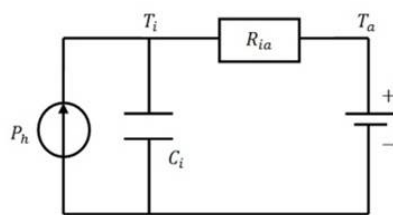


Tableau 5.6 Schéma électrique du modèle « R1C1 »

- T_i : température d'air intérieure
- T_a : température ambiante (extérieure)
- C_i : capacité de l'air intérieur
- R_{ia} : résistance intérieure/extérieure
- P_{ch} : puissance de chauffage

Les travaux de Madsen et. al. sur l'identification de modèle R_xC_y à partir de données mesurées sur site ont abouti sur la construction d'une *toolbox* sur R [110]. La méthode proposée repose sur une approche stochastique et les paramètres des modèles sont estimés en écrivant la fonction du maximum de vraisemblance du système. Bacher et. al. [13] proposent une méthode *forward* pour le choix du modèle thermique. Les travaux de Zayane [190]

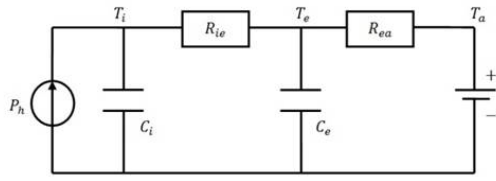


Tableau 5.7 Schéma électrique du modèle « R2C2 »

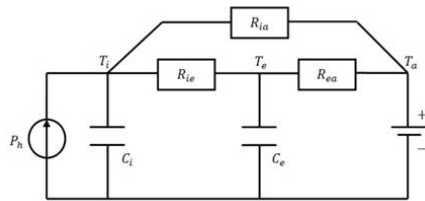


Tableau 5.8 Schéma électrique du modèle « R3C2 »

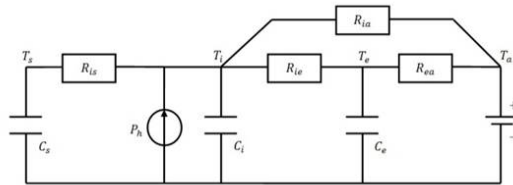


Tableau 5.9 Schéma électrique du modèle « R4C3 »

- T_i : température d'air intérieure
- T_a : température ambiante (extérieure)
- T_e : température d'enveloppe
- C_i : capacité de l'air intérieur
- C_e : capacité de l'enveloppe
- R_{ie} : résistance intérieure/enveloppe
- R_{ia} : résistance intérieure/extérieure
- P_{ch} : puissance de chauffage
- T_i : température d'air intérieure
- T_a : température ambiante (extérieure)
- T_e : température d'enveloppe
- C_i : capacité de l'air intérieur
- C_e : capacité de l'enveloppe
- R_{ie} : résistance intérieure/enveloppe
- R_{ea} : résistance enveloppe/extérieure
- R_{ia} : résistance intérieure/extérieure
- P_{ch} : puissance de chauffage
- T_s : température mesurée par la sonde
- T_i : température d'air intérieure
- T_a : température ambiante (extérieure)
- T_e : température d'enveloppe
- C_s : capacité du capteur
- C_i : capacité de l'air intérieur
- C_e : capacité de l'enveloppe
- R_{is} : résistance intérieure/capteur
- R_{ie} : résistance intérieure/enveloppe
- R_{ea} : résistance enveloppe/extérieure
- R_{ia} : résistance intérieure/extérieure
- P_{ch} : puissance de chauffage

montre le lien entre cette écriture et celle d'un système classique.

L'analyse des résidus permet de valider le modèle identifié. En effet, le terme d'erreur (résidus) est supposé être un bruit blanc gaussien. Le tracé de l'inter-corrélation des résidus et de l'auto-corrélation entre les erreurs et les entrées du modèle permet de vérifier la validité

de cette hypothèse *a posteriori*. Dans la suite, le seuil a été fixé à 10% [110].

Les bornes des différents paramètres à identifier ont été fixés à partir des valeurs classiques trouvées dans la littérature. Une grille de valeurs d'initialisation des paramètres possibles a ensuite été construite pour chaque modèle et l'algorithme disponible dans la *Toolbox R* est utilisé pour calculer les valeurs des paramètres pour chaque vecteur d'initialisation. Selon les points de l'espace des paramètres utilisés pour l'initialisation, l'algorithme ne converge pas toujours et les valeurs obtenues pour les paramètres ne sont pas uniques (mais les impédances équivalentes le sont), **ce qui est typique d'un problème mal conditionné** [190]. Des exemples de résultats sont représentés sur les figures 5.3.19 à 5.3.22 pour un des logements étudiés, pour un modèle identifié de la forme R_3C_2 . Les figures 5.3.19 et 5.3.20 représentent les résultats sur une séquence d'identification avec une prédiction à 10 minutes et à une heure respectivement. Le premier graphique représente les résidus, le second l'évolution de la température mesurée par le capteur (courbe de couleur noire) et celle calculée avec le modèle (courbe de couleur rouge), et les deux derniers les sollicitations d'entrées. On peut déjà voir sur ces figures les limites du modèle: en effet, les changements de régime de la sollicitation *puissance chauffage* ne sont pas correctement représentés avec le modèle identifiés. Les figures 5.3.21 et 5.3.22 montrent (de gauche à droite) l'intercorrélation des résidus, le périodogramme et le périodogramme cumulé des résidus pour les deux pas de prédiction. La bande délimitée par les droites en pointillés sur le périodogramme cumulé matérialise le domaine d'incertitude acceptable (10%). La figure 5.3.22 illustre les limites de l'identification du modèle à partir des données disponibles.

L'analyse des résidus ne permet pas de valider les modèles identifiés. Plusieurs raisons (non exhaustives et non exclusives) peuvent être invoquées:

- L'imprécision sur les séries de sollicitations (précision des capteurs et des mesures). Le traitement des données introduit est indispensable mais un bruit de mesure supplémentaire qui contribue au caractère mal posé du problème
- Les signaux d'entrées sont une approximation trop grossière des sollicitations auxquelles le bâtiment est soumis
- Les sollicitations ne sont pas suffisamment riches pour solliciter le système, par conséquent le hessien du système est mal conditionné et certaines directions (paramètres) ne sont pas identifiables

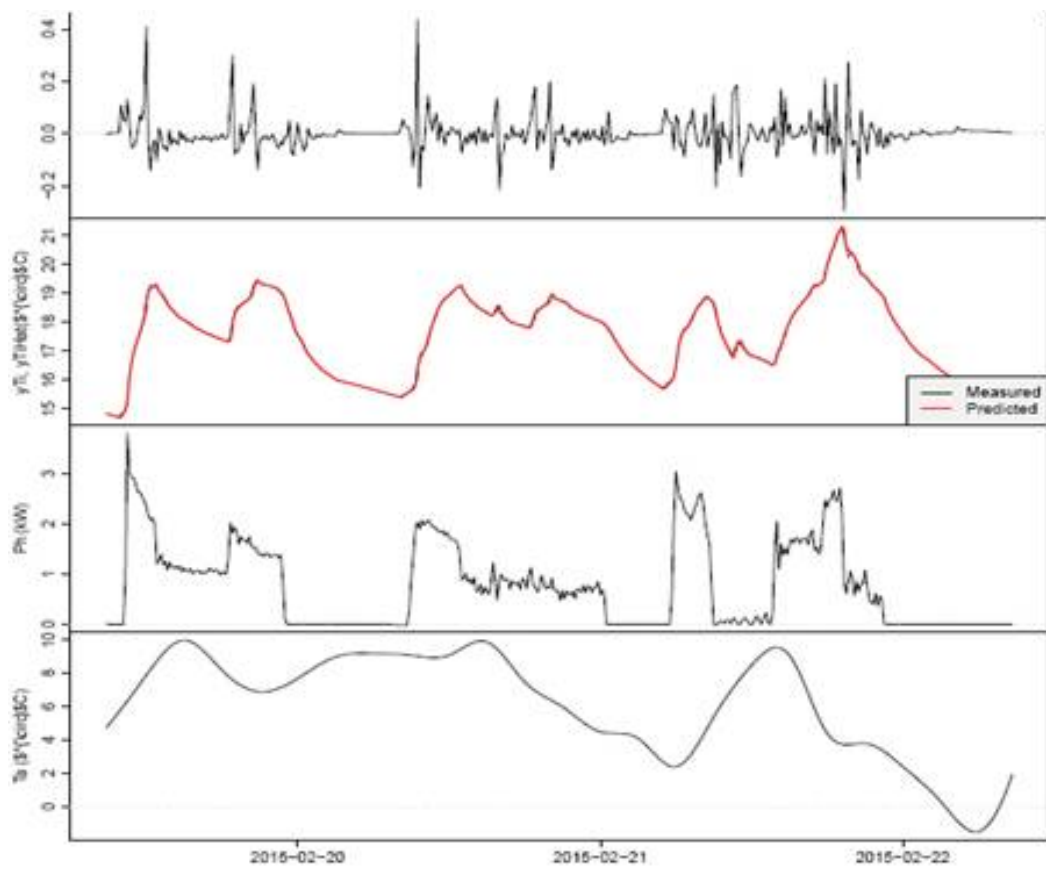


Figure 5.3.19 Résultats sur une séquence de validation, modèle R_3C_2 , prédiction à 10 min

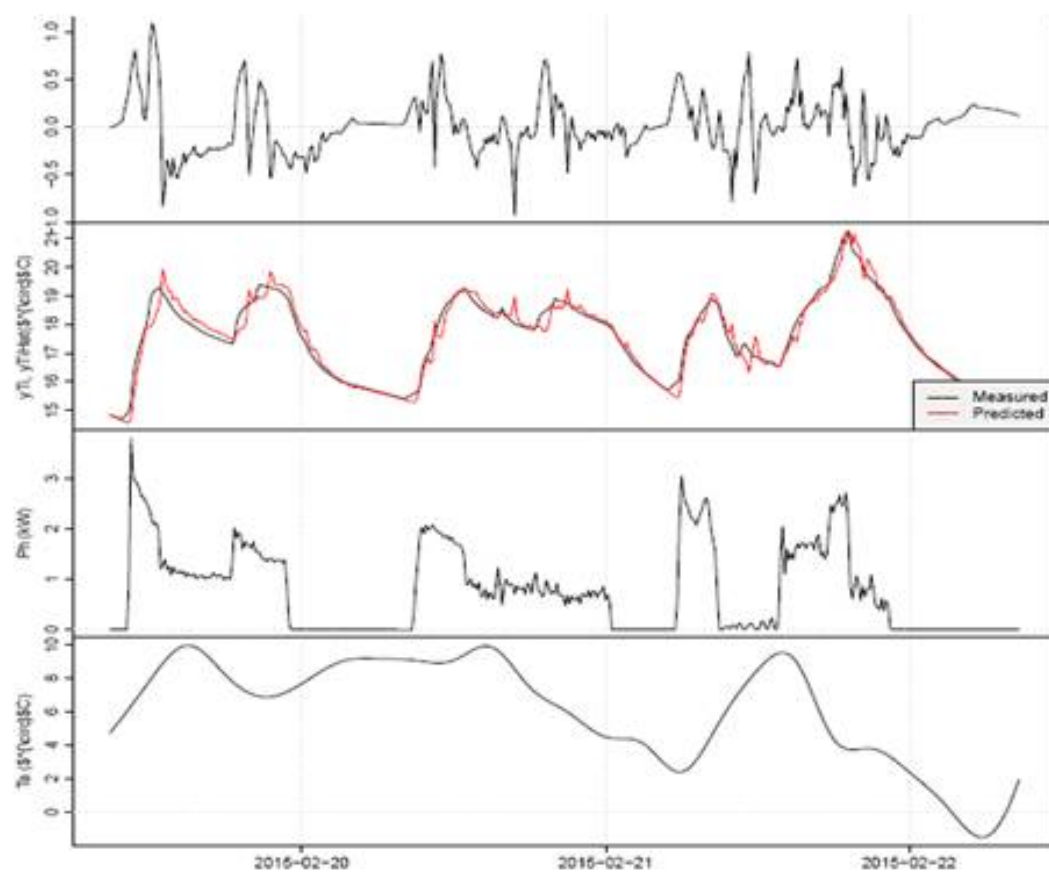


Figure 5.3.20 Résultats sur une séquence de validation, modèle R_3C_2 , prédiction à 1 h

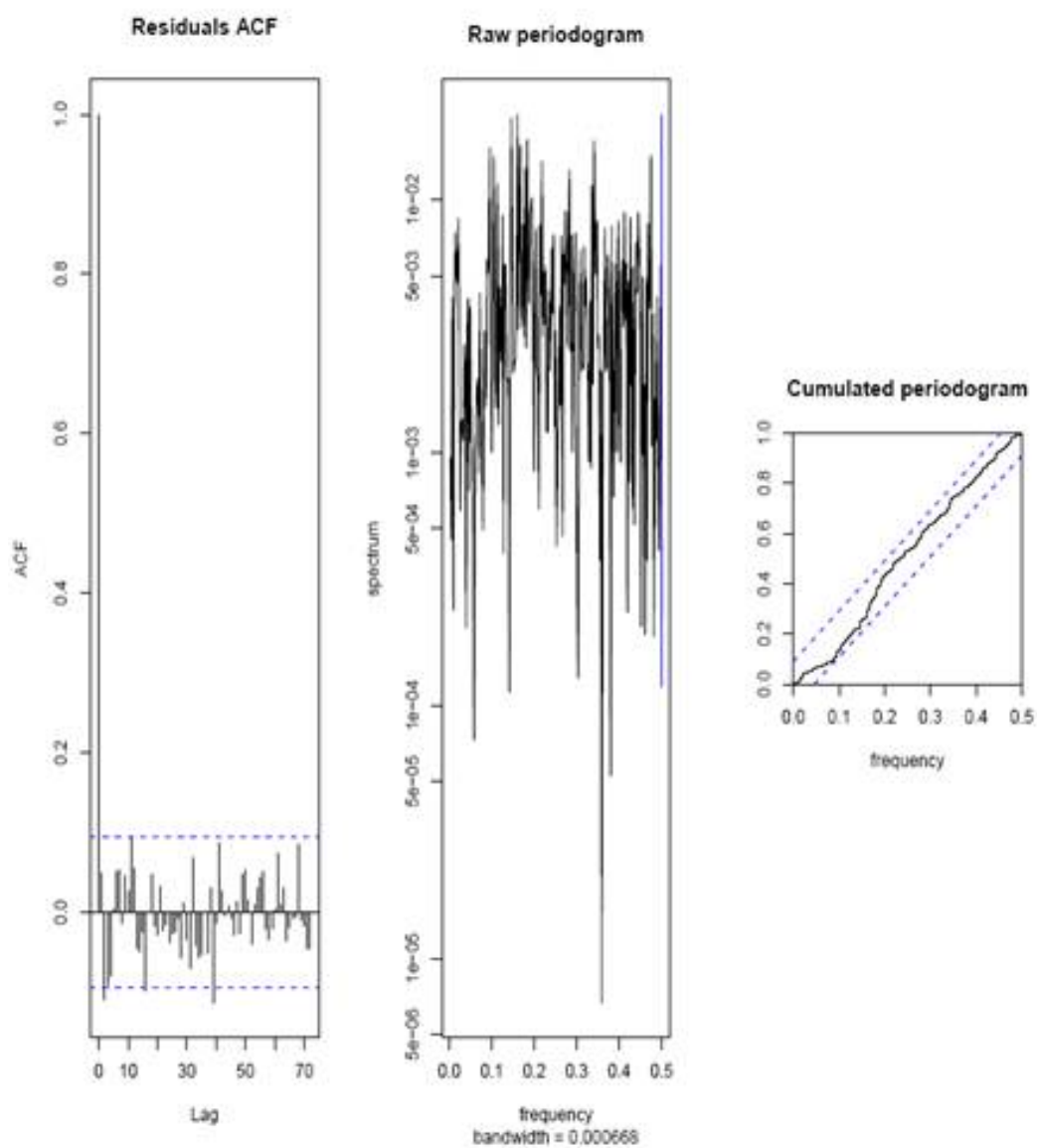


Figure 5.3.21 Analyse des résidus, modèle R_3C_2 , prédiction à 10 min

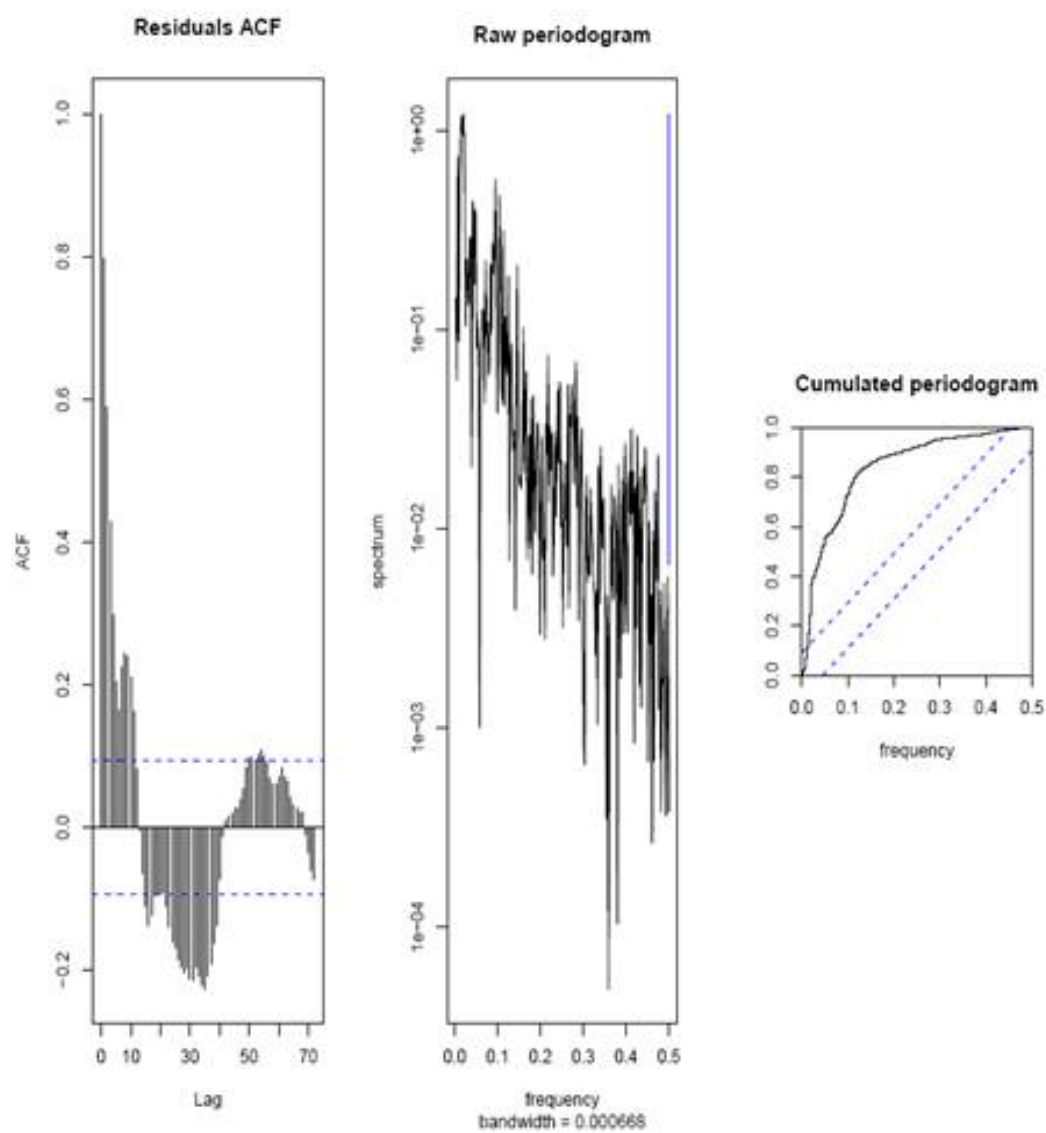


Figure 5.3.22 Analyse des résidus, modèle R_3C_2 , prédiction à 1 h

5.4 Conclusion du chapitre

Dans la première partie du chapitre, nous avons exploité les index de consommation relatifs à l'ensemble des usages des logements. Nous avons pu observer une déformation des indicateurs *réseaux* dans la situation avec pilotage direct, sans contrôle de la relance par rapport au cas sans effacement. L'évaluation des produits d'effacements réalisés suppose d'être en mesure d'estimer la courbe de référence (demande en l'absence de signal de contrôle), or les méthodes connues et déjà implémentée par des opérateurs, qui ont été présentées dans la partie 5.2 n'ont pas pu être mis en œuvre sur notre échantillon du fait de la taille de celui-ci.

Une méthode d'estimation d'une courbe de référence a été proposée dans ce chapitre, mais elle n'a pas pu être statistiquement validée pour les raisons évoquées ci-dessous. La comparaison entre ces deux courbes a néanmoins permis d'illustrer la déformation de la charge due à l'effacement.

Dans la seconde partie du chapitre, nous avons exploité les données d'usage *ECS* et *chauffage* disponibles dans l'échantillon. Pour l'usage *ECS*, un modèle simplifié a pu être ajusté sur les données agrégées des systèmes asservis, ce qui permet de proposer directement des évaluations des effacements réalisés dans ce cas. Pour les systèmes non asservis, un travail de recherche de la fonction de demande (ou puisage) est nécessaire pour poursuivre l'analyse.

En ce qui concerne l'usage chauffage, seules quelques voies de chauffage d'un nombre très limité de ménages étaient disponibles. Des modèles permettant de simuler la dynamique d'un bâti régulé ont été recherchés. Compte tenu des données disponibles (peu d'informations sur la position du capteur de température dans l'habitat, absence d'informations détaillées sur les logements, peu d'informations sur les systèmes de chauffage installés et (éventuellement) instrumentés, il n'a pas été possible de valider un modèle thermique dynamique.

Ce chapitre a donc permis de souligner les difficultés et les limites de l'exploitation des données issues d'une expérimentation *in situ*. D'autre part, les données disponibles nous ont permis de proposer des éléments de caractérisation de la variabilité des courbes de charge (tant par sa dimension spatiale que temporelle). Dans le chapitre suivant, nous rechercherons un modèle de parc global permettant de représenter les différentes sources de diversité que nous avons défini.

Chapitre 6

Modélisation parc

Sommaire du chapitre

6.1	Objectifs de la modélisation parc	192
6.1.1	Représenter les sources de diversité	192
6.1.2	Modéliser la demande électrique résidentielle: revue de littérature	193
6.1.3	Structure générale du modèle <i>bottom-up</i> - Périmètre de l'étude . .	197
6.2	Principes méthodologiques pour la génération du parc	200
6.2.1	Cas d'application: la métropole du Grand Lyon	201
6.2.2	Données disponibles	202
6.2.3	Schéma général pour la définition des entrées selon les données disponibles	214
6.3	Modèle pour les bâtis	214
6.3.1	Hypothèses générales pour la description des bâtis	214
6.3.2	Typologie de bâtis représentés dans le parc	218
6.3.3	Reconstruction des variables associées à chaque bâti	221
6.3.4	Synthèse du paramétrage du modèle de parc de bâti	228
6.3.5	Remarques sur le modèle de bâtis pour le parc	229
6.4	Modèle pour les systèmes	237
6.4.1	Systèmes de chauffage	237
6.5	Modèle pour les ménages	240
6.5.1	Modèle de présence individuel	241
6.5.2	Construction de profils de ménages à partir des profils individuels	244

6.1 Objectifs de la modélisation parc

6.1.1 Représenter les sources de diversité

L'évaluation des effets d'un effacement à l'échelle d'un ensemble de clients consommateurs d'électricité suppose de représenter la diversité existante au sein de l'échantillon dont on veut évaluer le potentiel d'effacement. Cette diversité peut être définie de plusieurs façons, on conserve dans le chapitre la distinction proposée dans le cadre de ce travail entre:

- Une diversité que nous qualifions de *fonctionnelle*, que l'on peut encore subdiviser en deux catégories:
 - Une diversité provenant de l'existence de bâtiments présentant différentes caractéristiques thermiques bien distinctes, par exemple du fait de l'utilisation de matériaux et méthodes constructives différentes selon l'époque d'achèvement du bâtiment et qui se révèle particulièrement importante pour la simulation des usages thermiques dans le bâtiment (chauffage, refroidissement)
 - Une diversité des équipements installés, lesquels peuvent par exemple intégrer des fonctionnalités de commandes plus ou moins évoluées.

Ces deux sources de diversité fonctionnelle sont corrélées, au moins jusqu'à un certain degré, mais cette corrélation est difficile à quantifier en pratique, et ne permet pas, telle quelle, de prendre en compte les effets de rénovation ou autres effets de non linéarité. Dans la suite, on ne recherchera pas de lien explicite entre le type de bâtiment et les systèmes qui y sont installés; toutefois, on prendra soin d'assurer une cohérence entre la modélisation du bâtiment, du ménage qui l'occupe, et le choix des équipements disponibles dans le logement.

- D'autre part une diversité dite *comportementale* trouvant son origine dans les différents modes d'utilisation des équipements par les ménages. Dans la suite on parlera de *ménage type* pour désigner un mode particulier d'utilisation des équipements disponibles.

Enfin on notera que les signaux externes, et notamment les conditions climatiques, sont générateurs de diversité au sein de l'échantillon (ce qui a été indirectement observé dans le chapitre 4).

Compte tenu de ces remarques et de l'objectif de ce travail, les fonctionnalités recherchées pour le modèle de parc sont:

- Capturer et représenter la diversité tant fonctionnelle et technique que comportementale du parc
- Permettre des simulations à *pas de temps courts*, en particulier on cherche à modéliser les dynamiques des systèmes sur des intervalles d'une dizaine de minutes
- Ne reposer que sur des données publiques et ne pas nécessiter d'études terrains afin d'assurer la reproductibilité de la méthode

Nous ajouterons que nous recherchons un modèle global suffisamment flexible de manière à pouvoir intégrer de nouvelles fonctionnalités et étendre ainsi le modèle. On pense notamment à l'ajout de modèles pour les équipements relatifs à des usages non thermiques de l'électricité.

6.1.2 Modéliser la demande électrique résidentielle: revue de littérature

La volonté de modéliser la demande en électricité à l'échelle d'un quartier ou d'une ville n'est pas nouvelle, et un certain nombre de travaux sur le sujet ont été effectués par le passé. En particulier, Swan et. al. [165] proposent une revue de littérature très complète des différentes approches de modélisation de la demande électrique d'un ensemble de consommateurs résidentiels et propose une classification de ces modèles en 4 grandes familles en distinguant les approches *bottom-up* et *top-down*. Encore plus récemment, dans le cadre de son travail de thèse, Garcia Sanchez [62] a proposé une revue des modèles *bottom-up* de consommation électrique (en particulier de la demande de chauffage) d'un ensemble de clients résidentiels.

Compte tenu des objectifs de la modélisation, notre approche est *bottom-up*, et le modèle que nous cherchons à construire est du type *ingénieur* selon les familles identifiées dans [165].

La première remarque est que l'objectif de nombreux modèles de parc existants porte essentiellement soit sur l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier [62], soit sur l'évaluation de l'impact de solutions de rénovation [164]. Un troisième objectif identifié est le développement d'outils d'aide à la décision à l'échelle de micro-quartiers, et on pourra se référer aux travaux de Kampf [90] pour le cas de la modélisation des besoins de chauffage et climatisation à cette échelle. Enfin, nous avons également relevé quelques travaux ayant pour objectif la caractérisation de l'impact de

stratégie d'effacements à l'échelle d'un parc [33, 130]. Reynders et. al. [143] proposent d'évaluer la performance de 3 modèles thermiques pour le calcul des besoins énergétiques du parc belge tel que caractérisé dans le projet *Tabula* [1], tandis que dans une autre étude, les auteurs ont mis en exergue l'influence de la caractérisation des typologies de bâtiments sur les besoins annuels de chauffage [136].

Afin d'identifier les enjeux et les difficultés de la modélisation à l'échelle d'un parc de logements et non plus à l'échelle d'un seul bâtiment, nous avons appliqué aux études existantes une grille de lecture (reproduite dans la tableau 6.1) articulée suivant 7 points essentiels, lesquels traduisent notre questionnement. On retiendra de cette analyse les points suivants:

1. Les modèles recherchés sont généralement représentatifs d'un quartier ou d'une région. Compte tenu de la diversité simulée dans le parc, l'ordre de grandeur est de 1000 logements par simulation. Lorsque les études portent sur l'évaluation de stratégies de pilotage de la charge, l'horizon temporel est de quelques jours, les évolutions dynamiques rapides sont représentées. Pour les études en besoin, ceux-ci sont évalués annuellement, au pas horaire.
2. Les modèles thermiques utilisés sont variés, qu'ils soient développés spécifiquement pour le projet ou non. Pour les modèles de bâtiments, les plus courant sont ESPr et les modèles *RC* réduits, avec dans ce cas une étape d'identification des paramètres nécessaires
3. Dans la plupart des études à disposition seul le parc des bâtis de type *maison* est représenté (les raisons peuvent être diverses). On notera que si le parc des maisons est plutôt bien caractérisé dans les bases de données, celui des logements collectifs a été moins étudié ¹
4. Les typologies de bâtis s'appuie sur 3 paramètres:
 - (a) Le type de bâti (maison / appartement ; accolé / en bande/ isolé)
 - (b) La surface du bâti
 - (c) La période constructive
5. Les gains internes dus aux équipements, à l'éclairage et aux occupants sont la plupart du temps calculés à partir de scénarios déterministes et normés, similaires aux scénarios

¹La grande diversité de ce type de logement rend l'exercice d'autant plus difficile

de la *RT*. On notera toutefois l'approche par profilage adoptée dans [130]. Dans [33], une forme de diversité est créée sur les consignes, les occupants sont supposés quitter le logement entre 8h et 18h, à $\pm 1h$

6. Comme attendu, les systèmes de chauffage ou climatisation ne sont modélisés que dans les études portant sur l'évaluation de stratégies de pilotage de la charge. Les régulateurs modélisés sont de type *TOR*
7. Les équipements relatifs à des usages non thermiques ne sont pris en compte que dans un nombre restreint de modèles (voir [164]), en lien avec l'objectif poursuivi. Dans [33], la courbe agrégée de chaque logement est tout d'abord modélisée via un modèle de réseau (*GRIDLAB-D*) puis l'usage de la climatisation est simulé pour chaque logement
8. Il n'y a pas de variabilité climatique locale intégrée dans les modèles de parc existant. La prise en compte de différentes conditions météorologiques se fait éventuellement à travers la simulation de plusieurs *zones climatiques* au sens des zones de la *RT*
9. Les données utilisées pour paramétrer les parcs sont issues de données statistiques publiques (par exemple: RECS ², enquêtes INSEE ³, SHEU-03 ⁴) et de campagnes d'audit sur le parc de bâtiments ([1], [36])
10. Il existe peu d'éléments permettant de valider la représentativité des parcs simulés. Pour les bâtis, celle-ci est garantie par les typologies utilisées: l'évaluation des performances du parc construit est ainsi cohérente avec l'image établie de l'existant

Par rapport aux modèles existants, le modèle de parc développé dans ce chapitre doit en particulier nous permettre de:

1. Simuler des stratégies de pilotage de la charge sur quelques heures, ainsi on cherche à représenter les dynamiques lentes et rapides du système global
2. Simuler des bâtis diversifiés: la flexibilité du modèle de bâti (chapitre 2) permet de simuler rapidement des logements de différentes périodes constructives

²Residential Energy Consumption Survey, <http://www.eia.gov/consumption/residential/>

³<http://www.insee.fr/fr/>

⁴Survey of Household Energy Use, <http://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&SDDS=4403>

Tableau 6.1 Grille d'analyse des modèles de parc existants

Objectifs de la modélisation		
Périmètre de l'étude - échelle	Domaine spatial Quel est l'étendue du parc à représenter?	Échelle temporelle Quelles dynamiques du parc à reproduire?
Schéma du modèle	Définition des Entrées Sorties du modèle	
Caractéristiques des modèles utilisés		
Modèle thermique	Type de modèles	
Caractérisation des bâtis	Définition d'une typologie de bâtis dans le parc? Quels attributs?	
Usages et occupation	Modèles AI	Méthode de génération des scénarios?
	Scénarios occupation	
Équipements	Modélisation des systèmes?	
	Usages thermiques	
	Autres équipements	
Données climat		
Base de données exploitées		
Validation du modèle	Quels sont les critères de validation pertinents?	
Cas d'étude avec le modèle de parc		

3. Intégrer les logements anciens, dont le potentiel d'effacement est le plus intéressant, dans le périmètre du parc. A ce jour, nous n'avons pas trouvé de modèle de parc français permettant de répondre à ce besoin
4. Prendre en compte la diversité des comportements au sein de la population. Le chapitre 4 a permis de mettre en évidence l'influence des modes de gestions des équipements sur les effacements réalisés. Dans cette partie, on souhaite caractériser de manière plus précise la diversité comportementale observable dans le parc

6.1.3 Structure générale du modèle *bottom-up* - Périmètre de l'étude

6.1.3.1 Périmètre géographique

Le parc à représenter est situé dans une même zone géographique. De plus, on suppose que les conditions climatiques sont suffisamment homogènes dans cette zone pour ne pas avoir à décrire finement des effets climatiques locaux.

6.1.3.2 Bâtiments représentés

On se limite dans le cadre de l'étude à la représentation des consommateurs du secteur résidentiel. Au sein de ce groupe, on recherche l'exhaustivité des bâtiments existants; toutefois, seuls les *logements ordinaires en France métropolitaine* tels que définis par l'INSEE sont représentés, ce qui veut dire que nous ne représentons que des logements de type *maison* ou de type *appartement*. De plus, on se limite aux seuls bâtiments régulièrement occupés (pas de représentation des logements vacants, qui n'ont pas d'intérêt ici), et parmi ces logements occupés, on ne modélise que les habitations principales des ménages.

6.1.3.3 Usages de l'électricité modélisés

L'objectif est de pouvoir simuler les consommations électriques pour les usages thermiques en priorité. Dans cette première version, seul l'usage *chauffage* pour les ménages ayant des systèmes de chauffage *électriques*, de type *convecteurs* ou *radiateurs* a été modélisé. L'extension du périmètre d'étude à l'usage *ECS* est possible en ajoutant un module *activité* et en recherchant le modèle de demande en eau chaude adéquat.

6.1.3.4 Schéma général du modèle, interactions entre les sous-modèles

La figure 6.1.1 montre l'articulation des différents sous-modèles permettant de construire un logement.

Compte tenu de l'approche proposée, on obtient, pour un logement donné, les interactions entre le bâti, les systèmes et le ménage représentées à la figure 6.1.2. La reconstruction du parc repose sur l'identification et la caractérisation d'ensembles de logements (ensembles {bâti-ménages-systèmes}), c'est-à-dire sur la définition des interactions représentées sur la figure 6.1.2 pour le parc à simuler.

On cherchera de plus, dans la mesure du possible, à prendre en compte les interactions entre logements au niveau du parc. L'un des aspects les plus représentatifs des interactions recherchées est relatif aux bâtis, avec par exemple la mitoyenneté pour les maisons individuelles et la contiguïté des appartements d'un même immeuble (conditions aux limites pour le modèle de bâti, voir couplage des bâtis dans un immeuble). Un schéma illustratif de ces interactions possibles au niveau du parc est donné à la figure 6.1.3 dans le cas d'un logement collectif composé de trois bâtis. On notera qu'à l'échelle du quartier déjà ces interactions ne se limitent pas uniquement à la connexité des bâtis, par exemple, dans le cas de deux bâtis situés l'un en face de l'autre, le calcul des masques solaires suppose de prendre en compte l'emplacement et la forme des bâtis proches (voir plus lointains selon les choix de modélisation, etc...) et donc de tenir compte d'une certaine forme d'interaction entre les bâtis. Pour cela, la méthode proposée dans [73] pourrait être intégrée dans le modèle de parc développé dans ce chapitre.

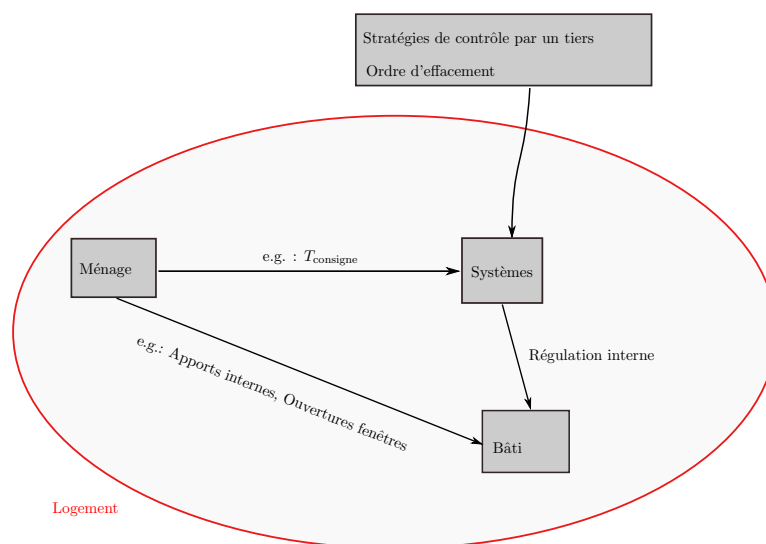


Figure 6.1.2 Schéma des interactions modélisées entre les 3 éléments d'un logement

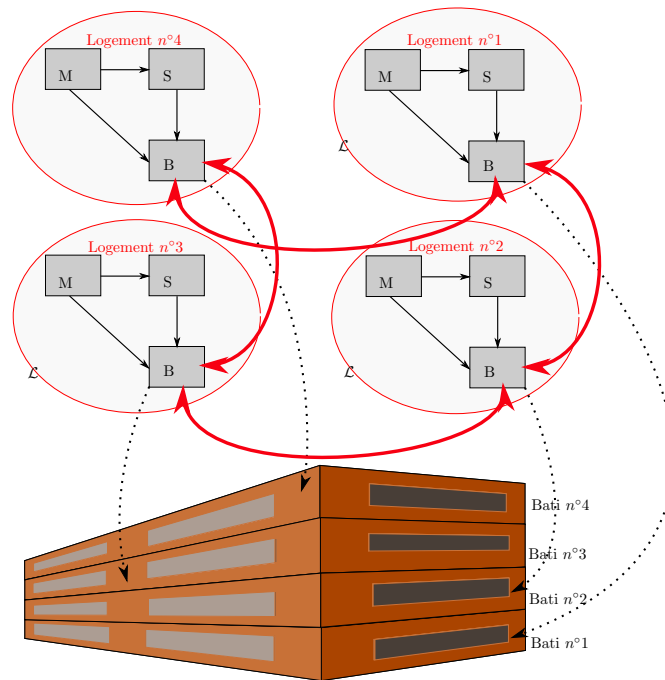


Figure 6.1.3 Schéma des interactions au niveau du parc

6.2 Principes méthodologiques pour la génération du parc

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode permettant de générer un parc réaliste de logements sans avoir besoin de mener d'études terrain conséquentes supplémentaires, lesquelles n'étaient pas réalisables à l'échelle souhaitée dans le cadre de ce travail. Par conséquent, le parc sera créé uniquement à partir de données publiques, telles que les données recueillies et publiées par l'INSEE, et on simule chaque logement à l'aide du modèle de bâtiment proposé au chapitre 3. L'une des notions-clefs dans le cadre de ce travail est donc la notion de *réalisme*. En effet, nous ne recherchons pas à recréer et décrire de manière exhaustive les logements existants dans le périmètre géographique considéré, mais nous souhaitons être capables de créer un parc décrivant correctement la dynamique du parc réel à la maille agrégée et non à la maille d'un logement, ce qui permettra dans un second temps d'identifier des offres d'effacements adaptées à la forme de la demande.

La validation du modèle de parc ne pourra donc se faire qu'à l'échelle d'une population de logements. Toutefois, le modèle de comportement thermique du bâti, ainsi que les modes de fonctionnement des systèmes décrits dans le chapitre 2 et la dynamique de chacun de ces modèles ont été validés individuellement et sont bien représentatifs d'un fonctionnement réel

des systèmes.

La méthode présentée dans ce chapitre est appliquée au territoire délimité par la métropole du Grand Lyon (section 6.2.1). On présente dans la partie 6.2.2 les données utilisées pour la construction du parc et on précise dans la partie 6.2.3 l'articulation entre les différents sous-modèles et les données utilisées pour chacun.

6.2.1 Cas d'application: la métropole du Grand Lyon

La méthode de génération de parc proposée ici est appliquée à la zone délimitée par la métropole de Lyon, appelée Grand Lyon dans la suite du document. Cette métropole regroupe 59 communes ⁵ couvrant un territoire de 540 km² et représente 1.3 millions d'habitants.

La figure 6.2.1 donne une image de l'étendue du parc choisi ainsi que du nombre de logements à modéliser dans ce parc.

Sur la figure 6.2.2 est tracée la répartition des modes de chauffage des logements. Cette répartition a été calculée uniquement sur les logements du type *MI* ou *LC*, occupés à titre de résidence principale (ce qui représente environ 89% des logements disponibles sur le territoire).

Les distributions respectives de maisons individuelles et de logements collectifs dans l'ensemble du parc et dans le parc "électrique" du Grand Lyon (c'est-à-dire le parc restreint aux logements dont le mode de chauffage est électrique) se trouvent à la figure 6.2.3.

Le parc à représenter est essentiellement constitué de logements collectifs, notamment dans le centre de la métropole (arrondissements de Lyon et communes limitrophes), tandis que les communes périphériques sont plutôt constituées de logements type "maisons individuelles". Si l'on regarde le parc de logements dont les systèmes de chauffage sont électriques, on observe toutefois une déformation de cette répartition qui n'est pas surprenante compte tenu des types de logements qui sont représentés. Sur le domaine délimité par la métropole de Lyon, le chauffage électrique représente environ 30% du parc, ce qui est également le cas au niveau national (exploitation des données de l'Enquête Nationale Logement 2006).

Enfin nous avons également représenté à la figure 6.2.4 la répartition des logements de chaque type ayant un mode de chauffage électrique par rapport à l'ensemble des logements de ce type pour chaque commune du territoire à modéliser: on y remarque une forte disparité sur le territoire du Grand Lyon.

⁵<http://www.grandlyon.com>

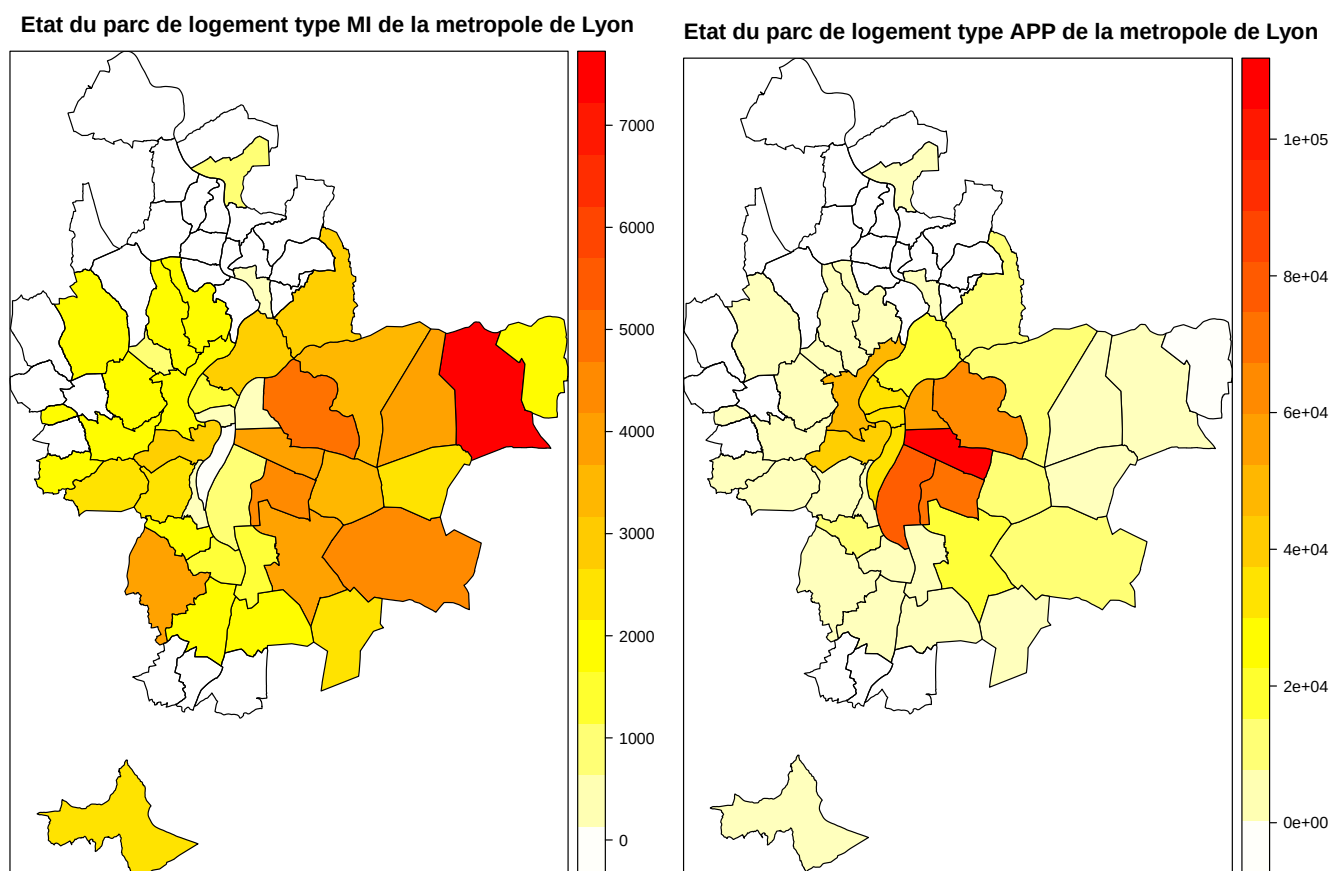


Figure 6.2.1 Nombre de logements du type *MI* et *LC* dans le Grand Lyon. Source données: [INSEE2008]

6.2.2 Données disponibles

On distingue deux types de sources pour la construction d'un parc réaliste de logements: d'une part des données statistiques issues d'enquêtes publiques telles que celles diffusées par l'INSEE et d'autre part des rapports d'analyse technique de la structure de certains parcs de logements.

6.2.2.1 Enquêtes statistiques: Données sur les logements et les ménages

Données issues des enquêtes de recensement de la population par l'INSEE Les enquêtes de recensement de la population aboutissent à plusieurs fichiers de données selon les thèmes à couvrir. Nous nous intéressons tout particulièrement ici aux fichiers logements,

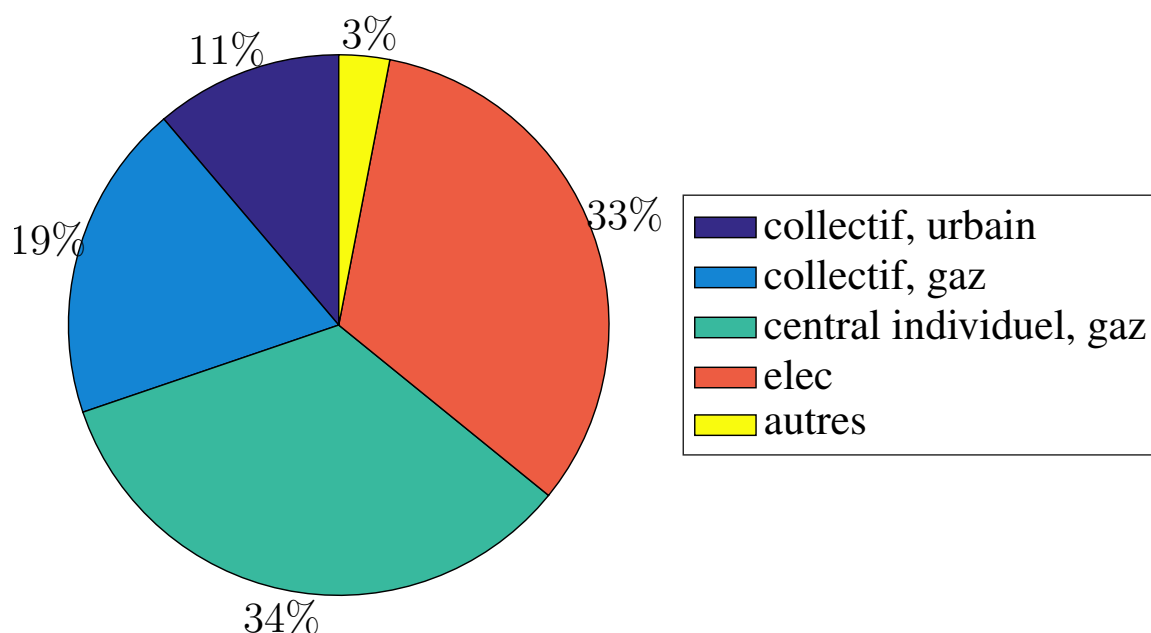


Figure 6.2.2 Mode de chauffage et répartition dans le grand Lyon. Source des données: [INSEE2008]

lesquels décrivent, à l'échelle communale, "les caractéristiques des logements et celles des ménages qui les occupent" ⁶.

Les fichiers sont accessibles au niveau national, régional, communal ou infra-communal (IRIS). Les fichiers détaillés disponibles (échelle infra-communale) sont répertoriés dans le tableau 6.2.

Nous commencerons par formuler une première remarque concernant les fichiers INSEE et la variable *période d'achèvement du logement*. Cette variable est fondamentale pour la reconstruction d'un parc puisqu'elle permet de caractériser les techniques constructives et les matériaux utilisés pour les logements (voir 6.3.2). On observe d'une part que cette variable n'est pas toujours recensée: par exemple elle n'apparaît pas dans le fichier LOGEMENT issu du recensement de la population en 2012 et 2010. Pour le fichier 2011, seules 3 catégories de périodes d'achèvement sont disponibles (avant 1946, entre 1946 et 1990 et après 1991 (partiel)). Ce regroupement des périodes en seulement 3 classes ne permet pas de rendre compte de manière satisfaisante de l'évolution de la performance thermique des bâtiments. Dans le fichier de 2008, 18 périodes constructives (pouvant être réduites à une seule année)

⁶ http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=fd-rp2008&page=fichiers_detail/RP2008/description.htm

Tableau 6.2 Fichiers INSEE exploitables pour la création du parc de logements

Nom	Source	Date	Commentaires
LOGEMTZD	INSEE	2008	• Fichier pour 7 régions dont Rhône-Alpes • Description à plusieurs échelles: communale, IRIS, TRIRIS
LOGEMTZD	INSEE	2011	• Fichiers régionaux • Plusieurs échelles • Variable <i>période d'achèvement</i> moins détaillée
ENQUETE LO- GEMENT 1999	INSEE (beyond)	1999	• Données non détaillées à la région

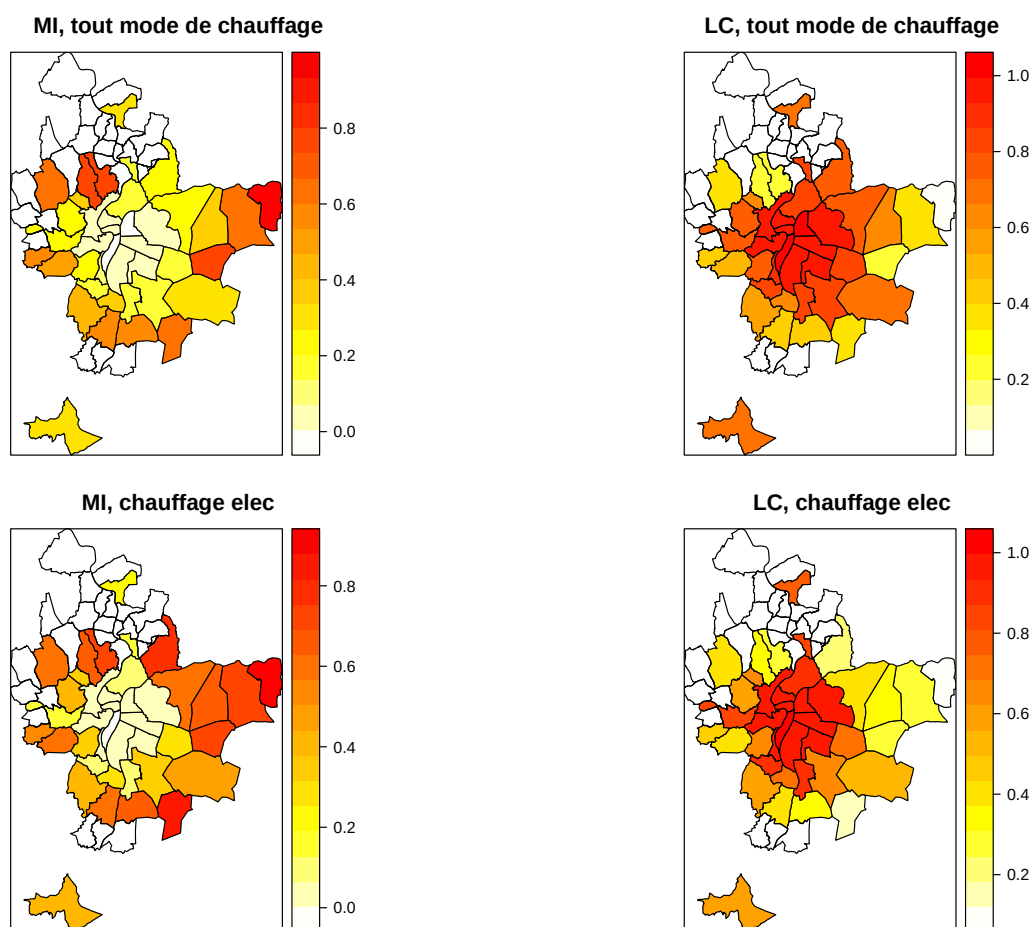


Figure 6.2.3 Logements avec chauffage électrique par rapport à l'ensemble des logements du parc (Maisons Individuelles / Logements Collectifs)

sont représentées, comme indiqué dans le tableau 6.3, auxquelles deux catégories spécifiques ont été ajoutées.

Ce découpage est avantageux car, de fait, la base de données construite est compatible avec les périodes des différentes réglementations thermiques, abstraction faite de la *RT2012* et de quelques différences minimales⁷. Dans la suite on regroupe les périodes constructives de façon à ce qu'elles correspondent aux différentes *RT*. On considère ainsi 6 niveaux de périodes d'achèvement des logements issus du fichier logement du recensement de 2008 (tableau 6.3).

Un problème se pose pour les logements construits avant la première *RT* (ie avant 1974): pour ces logements, nous expliciterons la méthode choisie dans la section dédiée au descriptif

⁷Les périodes sont parfois *décalées* d'une année

Tableau 6.3 Regroupement des bâtis par période d'achèvement issu du fichier *LOGEMENT* 2008 [INSEE2008]

Période fichier logement	période parc
Avant 1949	A
de 1949 à 1974	B
de 1975 à 1981	C
de 1982 à 1989	D
de 1990 à 1998	E
1999	E
2000	F
2001	F
2002	F
2003	F
2004	F
2005	F
2006	non pris en compte
2007	non pris en compte
2008	non pris en compte
2009	non pris en compte
2010	non pris en compte
En cours de construction	non pris en compte
Immeuble fictif	non pris en compte

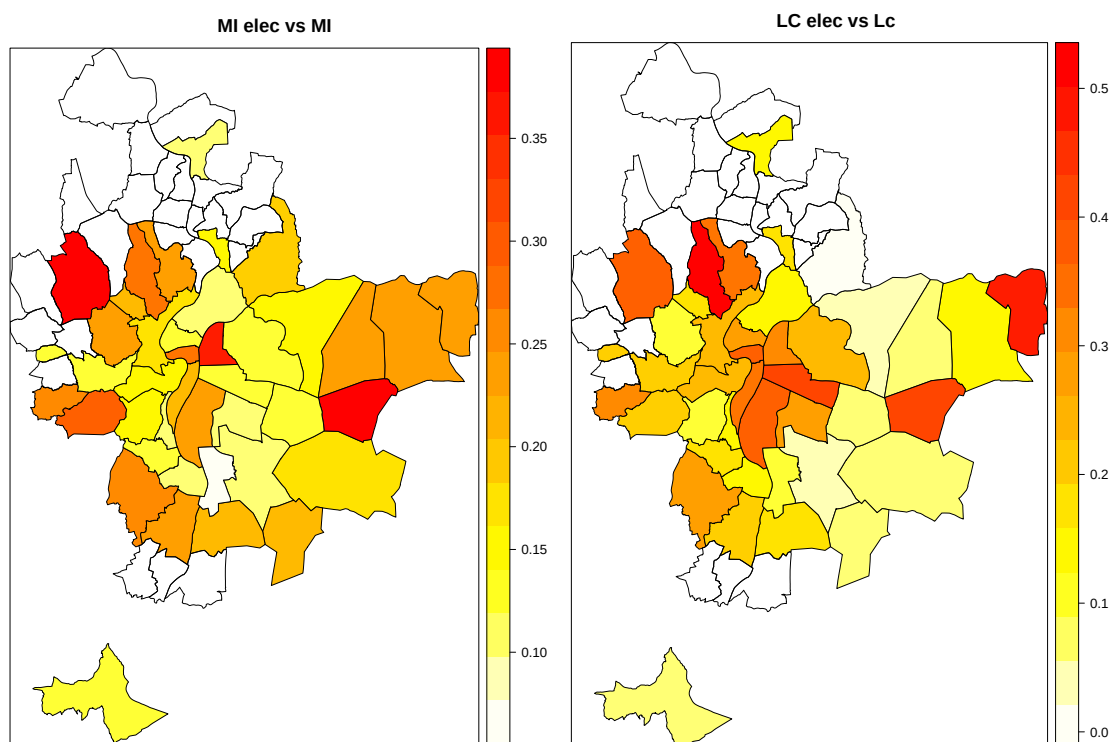


Figure 6.2.4 Logements avec chauffage électrique par type dans le parc

des fichiers de connaissance sur les logements. Nous pouvons cependant déjà affirmer qu'une distinction entre 3 catégories est nécessaire, compte tenu des techniques constructives à considérer:

1. Les logements construits entre 1949 et 1974 doivent être différenciés selon qu'ils ont été construits avant ou après 1967
2. Il est nécessaire de distinguer les logements construits avant 1915 de ceux construits entre 1915 et 1949

Ces données ne sont pas accessibles dans le fichier du recensement de 2008, mais sont accessibles dans le recensement de 1999 et dans les enquêtes nationales logement. Une exploitation conjointe de ces bases de données est nécessaire pour caractériser le parc.

La répartition des âges de construction pour les logements principaux de type "maison" ou "appartements", dont le système de chauffage est électrique, extraite du recensement de 2008, se trouve à la figure 6.2.5. On constate que pour certaines communes le parc de

logements est assez hétérogène tandis que d'autres communes ont des périodes constructives plus marquées.⁸

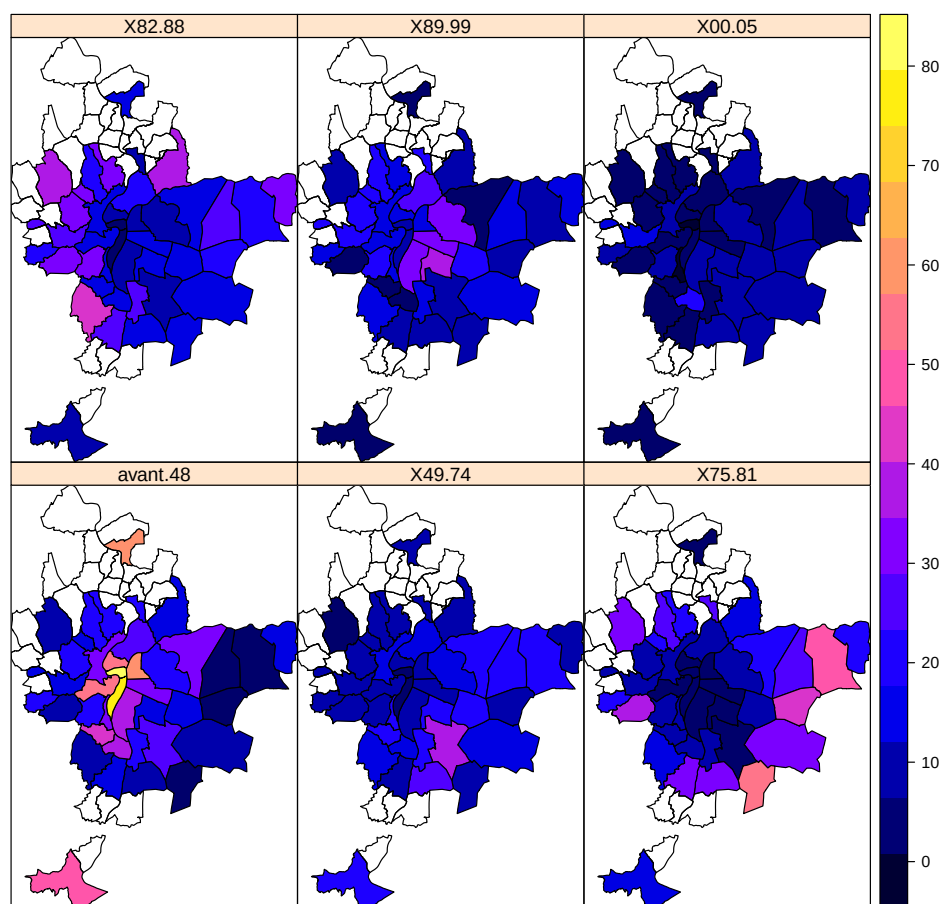


Figure 6.2.5 Répartition des périodes d'achèvement pour les logements principaux avec système de chauffage électrique. Source des données: [INSEE2008]

Dans la suite, sauf mention contraire, les données exploitées sont celles du fichier *LOGEMENT* issu du recensement de la population de 2008. Les effectifs à l'échelle infra-communale (*IRIS*) pouvant devenir trop faibles pour être exploitables, les données sont exploitées à minima à l'échelle de la commune.

Le fichier ainsi extrait contient 69 variables décrivant les logements ainsi que les ménages. Parmi ces variables, certaines sont utiles pour la description des logements, tandis que d'autres le seront pour la modélisation des ménages. En outre, nous voulons restreindre l'étude à

⁸Des *programmes de construction* à l'échelle de quartier voir de ville sont identifiables par une forme d'homogénéité du parc de bâti représenté sur la figure 6.2.5

certains usages et certains systèmes. Pour que cette description soit la plus réaliste possible, il est souhaitable de pouvoir trier les logements décrits dans l'enquête et ne conserver que les résidences occupées à titre principale, les logements équipés de systèmes de chauffage électriques, ... En effet, nous savons qu'à certaines périodes, le chauffage électrique a été privilégié par rapport à d'autres modes et inversement. Il est souhaitable que le parc modélisé permette de reproduire cette sur-représentation éventuelle de certains types de bâtiments (pour le cas du parc de la métropole lyonnaise, voir figures 6.2.3 et 6.2.4).

Données issues des enquêtes logement L'enquête nationale logement, notée **ENL**, est réalisée tous les 4 ans en moyenne (on note pour la suite *ENL2006* et *ENL2002* respectivement les fichiers des campagnes 2006 et 2002). L'enquête est représentative à la maille nationale, et à partir de l'enquête 2006, certains résultats sont exploitables au niveau régional. Pour le cas d'application proposé dans ce travail, les enquêtes ont été exploitées au niveau national. L'enquête est composée de plusieurs échantillons et l'un des objectifs est de décrire les conditions de logements des ménages. Elle comprend à la fois un descriptif des ménages et des logements qu'ils occupent, un descriptif complet est disponible en ligne ⁹.

Données issues des enquêtes emploi du temps Il s'agit d'une enquête réalisée environ tous les 10 ans par l'INSEE ¹⁰ permettant de "*recueillir des informations précises sur l'usage que les individus font de leur temps*". L'enquête de 2010 (notée dans la suite *EDT2010*) s'inscrit dans le cadre d'une uniformisation de ce type d'enquêtes à l'échelle européenne et a été exploitée pour la construction du modèle de ménage (voir la section 6.5). La base exploitée est issue de 17800 fiches adresses et contient environ 24000 carnets. En plus des informations générales (individuelles et sur le ménage) recueillies pour chaque individu, un individu du ménage remplit au moins un carnet ¹¹ en précisant ses activités par tranche de 10 minutes.

On notera l'existence d'un document de travail publié par l'INSEE portant sur l'évaluation des différentes sources de données pour le thème du logement qui apporte des informations utiles pour l'exploitation et la réconciliation des bases statistiques citées ¹². Enfin, d'autres bases de données portant sur des thèmes spécifiques ont été identifiées mais nous n'avons pas pu en exploiter pleinement les données dans le cadre de ce travail pour diverses raisons

⁹<http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/enquete-logement.htm>

¹⁰<http://www.insee.fr/fr/publications-et-services/irweb.asp?id=edt2010>

¹¹En général deux carnets ont été rempli par chaque individu: l'un pour les jours de semaine, l'autre pour les jours de week end

¹²https://www.cnle.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_insee.pdf

Tableau 6.4 Attribut d'intérêt des *bâtis indifférenciés* issus de la *BDTOPO*

Attributs	Remarque	Précision
HAUTEUR	Écart entre l'altitude minimale et maximale du bâtiment (attributs également disponibles)	1m

(la plus courante étant la difficulté d'associer un modèle type à partir de l'exploitation des données).

6.2.2.2 Données cartographiques

La principale source cartographique est constituée des cartes de l'IGN. Toutefois, d'autres bases cartographiques sont disponibles, sans que celles-ci ne soient aussi intéressantes dans le cadre de ce travail que la base de données topographiques de l'IGN (notamment du fait de la simplicité d'utilisation des cartes IGN).

Cartes de l'IGN Nous disposons de plusieurs bases de données exploitables à l'échelle infra-communale: d'une part la base de données topographiques, et d'autre part la base de données cadastrales. Compte tenu de l'objectif, nous exploiterons principalement la première base de données, notée *BDTOPO* dans la suite. Dans cette base, seules les données des *bâtis indifférenciés* sont exploitées. Ces locaux sont définis négativement par rapport à l'ensemble de la base, il s'agit de ceux n'appartenant pas à l'une des autres catégories décrites dans la base de données topographiques. Les bâtiments appartenant à cette classe ne correspondent donc pas exclusivement à des bâtiments de type *logements d'habitation*¹³. On précise dans la section 6.3.3 la méthode choisie pour réconcilier les données extraites de cette base avec les autres données disponibles pour la construction du parc. On trouvera le détail des attributs d'intérêts pour ce travail qui sont liées à cette classe dans le tableau 6.4. Les cartes ont été exploitées à l'aide des logiciels *OpenJump*¹⁴ et *R*.

Autres données cartographiques On notera la possibilité d'utiliser des sources telles que GoogleMaps ou OpenStreetMap pour la représentation spatiale du parc. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à l'exploitation des cartes de la *BDTOPO*. L'utilisation

¹³Les bâtiments indifférenciés incluent les types de locaux : "Bâtiments d'habitation, bergeries, bories, bungalows, bureaux, chalets, bâtiments d'enseignement, garages individuels, bâtiments hospitaliers, immeubles collectifs, lavoirs couverts, musées, prisons, refuges, villages de vacances"

¹⁴<http://www.openjump.org/>

de données plus précises sur les bâtis du secteur résidentiel pourrait permettre par la suite de mieux caractériser le parc, en particulier dépasser les limites liées à la réconciliation des données topographiques avec les données statistiques issues des enquêtes *INSEE* - voir infra.

6.2.2.3 Données issues d'études sur la caractérisation des logements

Nous avons identifié 4 principales sources de documentation portant sur la caractérisation des logements ¹⁵.

Le projet TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment): Il s'agit d'un projet européen ayant pour objectif de caractériser les consommations des bâtiments résidentiels à l'échelle européenne. Pour le moment, l'ensemble des pays de l'Union Européenne n'est pas représenté, mais la France fait partie du projet. Une présentation du projet est disponible ¹⁶, laquelle est reprise ici: à partir des concepts communs du projet (permettant des comparaisons nationales), chaque partenaire national a développé une typologie nationale de description de son parc de bâtiments. Cette typologie regroupe les éléments suivants:

- *a classification concept for existing residential buildings according to age, size and further parameters,*
- *a set of example buildings which represent specific building types of the national stocks,*
- *typical energy consumption values for the example buildings,*
- *showcase calculations of the possible energy savings,*
- *statistical data for buildings and supply systems.*

En ce qui concerne la France, le projet TABULA a permis de construire une typologie de bâtiments pour le secteur résidentiel et les caractéristiques des bâtiments type identifiés sont disponibles dans l'outil **Tabula**. Les typologies identifiées concordent avec les différentes réglementations thermiques. Pour les bâtiments construits avant la mise en place de la réglementation thermique, des modèles types de bâtiments représentatifs de logements français (pas de différenciation régionale, départementale, ...) sont disponibles. Cette description recoupe celle établie dans le cadre du projet *Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012*.

¹⁵Ces sources ne sont pas indépendantes, certaines pouvant en alimenter d'autres

¹⁶<http://episcope.eu/building-typology/overview/>

Le projet RAGE 2012 Le programme Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 comprend un volet *Analyse détaillée du parc résidentiel existant*¹⁷ qui porte sur l'étude et la caractérisation du parc résidentiel français jusqu'en 2000 [139] (rapport désigné par *RAGE2012* pour la suite). Cette caractérisation repose sur une synthèse multi-disciplinaire du parc de logement faisant appel à une analyse architecturale, technique et sociale du parc. La caractérisation du parc repose sur l'identification de périodes constructives types, lesquelles dépendent une fois encore de l'existence ou non d'une *RT*. Le parc de logement est scindé en deux catégories: les maisons individuelles (*MI*) et les logements collectifs (*LC*). L'étude a permis d'identifier 10 types de *MI* et 16 types de *LC*.

A l'échelle nationale, cette étude est la plus complète disponible à ce jour, elle fait appel à de nombreuses sources pour caractériser le parc (incluant les publications de TABULA [1] et l'ouvrage de P.Graulière), en particulier pour les bâtiments construits avant la mise en place d'une *RT*. 10 types de *MI* et 16 types de *LC* sont décrits.

Ce rapport, et notamment l'étude des sources ayant servi à l'élaboration des maisons et immeubles types construits avant 1948, fait apparaître une forte *régionalité* des méthodes constructives et matériaux utilisés. Cela nous a conduit à rechercher des caractéristiques plus détaillées pour ces logements suivant la zone géographique qu'on souhaite représenter.

Parmi les sources citées dans l'étude, on trouve en particulier un ouvrage en 45 volumes pour la caractérisation des bâtiments anciens dirigé par EDF dans les années 80 ([39]). Ces documents détaillent les méthodes constructives et matériaux types pour les logements anciens suivant la zone géographique considérée. Étant donné que nous souhaitons représenter un parc dont l'étendue géographique est réduite par rapport au périmètre du projet RAGE, il est opportun de caractériser plus finement les logements anciens à partir de la connaissance des techniques constructives locales, d'autant que ces logements représentent une part conséquente du parc.

Le projet PROMENLAB Il s'agit d'un projet¹⁸ visant à tester et promouvoir différents labels énergétiques au niveau du "parc de bâtiments existants à usage résidentiel d'une surface inférieure à 1000 m²".

Le projet se décompose en trois phases parmi lesquelles seule la première nous intéresse pour la modélisation des logements. Durant cette première phase, *une méthodologie concernant la labellisation a été élaborée en valorisant les expériences déjà réalisées en Allemagne au profit des autres pays partenaires (France, Italie, Pologne, Slovaquie, Irlande). Le cadre fixé par la directive sur la performance énergétique des bâtiments a été intégré.*

¹⁷<http://www.programmepacte.fr/>

¹⁸<http://www.raee.org/promenlab/popup.htm>

La méthodologie a permis de formaliser les principes du classement des bâtiments et de l'estimation du potentiel d'économie d'énergie.

Durant ce projet, une typologie des bâtiments du Grand Lyon a été proposée, typologie qui repose une fois encore essentiellement sur la considération de la période constructive (les périodes considérées s'étendent d'avant 1915 jusqu'à la RT75). Cette typologie a permis de mettre en avant 3 catégories de bâtiments: les maisons individuelles (*MI*), les logements en petit collectif (*PC*) et ceux en grand collectifs (*GC*). La distinction *petit/grand collectif* est liée au nombre de logements disponibles dans l'immeuble, selon la variable *Nombre de logements* du recensement de la population de 1999. Cette base a également été partiellement utilisée dans l'*ENL2006*, ce qui nous assure de la cohérence entre ces données. La typologie construite s'appuie donc logiquement sur le diptyque *Type de bâti / Période de construction*. En tenant compte des variantes possibles au sein d'une même période constructive, 29 types ont été identifiés (8 types de *MI*, 5 types de *PC* et 9 types de *GC*). Seuls les bâtis de type *MI* et *PC* sont caractérisés, soit 13 types (détails dans l'annexe C).

Données sur le bâti ancien lyonnais Il s'agit d'une source identifiée dans le rapport RAGE et dans le rapport PROMENLAB sur la caractérisation des bâtiments du Grand Lyon. Pour le projet PROMENLAB, cette source a permis de caractériser le parc des bâtis construits avant 1949. Nous avons utilisé le volume relatif à la région de Lyon [39] afin de reconstruire en détail les parois constructives identifiées dans le projet PROMENLAB. Pour représenter un autre parc que celui exposé dans la suite, il sera donc nécessaire de procéder préalablement à l'analyse et à la caractérisation des bâtiments anciens existants dans le nouveau périmètre choisi.

Remarques sur les données de caractérisation des bâtiments Dans les études présentées, la caractérisation du parc de bâtiment (national ou régional) se fait essentiellement à partir de la connaissance des périodes constructives. La connaissance de cette donnée est en partie accessible grâce aux enquêtes logement de l'*INSEE*. Néanmoins, ces études ne décrivent que qualitativement les éventuelles rénovations du parc. Lorsque cela était possible, nous avons intégré dans le parc les informations issues de l'*ENL2006*.

6.2.2.4 Autres sources de données

Données qualitatives sur les habitudes de vie des ménages L'étude bibliographique sur les températures de consigne qui a été présentée dans le chapitre 4 a permis de paramétrer le modèle de gestion de la consigne détaillé dans la partie 6.5.

Données sur les logements sociaux ¹⁹ Pour chaque commune de la métropole il est possible de connaître le nombre d'immeubles de logements sociaux, le nombre de logements de chaque immeuble (détaillé par type de T1 à T5), la date de mise en service, la date d'achat si nécessaire, la mise en œuvre ou non de solutions de rénovations dans le logement (attribut binaire). La date de construction n'est connue que pour les immeubles construits pour l'office, le mode de chauffage non plus, ce qui limite l'intérêt de l'intégration de cette base, elle n'a pas été exploitée dans la suite (la réconciliation de cette base avec les données issues de la *BDTOPO* pourrait permettre de mieux caractériser la géométrie du parc de bâti de type *LC*).

Données relatives au *Diagnostic Performance énergétique* Les guides de calcul *DPE* constituent un outil de comparaison intéressant. Le rapport d'étude [2] nous a permis de fixer des intervalles d'incertitudes pour certains paramètres des bâtis du parc.

6.2.3 Schéma général pour la définition des entrées selon les données disponibles

La figure 6.1.1 synthétise l'articulation entre les différents modèles nécessaires pour la simulation du parc de logements. Les différentes bases de données exploitées pour paramétrer les modèles sont indiqués pour chaque sous-modèle. Une étape de réconciliation entre ces différentes sources est nécessaire et fait l'objet de la section suivante.

A l'exception de quelques fichiers plus anciens dont notamment l'enquête nationale logement de 2006 dont une partie des données est issue du recensement de 1999, les données exploitées dans ce chapitre sont issues d'enquêtes et d'études produites entre 2006 et 2013. Les données ont été exploitées en faisant l'hypothèse d'invariance du parc au cours du temps.

6.3 Modèle pour les bâtis

Le modèle de simulation thermique utilisé est celui décrit au chapitre 3. Les différents types de paramètres d'entrée de ce modèle sont répertoriés dans le tableau 6.5.

6.3.1 Hypothèses générales pour la description des bâtis

6.3.1.1 Description géométrique du bâti

La partie habitée des bâtis est approximée par un parallélépipède d'une seule zone thermique, éventuellement deux zones thermiques représentant respectivement "les pièces de vie" et "la

¹⁹<http://www.grandlyonhabitat.fr>

Tableau 6.5 Description des variables nécessaires pour modéliser un bâti

Description géométrique	
Forme du bâti	Caractérisation de la forme
Localisation	Coordonnées
Surfaces	Surface au sol ($L * l$)
	Hauteur (h)
Surfaces vitrées	Surfaces
	Emplacements
Orientation de chaque paroi	
Caractéristiques constructives	
Parois opaques	Surfaces
	Carac. physiques de chaque élément de paroi ($\rho, \lambda, C, e, h_i, h_e$)
Parois vitrées	$U_{f,global}$
	épaisseur des différentes lames
	Coefficient de transmission-absorption
Volume d'air	taux de renouvellement d'air τ
	Capacité du <i>nœud d'air</i> C_{air}

zone nuit" (chambres) (représentation schématique des formes possibles à la figure 6.3.1). Par conséquent, on ne modélise pas les parois internes au sein d'une même "zone". Toutefois, afin de rendre la simulation réaliste, il est nécessaire d'adapter la valeur de *la capacité thermique du volume d'air dans la zone*²⁰.

La représentation des logements en une à deux zones thermiques est justifiée du fait de la simulation au niveau parc: de fait, les simulations unitaires (d'un seul logement) ne doivent pas nécessiter un temps de calcul trop important. Néanmoins, on notera que ce choix ne permet pas de prendre en compte l'existence de locaux non chauffés à l'intérieur du logement. Cela pourrait conduire à une sur-estimation importante des consommations, notamment dans le cas des maisons individuelles, lesquelles sont souvent composées de combles non habités et non chauffés voir de sous-sol sur l'ensemble de la surface du logement (essentiellement pour les maisons construites avant la RT75). Afin de mieux prendre en compte ces flux de chaleur, on néglige le couplage entre la zone chauffée et la zone non chauffée. On calcule dans un premier temps l'évolution de température dans la zone non chauffée en supposant la régulation de la zone chauffée parfaite. La série temporelle ainsi calculée est prise comme condition aux limites pour la simulation pour la paroi de séparation des deux zones.

Une hypothèse similaire est faite pour les bâtis de type appartement: on ne modélise pas le couplage entre les différents appartements (zones thermiques) d'un même immeuble collectif et on suppose en réalité que les appartements sont indépendants les uns des autres. Cette hypothèse conduit à une sous-estimation des consommations, sans qu'il ne soit possible de donner une estimation fiable de l'erreur commise.

Répartition des parois vitrées sur la façade des bâtis Les bases de données disponibles ne fournissent pas d'information concernant l'emplacement et la surface vitrée des bâtiments. En revanche des informations concernant le taux de surfaces vitrées sont disponibles entre autres dans le rapport RAGE. Par conséquent, on propose de réconcilier autant que possible les données extraites du rapport RAGE avec celles des autres rapports, afin de déterminer la typologie des bâtis du parc (partie 6.3.2). Une fois ce travail effectué, on dispose pour chaque logement d'un taux de surface vitrée par rapport à la surface de façade du bâti, ce qui est la première étape. Dans un second temps, il est nécessaire de décrire plus finement les surfaces vitrées pour modéliser au mieux les effets des sollicitations climatiques externes dont notamment les apports solaires: nombre et surface de chaque fenêtre, emplacement de celles-ci. Compte tenu de la diversité des bâtis dans le parc français et même dans le

²⁰On rappelle qu'on désigne dans le cadre de ce travail par *noeud d'air* le noeud fictif représentant la dynamique rapide du bâti à l'ordre 1, lequel intègre le volume d'air de la pièce, les objets s'y trouvant, les parois légères internes...

parc de la métropole du Grand Lyon, il est peu probable que nous puissions établir une/des règles génériques pour ces trois paramètres, qui dépendent de beaucoup de facteurs, dont la plupart sortent du cadre de cette étude (nous ne modélisons pas *l'environnement des bâtis* par exemple, seul un coefficient générique de réduction des flux solaires est intégré, comme exposé dans le chapitre 4). Il est toutefois possible d'avoir accès à des valeurs types concernant les dimensions des fenêtres pour les logements les plus récents; en effet, des dimensions génériques pour certains types de fenêtres (avec menuiserie) sont disponibles dans la Règlementation Thermique.

Nous proposons donc la répartition suivante pour les surfaces vitrées:

1. Pour les bâtis de type *maison*, on suppose que le bâti est composé de deux grandes fenêtres, chacune comptant pour la moitié de la surface vitrée totale. L'emprise au sol des bâtis étant un rectangle, les fenêtres sont systématiquement localisées selon la longueur, ce qui permet d'être cohérent avec l'hypothèse liée à la mitoyenneté : les bâtis sont mitoyens suivant la largeur

Dans le cas où la maison contient deux zones thermiques, on alloue une part forfaitaire à la première zone, typiquement de l'ordre de 60%

2. Pour les bâtis de type *appartement*, on ne dispose pas de données concernant un éventuel découpage type des logements collectifs en appartement, or nos simulations sont effectuées pour chaque logement, c'est-à-dire par appartement. Il est donc nécessaire dans un premier temps d'effectuer un "découpage" des logements collectifs en appartements puis de proposer une méthode d'attribution des surfaces vitrées pour chaque type d'appartement identifié. On suppose pour cela qu'il existe deux découpages possibles des *LC* en appartements, lesquels sont schématiquement représentés à la figure 6.3.2. Le découpage 2 est plutôt supposé représenter de grands ensembles et par conséquent, les appartements ne sont exposés vers l'extérieur que par un seul côté. La totalité des surfaces vitrées est forcément sur la même face vitrée sauf pour les appartements "en coin", lesquels ont deux faces vers l'extérieur. Le second découpage permet de représenter partiellement les immeubles de plus faible envergure. On suppose que les appartements dans ce type de bâtiments ont une double exposition; on applique donc les mêmes hypothèses que pour les maisons individuelles pour la répartition des surfaces vitrées. Dans chaque cas, on notera qu'on modélise mal les *zones tampons* (cages d'escaliers, circulations, ...)

On définit ensuite pour chaque logement une orientation, ce qui permet de générer de la diversité sur les apports solaires sans qu'il ne soit pour autant possible d'estimer si le résultat obtenu est bien représentatif du parc étudié.

6.3.1.2 Caractéristiques constructives

Parois opaques & parois vitrées Le modèle proposé dans le chapitre 2 est un modèle détaillé, qui doit être alimenté par une description des caractéristiques thermiques de chaque couche pour chaque paroi. La typologie détaillée dans la section 6.3.2 s'appuie sur les typologies proposées dans les études présentées dans la section 6.2.2.3. Les valeurs des paramètres sont issues des grandeurs tabulées dans les *RT*. Nous avons ajouté des variantes de bâtis avec intégration de certaines solutions de rénovations, en exploitant les données de l'*ENL 2006*.

Volume d'air Pour le volume d'air, deux paramètres doivent être déterminés: d'une part le taux de renouvellement d'air et d'autre part la capacité du *nœud d'air*. Rappelons que dans le modèle, le nœud d'air est en réalité un *méta-nœud* tenant compte à la fois de la capacité de l'air et également une capacité équivalente pour les "meubles" ainsi qu'une capacité équivalente partielle pour les murs intérieurs. La détermination de cette capacité équivalente est complexe, les valeurs que nous pouvons trouver dans la littérature allant jusqu'à 40 fois la capacité thermique de l'air [37].

Le taux de renouvellement d'air $\tau(t)$ est supposé constant par morceaux. Pour un bâti donné, il est donc possible d'intégrer plusieurs valeurs pour ce taux, permettant de prendre en compte l'ouverture/fermeture de volets ou bien l'ouverture des fenêtres (des hypothèses supplémentaires de modélisation sont alors nécessaires). Toutefois, cette fonctionnalité n'a pas été exploitée dans le modèle construit, un taux unique τ est donc défini pour chaque bâti.

6.3.2 Typologie de bâtis représentés dans le parc

Compte tenu de l'analyse des types de bâtiments représentés dans le parc français (section 6.2.2), le parc du Grand Lyon modélisé est constitué de 8 classes de maisons individuelles et 16 classes de logements collectifs, comme indiqué dans les figure 6.3.3 et 6.3.4. On précise dans ces tableaux l'ensemble des sources de données utilisées pour alimenter le modèle.

L'appartenance d'un bâti à l'un de ces types est entièrement déterminée par la donnée de l'année d'achèvement du logement (ou plutôt l'époque d'achèvement) et au sein de chaque classe plusieurs variantes de bâti peuvent être envisagées, conduisant à des valeurs de U similaires, mais dont les propriétés thermiques ne sont pas les mêmes. On notera qu'une classe supplémentaire devra être ajoutée pour les logements construits selon la *RT2012*, toutefois, les données statistiques exploitées ne nous permettent pas de construire le parc des

logements labellisés *basse consommation* ²¹.

Pour les maisons individuelles, on distingue les maisons mitoyennes des maisons isolées. On rappelle qu'un seul type de mitoyenneté est possible: en effet compte tenu du choix de répartition des surfaces vitrées, les maisons sont toujours mitoyennes selon la largeur. On envisage deux cas de mitoyenneté, soit d'un seul côté (*maisons jumelées*), et dans ce cas le côté mitoyen du bâtiment est tiré aléatoirement, soit des deux côtés (*maisons en bande*). Une évaluation du niveau de mitoyenneté des bâtiments pourrait être extraite de la BDTOPPO, cependant, compte tenu de la difficulté de réconciliation avec les données issues de l'INSEE, nous n'avons pas poursuivi plus en détail dans cette direction. Nous avons donc fixé pour la suite le rapport entre les maisons mitoyennes d'un seul côté et celles mitoyennes des deux à 80%.

La répartition des bâtis de chacun de ces types dans le parc du Grand Lyon est déterminée à l'aide du recensement de la population et de l'enquête logement. Les variables nécessaires au modèle sont données dans le tableau 6.6. L'enquête de 2008, fichier LOGEMENT, permet de déterminer la répartition de chaque classe de bâti dans le parc. Pour les périodes *avant 1948* et [1949 – 1974], la subdivision entre $[-, 1914]$, [1915 – 1948] et [1949, 1967], [1968, 1974] a finalement été extraite de l'enquête nationale logement. Cette enquête a été alimentée en partie grâce aux données du fichier recensement de 1999. L'enquête logement est représentative à l'échelle nationale mais pas à l'échelle régionale pour le territoire du *GrandLyon* ainsi nous avons directement projeté les données de l'enquête sur celles issues du recensement de la population sur la zone du *GrandLyon*. A l'échelle du parc construit dans ce chapitre, il existe donc un biais entre ces périodes. Cette distribution est toutefois cohérente avec celle établie dans le cadre du projet *PROMENLAB* pour la métropole du *GrandLyon*.

Compte tenu du découpage de la variable *période d'achèvement*, 8 classes sont extraites de l'exploitation conjointe des bases INSEE. De plus en tenant compte des deux types de bâti représentés (logements collectifs et maison individuelles) et de la possible mitoyenneté des bâtis du type *MI*, de type de logements collectif, entre *petit collectif* (immeuble de moins de 9 logements) et *grand collectif* (immeuble d'au moins 10 logements), les enquêtes INSEE permettent de construire 21 classes de bâti à représenter. Enfin, en tenant compte des 6 catégories de surfaces de logement représentées dans les données, on aboutit à 126 types de logement à décrire en fonction:

- Type de logement (maison ou appartement)

²¹il serait également nécessaire de valider le modèle thermique pour ce type de bâti, toutefois dans le cadre de l'évaluation d'effacements de consommation électrique, le potentiel de cette classe de bâtis est négligeable, de même que le poids énergétique de cette classe dans le parc.

Tableau 6.6 Variables INSEE nécessaires pour la reconstruction du parc

Variable	Nombre de niveaux	Source
Période constructive	6	[INSEE2008]
Surface	6	[INSEE2008]
Mitoyenneté	3 (dont niveau <i>sans objet</i>)	[INSEE2008]
HLM	3 (dont niveau <i>sans objet</i>)	[INSEE2008]
Période [1915 - 1948] selon la surface	12	[INSEE2006]
Période [1967 - 1974] selon la surface	12	[INSEE2006]
Distinction <i>Petit / Grand Collectif</i>	4 (3 types + sans objet)	[INSEE2006]

- Si maison: mitoyenne ou non
- Si logement collectif: distinction *petit/grand* collectif
- Période d'achèvement
- Surface habitable du bâti

La répartition de ces types est calculée à l'échelle de la commune (sauf pour les deux subdivisions des périodes constructives qui sont issues de données nationales). Nous avons déjà tracé la répartition des époques constructives des logements principaux dont le mode de chauffage est électrique à la figure 6.2.5. Si on regarde l'état de ce même parc selon la variable *surface habitable*, on obtient la carte de la figure 6.3.5. On remarquera que le centre de la métropole (Lyon et villes limitrophes) est plutôt constitué de logements plus petits que les communes plus éloignées, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la répartition entre bâti de type "maison" et "appartement" dans le parc; les maisons individuelles ayant de manière globale une plus grande surface habitable que les logements type "appartement" ²².

La figure 6.3.6 donne le taux de mitoyenneté des logements principaux de type *maison* dont le chauffage est électrique. (Sur la figure de gauche se trouve la distribution des bâtis type *individuel* tandis que les bâtis *mitoyens* sont représentés sur la carte de droite).

On notera que le taux de mitoyenneté des maisons est de l'ordre de 35% dans le parc modélisé, avec des zones où ce taux est beaucoup plus important. Sur l'ensemble du parc, l'ordre de grandeur est de 20% de maisons mitoyennes.

²²Il serait plus intéressant de regarder la distribution pour chaque type de bati = MIind, MImit, App

6.3.3 Reconstruction des variables associées à chaque bâti

6.3.3.1 Caractéristiques constructives

Parois opaques Dans les différents documents établissant une typologie de bâtiments, ceux-ci sont caractérisés par la donnée de coefficients de déperditions thermiques U globaux, soit pour chaque type de paroi (projet *Promenlab*), soit au global pour le logement ([139]). Dans le modèle de thermique du bâtiment, une description de chaque couche composant chaque paroi est nécessaire. Or la donnée d'un coefficient U global ne permet pas de retrouver la description de chaque épaisseur de paroi. Afin de s'assurer de la cohérence entre les données "macro" (coefficients U par type de parois) et celles nécessaires en entrée du modèle de thermique pour chaque type de bâti à décrire, nous procédons en plusieurs étapes:

- Description des composants de chaque paroi compte tenu de la période constructive du logement
- Recherche des coefficients caractéristiques de chaque matériau
- Calcul du coefficient U global de la paroi et comparaison avec les coefficients U connus
- Ajustement éventuel du coefficient: par l'intermédiaire de l'épaisseur de la couche d'inertie lourde (typiquement celle en "béton") soit sur du/des paramètres incertains dans le cas où la composition détaillée des parois serait mal connue

Lorsque cela est possible, le modèle est alimenté par les fréquences observées (par exemple pour la répartition entre les différentes variantes de bâti pour une période constructive fixée). Si aucune donnée n'est disponible, on suppose que la distribution est uniforme.

L'exploitation de l'ENL a permis d'intégrer dans le modèle de parc des distributions observées pour les 126 types de bâti pour les paramètres suivants:

- Isolation du toit (critère qualitatif suivant 4 modalités)
- Le type de revêtement au sol

Parois vitrées

Paramètres physiques Pour les parois vitrées, il est usuel de n'utiliser dans les modèles qu'un coefficient U global représentant à la fois la résistance thermique de la paroi vitrée et celle des menuiseries. La méthode de calcul est similaire à celle détaillée dans la *RT*, ce qui revient à considérer la capacité thermique de la vitre comme négligeable. Dans ce cas, il n'est plus possible de définir la température au niveau de la vitre comme l'un des état du système bâti. En conséquence, les échanges radiatifs entre les vitres et les autres parois opaques ne sont plus modélisés. Or nous savons que les vitres sont plus froides que le reste des parois, ce qui se traduit par une diminution de la température opérative dans la pièce. Afin de pouvoir (au moins partiellement) tenir compte des effets de ces parois plus froides sur le confort thermique, on suggère une méthode hybride:

- Prise en compte de la résistance des menuiseries comme couplage direct entre l'air ambiant et l'air extérieur
- Discrétisation des couches de verre des parois vitrées
- L'air ou le gaz se trouvant entre les lames de verre est modélisé par une résistance pure
- Prise en compte éventuelle de l'existence de fermeture et / ou protection par l'augmentation de la résistance de couplage entre l'air intérieur et l'air extérieur

Les grandeurs de référence utilisées sont issues des valeurs tabulées dans la *RT*. Les valeurs des $U_{f,global}$ ont été recalculées afin de correspondre aux données référencées dans le paragraphe 6.2.2.3 (calcul en adaptant l'épaisseur de la lame de gaz).

Caractérisation des parois vitrées dans le parc L'exploitation des données de l'*ENL 2006* permet de donner des clefs de répartition entre simple et double vitrage pour les 126 types de bâtis inclus dans le parc. Les fréquences observées ont directement été utilisées comme données d'entrée dans le modèle de parc (il s'agit de données représentatives au périmètre national). A titre d'exemple, la répartition entre simple et double vitrage pour les bâtis de type *maison individuelle* suivant la période constructive est représentée à la figure 6.3.7. On constate qu'une part importante du parc *ancien* est équipé de double vitrage.

6.3.3.2 Nœud d'air

L'étude [109] est cohérente avec les informations sur les systèmes de ventilation issues de l'*ENL2006* (distinction des cas: ventilation naturelle, *VMC* dans les pièces humides, *VMC* dans l'ensemble du bâti). Le modèle thermique utilisé ne permet pas d'exploiter ces données. Nous avons utilisé les données issues de la méthode *3CL-DPE* (conforme pour les

calculs de *DPE* ²³) afin de paramétrer les valeurs de taux de renouvellement d'air du parc. La distribution des équipements type *VMC* dans le parc est celle issue de l'exploitation de *ENL2006*. Les intervalles de variation des taux de renouvellement d'air ont été fixés en se basant sur [2] et les valeurs attribuées au bâti du parc sont tirés uniformément entre les deux bornes.

Nous n'avons pas trouvé de données permettant de préciser le paramétrage de la capacité du *nœud d'air*. Nous avons supposé que:

$$C_{n,air} \sim \mathcal{U}[5C_{air}, 20C_{air}]$$

avec C_{air} la capacité thermique de l'air dans des conditions de référence. Cette hypothèse introduit une variabilité importante dans le parc.

6.3.3.3 Description géométrique des bâtis

La surface habitable des logements est supposée suivre une loi uniforme entre les bornes extrêmes de chaque classe de la variable "SURF" de l'enquête logement, arrondi à 5m près. Pour la classe 1 - représentant les logements de moins de 25 m² - la valeur minimale de la surface est fixée à 15 m² tandis que pour la classe 6 - représentant les logements de plus de 150 m² - la surface maximum est fixée à 200 m². Ces bornes ont été fixées à partir de l'exploitation de l'*ENL2006*.

Exploitation de la *BDTOPO* Grâce à la *BDTOPO* il est possible de connaître la forme, l'emprise au sol, la localisation et la hauteur de chaque bâtiment de différentes catégories. Nous avons choisi d'exploiter la base *bâti indifférencié* à l'échelle de la commune, de manière à pouvoir reproduire les spécificités de certaines zones (notamment la sureprésentation de certains types de logements). Ce découpage pourrait être raffiné par une meilleure connaissance réseau, il présente néanmoins l'avantage d'être une clé d'association entre les différentes sources de données exploitées.

Le parc des maisons individuelles (logements principaux) dont le mode de chauffage est électrique suivant les variables *SURFACE* et *Période constructive* est représenté à la figure 6.3.8. On constate que ces deux variables sont corrélées, or la *BDTOPO* ne contient pas d'information sur la période d'achèvement des bâtis. La figure 6.2.5 montre la répartition des périodes constructives suivant les communes de la métropole. En exploitant la *BDTOPO* à

²³<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000018801075>

l'échelle communale, on reproduit de manière qualitative cette corrélation. Il n'est cependant pas possible de quantifier l'erreur commise.

L'exploitation de la base de données TOPO se fait en plusieurs étapes, et ce pour chaque commune. Pour chaque bâti de la base, on calcule l'emprise au sol et le périmètre du bâti. Dans une première étape, on cherche à identifier à partir d'une double lecture emprise au sol/hauteur des bâtis ceux qui sont éligibles pour représenter des maisons individuelles de ceux qui peuvent être des immeubles et les autres (bâtis ne pouvant être associés aux deux premières catégories). Pour les maisons individuelles, on suppose que l'emprise au sol ne peut pas dépasser 200 m^2 . En outre, la hauteur limite des bâtiments est fixée à 6 m. Pour rappel, il s'agit d'une hauteur mesurée par rapport à la gouttière connue avec une précision d'un mètre: un bâtiment de 6 m peut donc faire jusqu'à trois étages si on considère par exemple des combles aménagés! Pour les logements collectifs, l'emprise au sol est au minimum de 200 m^2 .

Cette étape effectuée, les bâtis de la BDTOPO sont affectés à trois classes possibles: les bâtis assimilés à des maisons individuelles, ceux assimilés à des logements collectifs (immeubles) et enfin une troisième catégorie regroupant les bâtis n'appartenant à aucune de ces deux classes, laquelle est abandonnée dans la suite.

La seconde étape de l'analyse est différente selon qu'on considère la sous catégorie des maisons individuelles ou celle des logements collectifs.

Pour la catégorie *MI*, pour chaque commune, on représente d'une part la distribution des emprises au sol des bâtis et d'autre part on extrait de l'enquête logement plusieurs niveaux de distribution des surfaces des maisons individuelles:

- L'ensemble des *MI* (tous modes de chauffage confondus)
- Les *MI* servant de résidences principales (notée *MI1*)
- Les *MI* résidences principales dont le mode de chauffage est électrique (noté *MI1ELEC*)

Seul l'ensemble *MI1ELEC* est conservé dans la suite. Pour chaque bâti, la réconciliation entre les bases *INSEE* et *IGN* exploitée permet d'attribuer à chaque logement:

- une surface au sens de la *BDTOPO*
- un rapport d'élongation
- une orientation
- des coordonnées (barycentre du bâti)

La surface au sens de la *BDTOPO* est l'emprise au sol du bâti (au sens topographique). Celle-ci est attribuée en fonction de l'intervalle de surface habitable du logement considéré au sens *INSEE* en admettant un écart de 30% ²⁴ entre les deux notions. Il n'y a ainsi qu'une similarité entre les populations du parc à représenter et celles du parc reconstruit.

Pour la catégorie *LC*, la même sélection est réalisée sur les entrées de l'enquête. On conserve donc un sous ensemble *LCIELEC* composé des bâtis du type *appartements*, résidences principales dont le mode de chauffage est électrique. L'exploitation des formes sur la carte extraite de la *BDTOPO* (emprise au sol supérieure à $200m^2$, hauteur supérieur à $6m$) permet de créer un jeu de logements collectifs ayant les mêmes attributs que les *MI* et qu'il faut ensuite diviser en bâtis de type *appartements* afin de reconstruire les *logements*. Ce travail reste à poursuivre.

Calcul de l'orientation des bâtiments Il existe plusieurs manières de définir l'orientation d'un bâti/forme géométrique, une revue des méthodes existantes est disponible dans [52]. Une méthode simple à mettre en œuvre dans le cadre de ce travail est celle proposée dans le cadre du projet AGENT [7] et qui repose sur le calcul du *rectangle minimal (SMBR)* dans lequel s'insère le polygone décrivant le bâti. La figure 6.3.9 illustre le principe de la méthode.

Le logiciel *OpenJump* ²⁵ et le *plugin MorphAL* ²⁶ ont été utilisé pour effectuer les calculs. Quelque soit la forme du bâti, le *SMBR* existe toujours. Dans certains cas, le *SMBR* est une approximation grossière du bâti existant. On souhaite que l'emprise au sol (surface) du bâti (polygone) ne soit pas trop faible par rapport à celle du *SMBR*, ce qui revient à fixer une marge d'erreur pour la distance surfacique entre le polygone et son *SMBR* et une marge d'erreur admissible pour la distance surfacique du polygone et de son enveloppe convexe ([52]).

On donne un exemple de carte pour une partie de la commune de Bron à la figure 6.3.10. L'ensemble des bâtis indifférencié est coloré. Les bâtis dont l'approximation par un rectangle est définie à 5% sont en rouge foncés, ceux entre 5 et 10% en rouge clair. Les bâtis de couleur verte ne sont pas retenus dans la suite, dans le cas illustré, ils représentent la part la plus importante du parc de bâtis disponibles.

L'orientation des bâtis, telle que définie sur la figure 6.3.9 est ensuite calculée en ne conservant que le sous-ensemble des bâtis dont le *SMBR* est défini à au moins 10%.

²⁴Valeur *ajustée* de façon à ce que les effectifs des intervalles considérés dans chaque base soit équivalents

²⁵<http://www.openjump.org/>

²⁶<http://alpage.tge-adonis.fr/documents/ressources/MorphAL-0.1.zip>

Tableau 6.7 Paramètres géométriques issus de l'exploitation de la BDTOPPO

Paramètre	Référence de calcul
Hauteur	issue de la base
Périmètre	forme polygonale
Emprise au sol	forme polygonale
Rectangle minimal <i>SMBR</i>	forme polygonale
Largeur <i>SMBR</i>	
Longueur <i>SMBR</i>	
Élongation	<i>SMBR</i>
Orientation	<i>SMBR</i>
Coordonnées	
Latitude	barycentre <i>SMBR</i>
Longitude	barycentre <i>SMBR</i>

Les bâtis que nous modélisons ont forcément une emprise au sol rectangulaire. On conserve donc pour la suite la base de données issue de l'approximation des polygones par leur *SMBR* à 10% et, afin de simplifier les calculs, les bâtis sont maintenant représentés par leur *SMBR*. Cette forme approximée permet de calculer l'élongation du bâti. L'erreur commise par cette approximation est négligeable au vu des hypothèses simplificatrices des modèles.

Synthèse des données issues de la BDTOPPO La base topographique a été exploitée en deux temps: tout d'abord, une première sélection des bâtis disponibles a permis d'identifier les formes réalistes par rapport aux bâtis que l'on souhaite modéliser. Dans un second temps, en approximant l'ensemble des bâtis par leur rectangle minimal (*SMBR*), on construit un ensemble de formes géométriques réalistes pour le parc. On rappelle l'ensemble des paramètres ainsi reconstruits dans le tableau 6.7, en précisant la référence utilisée pour le calcul.

Exploitation des études sur le parc de logements Afin de paramétrer totalement la forme des bâtis dans le modèle, il reste à se donner des valeurs pour les paramètres reproduits dans le tableau 6.8. Nous avons exploité pour cela les données des études présentées dans la section 6.2.2.3.

Pour les logements collectifs, l'exploitation de l'ENL a permis de poursuivre la caractérisation des bâtis en se donnant des distributions pour les paramètres répertoriés dans le tableau 6.9. Ces paramètres ont été calculés uniquement en opérant une distinction entre les bâtis

Tableau 6.8 Paramètres géométriques issus de l'exploitation des études de caractérisation du parc de logement

Paramètre	Source
Hauteur sous plafond	
Taux de vitrage	
Étages	
Combles aménagés	
Surface au sol	

Tableau 6.9 Données sur le bâti et son environnement issues de l'ENL 2006 utilisée pour la reconstruction du parc de logements collectifs

paramètre	Attribut de l'enquête	Nombre de niveaux
Hauteur sous plafond	HAUT	$< 2.2 \text{ m}, [2.2, 3], > 3 \text{ m}$
Surface habitable détaillée	HSH2 ²⁷	$[[9\text{m}^2, 270\text{m}^2]]$
Étage où se trouve le logement	IEL	$[1, 32]$
Nombre d'étages de l'immeuble	INE	$[1, 34]$
Nombre de logement de l'immeuble	INL	$[2, 300]$
Exposition	KOR	8 (S-SO-SE-O-E-NO-NE-N)
Distance du vis-à-vis	KVD	$< 10\text{m}, [10, 20], [20, 50], > 50\text{m}$
Type de vis-à-vis	KVV	7

suivant la période constructive, car nous n'avons pas observé de différence significative des distributions de ces paramètres selon la surface et le type de logement collectif (*petit/grand collectif*).

Remarque 6.3.1. *Il existe des incohérences entre les différents modèles pour ce qui est de la surface, notamment parce que celle-ci n'est pas définie tout à fait de la même manière dans les différents sous-modèles. En outre, la réconciliation entre la notion d'emprise au sol au sens de la BDTOPO et la notion de surface au sens des variables définies dans les enquêtes INSEE n'est pas satisfaisante. Pour les maisons individuelles, la reconstruction proposée conduit à des incohérences entre la surface au sens de la BDTOPO et la surface habitable du logement. La hauteur du bâti modélisé, qui ne correspond pas à la hauteur du bâti issu de la BDTOPO associée, est prise comme référence dans la suite. Le parc construit peut donc être cartographié et on pourra envisager ultérieurement de poursuivre dans cette voie afin d'améliorer la prise en compte des apports solaires, ce qui permettrait*

d'intégrer de nouvelles fonctionnalités à la plateforme. Pour les logements collectifs, le travail d'association reste à poursuivre. Dans la plateforme actuelle, les logements sont attribués aléatoirement à l'un des bâtis disponibles dans la BDTOPO, ce qui n'est pas satisfaisant.

6.3.4 Synthèse du paramétrage du modèle de parc de bâti

Compte tenu de l'ensemble des hypothèses, les étapes de reconstruction des bâtis du parc sont résumées par les équations:

$$\begin{aligned} \text{Bati} &= f(\text{PC}, \text{SURF}, \text{LC/MI}, \text{MIT}, \text{PE/GE}) \\ \text{SOURCES} &= ([\text{INSEE2008}], [\text{INSEE2006}]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Descriptif Parois opaques} &= f(\text{PC LC/MI}, \text{MIT}, \text{PE/GE}) \\ \text{SOURCES} &= (6.2.2, \text{RT}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Descriptif Parois Vitrees} &= f(\text{PC LC/MI}, \text{MIT}, \text{PE/GE}) \\ \text{SOURCES} &= (6.2.2, [\text{INSEE2006}], \text{RT}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Geometrie TOPO} &= f(\text{SURF LC/MI}, \text{MIT}, \text{PE/GE}) \\ \text{SOURCES} &= (\text{BDTOPO}, [\text{INSEE2006}]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Geometrie Forme} &= f(\text{PC}, \text{SURF}, \text{LC/MI}, \text{MIT}, \text{PE/GE}) \\ \text{SOURCES} &= (6.2.2) \end{aligned}$$

Avec:

PC : Période Constructive

SURF : Surface habitable

LC/MI : Logement Collectif ou Maison Individuelle

MIT : Mitoyenneté (binaire)

PE/GE : Petit ou Grand Collectif

6.3.5 Remarques sur le modèle de bâtis pour le parc

Compte tenu de la méthode de reconstruction des caractéristiques thermiques du parc de bâtis, dont notamment celles des parois, la distribution des coefficients de déperditions suivant les périodes constructives est nécessairement représentative du parc.

A partir des coefficients de déperditions et des autres paramètres des bâtis, il est possible de calculer la distribution des *DPE* dans le parc. Compte tenu des sources de données utilisées, des hypothèses de reconstruction des variables et des intervalles relativement larges des classes de *DPE*, le parc de bâti reconstruit est cohérent avec, par exemple, le parc représenté dans [11].

La méthode de construction des paramètres liés à la géométrie du bâti à partir de la *BDTOPO* ne permet pas de représenter les dynamiques de quartier. En effet, le critère de sélection des formes selon l'approximation par le *SMBR* ne permet pas de représenter de manière satisfaisante des dynamiques à l'échelle de quartiers.

Une piste d'amélioration serait d'ajouter de la flexibilité dans le modèle de bâti en représentant des formes polygonales au lieu des simple rectangles, ce qui revient à étoffer la bibliothèque de formes de bâtis disponible dans le parc. Cette approche permettrait d'associer plus justement un bâti de la *BDTOPO* aux bâtis à modéliser. On pourrait de plus intégrer un modèle pour les sollicitations externes en utilisant l'outil d'évaluation des échanges radiatifs en milieu urbain élaboré dans [73]. Toutefois, nous n'avons pas trouvé de règle d'association satisfaisante entre les différentes surfaces au sol pouvant être estimées, ce qui limite l'intérêt d'un raffinement de la méthode d'exploitation de la *BDTOPO*.

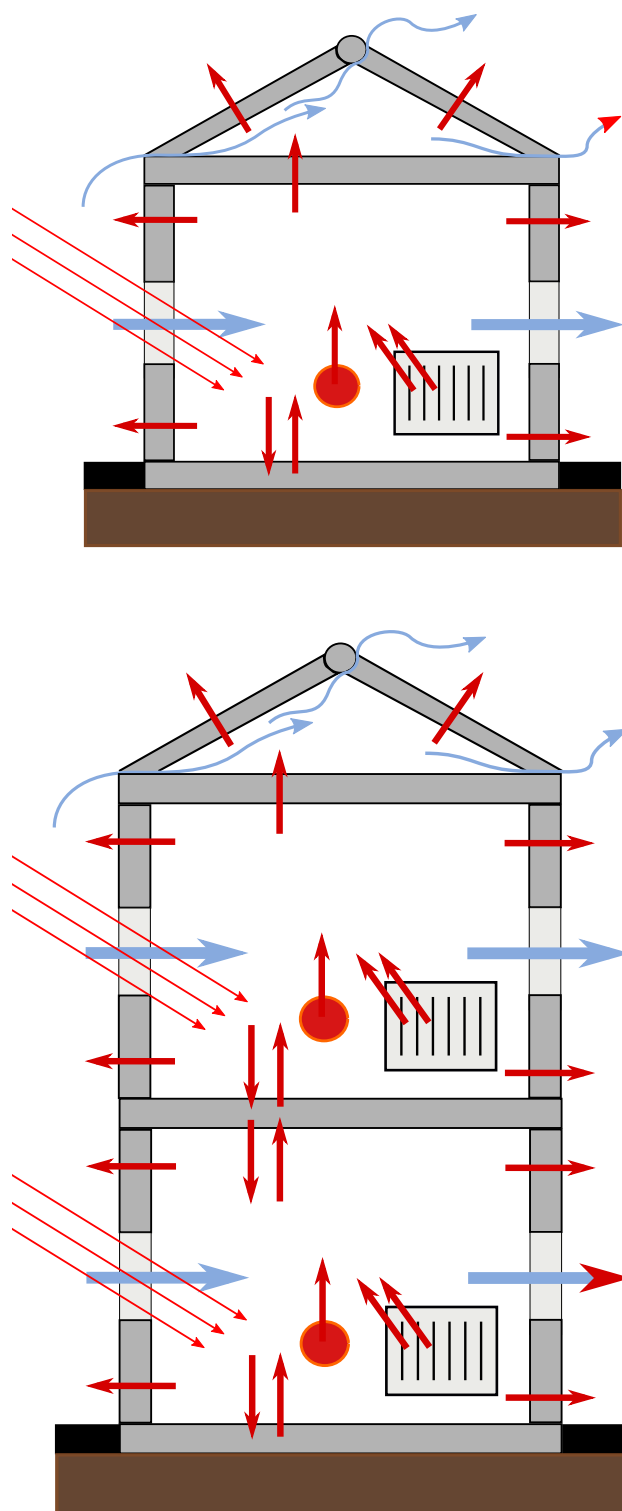


Figure 6.3.1 Représentation schématique des *MI* modélisées (adapté de [181])

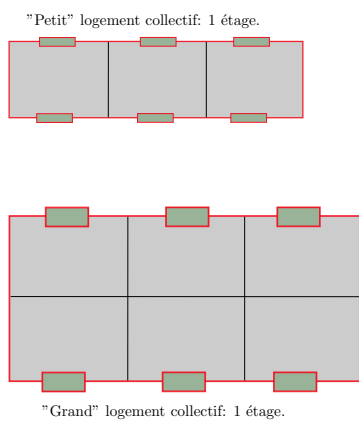


Figure 6.3.2 Découpages possibles des logements collectifs en bâtis unitaires

Nombre de variantes	Période constructive							
	< 1915	[1915-1948]	[1949 - 1967]	[1968 - 1974]	[1975 - 1981]	[1982 - 1988]	[1990 - 2000]	[2000-2005]
	3	3	3	3	2	2	2	1
Source des données								
Parois opaques	Promenlab Bati en lyonnais	Promenlab Bati en lyonnais	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Rage RT	Rage RT	Rage RT
Parois vitrées	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	RT Tabula	RT Tabula	RT Tabula	RT Tabula
	ENL Promenlab	ENL Promenlab	ENL Promenlab	ENL Promenlab	Rage ENL Promenlab	Rage ENL	Rage ENL	
Volume air	Methode 3CL ENL	Methode 3CL ENL	Methode 3CL ENL	Methode 3CL ENL	Methode 3CL ENL	Methode 3CL ENL	Methode 3CL ENL	Methode 3CL

Figure 6.3.3 Typologies de bâtis de maisons individuelles dans le parc

Période constructive								
<i>petit collectif</i>	< 1915	[1915-1948]	[1949 - 1967]	[1968 - 1974]	[1975 - 1981]	[1982 - 1988]	[1990 - 2000]	[2000-2005]
Nombre de variantes	1	1	1	1	1	1	1	1
Source des données								
Parois opaques	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Promenlab			
	Bati en lyonnais	Bati en lyonnais						
	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	
	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati		
Parois vitrées	Collectif	Collectif	Collectif	Collectif	Collectif	Collectif	RT	RT
					RT	RT	RT	RT
	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula
	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	
Volume air	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	
	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Promenlab			
	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL
	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	

Période constructive								
<i>Grand Collectif</i>	< 1915	[1915-1948]	[1949 - 1967]	[1968 - 1974]	[1975 - 1981]	[1982 - 1988]	[1990 - 2000]	[2000-2005]
Nombre de variantes	1	1	1	1	1	1	1	1
Source des données								
Parois opaques	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	
	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati	Guide Bati		
	Collectif	Collectif	Collectif	Collectif	Collectif	Collectif		
					RT	RT	RT	RT
Parois vitrées	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula	Tabula
	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	Rage	
	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	
	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Promenlab	Promenlab			
Volume air	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL	Methode 3CL
	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	ENL	

Figure 6.3.4 Typologies de bâtis de logements collectifs dans le parc

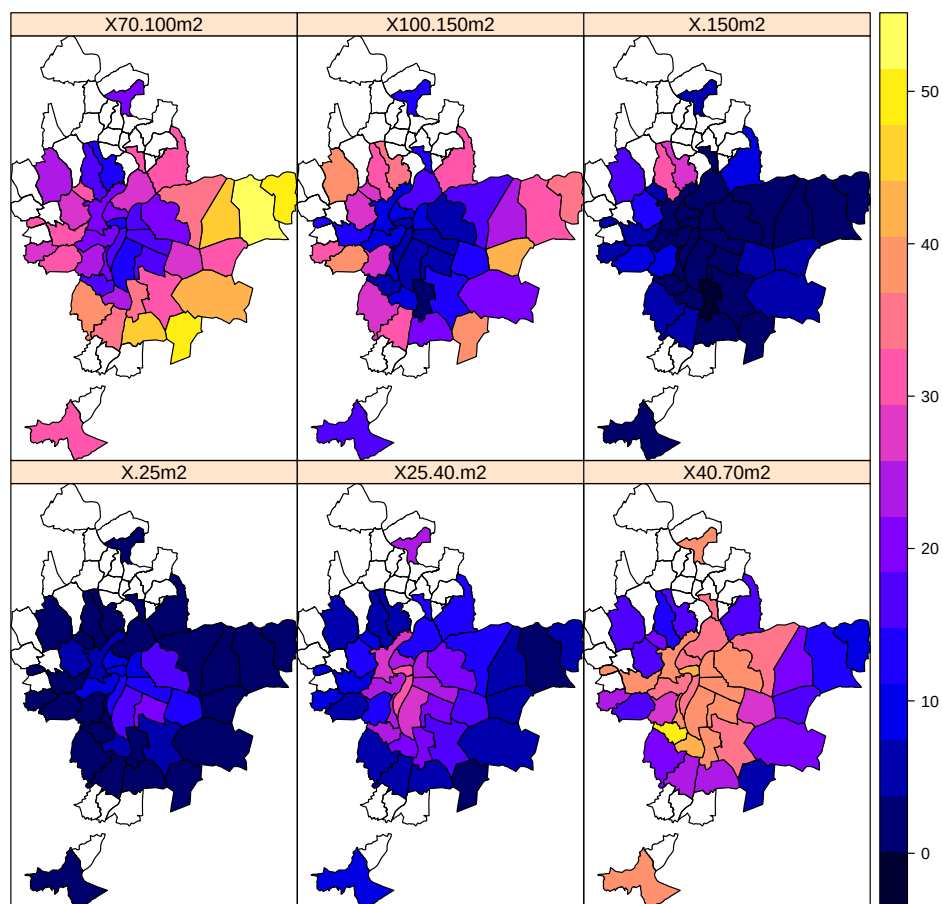


Figure 6.3.5 Répartition des surfaces habitables pour les logements principaux avec système de chauffage électrique. Source des données: [INSEE2008]

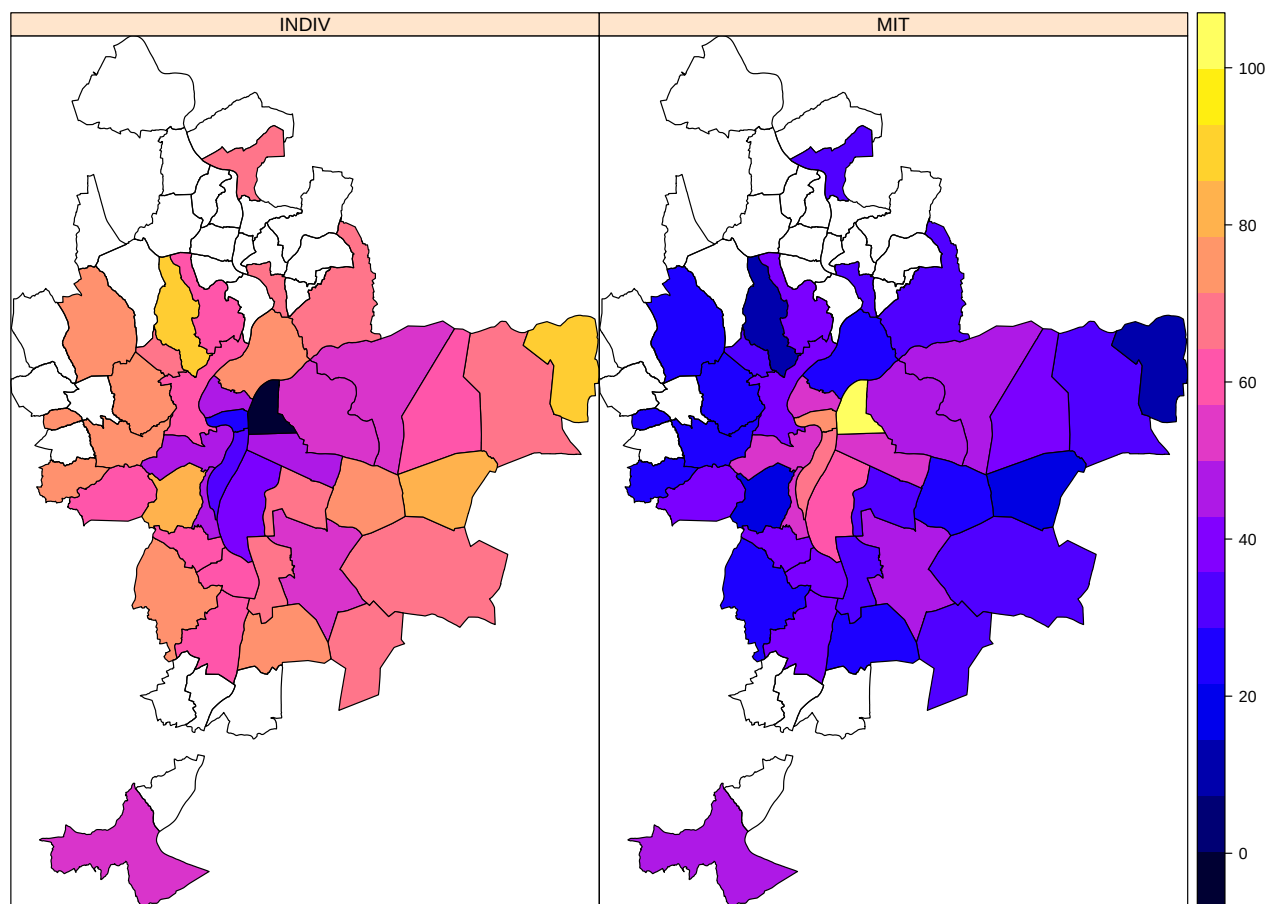


Figure 6.3.6 Répartition entre bâtis isolés et bâtis mitoyens pour les logements principaux type "maison, chauffage électrique". Source des données: [INSEE2008]

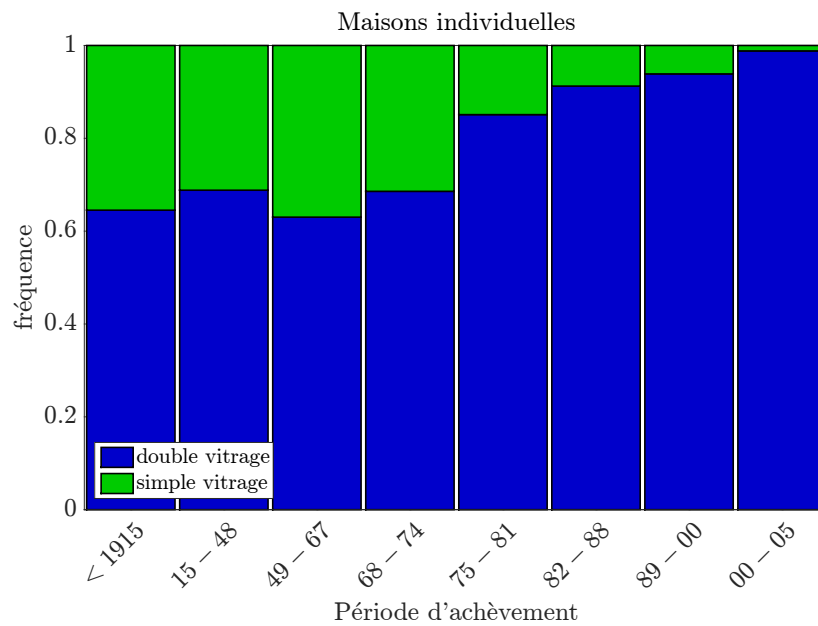


Figure 6.3.7 Répartition entre simple et double vitrage pour les maisons individuelles en fonction de la période constructive. Source des données: [INSEE2006]

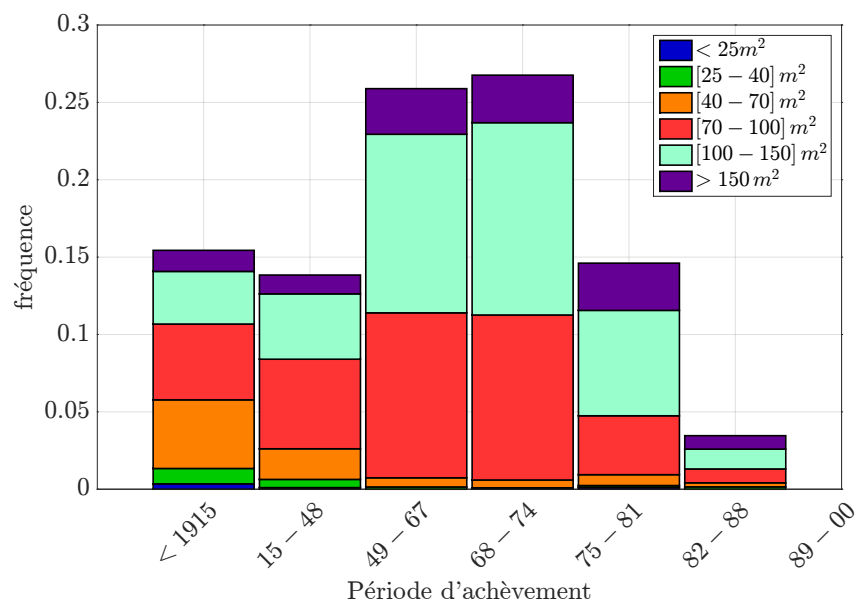


Figure 6.3.8 Parc de maisons individuelles suivant la période d'achèvement et la surface. Source des données : INSEE



Figure 6.3.9 Principe de la méthode de calcul du rectangle minimal (*SMBR*). Source : [52]



Figure 6.3.10 Exemple de retraitement des données de la BDTOPO pour la construction du parc des maisons individuelles

6.4 Modèle pour les systèmes

Le modèle simplifié pour les systèmes de chauffage a été présenté dans la partie 2.3. Nous n'avons pas eu accès à des informations précises sur les équipements installés et leur dimensionnement dans les logements suivant la période de construction ou éventuellement le nombre de personnes occupant le logement.

6.4.1 Systèmes de chauffage

Dimensionnement des systèmes Nous avons montré dans le chapitre 4 que les paramètres liés aux systèmes de chauffage tels que modélisés dans le chapitre 2 sont des variables déterminantes sur la forme des effacements réalisés.

La méthode de dimensionnement des émetteurs est inchangée par rapport au chapitre 2. Elle est appliquée à chaque *zone thermique du bâti*. Les parois internes sont supposées adiabatiques, de même que pour les parois externes si celles-ci sont communes à deux bâtis (parois mitoyenne dans le cas de bâti de type *maison*, parois lourdes dans les logements collectifs). Nous savons que les systèmes installés dans les logements ont des puissances nominales échelonnées, typiquement à $\alpha_{\text{dim}} = 500W$. La puissance installée effective dans les bâtiments est donc donnée en tenant compte de cet effet de sur-dimensionnement (on suppose que les puissances installées sont systématiquement surdimensionnées par rapport aux besoins calculés). Étant donné que le modèle de bâtiment utilisé dans le cadre de ce travail ne permet pas de modéliser les logements pièce par pièce, chaque zone est chauffée par un *méta-convecteur* fictif, ce qui implique que la puissance installée dans les logements est sous-estimée par rapport au cas *réel*.

Nous avons vu dans le chapitre 1 que les ménages disposant d'un chauffage de type électrique pratiquent la méthode du *zonage* (gestion de la consigne par zone, selon l'usage de la pièce), ce qui n'est pas pris en compte dans nos modèles où on suppose que l'ensemble du logement est chauffé. Cette erreur a un effet compensatoire par rapport à la première, mais nous ne savons pas si les appels de charge modélisés sont correctement ajustés, sur ou sous estimés. Nous n'avons pas en effet pas trouvé de données quantitatives qui nous permettent de discuter de ces hypothèses.

Pour chaque bâti, pour chaque zone thermique si le logement est décrit par deux zones, on a donc:

$$P_i = (U_f S_f + U_p S_p + \dot{m} C_{\text{air}})(T_{\text{conf}} - T_{\text{base}}) + U_{\text{pl}} S_{\text{pl}}(T_{\text{conf}} - T_{\text{sol}}) + \Phi_{\text{rel}}$$

$$P_{\text{installée}} = \left\lfloor \frac{P_i}{\alpha_{\text{dim}}} \right\rfloor \alpha_{\text{dim}}$$

Cette approche est justifiée pour les bâtis construits après la première réglementation thermique, en revanche, pour les bâtis plus anciens, nous n'avons pas d'éléments permettant de valider ce choix de modélisation.

On notera qu'avec cette approche, les puissances installées dans le parc sont cohérentes avec les *valeurs à dire d'experts connues*, notamment en ce qui concerne la puissance moyenne installée unitaire (par surface habitable): on retrouve bien une valeur de l'ordre de $100\text{W}/\text{m}^2$.

Remarque 6.4.1. *L'ensemble de la démarche proposée dans ce travail ne permet pas de prendre en compte la pratique du cloisonnement ou zonage, identifiée comme l'un des avantages des systèmes de chauffage électrique par rapport à d'autres modes de chauffage par les ménages dès les années 80 [54]. Cette pratique existe manifestement toujours selon certaines études sociologiques récentes [25]. Par conséquent, pour les logements les plus anciens, la demande pour l'usage chauffage est sans doute sur-estimée dans le modèle, avec une consigne uniforme dans le logement et un metaconvecteur dans l'unique zone thermique. Une méthode envisageable pour corriger cet effet serait de considérer que seule une fraction du logement est chauffée, voir par exemple [177], et d'adapter en conséquence les conditions aux limites des parois déperditives. Nous manquons toutefois de données sur ce coefficient pour poursuivre dans cette voie.*

Hypothèses pour la génération du parc de systèmes On suppose que les caractéristiques fonctionnelles des systèmes ne dépendent pas du ménage résidant dans le logement. On ne prend donc en compte que les éventuelles corrélations entre les types de bâtis et les systèmes installés.

Afin de définir complètement les systèmes de chauffage installés dans les logements, il reste à préciser le type de système (dans le cadre de ce travail, seuls les radiateurs et convecteurs sont modélisés) et le type de régulation associé à chaque système.

A titre illustratif, nous avons tracé la répartition des différents systèmes de chauffage électrique dans le parc français issue de l'*ENL 2006* suivant le type de logement (distinction entre *maisons individuelles* et *logements collectifs*) et la période constructive sur la figure 6.4.1. On constate que les systèmes convecteurs/radiateurs sont prépondérants dans le parc, si on s'affranchit de la distinction entre systèmes fixes et mobiles, ce type de système représente plus de 94% des systèmes installés, quelque soit la période constructive pour les maisons individuelles et plus de 96% pour les logements collectifs.

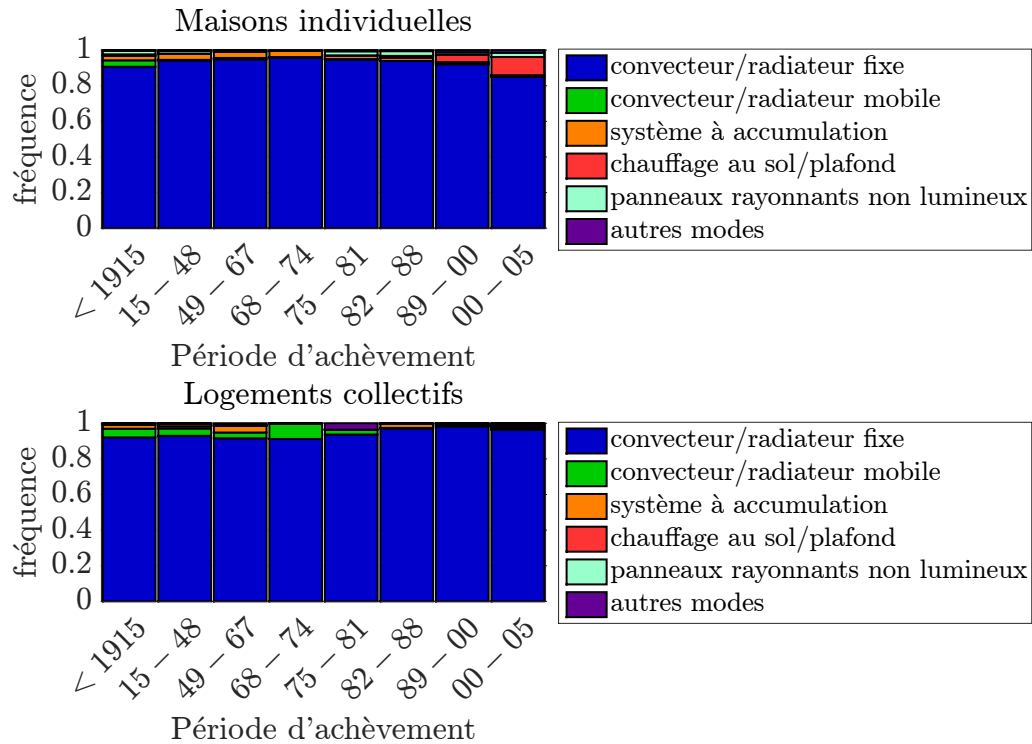


Figure 6.4.1 Distribution des types de systèmes de chauffage électrique selon le type de bâti et la période constructive. Source des données : [?]]

L'ENL 2006 ne fournit pas d'indication permettant de paramétrer le nombre de systèmes de type convecteurs par rapport aux radiateurs dans le parc. Nous n'avons pas trouvé d'autre source qui permettrait de fixer une répartition entre l'un et l'autre de ces systèmes selon les typologies de bâtis, ou d'autres variables. Sauf mention contraire, nous avons supposé que cette distribution est uniforme dans le parc (elle ne dépend pas du type de logement), et on note $x_c = 0.7^{28}$ le taux de convecteurs dans le parc. Compte tenu de la sensibilité des résultats d'effacements à ce paramètre (voir chapitre 4), un axe de développement intéressant serait de mieux décrire le type de systèmes installés dans le parc.

Dans la première version du parc, les simulations ont été effectuées avec des régulateurs type TOR (bande morte fixée, $BM = 0.5K$), puis les appels de charge ont été moyennés sur 10 minutes pour l'interprétation des résultats (voir chapitre 2). C'est également l'hypothèse qui a été choisie dans [33, 130])

²⁸Aucun élément ne nous a permis de valider cette hypothèse

6.5 Modèle pour les ménages

Les éléments présentés dans le chapitre 4 ont permis de mettre en avant l'influence des modes de gestion du chauffage sur la forme des courbes de charge obtenues puis sur les effacements réalisés. Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle simplifié de gestion de la consigne. Dans cette approche initiale, nous avons fait l'hypothèse que la présence des occupants dans les logements était déterminée par 3 variables: le type d'emploi, l'âge de l'individu et le jour considéré. Ces variables ont été choisies conformément aux variables déterminantes des profils de présence identifiés dans [6]. L'exploitation de l'enquête emploi du temps 2010 [INSEE2010] nous a ensuite permis de construire un modèle de présence par chaîne de *Markov* pour les 13 types d'individus et 2 types de jours choisis. Les profils de présence des ménages ont ensuite été construits par l'agrégation des profils individuels, avec une règle heuristique pour les individus identifiés comme *enfants*. Deux limites essentielles ont été identifiées dans cette approche: d'une part le choix *a priori* des variables explicatives ne garantit pas que les profils construits sont représentatifs de *mode de vie* spécifiques et d'autre part l'absence d'interaction entre les individus produit un effet lissant sur les profils de présence moyens.

Pour la modélisation à l'échelle d'un parc, il est nécessaire de représenter la diversité des comportements des ménages composant le parc. La dénomination *comportements* dans ce chapitre désigne l'action des individus d'un ménage sur les équipements domestiques (voir [31]), et en particulier sur ceux pilotés par l'opérateur d'effacement.

La distinction des modes de gestions selon les individus regroupe plusieurs questions dont certaines ont déjà fait l'objet de développement dans ce travail. Dans le chapitre 1, nous avons détaillé les enjeux liés aux scénarios de gestion de(s) consigne(s) des équipements de chauffage, et nous avons donné des premiers éléments de réponse sur l'influence des modes de gestions dans le chapitre 4.

Les données exploitées dans le chapitre 5 sur l'usage chauffage de quelques logements ont souligné l'hétérogénéité de la demande liée à cet usage parmi les ménages, ce qui va dans le sens des travaux [40, 78].

Dans l'approche parc développée dans ce chapitre, nous supposons toujours que les modes de gestions de consignes et/ou coupures des systèmes de chauffage sont déterminés par l'activité des occupants dans le logement et nous supposons que le niveau de consigne demandé est essentiellement déterminé par 3 états des individus (voir chapitre 1): l'état

présent et actif, l'état *présent*, *au repos* et l'état *absent du logement*. Pour chacun de ces états, on associe un niveau de consigne (*réduit* ou *confort*) et un état de la commande (*extinction* ou *allumage* des systèmes) selon les mêmes hypothèses que dans le chapitre 4.

6.5.1 Modèle de présence individuel

L'objectif de cette partie est d'identifier des typologies de présence des individus dans les logements à partir de l'exploitation de l'enquête *emploi du temps 2010* selon une approche *bottom-up*. Ce type d'approche a déjà fait l'objet de travaux dans le cadre de la modélisation des usages du secteur résidentiel, dont quelques uns ont été brièvement introduits dans le chapitre 4. Ces travaux répondent à deux objectifs distincts: la modélisation des usages du secteur résidentiel par une approche *bottom-up* et la simulation thermique dynamique (usage chauffage ou climatisation).

Pour le premier objectif on cherchera à modéliser les activités des occupants qu'il est possible d'associer à des équipements domestiques, puis la courbe de charge de chaque équipement est simulée afin de restituer la courbe de charge de l'ensemble des usages pour un logement donné (la caractérisation des équipements proposée dans [69] pourra alors être utile pour la description des cycles de puissance des équipements).

Dans le second cas, une méthode s'inspirant de celle développée dans [183] peut être intéressante: elle consiste à procéder en deux étapes en créant d'abord un modèle de présence dont la sortie alimente un modèle d'activité (et on se ramène alors au cas précédent si on souhaite restituer les appels de charge des équipements domestiques). C'est la solution que nous avons choisie dans le cadre de ce travail afin de construire des profils de présence réalistes pour modéliser la diversité liée à l'usage chauffage dans le parc et de s'assurer de la possibilité d'extension de notre approche par la suite (extension de la modélisation à d'autres usages de l'électricité notamment).

Le modèle de présence développée dans [183] repose sur la recherche par pas horaire des déterminants individuels expliquant les états de présence. Par conséquent, cette approche permet de représenter la diversité du parc d'un point de vue temporel.

La méthode d'identification de typologies de présence proposée dans [6] par une classification ascendante hiérarchique a été reprise dans ce travail. Cette approche s'inscrit dans un contexte de caractérisation *spatio-temporelle* des profils de présence. Elle permet d'attribuer à chaque individu un profil de présence, qui est déterminé par la recherche des déterminants

ou variables explicatives parmi celles renseignées par les individus ayant rempli les carnets d'activités de l'enquête emploi du temps. Les principales étapes pour le modèle sont:

- Recherche de profils types individuels par classification ascendante hiérarchique (CAH dans la suite) des carnets décrivant les journées des individus. À l'issue de cette étape, le découpage de l'arbre de la CAH résulte en différents profils individuels
- Recherche des déterminants expliquant les profils identifiés lors de la première étape parmi les variables individuelles ou caractérisant le ménage d'appartenance. Un modèle multinomial permet de simuler la présence des individus dans les logements à partir de la connaissance des déterminants expliquant les profils de présence
- Restitution des ménages: les ménages sont décrits par l'agrégation d'individus dont les caractéristiques peuvent être communes ou non et chaque individu est simulé à partir du modèle construit dans les étapes précédentes

La sortie du modèle de présence (présent et actif ou non) est ensuite utilisée pour construire un modèle d'activité. Les activités modélisées dans les travaux antérieurs ([6, 122, 145, 167, 182, 183]) résultent de choix dépendant des données disponibles dans les enquêtes utilisées, de la complexité du modèle recherché et de l'objectif poursuivi (par exemple modélisation des apports internes dans les logements performants ou restitution *bottom-up* de courbes de charges au niveau logement). Cette extension du modèle de parc à d'autres usages électriques constitue un axe de développement à poursuivre.

La recherche du modèle de présence est détaillée dans l'annexe D à partir des données de l'enquête emploi du temps 2010 de l'INSEE [INSEE2010]. Nous avons identifié 12 profils de présence à partir des échantillons de données:

- $E_{a,ft}$: Individus *actifs ayant un emploi à temps plein*. 8 profils sont définis pour cet échantillon
- E_c : Individus n'ayant pas l'attribut *actifs avec un emploi à temps plein*: définition de 4 profils types

Les 12 profils sont représentés sur la figure 6.5.1, les profils de chaque groupe selon les 3 états sont représentés dans l'annexe D.3. Pour les individus n'ayant pas un emploi à temps plein, les profils se distinguent essentiellement par les périodes de présence et activité dans les logements. Dans le cas des individus ayant un emploi à temps plein, on constate dans les profils identifiés que certains modes de vie se démarquent, comme par exemple le profil des individus avec période de repos *décalée* par rapport à la tendance générale. De la même

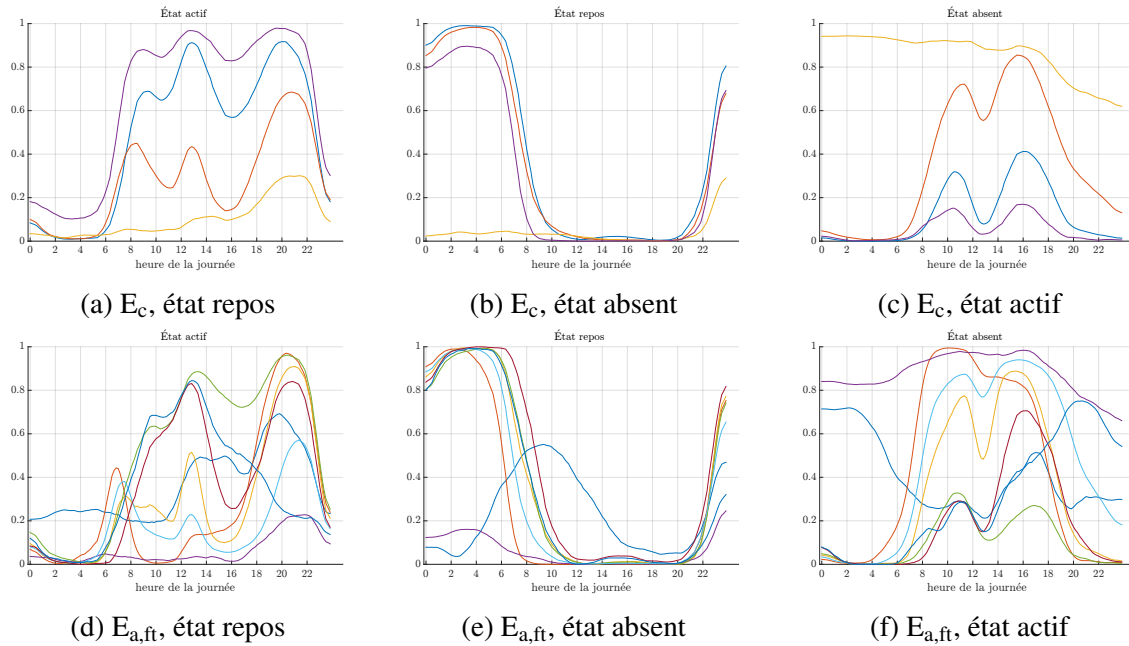


Figure 6.5.1 Profils de présence identifiés pour les échantillons E_c et $E_{a,ft}$

manière, on identifie certains modes de vie sur les profils pour l'état *présent et actif* qui sont en accord avec les typologies d'horaires de travail qui ont été décrites dans [103].

Dans un second temps, un modèle explicatif de ces profils de la forme multinomial en sélectionnant parmi les variables des individus ou des ménages 26 variables candidates, chacune comportant 2 à 15 modalités (détails dans l'annexe D). Des procédures de sélection des variables de type *backward* et *forward* ont été implémentées. Le critère retenu pour le choix des modèles repose sur l' AIC^{29} . Dans les deux cas, les modèles identifiés sont surdéterminés, ce qui ressort de l'analyse *a posteriori* des variables explicatives identifiées.

D'autre part, les variables d'entrée du modèle de logement (type de logement, période constructive, surface) sont indépendantes des variables caractérisant les profils issus des modèles explicatifs de présence (type d'activité de l'individu, âge, ...) dans la mesure où nous n'avons pas explicité de corrélation entre les types de logements et les ménages qui les occupent.

Pour chaque profil de présence, on détermine le modèle par chaîne de *Markov* d'ordre 1 selon la même méthode qu'au chapitre 4. On représente les profils simulés et issus de l'enquête pour l'un des groupes sur la figure 6.5.2.

²⁹ AIC : Akaike Information Criterion

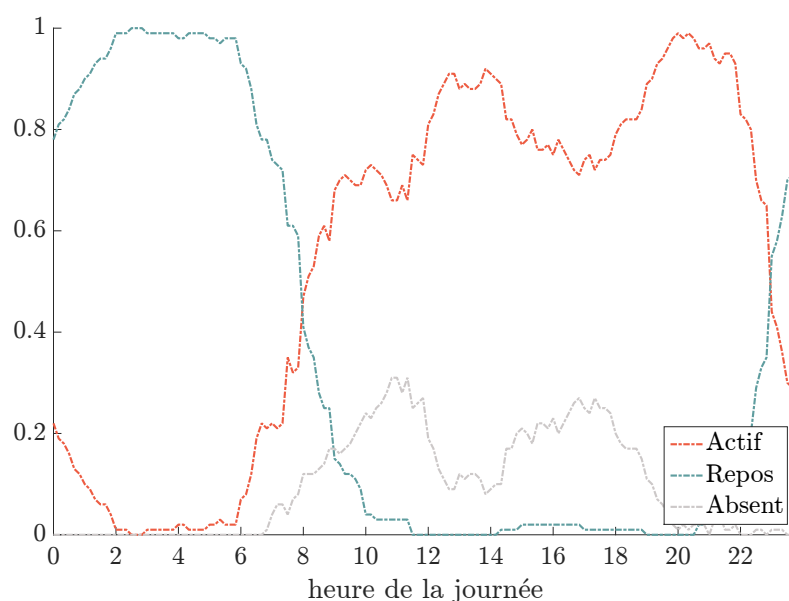


Figure 6.5.2 Exemple de profil simulé et issu des données de l'enquête emploi du temps pour l'un des groupe identifié

6.5.2 Construction de profils de ménages à partir des profils individuels

Les profils de présence individuels n'ont pas pu être caractérisés par des déterminants individuels. Par conséquent, il est nécessaire de fixer des règles d'association des individus dans le logement. On suppose que:

- Le nombre d'individus dans un logement (nombre de personne composant le ménage) dépend uniquement de la surface du logement. On distingue dans les individus les types *adulte* et *enfant*. Seul les premiers types sont modélisés grâce aux profils identifiés précédemment
- Les individus d'un même ménage sont issus du même groupe de profil. Cette hypothèse vise à limiter l'effet de foisonnement infra-logement dû à la variabilité des profils individuels (sans corrélation entre eux) et donc de proposer des profils de charge de l'usage chauffage différenciés (l'objectif n'est pas de représenter des activités réalistes mais des profils de charge dont la diversité est réaliste).

Chaque ménage est composé d'un ou deux individus auxquels on attribue l'un des 12 profils. Le modèle de présence par chaîne de *Markov* assure une forme de diversité parmi les individus d'un même logement. La présence des individus de type *enfant*

résulte de la duplication du profil de l'un des *adultes*, ce qui modifie donc uniquement les apports internes

- La distribution des individus ayant ou non un emploi à temps complet dans l'échantillon est issue des données du *recensement* 2008, puis pour chaque sous-échantillon, les distributions empiriques des groupes sont utilisées pour construire un ensemble de ménages statistiquement représentatif de celui issu de l'*EDT*³⁰

6.6 Apports méthodologiques du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'ensemble des hypothèses permettant de construire un parc réaliste de consommateurs pour l'usage chauffage selon une approche *bottom-up*.

Le parc de bâtiments est issu de l'exploitation de plusieurs sources de données dont certaines enquêtes de l'*INSEE* et des rapports sur la caractérisation des bâtiments. Les hypothèses permettant de réconcilier l'ensemble de ces données ont été détaillées dans la partie 6.3. L'outil de simulation du parc de bâtis a été calibré à partir du recensement de la population de 2008 de l'*INSEE* [*INSEE2008*]. Les distributions de certaines variables utiles pour la caractérisation du parc de bâtis et des systèmes sont issues de l'enquête *logement* de l'*INSEE* de 2006 [*INSEE2006*]. Dans ce cas, nous avons projeté les données nationales sur le parc, nous avons donc supposé que ce dernier est représentatif au niveau national par rapport aux choix des variables descriptives du parc. Une méthode originale de description géométrique des logements à partir des données topographiques a été développée.

La description des systèmes de chauffage dans le parc est limitée à ceux du type *convecteurs* ou *radiateurs*, dont le principe a été introduit dans le chapitre 2. Les données issues des enquêtes logement de l'*INSEE* n'ont pas permis de proposer une description plus fine de la distribution de ces systèmes dans le parc. L'exploitation de ces données a en revanche permis de s'assurer que ces systèmes sont prépondérants dans le parc des logements dont le mode de chauffage est électrique à la maille nationale, en particulier pour les logements antérieurs à 2005 dont le potentiel d'effacement est le plus intéressant.

Le dimensionnement des systèmes dans le parc reprend les hypothèses qui ont été détaillées dans le chapitre 2, les résultats donnés dans le chapitre 4 suggèrent qu'un ajustement du parc selon un paramètre de dimensionnement des systèmes le composant est une étape clef

³⁰Représentativité nationale et non au niveau de la métropole du *Grand Lyon*

dans la poursuite de ce travail.

L'exploitation de l'enquête *emploi du temps* nous a permis de proposer des profils de présence réalistes au niveau individuel. La restitution des profils au niveau des ménages reste cependant à poursuivre, notamment si nous souhaitons prendre en compte les corrélations entre les activités des différents membres du ménage. Dans l'*EDT* de 2010, les individus devaient indiquer les personnes présentes avec eux pour chaque activité décrite. Un axe de travail à poursuivre serait donc d'exploiter cette variable dans le but de décrire la présence dans le logement directement. Toutefois l'analyse des données de l'*EDT* selon cette variable indique que le remplissage de cette variable est trop sommaire pour pouvoir être exploité. La recherche de déterminants des profils de présence n'a pas donné de résultats convaincant. Nous pensons que cela peut s'expliquer d'une part du fait d'une sélection contrainte mais pas forcément appropriée des variables explicatives et d'autre part par le caractère aléatoire des comportements des sous-groupes déjà identifiés (selon la modalité *avoir ou non un emploi à temps complet*).

La reconstruction des ménages repose sur plusieurs hypothèses fondamentales. N'ayant pas pu caractériser les déterminants des profils obtenus, nous avons supposé que l'ensemble des individus d'un ménage appartient au même groupe profilé. Cette hypothèse permet de limiter l'effet *lissant* du à l'absence de corrélation entre les individus d'un même ménage mais conduit potentiellement à une surestimation de la diversité dans le parc.

Dans le chapitre 7, on propose d'illustrer sur notre parc plusieurs cas d'effacement de l'usage *chauffage* (cas du chauffage électrique).

Chapitre 7

Études d’effacements sur un ensemble de consommateurs d’électricité pour l’usage chauffage

Sommaire du chapitre

7.1	Parc de référence modélisé	248
7.2	Étude de l’influence de la durée de contrôle sur les indicateurs d’effacements pour un parc hétérogène de consommateurs (usage chauffage)	251
7.2.1	Protocole de simulation	251
7.2.2	Résultats sur la courbe de charge agrégée des consommateurs . .	252
7.3	Influence des modes de gestion sur la dynamique du parc	255
7.3.1	Scénarios étudiés	256
7.3.2	Évaluation des effacements réalisés sur le parc	258
7.4	Forme des effacements selon les profils de présence identifiés sur l’EDT	260
7.5	Bilan	261

Résumé

On présente dans ce chapitre quelques études de cas d’effacement sur le parc modélisé selon l’approche *bottom-up* définie dans le chapitre précédent.

Nous avons montré dans le chapitre 4 que les paramètres du bâti déterminent en grande partie la forme de la courbe de charge effacée par rapport à la courbe de référence. D'autre part, les modes de gestion des ménages sont également des paramètres d'influence sur les effacements. Dans le cas de logements relativement récents, la durée de la phase de recouvrement est essentiellement influencée par l'existence ou non d'un changement de consigne (réduit ou coupure) tandis que pour des bâtis plus anciens, on peut s'attendre à ce que le *type de gestion* (réduit ou coupure) ait une influence sur le report (effet de relance et durée du recouvrement). Dans cette partie, on cherche à caractériser des produits d'effacements réalisés sur un parc dont les caractéristiques physiques des bâtis sont représentatives du parc de logement du *Grand Lyon*.

Dans la section 7.1 on rappelle les caractéristiques du parc étudié, issu du chapitre 6. On donne des éléments d'analyse de l'influence de certains paramètres dans les sections suivantes: influence de la durée de l'effacement dans la partie 7.2, influence du type de gestion dans la section 7.3.

7.1 Parc de référence modélisé

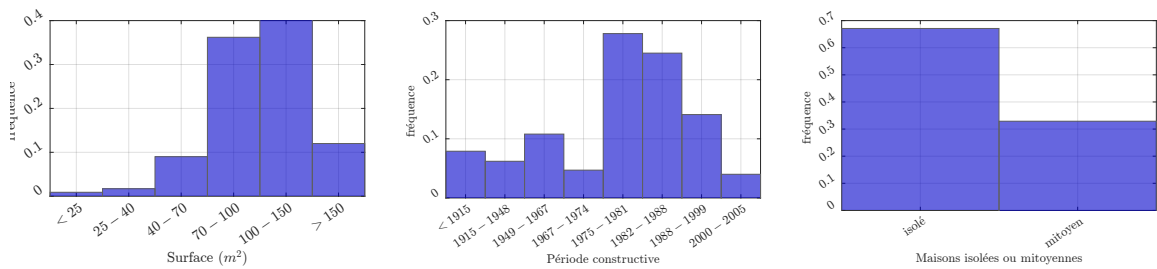
En exploitant le fichier *Logement* du *Recensement 2008*, on reconstruit une image du parc du *Grand Lyon*. On rappelle que les variables d'entrée, servant à ajuster le parc sur celui de la zone du *Grand Lyon* telle qu'elle a été décrite dans le chapitre 6, pour les 3 sous-modèles permettant de simuler le parc sont:

1. Bâtis

- le type de logement
- la surface (classe)
- la période constructive

2. Ménages

- le type de ménage
- le nombre d'occupants
- le nombre d'enfants (critère: $age < 18 ans$)
- le type d'emploi des individus de type adulte (variable binaire: actifs ayant un emploi à temps complet ou non)



(a) Distribution des surfaces dans le parc (b) Distribution des périodes constructives dans le parc (c) Distribution des typologies de maisons du parc (mitoyen/isolé)

Figure 7.1.1 Distribution des attributs de construction des bâtis de type *maisons individuelles* du parc

3. Systèmes: la distribution des différents types de systèmes dans le parc est déterminée à partir des hypothèses de la section 6.4

Dans la suite, on présente le cas d'un parc uniquement composé de *maisons individuelles*, ce qui simplifie le paramétrage. On considère 1000 logements pour chaque simulation, ce qui est suffisant pour s'assurer d'un niveau d'agrégation réaliste.

Les caractéristiques constructives des bâtis sont représentatives de la zone du *Grand Lyon*, qui a été décrite dans le chapitre 6. On donne sur la figure 7.1.1 les distributions des paramètres définissant les typologies de *maisons individuelles*: taux de maisons isolées ou mitoyenne (figure 7.1.1c), répartition des périodes constructives (figure 7.1.1b) et des surfaces (figure 7.1.1a). Les découpages en classes de la figure 7.1.1 correspondent à ceux des enquêtes *INSEE* utilisées.

Le taux de *convecteurs* dans le parc par rapport aux systèmes de type *radiateur* a été fixé à 0.7 (voir section 6.4.1).

Les logements sont peuplés conformément aux hypothèses de la partie 6.5, et on suppose que la gestion des systèmes par les occupants est de type dynamique, avec réduit durant les périodes d'absence (tous les occupants doivent quitter le logement pendant au moins deux heures pour que la consigne soit passée en mode *eco*) et durant les périodes d'inactivité de l'ensemble des membres (en prenant pour références le dernier individu effectuant la transition $PA \rightarrow PR$ et le premier effectuant la transition inverse $PR \rightarrow PA$). Ces hypothèses ont été discutées dans la section 4.3.2.

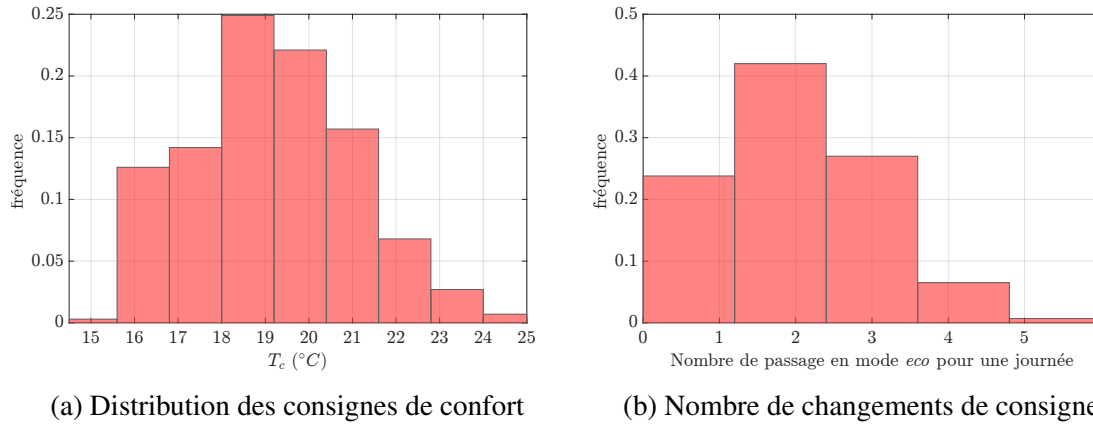


Figure 7.1.2 Distribution des paramètres de gestion de la consigne dans le parc de référence

Dans le cas général, la distribution du niveau de consigne *confort*, T_{confort} dans le parc suit une loi normale tronquée ($\text{Min } T_{\text{confort}} = 17^\circ\text{C}$, $\text{Max } T_{\text{confort}} = 24^\circ\text{C}$):

$$T_{\text{confort}} \sim \mathcal{N}(21, 2) (^\circ\text{C})$$

La figure 7.1.2 donne une vision synthétique des distributions des paramètres liés à la gestion des systèmes dans le parc de référence.

On fixe la durée de simulation à deux semaines, dont les conditions climatiques ont été définies dans le chapitre 4, la première est considérée comme une *semaine d'initialisation* du processus, et la seconde semaine, durant laquelle l'ordre d'effacement est envoyé, correspond au cas *climat froid* de la figure 4.2.1. La température extérieure moyenne durant la semaine avec ordre d'effacement est de 1.1°C , la température moyenne sur les 9 h autour de l'effacement (intervalle 15h - 24h) est de -1.5°C . L'ordre d'effacement, qui est un signal u_{cc} , c'est-à-dire un pilotage direct ON/OFF, est envoyé le second jour de la seconde semaine.

Remarque 7.1.1 (Influence des conditions climatiques). Nous avons montré dans la partie 4.2.5 que les effacements sont sensibles aux conditions climatiques. Dans cette partie, on se place du point de vue d'un opérateur d'effacement qui cherche à activer le potentiel de son parc aux moments de pointe réseau. Par conséquent, on suppose que les sollicitations extérieures (et en premier lieu la température extérieure) sont fixées pour les jours avec ordre d'effacement sans rechercher les déterminants de ces jours.

L'effet de la température extérieure sur les indicateurs en énergie (recouvrement) est similaire (forme de la déformation en fonction du paramètre) à celui de la durée de l'effacement.

En augmentant la durée du contrôle, on augmente en effet l'écart de température intérieur/extérieur.

7.2 Étude de l'influence de la durée de contrôle sur les indicateurs d'effacements pour un parc hétérogène de consommateurs (usage chauffage)

7.2.1 Protocole de simulation

Dans cette section, on cherche à évaluer l'effet du pilotage selon sa durée, en prenant pour instant de début de contrôle le début de la période de pointe du soir.

La durée de l'effacement est exprimée en minutes dans cette partie.

Les simulations sont réalisées en choisissant des effacements commençant à 18 h, pour d_{eff} allant de 10 à 120 minutes, par pas de 10 min, soit 12 cas. Le choix de l'horaire de début d'effacement a été défini de façon à correspondre à l'heure de début de pointe. La pointe journalière à 95% est déterminée en recherchant la plage horaire pendant laquelle la demande est au moins égale à 95% de la pointe journalière à 10 minutes.

On représente sur la figure 7.2.1 la pointe du soir compte tenu des hypothèses et de la définition choisie. La forme de la demande de l'usage en l'absence d'effacement dépend du parc construit (répartition des caractéristiques des bâtis et des systèmes) et des hypothèses sur les modes de gestion des systèmes. La durée pendant laquelle on cherche à moduler la charge est théoriquement de 3h, délimitée par les lignes bleues. La charge à moduler durant les heures de congestion est quant à elle délimitée par les zone grisée.

Chaque cas est simulé avec le même parc de logement et le même profil d'occupants dans les logements.

On caractérise l'effet de déformation sur la courbe de charge selon les indicateurs définis dans le chapitre 3. Cette première analyse permet de caractériser localement l'effet de déformation introduit par le contrôle sur le parc afin de proposer dans la suite des stratégies de pilotage simple au niveau du parc agrégé. L'intérêt de cette approche est donc d'identifier la dynamique du parc afin de proposer des solutions de pilotage direct sur l'ensemble des consommateurs disponibles sans nécessiter une connaissance fine des caractéristiques de chaque système du parc (triplet *ménage-logement-équipements*).

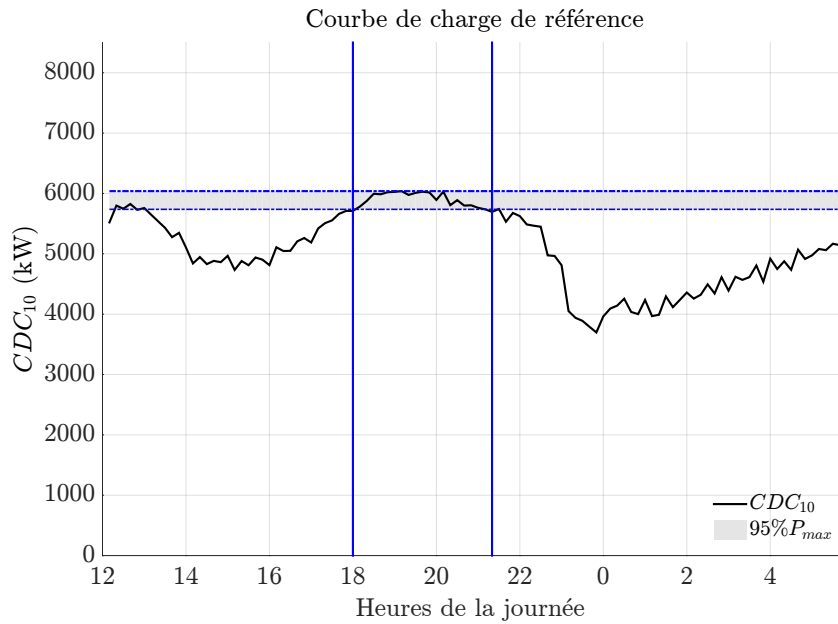


Figure 7.2.1 Pointe agrégée à moduler

7.2.2 Résultats sur la courbe de charge agrégée des consommateurs

On représente les courbes de charge agrégée de l'usage chauffage pour les 12 cas d'étude pour le parc de 1000 logements sur la figure 7.2.2. On observe le phénomène de saturation du chauffage à l'échelle du parc lorsque la durée de l'effacement dépasse une heure. Ce seuil est lié aux hypothèses et à la structure du parc simulé qui a été décrit au chapitre précédent.

Les résultats obtenus en simulation et présentés dans cette partie suggèrent que le phénomène de saturation à l'issue de la période de contrôle est surestimé (durée) par rapport aux observations terrains. En effet, on observe sur la figure 7.2.2 que le rebond ne dépend que faiblement de la durée de l'effacement. Cette remarque demeure toutefois qualitative (comparaison des courbes d'usages du chapitre 5 avec celles issues des simulations de cette partie). Les valeurs des principaux indicateurs d'effacement définis dans le chapitre 3 sont données dans le tableau 7.1.

Le calcul de la durée du report est fait en définissant un seuil à $\epsilon_r = 5\%$. La valeur de ce seuil a été fixée après observation des courbes de charge agrégée à 10min. Une valeur plus faible aurait pour effet de prendre en compte le phénomène oscillatoire observé sur les courbes à 10 minutes du au décalage du cycle (global) suite à l'effacement. Il est possible de déterminer plus précisément la valeur du seuil à choisir en déterminant le rapport cyclique vu

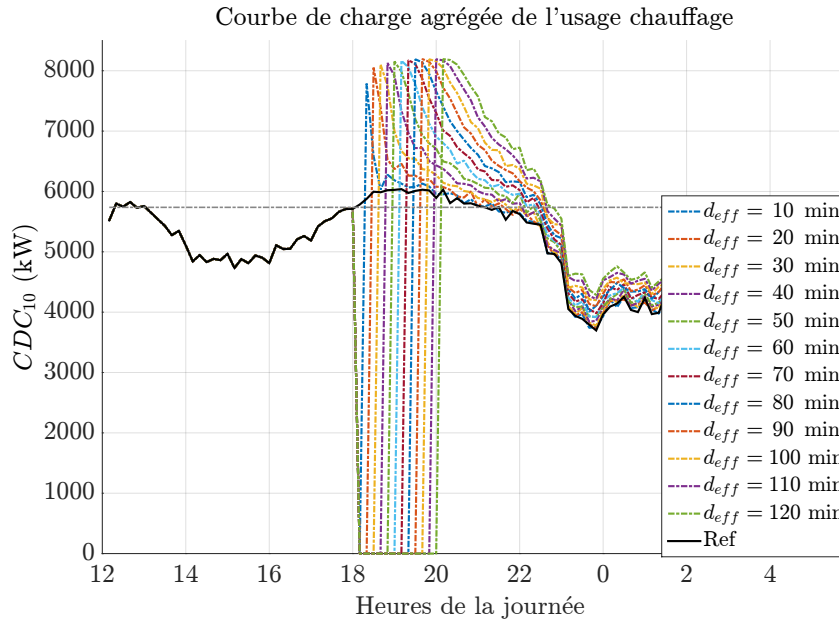


Figure 7.2.2 Courbes de charge 10min avec effacement, pour des durées de contrôle de 10 à 120 minutes, en l'absence de stratégie de pilotage de la relance

du parc¹. L'intérêt de ce calcul reste toutefois limité: en effet, le seuil ainsi calculé dépend des conditions de simulations, et il est donc nécessaire de refaire ces calculs pour chaque cas d'étude. La comparaison entre différents cas suppose que le référentiel soit commun, la valeur fixée de $\epsilon_r = 5\%$ est le meilleur compromis sur la précision globale (application possible à l'ensemble des cas).

La comparaison des courbes à 30 minutes (puissance moyenne, figure 7.2.3) donne une vision synthétique de l'effet de saturation (niveau, durée) pour les 12 cas étudiés.

Les effacements sont caractérisés selon les indicateurs définis dans le chapitre 3:

1. Le *report* $R\%$, défini par l'équation 3.2.2
2. La *durée du recouvrement* $t_{fin}(5\%)$, calculée selon l'équation 3.2.3, avec $\epsilon_r = 5\%$
3. Le *rebond* Rb , défini par l'équation 3.2.6
4. Le *facteur de relance* FR qui a été introduit dans la définition 12

¹On désigne par *rapport cyclique moyen du parc*, la valeur moyenne au niveau du parc du rapport $\alpha(t) = \frac{t_{on}(t)}{t_{on}(t) + t_{off}(t)}$

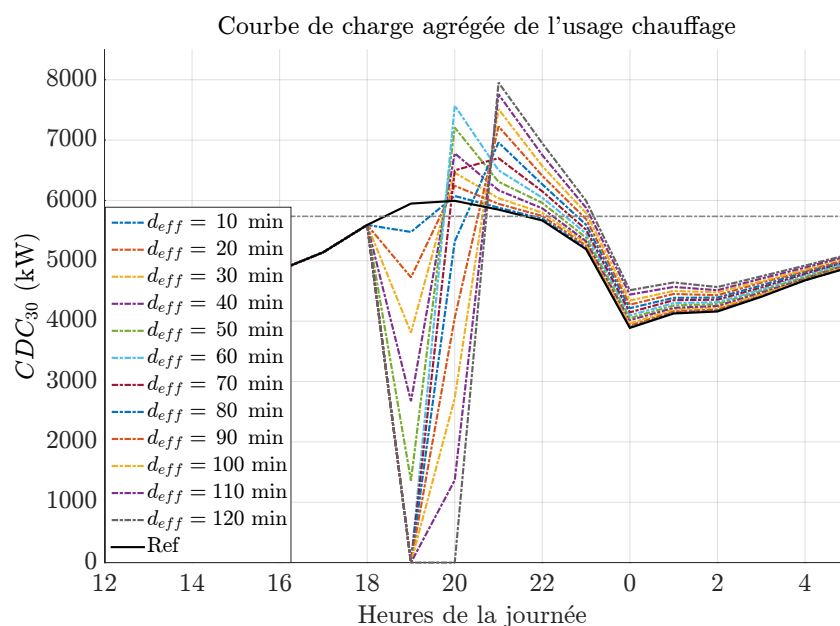


Figure 7.2.3 Courbes de charge moyenne 30min avec effacement, pour des durées de contrôle de 10 à 120 minutes, en l'absence de stratégie de pilotage de la relance

Tableau 7.1 Caractérisation de la déformation de la charge agrégée selon la durée de l'effacement

	$d_{eff} (\times 10 \text{ minutes})$											
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}
$R\%$	94.2	90.0	86.3	84.0	82.0	80.0	79.0	77.5	76.5	75.5	74.5	73.8
$t_{fin}(5\%)$ (min)	30	60	100	110	160	170	200	310	360	360	400	410
Rb	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.34	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.36
FR	1.36	1.41	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43

Les valeurs des indicateurs données dans le tableau 7.1, en particulier le taux de report de la charge, sont déterminées par la structure du parc (figure 7.1.1) et la part importante de logements *anciens* (voir les résultats selon la période constructive donnés dans le tableau 4.13 du chapitre 4).

Il n'y a pas d'effet de retard sur la phase de recouvrement, qui débute dès la fin de l'effacement. Ceci s'explique par le choix du modèle thermique. La durée de la phase de recouvrement selon la durée de l'effacement est déterminée par la dynamique rapide du

parc agrégé (déperditions par renouvellement d'air et plus généralement caractéristiques constructives du parc, choix de dimensionnement des systèmes, hypothèse de gestion des consignes avec réduit durant la période nocturne).

L'évolution de la durée de l'effacement influence les indicateurs liés au recouvrement (taux de report, durée de recouvrement) mais il n'y a pas d'influence observable sur les indicateurs en puissance. Ces observations ne sont pas surprenantes, compte tenu des choix de modélisation des bâtis (modèles détaillés dans le chapitre 2). La validation de ces résultats nécessite une confrontation à des données réelles, qui n'a pas pu aboutir dans le cadre de ces travaux, ce qui a déjà été discuté dans le chapitre 5.

Une méthode simple permettant à un opérateur d'effacement de proposer des blocs d'effacement et de contrôler l'effet de la relance est donc de construire des signaux d'effacement cascado-cycliques. Ce type de stratégie consiste à activer successivement, dans le cas le plus simple à intervalle de temps fixé, des ordres d'effacement sur des sous-groupes du parc.

7.3 Influence des modes de gestion sur la dynamique du parc

Dans cette partie, on s'intéresse à l'effet de la forme de la demande sur celle des effacements réalisée. Le modèle de présence utilisé est celui introduit dans le chapitre précédent. Afin de simuler différentes formes de demande, on peut envisager deux approches: simuler indépendamment les différents types d'individus identifiés dans le modèle de présence et considérer des échantillons (parc) uniquement composés de l'un des types ou bien déformer la demande via la déformation des modes de gestions du parc.

La première approche suppose que les individus d'un ménage soient toujours de même type, ce qui n'est pas le cas selon l'analyse des types de ménages issus des enquêtes *INSEE*. La reconstruction des ménages à partir des individus produit en effet un lissage de la courbe de présence moyenne et donc du scénario de consigne (compte tenu des hypothèses que nous avons choisies pour reconstruire celui-ci). D'autre part, cette approche n'est pas cohérente avec le principe d'association entre ménages et bâtis introduit dans le chapitre 6. Enfin, la définition de modes de gestion différenciés et de leur répartition dans le parc reste à déterminer.

Nous avons souligné dans le chapitre 1 la difficulté d'identifier les modes de gestion des ménages ainsi que leur distribution dans le parc. L'un des intérêts du modèle dynamique réside dans le fait qu'il permet de simuler des présences réalistes dans le parc selon certaines caractéristiques des individus et des ménages. En conséquence, il est possible d'attribuer aux ménages du parc des modes de gestions dynamiques selon la présence dans les logements, ce qui résout en partie le problème des instants de changement de consigne. Construire les modes de gestions à partir des scénarios de présence requiert néanmoins des hypothèses supplémentaires concernant les stratégies, qui se traduisent entre autre par l'introduction d'un paramètre de lissage. Le choix d'un modèle de chaîne de *Markov* d'ordre 1 pourrait conduire à un plus grand nombre de changement d'état par rapport à un modèle d'ordre supérieur. Le paramètre de lissage permet de limiter les changements rapides de consignes qui en résulterait et qui ne nous semble pas réaliste des pratiques² des ménages.

La figure 7.1.2b montre que la distribution du nombre de changements de consigne dans le parc pour un jour donné n'est pas incohérente avec les travaux qui ont été présentés dans le chapitre 1, ce qui atteste d'une forme de réalisme du parc étudié. Nous n'avons pas cependant d'éléments qui nous permettrait de valider les scénarios proposés.

La question du type de gestion (réduit ou coupure par exemple) n'a pas pu être traitée avec les données à disposition. Par conséquent, on choisit dans cette partie d'étudier localement l'effet des modes de gestions sur la forme des effacements du parc, c'est-à-dire qu'on suppose que l'ensemble du parc choisit toujours le même mode de gestion, qui peut être une coupure ou un réduit (définitions dans la partie 4.3.2).

7.3.1 Scénarios étudiés

Le parc est toujours celui décrit dans la partie 7.1. On se limite dans cette partie à des effacements d'une heure avec un contrôle de type u_{cc} .

On propose 4 modes de gestion selon deux paramètres d'ajustement:

1. Le type de gestion: réduit ou coupure (notation R ou C)
2. Le seuil de lissage³ pour le changement de consigne: 2h ou 4h (notation 2 ou 4)

²Nous manquons de données pour valider ou invalider cette hypothèse sur le parc français

³Ce seuil correspond à la durée minimale des états *absence* ou *présent, au repos* des individus pour qu'une action sur la consigne puisse être prise en compte. Si le seuil est de 2h, alors une absence des individus au cours de la journée d'une heure trente ne génère pas de changement de consigne. On peut noter qu'une consigne constante est donc un cas limite de scénario dynamique pour lequel le seuil serait égal à la durée d'observation.

Chaque cas d'étude est noté [*Type de gestion - Durée de lissage*], ainsi [*R,2*] désigne le cas d'une gestion avec réduit et lissage de 2h.

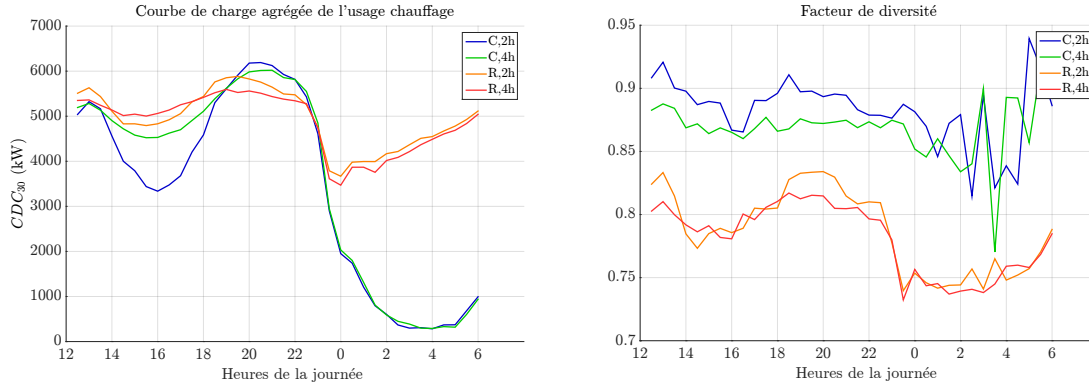
On représente les courbes de charge agrégée de référence pour le jour avec effacement sur la figure 7.3.1a. Le parc de référence étant composé de logements plutôt anciens (figure 7.1.1b), l'existence du réduit provoque une modification du rapport cyclique moyen du parc durant les périodes de plus faible activité par rapport aux périodes *critiques* (après une phase transitoire), avec une consommation moyenne durant la période d'inactivité des occupants qui demeure importante une fois la nouvelle consigne atteinte (en comparaison du cas avec coupure).

Dans le cas avec coupure, on observe une déformation de la courbe de charge avec des effets de rampe plus marqués que dans le cas avec réduit. La consommation durant les heures nocturnes s'explique par l'existence d'individus actifs dans le logement. La figure 7.3.1b montre que le facteur de diversité sur 30min du parc est proche de 1 dans le cas *C*, ce qui s'explique par un effet de saturation des systèmes dans le parc dès lors que les systèmes sont *réactivés* par les ménages.

On peut noter que dans les cas *C*, le creux de demande de l'après-midi est plus marqué que dans les cas *R*, ce qui s'explique par la part importante de logements *anciens* dans le parc. La pointe du soir est supérieure dans le cas avec coupure et elle est plus tardive. Ceci s'explique par le fait que dans les cas *R*, les niveaux de confort des logements sont plus rapidement atteints que dans les cas *C* et il se produit un phénomène de *compensation* au niveau du parc entre les logements, tandis que dans les cas *C*, la saturation des systèmes des logements dont le changement de consigne se produit au début de la rampe s'ajoute à la demande des ménages changeant de consigne plus tardivement.

Le paramètre lié à la durée minimale d'inactivité ou d'absence (2h ou 4h) conditionnant le changement de consigne a pour effet de lisser la demande. On retrouve un effet similaire sur la diversité à celui qui avait été observé dans le chapitre 4 lors de l'étude de l'influence du modèle de présence (section 4.3.4).

La déformation de la courbe de charge due au type de gestion (*R* ou *C*) rend la comparaison entre les scénarios complexe car les pointes de demande ne coïncident plus tandis que les heures de passage *PA* -> *PR* du soir demeurent inchangées. Or, nous avons montré dans le chapitre 4 que la durée du report dépend fortement de l'existence ou non d'un changement de consigne dans les heures qui suivent l'évènement. Ce changement de consigne a pour effet de ramener les bâtiments dans des états thermiques équivalents par rapport à la nouvelle



(a) Courbes de charge agrégée à 30min pour plusieurs scénarios de gestion (b) Évolution du facteur de diversité à 30min (observation pour 24h)

Figure 7.3.1 Caractérisation de la demande du parc pour deux scénarios de gestion des consignes

consigne. Afin de rendre les scénarios comparables du point de vue de la charge effacée, l'heure de début d'effacement est choisie en fonction de la pointe réseau, ce qui veut dire que les durées avant le passage $PA \rightarrow PR$ ne sont pas les mêmes dans les cas R et C .

7.3.2 Évaluation des effacements réalisés sur le parc

On note t_s l'instant de début de contrôle distant (début de l'effacement), qui est différent selon le scénario étudié. Les résultats sont présentés en superposant les heures de début d'effacement, la durée d'observation affichée est de 24h (6h en amont et 18h à partir de l'envoi du signal).

Par conséquent, on ne s'intéresse qu'à la forme des effacements réalisés, qui est définie en fonction du scénario de référence, et que nous caractérisons selon l'évolution de l'écart relatif $\epsilon(t)$ entre les courbes de référence CDC_{ref} et avec effacement CDC_{eff} :

$$\epsilon(t) = \frac{CDC_{ref}(t) - CDC_{eff}(t)}{CDC_{ref}(t)} \quad (7.3.1)$$

La figure 7.3.2 synthétise les formes d'effacements obtenues pour les 4 cas étudiés, les heures sont affichées par rapport à l'heure de début d'effacement ($t_s = 0h$ sur les figures).

Les principaux indicateurs du phénomène de relance sont donnés dans le tableau 7.2. On retient que la durée du recouvrement ne dépend pas du type de gestion si on suppose que la valeur est précise à 30min⁴. Ceci avait déjà été observé dans le chapitre 4 et s'explique

⁴Ce niveau de précision nous semble être une évaluation dans le cas le plus favorable avec notre modèle de parc.

par l'existence du changement de consigne le soir, quelque soit les modalités de celui-ci (on rappelle qu'en revanche, si la consigne est inchangée à l'issue de la période d'effacement, la durée du recouvrement augmente et s'étend sur plusieurs heures). Nous pensons qu'une partie de l'écart sur cet indicateur entre simulation et observations terrain s'explique par des modèles de gestion des consignes trop simples. Les effets en puissance (facteur de relance, rebond) sur le parc agrégé dépendent de la structure de la demande de référence, dont on représente différentes modalités à partir de la distinction des cas *R* et *C*. Au niveau du parc, certains indicateurs en énergie sont sensibles aux hypothèses sur la consigne: c'est notamment le cas du taux de recouvrement. Ceci s'explique par le fait que dans le cas du scénario avec coupure, l'évolution du recouvrement est plus lente que dans le second cas (voir les taux à 1h et 2h), et la plage d'observation avant le *réduit de nuit* est plus faible car la pointe du soir intervient plus tard que dans le cas de scénario avec réduit.

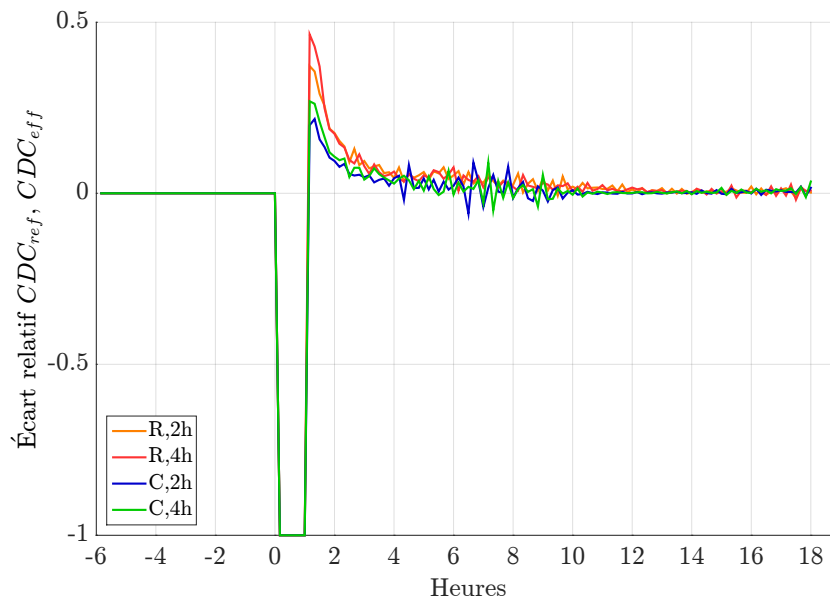


Figure 7.3.2 Forme des effacements pour différents hypothèses des scénarios de gestion de consigne

L'évaluation des effacements sur ces différents cas montre que, pour un effacement de durée fixée, la forme de la courbe de charge de référence a un effet prépondérant sur les indicateurs d'effacement. La modulation de la charge produite par un événement d'effacement dépend donc de la forme de la courbe de demande de référence et notamment de la diversité de la demande initiale, ce qui avait été partiellement observé dans le chapitre 4.

Tableau 7.2 Caractérisation de la déformation de la charge agrégée pour les 4 modes de gestion étudiés

	$R, 2h$	$R, 4h$	$C, 2h$	$C, 4h$
$R\%$	81.3	82	41.5	48.2
$t_{fin}(5\%)$ (min)	190	190	120	90
Rb	1.4	1.5	1.2	1.3
FR	1.45	1.47	1.25	1.28

7.4 Forme des effacements selon les profils de présence identifiés sur l'EDT

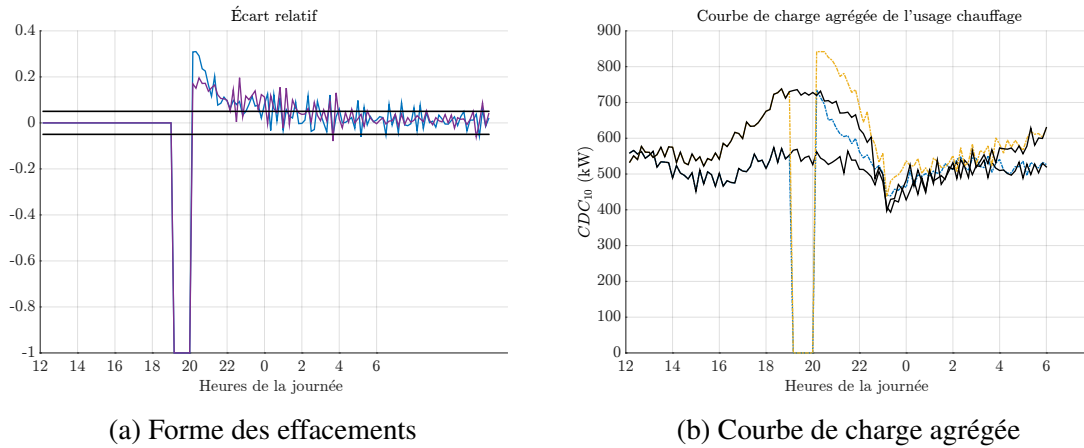
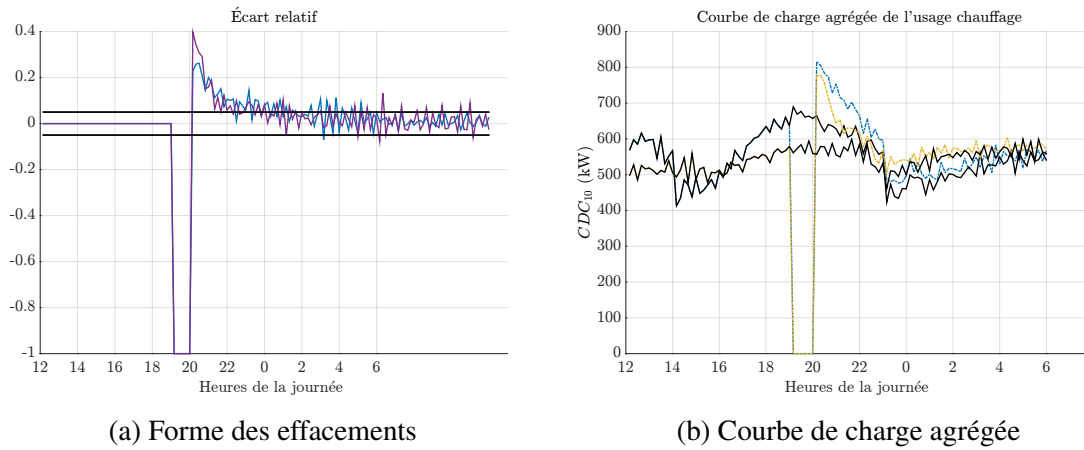
Pour le cas de la consigne avec *réduit*, on s'intéresse à la forme des effacements réalisés selon le profil de présence, c'est-à-dire selon la *typologie* des ménages telle que nous l'avons définie dans la partie 6.5.

Pour chaque profil, on simule un ensemble de ménages appartenant à l'un des 12 groupes de présence, le parc de logements est inchangé. On donne les résultats dans le cas d'un effacement de type *ON/OFF*, débutant à 19h, de durée égale à une heure.

Les indicateurs sont les mêmes que ceux définis dans la partie 7.3. Le tableau 7.3 donne les résultats obtenus selon le profil de présence. Les formes d'effacement réalisés pour deux parmi les 8 et 4 profils identifiés avec les échantillons $E_{a,ft}$ et E_c sont données sur les figures 7.4.1 et 7.4.2 respectivement. Les formes identifiées pour l'ensemble des profils sont détaillées dans l'annexe E.

Tableau 7.3 Caractérisation de la déformation de la charge agrégée selon le type de profil de présence

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R\%$	88	84	84	90	88	87	86	88	87	85	90	87
$t_{fin}(5\%)$ (min)	170	150	120	120	110	230	130	140	210	150	140	120
Rb	1.3	1.2	1.3	1.5	1.3	1.3	1.2	1.5	1.3	1.2	1.4	1.4
FR	1.3	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4

Figure 7.4.1 Effacements réalisés pour deux profils du groupe $E_{a,ft}$ Figure 7.4.2 Effacements réalisés pour deux profils du groupe E_c

7.5 Bilan

Nous avons proposé une méthode de reconstruction d'un parc réaliste dans le chapitre 6. Dans ce chapitre, nous avons proposé des exemples d'effacements sur un parc de bâtiments dont la diversité technique repose sur la caractérisation des bâtis de la métropole du *Grand Lyon*. Dans le premier cas, on illustre la déformation de la charge pour des durées d'effacements de 10 minutes à 2 heures. Le recouvrement énergétique observé au niveau du parc est essentiellement lié aux performances thermiques du parc agrégé et on retrouve le caractère passe-bas des systèmes dans la dynamique du recouvrement. Le modèle thermique simplifié ne reproduit que partiellement la dynamique de relance en puissance, et une confrontation à des données réelles de consommation de l'usage est nécessaire pour proposer une méthode

d'ajustement du parc en puissance.

Dans la seconde étude, on s'intéresse à l'effet des modes de gestions sur les indicateurs d'effacements. L'introduction de non-linéarités dans les modèles, matérialisé dans ce cas par des phases d'extinction des systèmes perturbent la dynamique du parc. Ainsi, on observe non seulement un effet sur les indicateurs énergétiques, le report est dans ce cas plus faible que dans le scénario initial, mais également une diminution de l'effet de saturation au niveau du parc. Ce phénomène s'explique dans notre cas par le fait que certains systèmes sont *éteints* par les occupants, ce qui conduit à une diminution de l'appel de charge suite à l'effacement par rapport au cas précédent.

Nous avons vu dans le chapitre 3 que la relance au niveau agrégé à la suite d'une coupure réseau, ce à quoi s'apparentent les effacements réalisés dans ce chapitre, est souvent sur-estimée dans les modèles. Un ajustement du modèle de consigne, alimenté par le modèle de présence dynamique développé dans le chapitre 6, peut donc permettre de s'assurer du réalisme des profils de charge et donc des évaluations réalisées en simulation. Pour cela, nous rechercherons un ajustement des distributions de consignes et réduits dans le parc, ou bien des distributions des différents modes de gestions dans le parc.

Chapitre 8

Conclusion

Synthèse des travaux réalisés

Apports du chapitre 1 Le premier chapitre de la thèse a permis de définir le cadre général de ce travail et de mettre en évidence les spécificités des usages thermiques de l'électricité. L'étude bibliographique sur la gestion des systèmes de chauffage nous a permis de mettre en évidence la difficulté de définir ces modes et proposer des modèles de représentation de la diversité *comportementale* d'un parc d'utilisateurs.

Apports des chapitres 2 et 3 Dans le premier chapitre, on définit les modèles simplifiés retenus dans la suite des travaux. Après une synthèse des études sur les effacements diffus de charges thermiques, on définit les indicateurs pertinents pour l'évaluation des effacements.

Apports du chapitre 4 Dans ce chapitre, on caractérise les consommations de référence de quelques ensembles types {bâti-systèmes-ménages}. Les analyses de sensibilité du chapitre montrent que les paramètres d'influence identifiés sont similaires à ceux donnés dans la littérature. Les études de cas d'effacement type sur plusieurs bâtiments, avec plusieurs modèles d'occupation permettant de simuler à différents degrés la diversité d'origine comportementale (occupation, gestion des consignes, pilotage des systèmes) et plusieurs stratégies de gestion ont permis de mettre en évidence les effets du foisonnement sur des indicateurs d'effacements tels que le recouvrement, le taux de report, la forme de la courbe de charge.

On a montré que les performances thermiques du bâtiment déterminent au niveau unitaire (parc de bâtiments homogènes) le recouvrement énergétique et la dynamique du rebond. Le dimensionnement des systèmes dans le parc influence largement l'effet de relance. Une première analyse des profils de demande nous a permis de mettre en exergue l'importance de

la diversité comportementale sur les effacements réalisés sur des ensembles de logements à performance thermique fixée. On retiendra notamment que la gestion dynamique des consignes limite *artificiellement* la durée de la phase de recouvrement dans nos simulations. La gestion des systèmes par les ménages est donc une question centrale pour un opérateur d'effacement.

Apports du chapitre 5 Dans ce chapitre, on exploite les données de consommations de logements soumis à un pilotage direct de certains équipements.

L'exploitation des index de l'ensemble des usages des consommateurs disponibles nous a permis de montrer la diversité des profils obtenus en effaçant certaines charges thermiques. Cependant, la représentativité des résultats proposés dans cette partie n'a pas pu être montrée car il n'a pas été possible de valider la méthode de construction de la courbe de référence définie pour les évaluations. Nous avons montré dans cette partie les limites liées à l'exploitation de données issues d'expérimentation *in situ* et notamment de la difficulté de construire une référence avec les données exploitées (de l'ordre de 200 ménages). Des éléments d'analyse utiles pour la suite sur la diversité d'un échantillon de consommateurs ont pu être extraits des données.

Ayant eu accès aux consommations spécifiques de l'usage ECS d'une centaine de ballons, nous avons proposé une approche globale permettant d'identifier la dynamique de parc de l'usage. Nous avons montré que la dynamique des systèmes ECS en interaction avec les ménages s'identifie par un modèle d'ordre 1 au niveau agrégé.

Ce travail ouvre la possibilité de mettre en œuvre des stratégies de contrôle prédictif sur le parc. Dans ce cas, l'estimation des états par un filtrage de Kalman, qui a déjà été déployée dans des cas similaires, pourra utilement être mise en œuvre. Le potentiel du parc de ballons électriques à accumulation est déjà largement utilisé actuellement, l'intégration de systèmes types *ballons thermodynamiques* dans le modèle global pourra être un axe de développement futur. Dans ce cas, une caractérisation plus fine des besoins en eau chaude (temporalités, volumes) est nécessaire.

Les courbes de charges de l'usage chauffage et les connaissances sommaires sur les bâtis de l'échantillon n'ont pas permis d'identifier les modèles thermiques des bâtis avec les données disponibles. L'analyse des formes de courbes de charges agrégées a montré que la dynamique globale liée aux effacements est représentée dans nos modèles. L'étude de quelques cas spécifiques nous a permis d'observer l'existence de comportements (gestion) di-

versifiés. Les stratégies de gestion avec intermittence sont prépondérantes dans l'échantillon. L'analyse de la courbe de charge agrégée des consommations logements indique que la majeure partie des logements sont pilotés dynamiquement par les ménages. Compte tenu de l'impact montré dans le chapitre 4 de ce type de gestion, cette étude a motivé l'intégration d'un modèle de présence dynamique issu de l'identification de types d'individus à partir de l'enquête emploi du temps dans le modèle de parc global dont le principe de construction a été détaillé dans le chapitre 6.

Enfin, l'analyse de la courbe agrégée issues des consommations totales logement a permis de montrer le caractère transitoire de la relance: avec les données disponibles, nous observons un rebond du même ordre de grandeur que la puissance effacée, et un recouvrement de l'ordre du double de la période effacée dans le cas d'effacement pointe de soir - une heure. Sur la courbe de l'usage chauffage, la forme de la déformation est similaire à celle connue issue d'une coupure réseau (courbes de charges à 10 minutes). L'absence de contrôle du rebond conduit à une dégradation de l'indice de diversité et de foisonnement (comparaison avec les courbes de charge sans effacement).

Apports du chapitre 6 Dans ce chapitre nous avons proposé une méthode globale de construction de courbes de charges associées à l'usage chauffage par une stratégie *bottom-up*. Nous avons pour cela exploité 4 enquêtes de l'INSEE, des données de références sur la caractérisation des bâtiments du parc français (et lyonnais plus spécifiquement), et la base de données topographique de l'IGN pour construire un parc réaliste de consommateurs d'électricité qui s'appuie sur des typologies génériques de bâtiments, qui intègre différentes sources identifiées de diversité, et qui permet de prendre en compte, au mieux, les interactions entre les ménages, les bâtis et les systèmes.

Les caractéristiques physiques des matériaux de référence des bâtis ont été extraites des différentes *RT*, ce qui a permis de construire un catalogue générique et modulable utilisé dans le parc de *bâtis*, les règles d'association ayant été définies en utilisant les rapports techniques disponibles.

Un travail de réconciliation de l'ensemble de ces données a finalement permis de construire un outil de simulation réaliste d'un parc de consommateurs hétérogènes associés à des systèmes eux-mêmes diversifiés. La flexibilité du modèle global assure son potentiel d'évolution et d'utilisation.

Ce modèle global nécessite d'être calibré si on souhaite s'assurer de sa représentativité à l'échelle d'un échantillon connu de consommateurs. L'analyse d'échantillons de données d'usage représentatifs de dynamiques globales (courbes de charges par exemple) doit permettre d'identifier les paramètres d'ajustement pertinents du parc. Des travaux dans ce sens ont été initiés en simulation à travers des études de cas du chapitre 7.

Le modèle pourrait alors notamment être utilisé comme un outil d'aide à la décision par exemple pour :

- Les opérateurs d'effacement en leur permettant d'étudier l'effet de stratégies d'effacement de type *pilotage direct* sur le parc de consommateurs dont ils disposent. Quelques exemples de stratégies simples sont proposés dans le chapitre 7
- Les opérateurs d'équilibrage du réseau. Un axe de recherche futur serait d'intégrer le parc dans un modèle plus global. Il serait intéressant de modéliser les charges agrégées aux différents nœuds du réseau. L'utilisation de la *BDTOPO* pour la construction du parc est une première étape vers l'intégration de la plateforme dans un contexte réseau. La réconciliation entre ces données et celles issues des enquêtes *INSEE* permet en effet de construire des profils de demande locaux
- Les pouvoirs publics afin d'étudier l'impact de stratégies de rénovation sur le parc. Une des principales difficultés serait alors d'intégrer les *effets rebonds* (définis ici comme une augmentation du confort au détriment des économies suite aux rénovations effectuées). Un axe de développement serait de définir des scénarios à projeter sur le parc et à évaluer avec la plateforme les effets des solutions envisagées (économies d'énergie au niveau du parc par exemple)
- L'étude de l'intégration de moyens de production. La plateforme permet des simulations dynamiques des charges thermiques électriques du secteur résidentiel. En intégrant un parc de production intermittente, il serait possible d'étudier des stratégies de contrôles à différentes échelles. L'application des méthodes de contrôle prédictif développées dans [99] est une voie intéressante à explorer sur le parc

Apports du chapitre 7 Dans ce chapitre, nous avons proposé quelques études de cas d'effacement sur un parc reconstruit selon l'approche proposée par le chapitre précédent.

Dans un premier temps, on s'intéresse à la dynamique du parc suite à un effacement de durée variable. L'agrégation des différentes charges conduit à une dynamique de parc globale

qu'il serait intéressant de chercher à identifier (recherche d'un modèle pseudo-physique représentant l'ensemble des charges par exemple). En simulation, cette dynamique globale, pour un scénario de gestion fixé, est essentiellement déterminée par les caractéristiques constructives (performances thermiques) des bâtis du parc. L'utilisation de la BDTOPO et des enquêtes *INSEE* pour la construction du parc permet d'envisager des études locales sur des ensembles spécifiques (composante réseau à intégrer).

Dans la seconde partie du chapitre on montre que la forme de la demande initiale et le comportement, définis par l'attribution de certains modes de gestions de la consigne, ont une influence déterminante sur les produits d'effacements. Le parc de bâtis proposé pour l'étude est le même pour l'ensemble des cas étudiés. On montre que les produits d'effacements réalisés (forme de la déformation de la charge) dépendent des modes de consommations adoptés et qu'il n'est donc pas possible d'identifier une forme générique *a priori* des produits d'effacements réalisés.

Perspectives

Les études de cas de ce chapitre mettent donc en évidence l'importance de 3 groupes de paramètres sur les effacements réalisés sur un parc.

Au premier ordre, les caractéristiques constructives du parc, c'est-à-dire la structure du parc initial (caractéristiques intrinsèques des systèmes bâtis et ménages du parc) déterminent le taux de report et la dynamique de recouvrement. Les modèles utilisés dans ces travaux ne permettent pas de s'assurer de la représentativité des dynamiques de relances rapides, ce qui s'explique par le niveau de représentativité des modèles choisis (modèle global logement, représentation des bâtis par deux zones thermiques au plus).

Poursuivre ces travaux nécessite de disposer d'un échantillon de taille suffisante composé de logements hétérogènes dont on connaîtrait au moins le profil de consommation de l'usage chauffage et les caractéristiques des systèmes de chauffage (nombre d'équipements, puissance nominale de chaque appareil) ainsi que certaines caractéristiques des logements. Dans le chapitre 6, nous avons montré comment caractériser un parc de bâtis à partir de quelques attributs: type de logement, période constructive, surface. On recherchera en priorité ces variables pour l'échantillon étudié.

Dans un second temps, des connaissances plus précises sur les modes de gestion des systèmes de chauffage sont nécessaires pour paramétrer un modèle de parc à sous-modèles plus précis. Nous avons montré dans ce dernier chapitre que les indicateurs d'effacements

sont sensibles aux choix de consignes.

L'effet des effacements sur le confort thermique reste indéterminé. En simulation, la notion de confort à l'échelle locale n'a pas pu être représentée, des modèles plus détaillés seraient nécessaires mais ils sont lourds à paramétrer au niveau d'un logement et l'ajustement au niveau d'un parc ne nous paraît pas envisageable. Les données de températures issues d'expérimentations sont difficilement exploitables au niveau agrégé car la cohérence entre les différentes séries de mesures est difficilement vérifiable. En outre, nous manquons d'informations pour exploiter ces données; hormis d'éventuelles dérogations (qui n'ont pas pu être estimées dans le cadre de ces travaux), nous n'avons pas d'indication globale sur le ressenti dans le logement du fait d'un effacement distant. Les évaluations de l'évolution de température dans les logements issues des données ne sont pas représentatives, l'échantillon exploité étant de faible taille. La poursuite de ces travaux serait justifiée si l'aspect *confort perçu* est un paramètre central de la motivation à souscrire ou non à des offres d'effacement. Cet aspect reste à explorer, nous n'avons pour le moment pas de données issues de *déploiement opérationnel d'offres d'effacement*.

Le second ensemble de paramètres regroupe donc les attributs liés à la gestion des systèmes et donc à la forme de la courbe agrégée. En supposant que l'ensemble des ménages adopte la même stratégie (coupure ou réduction de la consigne pour certains états de présence), on montre que l'effet de cette dynamique a une influence à la fois sur les indicateurs en énergie et sur ceux en puissance (rebond et pic de surconsommation) au niveau du parc.

Les résultats des effacements sont donc largement corrélés à la diversité infra-journalière du parc (forme de la courbe de demande des consommateurs). Un modèle de comportement dynamique des ménages du parc est donc une première étape indispensable pour la prise en compte de la gestion non stationnaire de la consigne. Dans le chapitre 6, nous avons proposé une méthode originale permettant de construire des profils de présence individuels, des travaux sur l'identification de modes de gestions du chauffage par les ménages pourront alimenter le modèle de parc et nous assurer de la représentativité des résultats présentés dans la section 7.3.

Un modèle d'activité peut ensuite être couplé à ce modèle de présence. Le modèle d'activité pourra être exploité par la suite pour reconstruire la demande des usages spécifiques. Des données sur les équipements (taux de pénétration dans le parc, cycles de fonctionnement unitaire) devront être recherchés. En premier lieu, le modèle d'activité

pourra être utile pour paramétrer la demande pour l'usage ECS (modèle dynamique de puisage); des travaux sur cet usage sont en cours.

La définition des calendriers de changement de consigne dans le logement à partir des profils individuels (puis ménage par agrégation d'individus) a nécessité de *hiérarchiser* les typologies d'individus et de se donner des seuils de durée à consigne inchangée. À défaut de pouvoir alimenter les modèles physiques avec ce type de données, proposer un modèle de présence global ménage permettrait d'améliorer la représentativité du modèle au niveau du parc.

Enfin, le choix du signal global (ensemble des signaux-logements émis) donne de la flexibilité à l'agrégateur et lui permet de rechercher dans son parc des formes d'effacement à valoriser. L'intégration du modèle dans un contexte de réseau nous permettra dans la suite de rechercher et d'exploiter des solutions de pilotage de la charge globale, intégrant les contraintes sur les moyens de productions intermittents.

Annexe A

Annexes du chapitre 4

Sommaire du chapitre

A.1	Synthèse bibliographique sur l'analyse des paramètres d'influence sur la dynamique des besoins thermiques par la méthode de <i>Morris</i>	271
A.2	Paramètres de référence des bâtis étudiés dans la partie 4.2.1	273
A.3	Paramètres inclus dans l'étude de la partie 4.2.3	276
A.4	Détails des jours avec signal d'effacement	280

A.1 Synthèse bibliographique sur l'analyse des paramètres d'influence sur la dynamique des besoins thermiques par la méthode de *Morris*

Tableau A.1 Principaux résultats issus du criblage de Morris issus de l'analyse bibliographique

Étude	[184]
Type de bâti	Bâtiment de bureau, cas d'application: bureau $\pm 10m^2$
Indicateurs pour l'évaluation	Confort (TO : nombre moyen d'heures où $PDD > 10\%$)
Nombre de paramètres inclus dans l'étude	81 paramètres, selon 2 niveaux, $r = 3$ trajectoires
Paramètres les plus influents	12
Paramètres	
Coefficient transfert convectif extérieur, toit	
Taux de renouvellement d'air	
Coefficient transfert convectif intérieur, plancher	
Vitesse de l'air, intérieur	
Coefficient de transmission solaire	

	Humidité relative, intérieur
	Albédo
	Coefficient transfert convectif extérieur, fenêtres
	Coefficient transfert convectif intérieur, parois verticales
	Coefficient transfert convectif extérieur, parapet
	Épaisseur de la couche de béton, toit
	Résistance de la lame d'air, fenêtres
Étude	[42]
Type de bâti	Bâtiment de bureaux, 4 étages
Indicateurs pour l'évaluation	Confort (TO : nombre moyen d'heures où $PDD > 10\%$)
Nombre de paramètres inclus dans l'étude	89 paramètres, $r = 5$ trajectoires (450 évaluations) (suivie d'un propagation des incertitudes sur les paramètres les plus influents)
Paramètres les plus influents	10
	Paramètres
	Coefficients liés à la pression du vent
	Coefficient de réduction du vent
	Stratification de l'air à l'intérieur de la zone
	T_{ext}
	Coefficients transferts convectifs extérieurs
	Résistances thermiques des parois vitrées
	Coefficient transfert convectif intérieur
	Albédo
	Coefficient de transmission solaire, parois vitrées
	Coefficient de transmission solaire, protections solaires
Étude	[34]
Type de bâti	Maison individuelle (non mitoyenne, RDC + 1), faiblement isolée, double vitrage
Indicateurs pour l'évaluation	Divers dont: Besoins de chaleur et de froid, performance énergétique
Nombre de paramètres inclus dans l'étude	129 paramètres
Paramètres les plus influents	8 (besoins de chaleurs) 5 (classe énergétique)
	Paramètres
	Taux de renouvellement d'air
	Température de consigne
	Scénario d'occupation (nombre d'occupants)
	Apports de chaleur sensible dus aux occupants
	Apports de chaleur sensible dus aux équipements
	Conductivité thermique bois (plancher)
	Conductivité thermique isolant (toit)

Conductivité thermique isolant (parois verticales)	
Étude	[26]
Type de bâti	Maison individuelle (non mitoyenne, $180m^2$)
Indicateurs pour l'évaluation	Consommations énergétique annuelle (ECS + chauffage clim)
Nombre de paramètres inclus dans l'étude	57 paramètres
Paramètres les plus influents	10
Paramètres	
Température de consigne	
Taux de renouvellement d'air, hiver, occupation	
Besoins ECS	
Angle par rapport à l'horizon	
Apports de chaleur sensible dus aux équipements	
Taux de renouvellement d'air, hiver, absence	
Coefficient de transmission global U , fenêtres	
Taux de renouvellement d'air, été	
?	
Coefficient de transmission global U , parois verticales	

A.2 Paramètres de référence des bâtis étudiés dans la partie 4.2.1

Tableau A.2 Paramètres de référence des bâtis étudiés de type RT75

	λ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	C $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	ρ kg m^{-3}	e m	h_i $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	h_e $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Murs extérieurs					7.69	25
Revêtement	0.25	1000	800	0.01		
Isolant	0.043	1450	13	0.04		
Bloc béton	2.3	1000	2300	0.15		
Plancher bas					5.88	25
Revêtement	0.16	1000	700	0.02		
Chappe béton	2.3	1000	2300	0.04		
Isolant	0.17	1600	850	0.07		
Bloc béton	0.9	1000	1400	0.3		
Toiture isolée					11.11	20
Sous-toiture	0.1	1700	250	0.03		
Isolant	0.043	1450	13	0.1		
Tuile	0.65	1000	0.66	0.015		
Plancher haut					11.11	11.11
Revêtement	0.25	1000	800	0.01		
Bois	0.16	1000	700	0.05		
Isolant	0.03	1700	250	0.06		

Tableau A.3 Paramètres de référence des bâtis étudiés de type RT89

	λ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	C $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	ρ kg m^{-3}	e m	h_i $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	h_e $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Murs extérieurs					7.69	25
Revêtement	0.25	1000	900	0.01		
Isolant	0.036	1400	30	0.05		
Bloc béton	0.84	1700	800	0.2		
Plancher bas					5.88	25
Revêtement	0.16	1000	700	0.02		
Chappe béton	1.3	850	2200	0.06		
Isolant	0.031	1200	35	0.07		
Bloc béton	1.3	850	2200	0.15		
Toiture isolée					11.11	20
Revêtement	0.25	1000	900	0.01		
Isolant	0.06	1000	35	0.21		
Sous-toiture	0.1	1700	650	0.05		
Tuile	0.65	1000	0.66	0.015		
Plancher haut					11.11	11.11
Revêtement	0.25	1000	800	0.01		
Bois	0.7	1000	700	0.1		
Isolant	0.16	100	650	0.2		

A.3 Paramètres inclus dans l'étude de la partie 4.2.3

Tableau A.4 Paramètres inclus dans le criblage de Morris

Paramètre	Abrév	Unité	Bornes R775	Bornes R788
1 Taux de renouvellement d'air	τ_{renouv}	volh^{-1}	[0.2, 0.8]	[0.5, 0.8]
2 Capacité de l'air	C_{air}	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$[510^3, 2010^3]$	$[510^3, 2010^3]$
3 Coefficient linéarisé pour les échanges convectifs intérieurs, parois verticales	Hi	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	[5, 15]	[5, 15]
4 Coefficient linéarisé pour les échanges convectifs extérieurs, parois verticales	He	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	[5, 25]	[5, 25]
5 Coefficient linéarisé pour les échanges convectifs extérieurs, planchers	He _{pl}	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	[10, 25]	[10, 25]
6 Coefficient linéarisé pour les échanges convectifs extérieurs, toiture	He _{toit}	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	[10, 20]	[10, 20]
7 Épaisseur de l'isolant pour les parois verticales extérieures	e _{isol,m ext}	m	[0.03, 0.06]	[0.03, 0.1]
8 Épaisseur des parois de béton (murs extérieurs)	e _{béton}	m	[0.1, 0.2]	[0.15, 0.3]
9 Épaisseur de l'isolant pour la toiture	e _{isol, toit}	m	[0.05, 0.08]	[0.1, 0.15]
10 Épaisseur des lames de verre, parois vitrées	e _{verre}	m	[0.028, 0.004]	[0.028, 0.004]
11 Épaisseur de la dalle de béton, plancher	e _{béton,pl}	m	[0.2, 0.3]	[0.3, 0.4]
12 Épaisseur de la couche de revêtement, parois verticales	e _{placo}	m	[0.01, 0.02]	[0.01, 0.02]
13 Épaisseur des tuiles	e _{tuile}	m	[0.02, 0.04]	[0.02, 0.04]
14 Épaisseur de la couche de revêtement, plancher	e _{rev,sol}	m	[0.005, 0.02]	[0.005, 0.02]

Numéro	Paramètre	Abrév	Unité	Bornes R775	Bornes R788
15	Coefficient de transmission thermique, parois béton (murs extérieurs)	$\lambda_{\text{beton,mur}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[1.5, 2.3]	[1.5, 2.3]
16	Coefficient de transmission thermique, parois béton (planchers bas)	$\lambda_{\text{beton,pl}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[0.9, 1.5]	[1.5, 2.3]
17	Coefficient de transmission thermique, isolant, parois verticales	$\lambda_{\text{isol,mur}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[0.024, 0.045]	[0.024, 0.045]
18	Coefficient de transmission thermique, isolant, toiture	$\lambda_{\text{isol,toit}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[0.03, 0.045]	[0.03, 0.045]
19	Coefficient de transmission thermique, revêtement, planchers	$\lambda_{\text{rev,pl}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[0.16, 1]	[1, 2]
20	Coefficient de transmission thermique, parois vitrées	λ_{verre}	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[1, 1.2]	[1, 3]
21	Coefficient de transmission thermique, isolant, planchers	$\lambda_{\text{isol,pl}}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[0.5, 0.6]	[0.03, 0.05]
22	Coefficient de transmission thermique, tuiles	λ_{tuile}	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	[0.5, 0.7]	[0.5, 0.7]
23	Taux de vitrage	t_{vitre}	$\%S_{\text{façade}}$	[10, 30]	[10, 50]
24	Orientation longitudinale	orient	rad	[0, π]	[0, π]
25	Coefficient de réduction, masques solaires	α_{masques}	—	[0.5, 0.7]	[0.5, 0.7]
26	Hauteur sous plafond	HSP	m	[2.8, 3.5]	[2.8, 3.5]
27	Albédo	ρ_g	—	[0.1, 0.4]	[0.1, 0.4]
28	Température au niveau du sol	T_{sol}	K	[278, 281]	[278, 281]
29	Correctif température extérieure	$T_{\text{ext,d}}$	K	[−1, 1]	[−1, 1]
30	Latitude	Lat	°	[4.71, 5.06]	[4.71, 5.06]
31	Longitude	Long	°	[45.572, 45.885]	[45.572, 45.885]
32	Rapport d'élongation du bâti	elong	—	[1, 2]	[1, 2]

Numéro	Paramètre	Abrév	Unité	Bornes RT75	Bornes RT88
33	Facteur solaire, flux direct	T _{dir}	—	[0.7, 0.9]	[0.7, 0.9]
34	Facteur solaire, flux diffus	T _{diff}	—	[0.7, 0.9]	[0.7, 0.9]
35	Absorptivité, ray. glo, ext.	apogloext	—	[0.8, 0.95]	[0.8, 0.95]
36	Absorptivité, ray. clo, ext.	apocloext	—	[0.5, 0.7]	[0.5, 0.7]
37	Absorptivité, ray. clo, int.	apocloint	—	[0.9, 1]	[0.9, 1]
38	Absorptivité, ray. clo, int.	apvcloint	—	[0.1, 0.3]	[0.1, 0.3]
39	Fraction des flux solaires absorbés dans les planchers	frac _{pl}	—	[0.5, 0.7]	[0.5, 0.7]
40	Coefficient linéarisé pour les échanges radiatifs	h _{rad}	Wm ⁻² K ⁻¹	[4, 6]	[4, 6]
41	Émissivité parois grises	emisgris	—	[0.8, 0.95]	[0.8, 0.95]
42	Émissivité parois vitrées	emisvitre	—	[0.1, 0.2]	[0.8, 0.95]
43	Part radiative pour les émetteurs	α _{rad,syst}	—	[0.05, 0.5]	[0.05, 0.5]
44	Coefficient de réduction des apports internes	α _{AI}	—	[0.8, 1.2]	[0.8, 1.2]
45	Coefficient de pondération de la puissance nominale des émetteurs	α _{rel}	—	[0.8, 1.2]	[0.8, 1.2]
46	Bande morte des thermostats	BM	K	[0.5, 1]	[0.5, 1]
47	Niveau du réduit	i _{réduit}	K	[0, 3]	[0, 3]
48	Heure de passage du mode <i>éco</i> au mode <i>confort</i>	t _{rel}	h	[17, 18.5]	[17, 18.5]

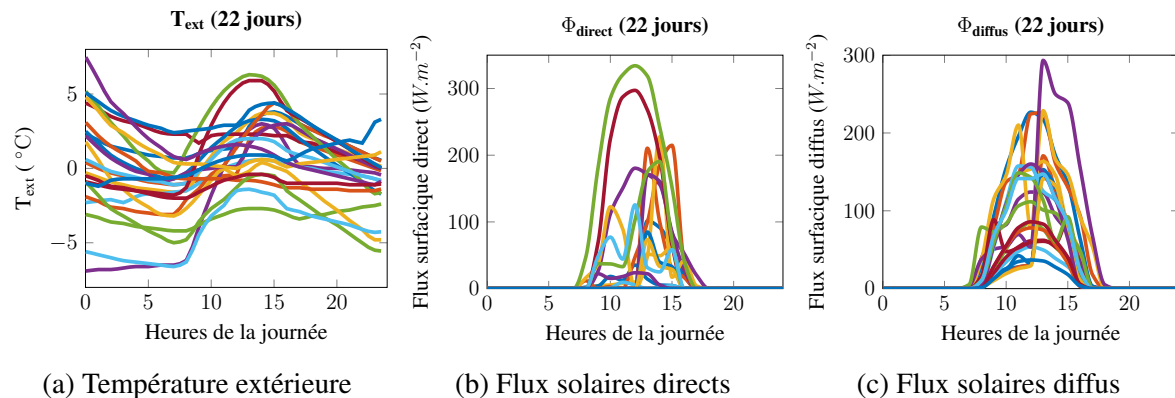


Figure A.4.1 Sollicitations météorologiques pour les 22 jours avec effacement (chaque couleur représente un jour différent)

A.4 Détails des jours avec signal d'effacement

Les températures extérieures moyennes calculées pour la station de Lyon pour les 22 jours avec effacement sont reproduites dans le tableau A.5. On représente également les évolutions des sollicitations météorologiques pour les jours avec effacement sur la figure A.4.1. On constate que, compte tenu de la méthode de choix de ces jours, les conditions climatiques sont relativement diversifiées (flux solaires maximums, amplitude de variation de la température extérieure).

Tableau A.5 Températures extérieures moyennes sur la période 15 h – 0 h pour les 22 jours avec effacement

jour	$\bar{T}_{\text{ext}}$
1	-5.8°C
2	-3.5°C
3	-3.4°C
4	-2.9°C
5	-2.5°C
6	-1.9°C
7	-1.4°C
8	-1.0°C
9	-0.3°C
10	-0.2°C
11	-0.2°C
12	-0.1°C
13	0.2°C
14	0.2°C
15	0.5°C
16	0.6°C
17	0.8°C
18	1.1°C
19	1.2°C
20	1.2°C
21	1.2°C
22	1.5°C

Annexe B

**Relation entre les consommations de
l'usage chauffage et la température de la
station météo la plus proche**

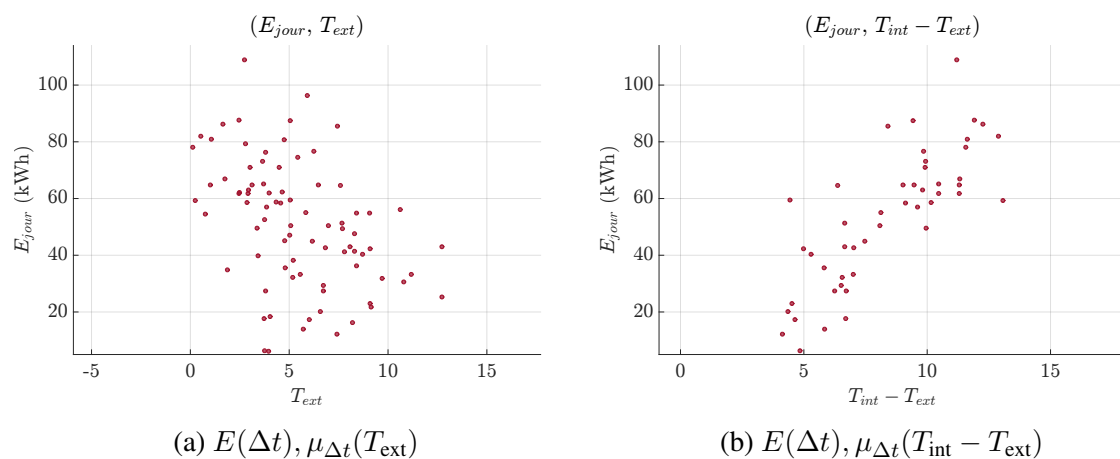


Figure B.0.1 Exemple de nuages de points obtenus - logement 1

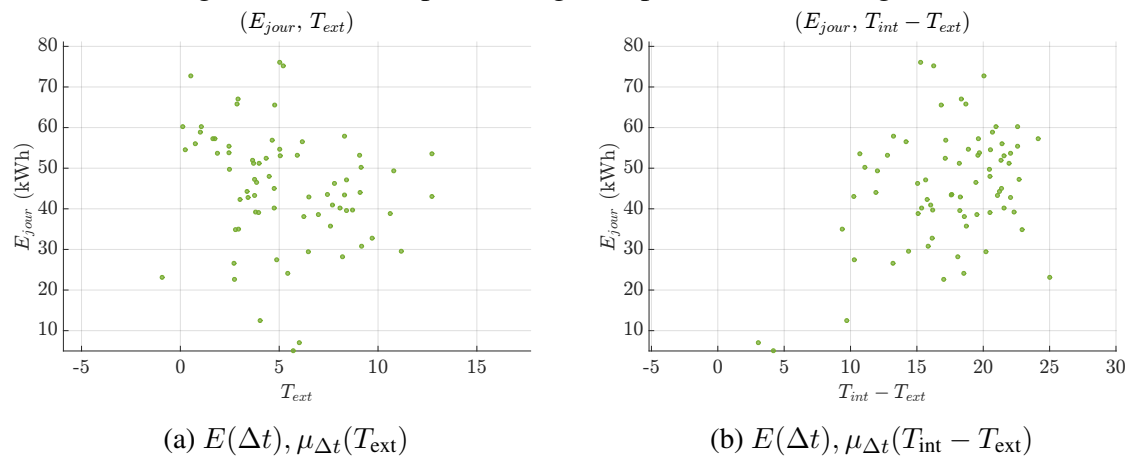


Figure B.0.2 Exemple de nuages de points obtenus - logement 2

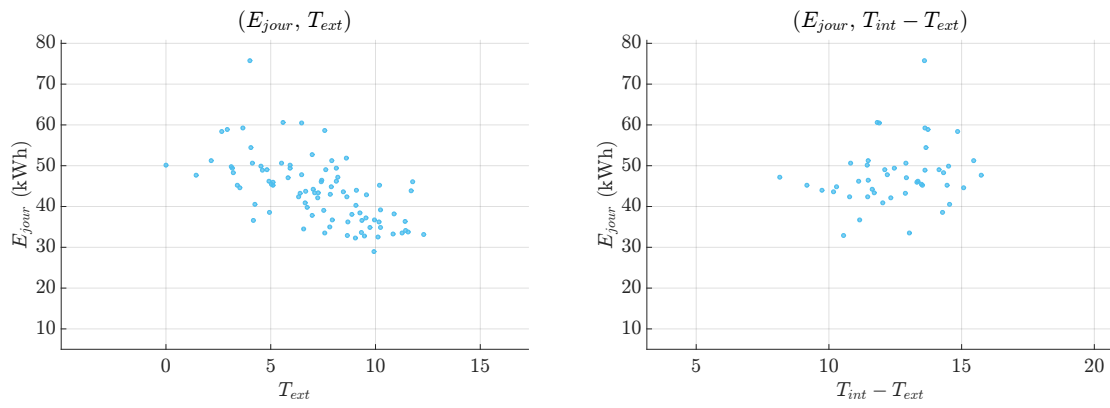


Figure B.0.3 Exemple de nuages de points obtenus - logement 3

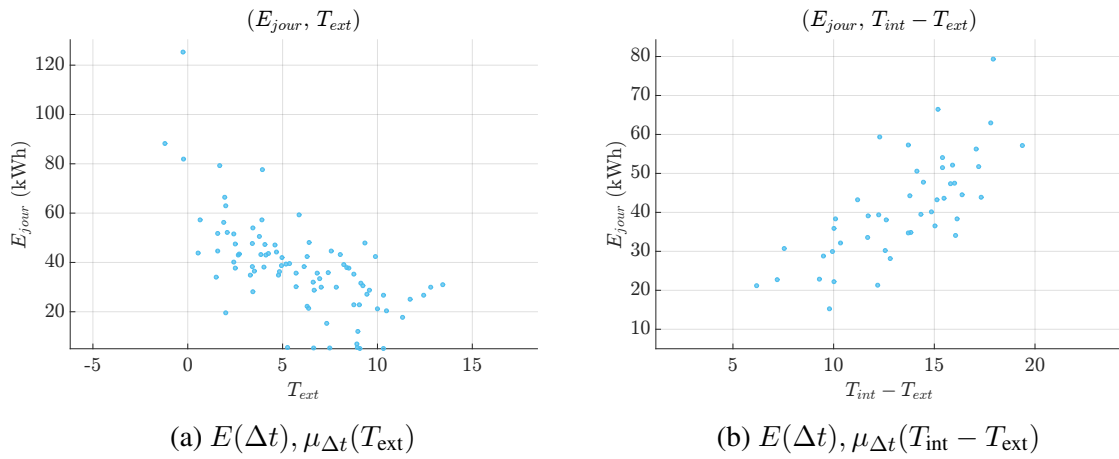


Figure B.0.4 Exemple de nuages de points obtenus - logement 4

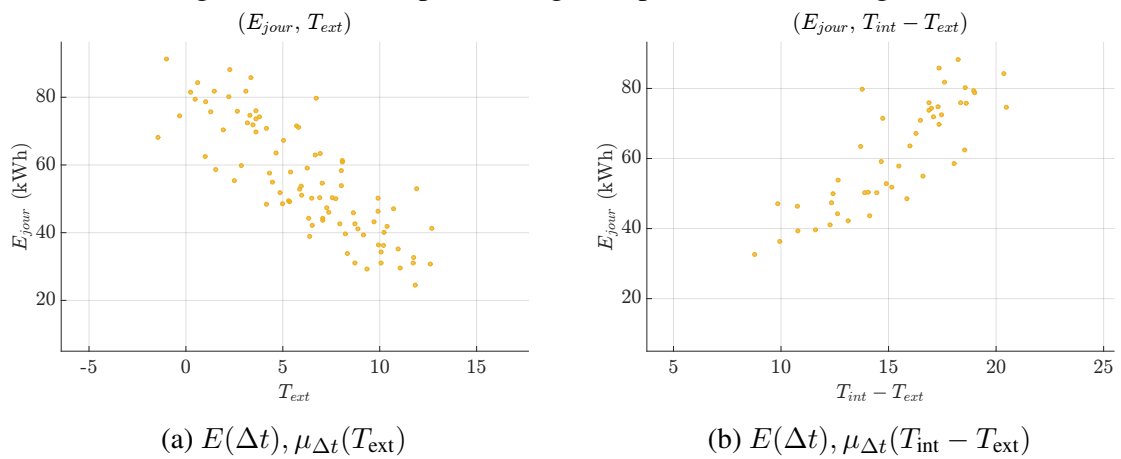


Figure B.0.5 Exemple de nuages de points obtenus - logement 5

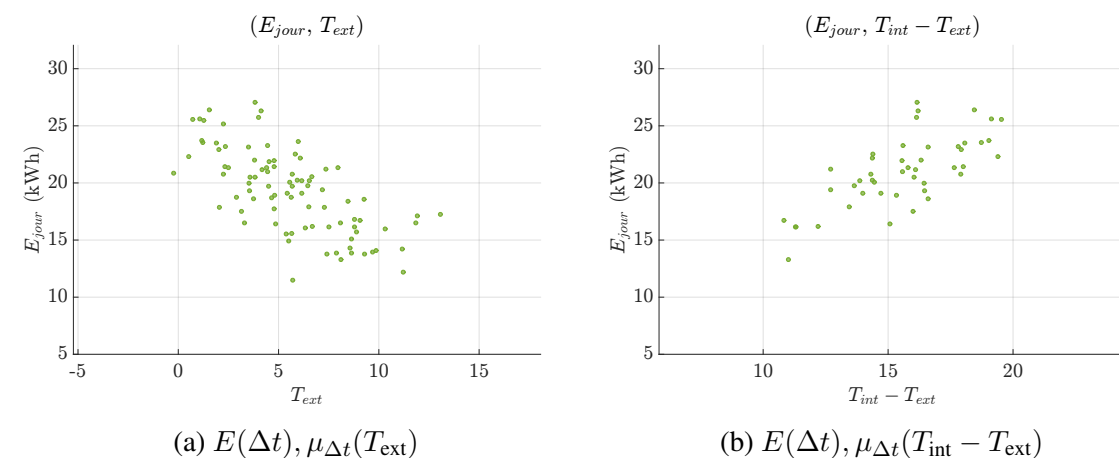


Figure B.0.6 Exemple de nuages de points obtenus - logement 6

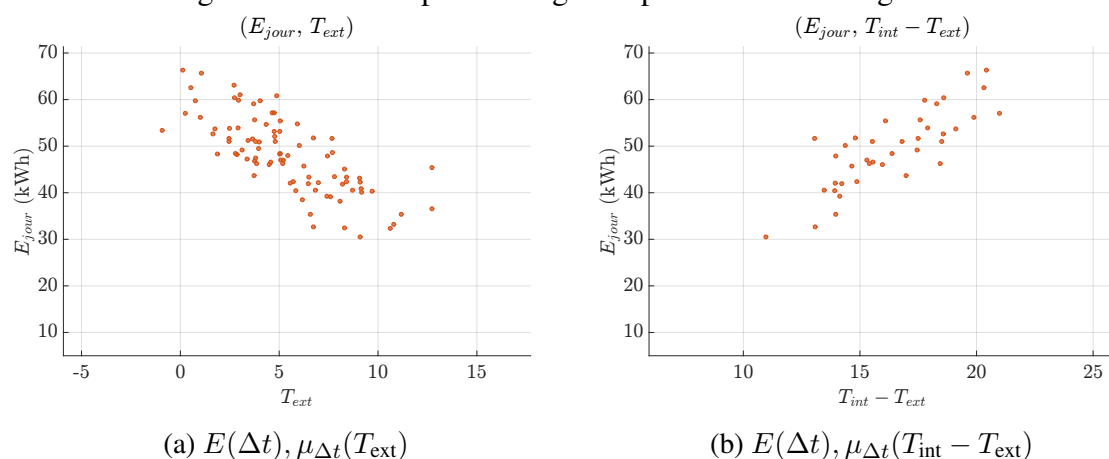


Figure B.0.7 Exemple de nuages de points obtenus - logement 7

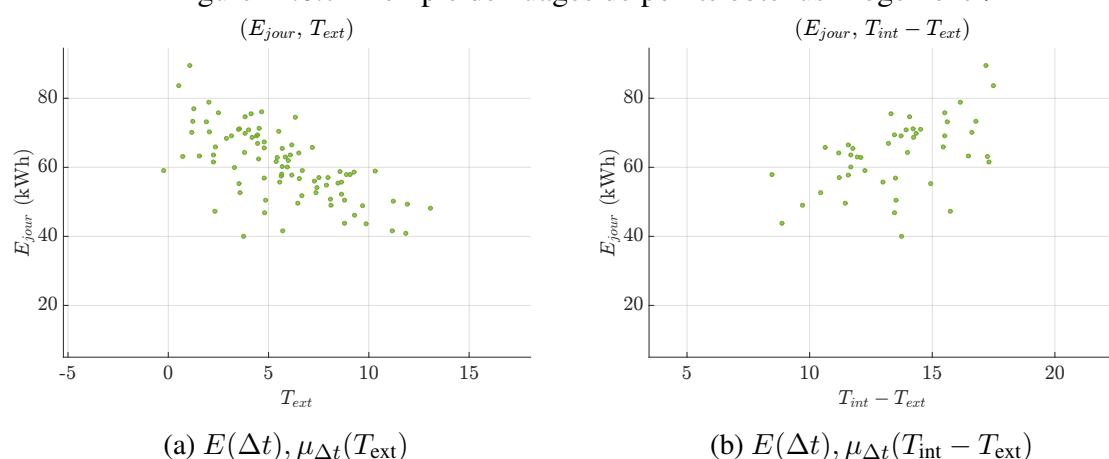


Figure B.0.8 Exemple de nuages de points obtenus - logement 8

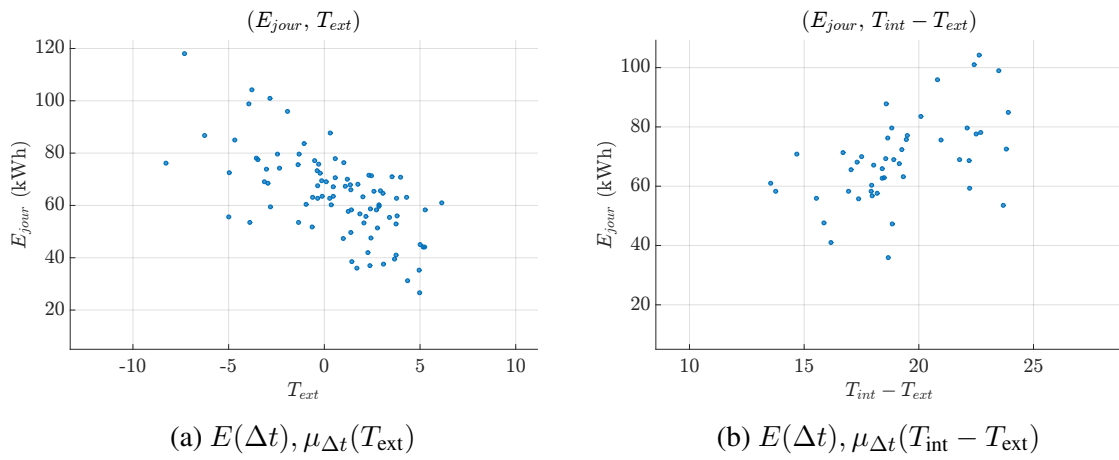


Figure B.0.9 Exemple de nuages de points obtenus - logement 9

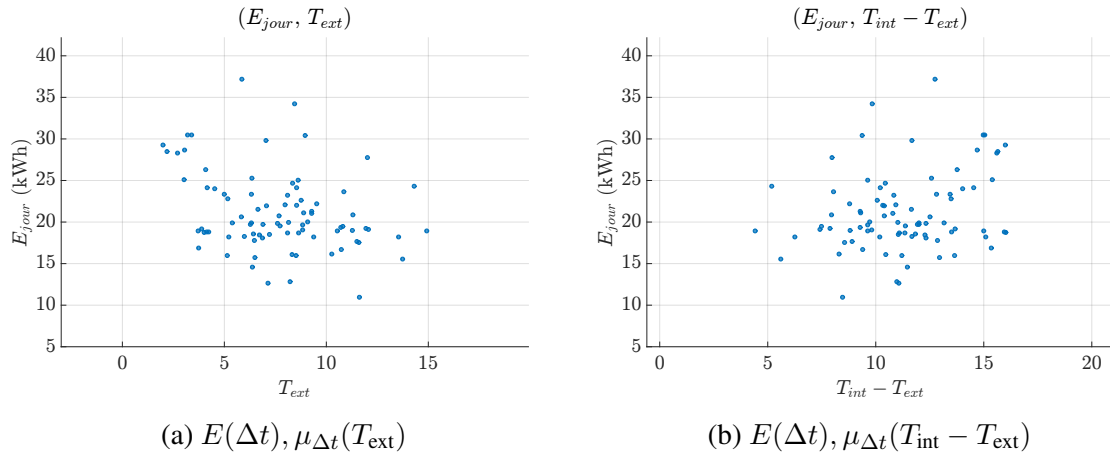


Figure B.0.10 Exemple de nuages de points obtenus - logement 11

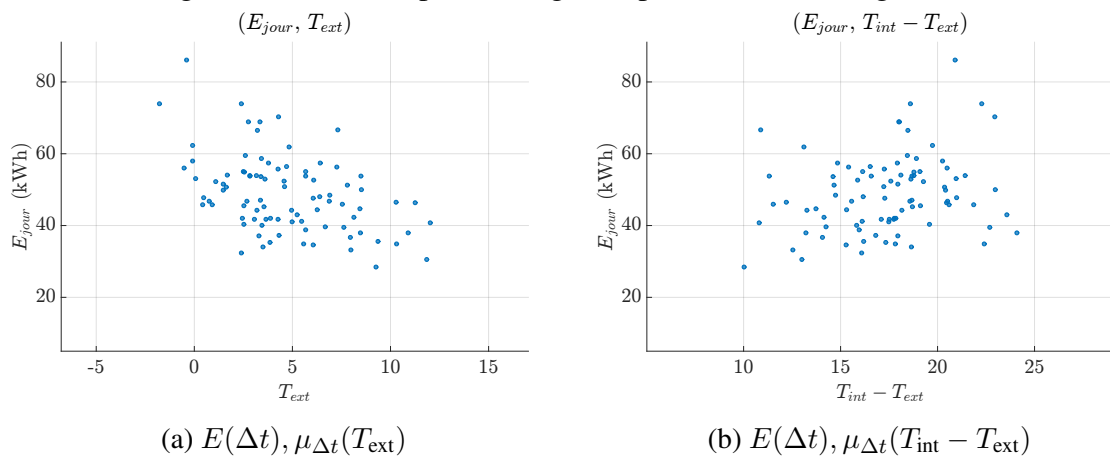


Figure B.0.11 Exemple de nuages de points obtenus - logement 12

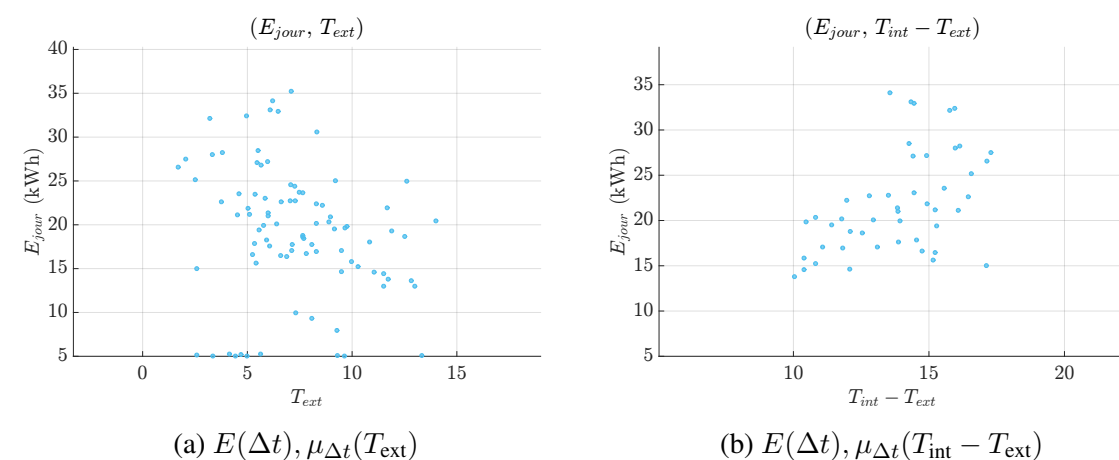


Figure B.0.12 Exemple de nuages de points obtenus - logement 13

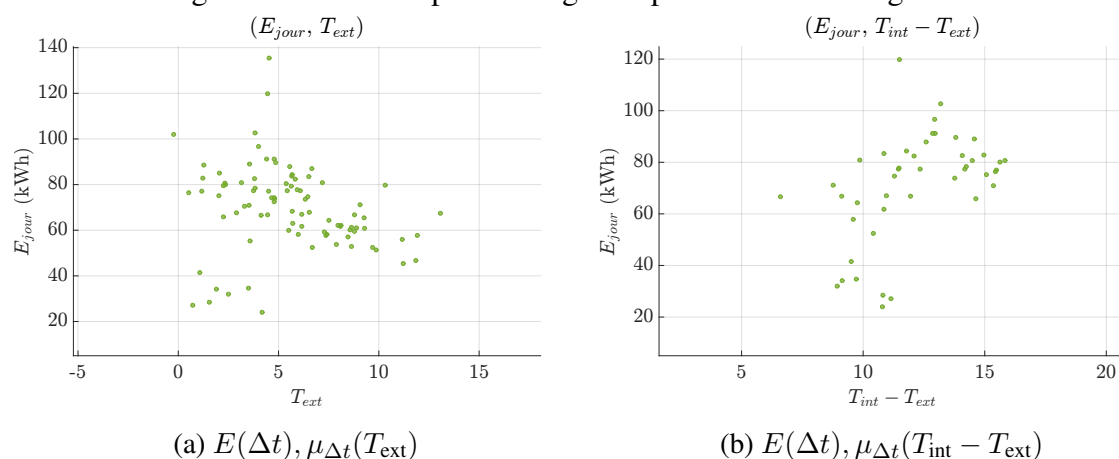


Figure B.0.13 Exemple de nuages de points obtenus - logement 14

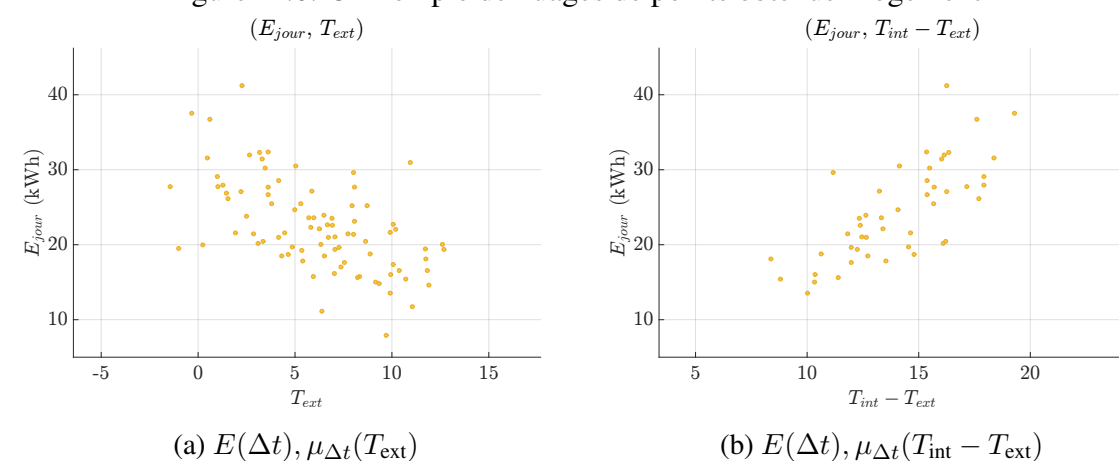


Figure B.0.14 Exemple de nuages de points obtenus - logement 15

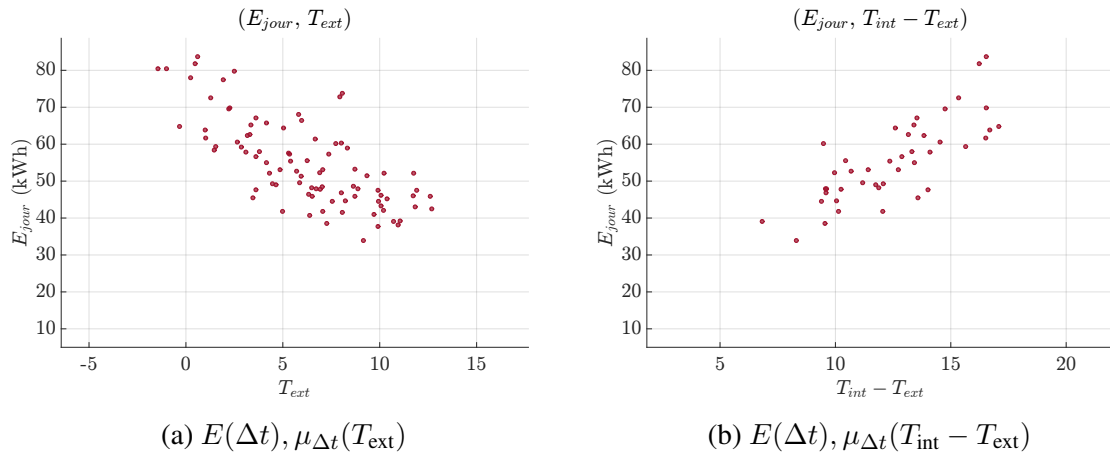


Figure B.0.15 Exemple de nuages de points obtenus - logement 16

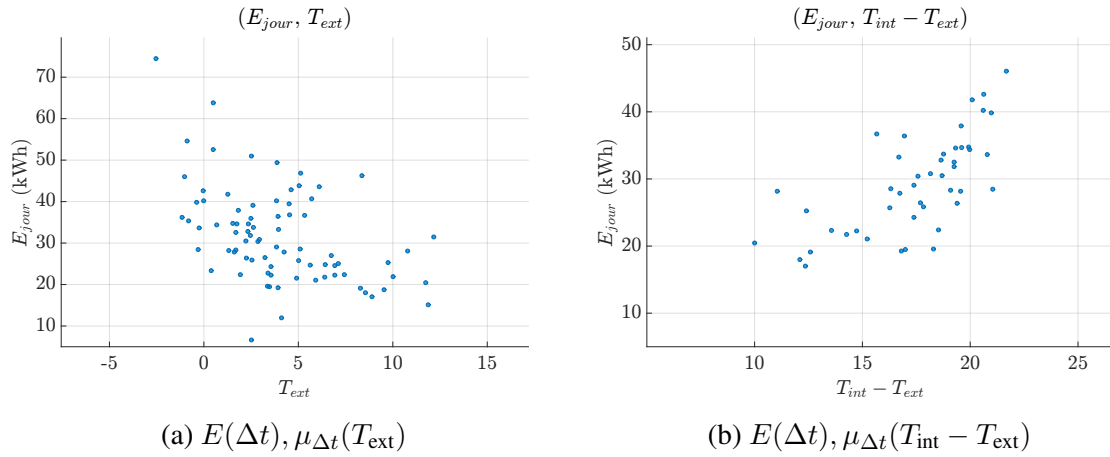


Figure B.0.16 Exemple de nuages de points obtenus - logement 17

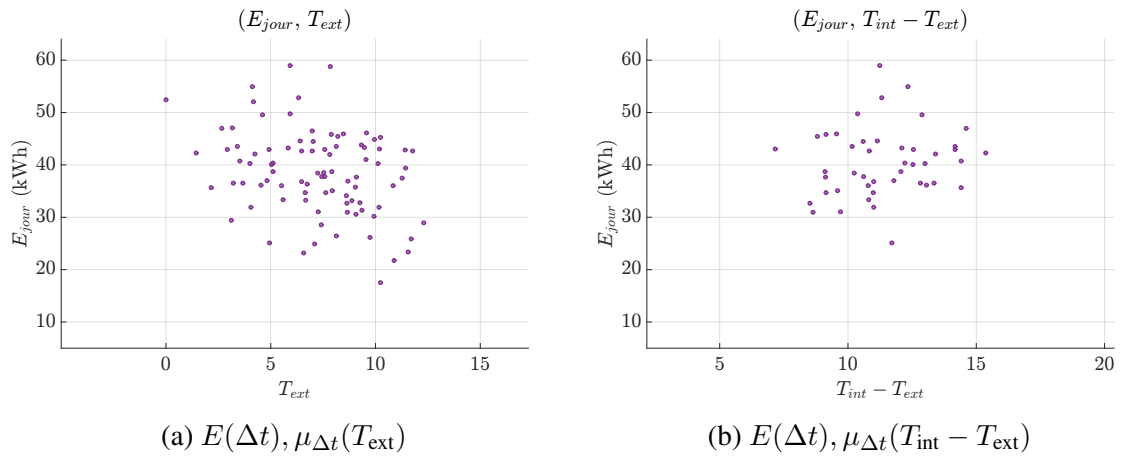


Figure B.0.17 Exemple de nuages de points obtenus - logement 18

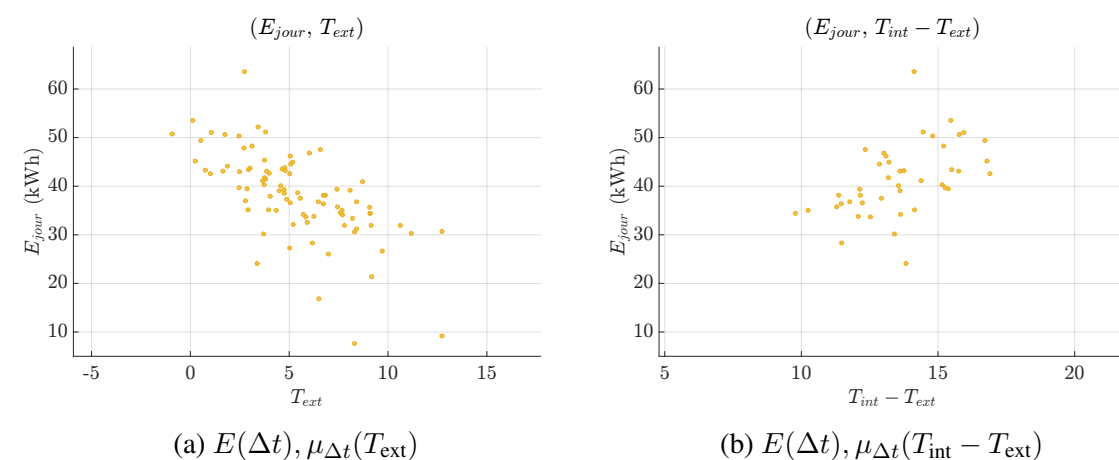


Figure B.0.18 Exemple de nuages de points obtenus - logement 19

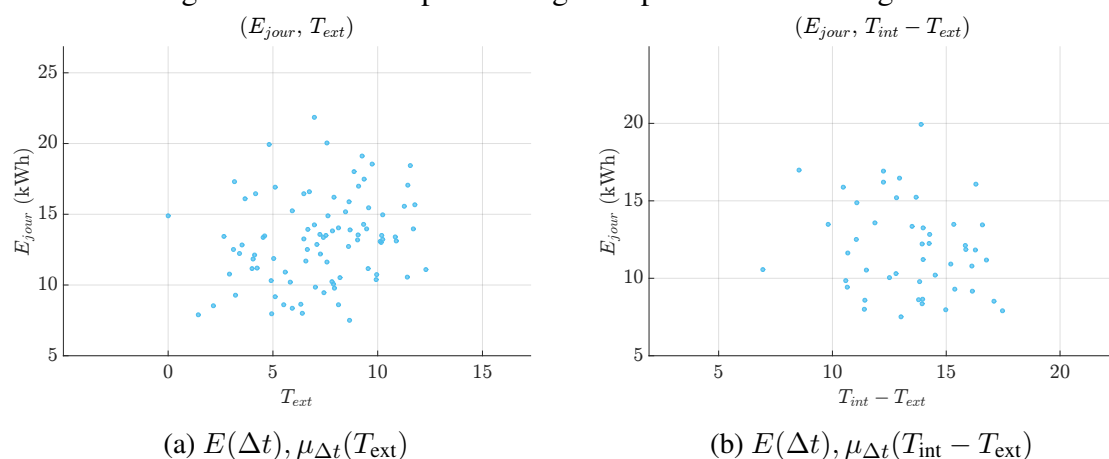


Figure B.0.19 Exemple de nuages de points obtenus - logement 20

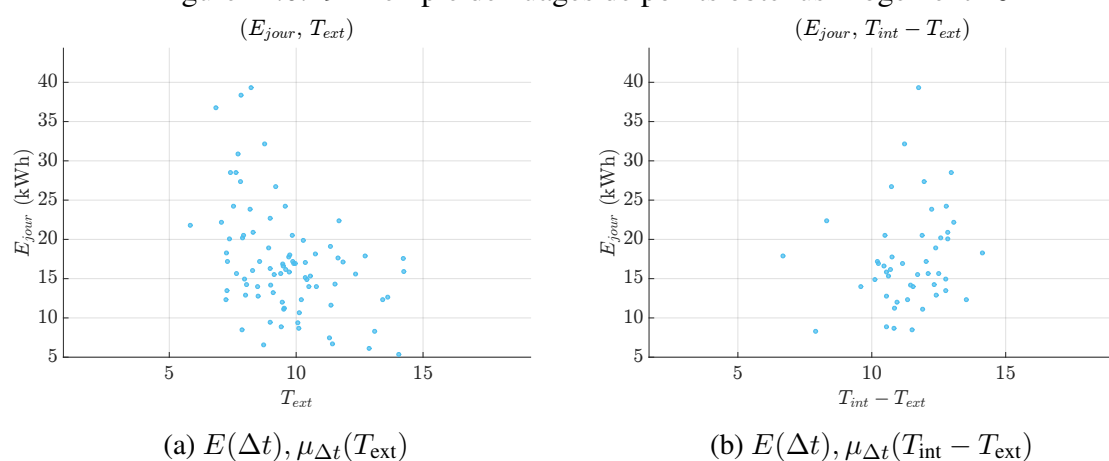


Figure B.0.20 Exemple de nuages de points obtenus - logement 21

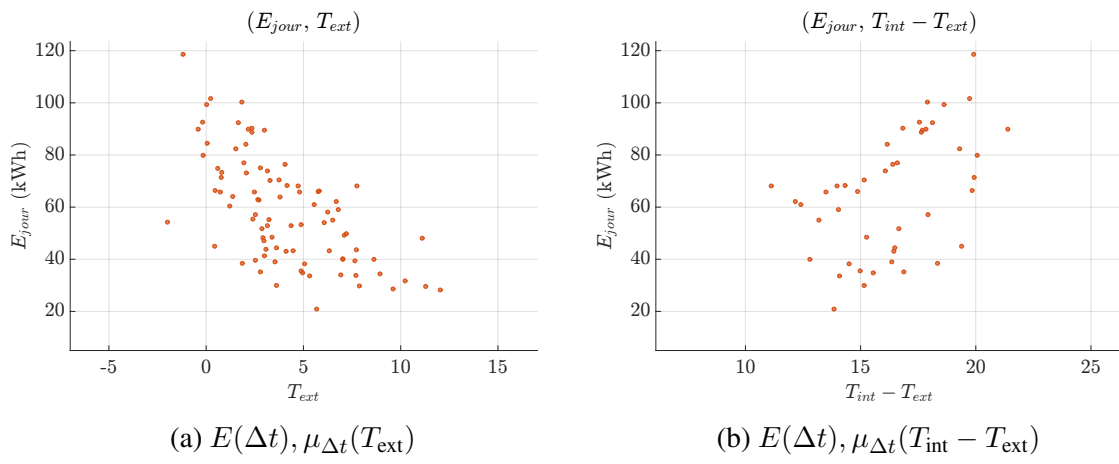


Figure B.0.21 Exemple de nuages de points obtenus - logement 22

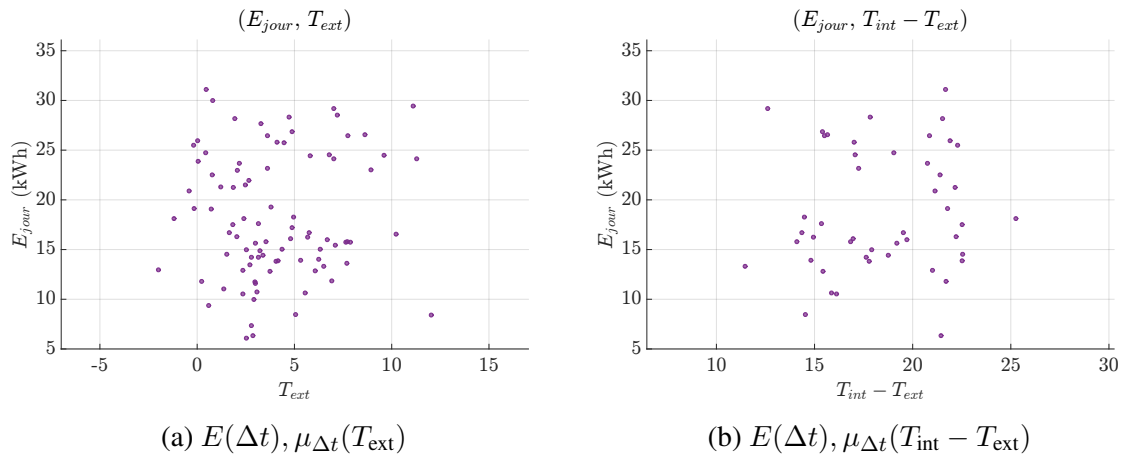


Figure B.0.22 Exemple de nuages de points obtenus - logement 23

Annexe C

Valeurs des U issues des différentes bases de données

Tableau C.1 Valeurs possibles de U pour différentes parois pour les bâtis de type *maisons individuelles* reproduites depuis l'étude PROMENLAB (l'étude complète est disponible en ligne)

	Période constructive					
	[–; 1914]	[1915; 1948]	[1949; 1967]	[1968; 1974]	[1975; 1981]	
Parois opaques						
murs extérieurs	[2,09;2,38]	[2,02;2,3]	[1,21;1,42]	[1,8;1,98]	[1,37;1,6]	[1,21;1,35]
	[2,39;2,68]	[2,34;2,62]	[2,58;3,07]	[1,42;1,62]	[1,80;1,98]	[0,93;1,05]
		[1,35;1,58]	[2,02;2,3]	[2,02;2,3]	[1,42;1,62]	[0,84;0,88]
planchers	2,6	2,6	1,16	1,21	2	1,07
	2,02	2,02	2,17	1,78	1,21	0,83
	0,98	0,98		1,18	1,18	
	[1,19;1,25]	[1,19;1,25]			[1,09;1,23]	
Pente de toiture	3,78	3,78	3,78		3,78	3,78
toit plat	2,19	2,19	2,19	1,2	1,2	0,59
				1,15	1,88	
					0,9	
plancher de comble	1,74	1,74		1,21	-	1,06
				1,74	2,11	0,83
Parois vitrées						
Vitrage simple, cadre bois	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Vitrage simple, cadre bois, volets bois		4,27	[4,27;4,53]	[4,27;4,53]	[4,27;4,53]	[4,27;4,53]
double vitrage, cadre acier						3,5
double vitrage, cadre acier, volets						[3,0;3,5]

Tableau C.2 Valeurs possibles de U pour différentes parois pour les bâtis de type *petit collectif* reproduites depuis l'étude PROMEN-LAB (l'étude complète est disponible en ligne)

	Période constructive				
	[−; 1914]	[1915; 1948]	[1949; 1967]	[1968; 1974]	[1975; 1981]
Parois opaques					
murs extérieurs	[2,11;2,34]	[1,21;1,42]	[1,37;1,6]	[3,28;3,52]	[1,8;1,84]
	[2,02;2,3]	[1,75;1,96]	[1,8;1,98]	[1,42;1,62]	1,1
	1,35	[1,42;1,62]	[2,38;2,45]	[2,09;2,14]	
planchers	2,6	1,74	2	0,81	
	0,98	1,07	1,16	1,21	
	0,98		1,13	1,18	
	[1,19;1,25]				
pente de toiture	3,78	3,78	3,78	1,2	0,59
	2,19	2,19	1,2	1,2	
toit plat			1,15 1,88 0,34		
plancher de comble	1,74	1,74	1,84	1,21	1,06
			1,23	2,11	
Parois vitrées		1,07	1,07		0,83
Parois vitrées					
Vitrage simple, cadre bois	5,2	5,2	5,2	5,2	
Vitrage simple, cadre bois, volets bois		[4,27;4,53]	[4,27;4,53]	[4,27;4,53]	
double vitrage, cadre acier					3,5
double vitrage, cadre acier, volets					[3,0;3,5]

Annexe D

Élaboration d'un modèle de présence

D.1 Présentation de l'enquête emploi du temps 2010

L'enquête *Emploi du Temps* de 2010 (*EDT2010* dans la suite) est une enquête statistique conduite par l'*INSEE* [*INSEE2010*] entre septembre 2009 et septembre 2010. Il s'agit de la 4^{ème} enquête de ce type conduite en France, et de la première édition suite à l'uniformisation des procédures de collecte et des informations collectées au niveau européen.

L'enquête vise à:

recueillir des informations précises sur l'usage que les individus font de leur temps. Il s'agit de proposer des analyses quantifiées de la vie quotidienne, que ce soit globalement (les milliards d'heures passées au travail professionnel ou domestique) ou pour des populations particulières (emplois du temps des actifs occupés, des chômeurs, des femmes au foyer, des personnes âgées, des étudiants, etc.)

L'échantillon interrogé est composé de 17800 fiches adresse. Pour la métropole, 22400 carnets journaliers ont été remplis par un peu plus de 12000 individus. En moyenne, environ 2 carnets sont remplis par chaque individu. Les modalités de choix des individus dans les ménages sont détaillées dans le document de référence disponible avec l'enquête. L'enquête comportait plusieurs volets permettant de collecter des informations relatives à l'individu et à son ménage d'appartenance. Elle n'est statistiquement pas représentative au niveau régional, nous avons donc exploité l'ensemble des carnets des individus résidant en métropole.

D.1.1 Informations disponibles

Après avoir associé à chaque carnet individuel les informations issues des questionnaires *ménage* et *individu*, on dispose d'un échantillon de 22400 carnets individuels composé d'une part de caractéristiques décrivant les individus et d'autre part de deux jeux de données *d'occupation* décrivant les activités des individus (précision demandée à 10 minutes) et le lieu où l'activité est effectuée. Pour chaque carnet, ces deux vecteurs sont de taille 162, avec une description de 21h30 à minuit le lendemain. Cette évolution par rapport à l'*EDT* édition 1999 peut permettre de mieux gérer le *recollement* des jours [*183*]. Elle n'a cependant pas été exploitée dans la suite, les carnets d'activité (variable *ACTPR*) et lieu (variable *LIEUDET*)

Tableau D.1 Heuristique pour la constitution des séries de données de présence issus de l'exploitation des variables *ACTPR* et *LIEUDET* de l'EDT 2010

État	Valeur variable
<i>AB</i>	$LIEUDET \neq 11$ (11 = <i>chez soi</i>) $LIEUDET = 11$ (11 = <i>chez soi</i>)
<i>PR</i>	et $ACTPR = 111$ (<i>sommeil</i>) ou $ACTPR = 112$ (<i>alitée, malade</i>) ou $ACTPR = 113$ (<i>Temps autour du sommeil</i>)
<i>PA</i>	autres cas

ont été réduits à une journée (144 points 10 minutes). Enfin, les individus étaient invités à indiquer une éventuelle activité *secondaire* effectuée simultanément à l'activité *principale*. L'exploitation de cette variable pourra permettre de proposer des modèles d'activités plus élaborés, intégrant des activités synchrones. Enfin, une dernière variable, relative aux personnes présentes lorsque l'individu effectue son activité pourrait être intéressante dans une perspective de modélisation des activités au niveau ménage et non plus individuel. Elle n'a cependant pas été exploitée dans la suite.

140 activités sont référencées dans les carnets, il peut s'agir d'activités domestiques, d'activité de plein air, ... et 15 lieux d'activités sont possibles. La variable *Lieu d'activité* (notée *LIEUDET*) a été transformée en variable binaire: *activité au domicile* ou *activité en dehors du domicile*. Si aucun lieu n'est indiqué, la variable a été laissée vide. L'analyse des activités nous a permis de compléter partiellement la variable dans ce cas.

D.1.2 Constitution d'un échantillon d'individus pour le modèle de présence

On construit à partir des carnets d'activités un premier échantillon de données qui servira pour la construction de notre modèle de présence, puis un second échantillon qui sera utile pour la construction du modèle d'activité. Ce second modèle dépend du premier dans la mesure où une activité ne peut être initiée ou poursuivie qu'à la condition que l'individu soit présent au domicile et dans un état *actif* (distinction par rapport aux individus dans l'état *en sommeil*).

Les variables *ACTPR* et *LIEUDET* de l'enquête sont utilisées. On définit *a priori* 3 états: *être présent et actif*, noté *PA* et repéré par le nombre 3, l'état *présent et inactif* codé par le nombre 2 et noté *PR*, et enfin l'état *absent*, noté *AB*, codé par le nombre 1. Les règles d'associations entre le remplissage des carnets et les états reconstruits sont donnés dans le tableau.

On construit ainsi un ensemble de 22400 séquences, correspondant au nombre de carnets exploités issus de l'enquête, formées de 144 points, soit un état par tranche de 10 minutes. Une séquence s_i relative au carnet i se présente sous la forme d'un vecteur de longueur 144: $s_i = [1, 1, 1, \dots, 2, \dots, 3, 3, 3, 1, 1, \dots]$

Pour chaque séquence, on dispose d'un jeu de variables décrivant certaines caractéristiques des individus, qui sont données dans le tableau D.2 (certaines variables ne sont pas pertinentes pour certains type d'individus).

Tableau D.2 Variables explicatives pour la description des individus issues de l'enquête et utilisées dans la suite

Nom variable <i>INSEE</i>	Signification
ag	âge de l'individu qui a rempli un carnet
sexe	Sexe de l'individu qui a rempli un carnet
ACTC	Activité de la personne qui a rempli un carnet
enfant	Enfant du ménage (binaire)
classif	Classification dans l'emploi de l'individu
typolog	Type d'occupation du logement
TPSJ	Météo du jour du carnet
TYPJ	Type de journée
jour	jour où le carnet a été rempli
TYPMEN15	Type de ménage détaillé au sens du TCM (15 modalités)
SURF	Superficie du logement (5 modalités)
NPIECES	Nombre de pièces du logement
couple	Vie en couple (3 modalités)
TYPLOG	Type de logement (7 modalités)
situa	Situation principale vis-à-vis du travail
tpp cor	Travail à temps complet ou partiel, corrigé
NHAB	Nombre de personnes du logement
NENFANTS	Nombre d'enfants dans le ménage
CSMEN	Catégorie socioprofessionnelle du ménage
TYPVOIS	Type d'habitat au voisinage du logement (5 modalités)
EXEJ	Caractère exceptionnel de la journée (binaire)
cs24	Catégorie socioprofessionnelle regroupée individuelle (24 modalités)
mois	mois de remplissage du carnet
horai	Fréquence des horaires de travail journaliers (4 modalités)
samed	Travail le samedi
diman	Travail le dimanche
merc	Travail le dimanche
lieuw	Lieu d'exercice de l'activité (9 modalités)
lieumidi	Lieu le plus fréquent du déjeuner (9 modalités)
MRD	Revenu mensuel total (10 modalités)

D.2 Modèle de présence

D.2.1 Identification des typologies de présence

Dans les modèles de présence utilisés pour la simulation thermique, nous avons identifié deux types de scénarios de présence, à savoir les scénarios à deux états et ceux à trois états.

Deux raisons peuvent être avancées pour la recherche de scénarios à trois états (présent et actif, présent et en sommeil, absent). La première raison est qu'il peut être pertinent de distinguer les niveaux d'apports internes relatifs aux états de type *actif* par rapport à ceux de référence dans le cas du *repos*. La seconde raison est que ces modèles de présence servent en général de signal d'entrée pour les modèles d'activités des occupants, ainsi l'état *présent dans le logement et en sommeil* correspond à une activité pour laquelle on peut définir directement un niveau d'apport interne déterminé et aucun équipement domestique dont les dégagements de chaleur sont significatifs ne sera envisagé, ce qui justifie la non nécessité de définir cet état comme un état déterminant en terme d'activité et permet d'utiliser la sortie du modèle de présence indépendamment de celle du modèle d'activité.

La méthode d'identification des typologies de scénarios de présence repose sur l'identification de trajectoires de présence similaires au sein de notre échantillon. Dans ce cadre, la question des états est essentielle et peut être reformulée de la manière suivante: l'état "présent, en sommeil" est-il déterminant de certains modes de vie? Dans l'affirmative, il convient de l'intégrer au modèle, autrement cet état ne devrait pas apparaître et notre choix devrait alors se porter naturellement sur un modèle à deux états. Dans le cas contraire, cet état n'est pas informatif pour la distinction des typologies et pourrait introduire un biais dans notre approche.

Dans la proposition de modélisation développée par Aerts [6], on constate que les deux états déterminants à la fois du motif des groupes et de leur dénomination sont l'état *présent* et l'état *absent*. Pour les groupes dont les individus sont *plutôt présents* la nuit, on observe que les horaires de coucher et lever sont assez similaires. Toutefois un groupe composé d'individus qualifiés de *absent la nuit* est identifié. La taille de ce groupe (profil d'individu) est de l'ordre de deux fois plus petite que celle du type de profil de présence le moins peuplé suivant.

Compte tenu de ces remarques, nous avons privilégié un modèle à 3 états. Ce choix nous permet d'une part éventuellement de distinguer les profils d'occupations selon l'heure de la journée si ce type de profil existe dans l'échantillon et d'autre part de simplifier la démarche pour la construction du modèle d'activité en ne prenant pas en compte l'activité *être au repos* pour laquelle les gains internes sont faibles en comparaison de ceux pour les autres activités. Le choix de la similitude, qui est décrit dans la partie D.2.1.2, nous a permis de rediscuter ce choix.

D.2.1.1 Échantillon de carnets à traiter

Bien que nous ayons traité les données issues de l'enquête, et malgré les filtres utilisés, l'échantillon des carnets disponibles demeure trop important pour être traité en un temps raisonnable avec un ordinateur de bureau, d'autant que dans un premier temps, nous envisageons plusieurs variantes afin de s'assurer de la robustesse de la méthode: avec plus de

25000 carnets disponibles, appartenant à environ 10000 individus, il est nécessaire de limiter la taille de l'échantillon à traiter.

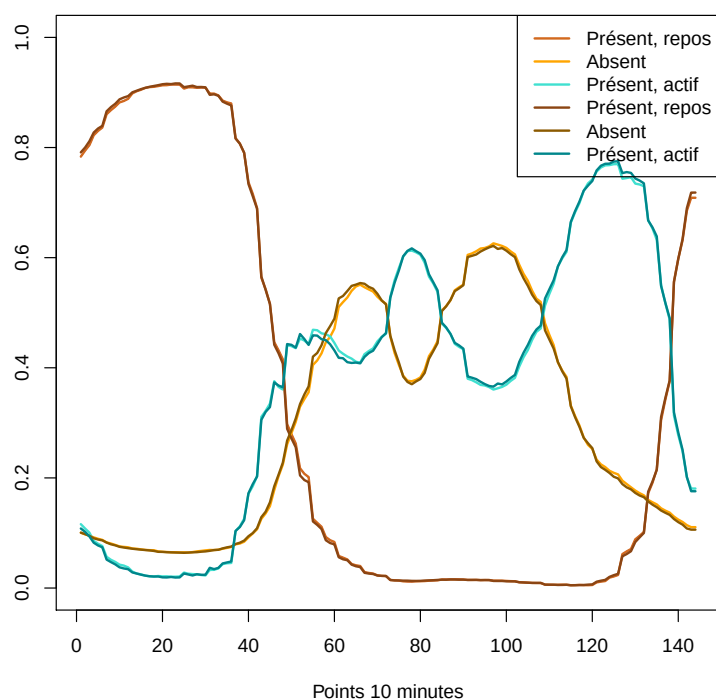


Figure D.2.1 Profils moyens en coupant l'échantillon en 2 groupes avec tirage aléatoire sans remise

Dans ce but, nous pouvions envisager deux méthodes: soit partitionner aléatoirement l'échantillon de départ, pour former deux sous-échantillons équivalents, ce qui est possible si la taille critique de l'échantillon est inférieure à deux fois la taille de celui disponible. C'est le choix qui a été retenu dans [100] par exemple et qui est envisageable avec nos données. On a représenté sur la figure D.2.1 la superposition des profils moyens de chaque états de deux échantillons de même taille dont les individus ont été tirés aléatoirement. On constate que l'écart entre ces profils est faible. Ce choix peut permettre de constituer un échantillon utilisé pour la validation dans la suite. La méthode de construction des profils de présence mise en œuvre dans le cadre de ce travail impose de former des sous-groupes ainsi, diviser l'échantillon de départ suivant une variable dont on sait qu'elle est un déterminant des profils de présence peut être une stratégie intéressante. Deux variables se démarquent systématiquement dans les modèles de présence développées à partir d'analyse d'enquêtes emploi du temps: le type de jour et le type d'emploi [6, 88, 122, 145, 182].

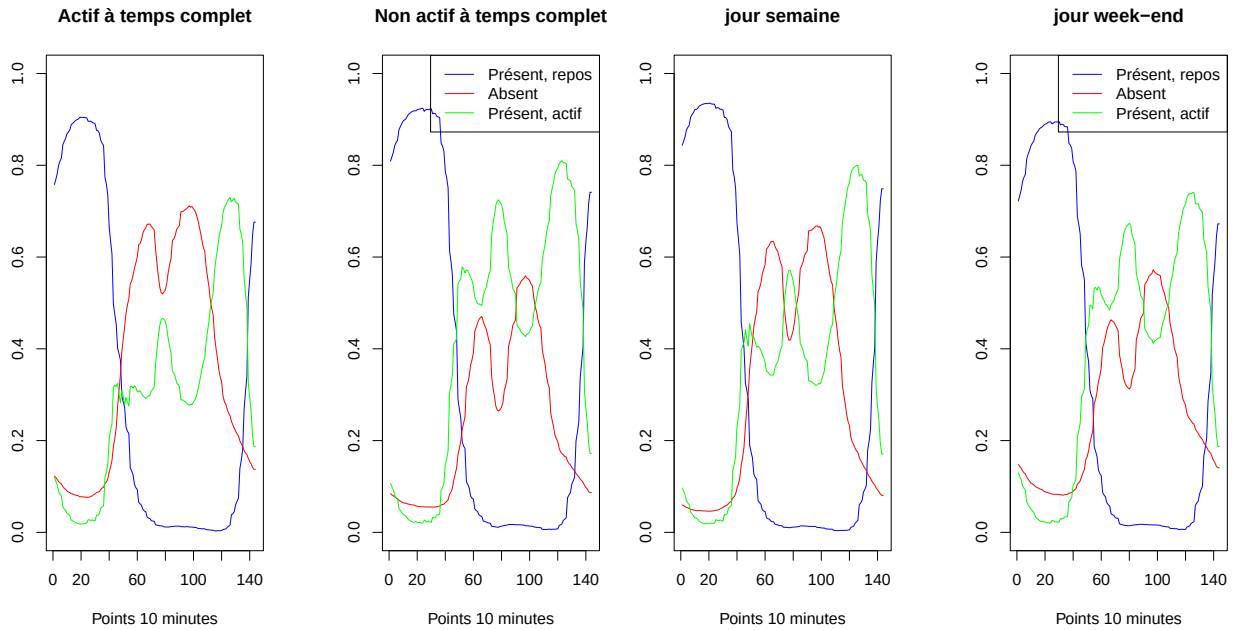


Figure D.2.2 Profils obtenus pour les échantillons $E_{a,ft}$ et E_c

Figure D.2.3 Profils obtenus pour les échantillons Ech_S et Ech_{WK}

Pour le type de jour, après une analyse *a priori* des profils de présence suivant le jour, le mois, le type de jour (semaine/week-end) et les résultats présentés dans [6], nous avons choisi de distinguer jour de semaine / jour de week-end:

1. Ech_S désigne l'échantillon des jours de semaine
2. Ech_{WK} désigne l'échantillon des jours de week-end

Pour le type d'emploi, nous avons choisi de distinguer les individus selon qu'ils occupent ou non un emploi à temps plein. On note donc:

- $E_{a,ft}$: Individus *actifs ayant un emploi à temps plein*
- E_c : Individus n'ayant pas l'attribut *actifs avec un emploi à temps plein*. Ce groupe contient à la fois des individus ayant un emploi à temps partiel et des individus n'ayant pas d'emploi (chômeurs, personne au foyer, retraités,...)

On conserve pour la suite les deux variantes (jours de semaine/jours de week-end) et (actifs, temps complet/non actifs temps complet). La taille relative de chaque échantillon selon la subdivision est schématisée sur la figure D.2.4.

D.2.1.2 Choix d'une similitude

Le choix de la similitude est une étape clef dans les méthodes de classification non supervisée car les résultats peuvent être sensibles à ce choix et l'interprétation des groupes issus de la classification se fait nécessairement par rapport à la définition de *proximité* qui a été choisie.

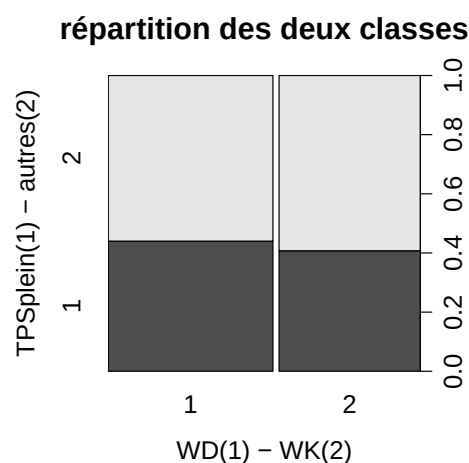


Figure D.2.4 Répartition du statut face à l'emploi à temps plein et des jours semaine/week-end

Parmi les similitudes existantes, les variantes construites à partir de la *distance de Hamming* présentent un intérêt particulier pour l'analyse de la dynamique des individus dans le temps (présence/absence du logement dans un premier temps). La distance de *Hamming* permet de comparer deux chaînes de caractères de longueur identique, la mesure donnée est une image directe du nombre de changements nécessaires pour transformer la première chaîne en la seconde.

Une seconde variante consiste à définir trois opérations possibles pour passer d'une chaîne à une autre, une seule opération étant possible à chaque caractère. Dans ce cas, il n'est plus nécessaire de disposer de chaîne de même longueur en proposant une opération de type *insertion*:

1. *Insertion*: consiste à ajouter un caractère à l'une des chaînes initiale
2. *Suppression*: consiste à supprimer un caractère de la chaîne
3. *Substitution*: consiste à remplacer un caractère par un autre

En construisant une matrice de distance entre deux séquences s_i et s_j , on détermine la similitude entre les deux séquences qui est le nombre minimal d'opérations nécessaires pour passer d'une chaîne à l'autre. On parlera dans la suite de *distance de Levenshtein* ou distance *OM* (*Optimal Matching*) pour désigner une similitude pour laquelle les 3 opérations décrites ci-dessous sont possibles, et dont le poids attribué à chaque opération est *a priori* distinct. Par exemple, le poids de l'opération d'*insertion* est de 1 tandis que le poids de l'opération *substitution* est de 2.

Lesnards [100] propose une interprétation intéressante des différents types opérations possibles dans une approche sociologique, illustrée sur des cas d'études de certaines *trajectoires de vie*¹, qui est reproduite dans le tableau D.3 dans lequel la notation *indel* désigne les

¹Études portant sur le repas dans la soirée et le temps de travail

Tableau D.3 Interprétation des différentes similitudes proposées par Lesnards. Source: [101]

	Indel	Subs
Préservé	Événements	Temps
Altéré	Temps	Événements

Tableau D.4 Similitudes testées

Similitude	Coût <i>Indel</i>	Coût <i>substitution</i>	Remarques
S_1 (Type Lev 1: 2etats)	1	$PA \rightarrow PR : 0$ $PR \rightarrow PA : 0$ sinon 2	Choix qui traduit l'équivalence des états PA et PR
S_2 (Type Lev 1: ct)	1	2	
S_3 (Dynamic Hamming: dyn)	Variable	Variable	Utilisé pour l'étude des routines de travail dans [104]
S_4 (Type Lev 2: trate)	1	impossible	

opérations *insertion ou suppression*, *subs* désigne l'opération de substitution. L'opération *indel* s'interprète en sciences sociales comme une *modification temporelle* permettant d'*aligner des évènements identiques* tandis que l'opération de *substitution* modifie le type d'évènement mais pas les instants de transitions d'un évènement à un autre.

Dans [6] plusieurs variantes ont été testées sur la base de l'exploitation de l'enquête *emploi du temps* belge de 2005 et il a été montré que les groupes obtenus avec les 6 variantes de poids sont assez similaires². On notera également l'existence d'une 4^{ème} version intéressante dans le cadre de ce travail: l'*optimal matching dynamic hamming*. Le principe et l'intérêt de cette variante pour l'analyse d'emploi du temps est détaillé dans [101], il consiste à affecter aux différentes opérations un poids *dynamique* en fonction de la durée des sous-séquences sans changement d'activités (durée à état inchangé).

Dans ce contexte, nous avons retenu 4 variantes de similitudes dont les spécificités et le paramétrage sont détaillés dans le tableau D.4. La variable *Indel* désigne le coût attribué aux opérations d'insertion et suppression. Dans la variante S_1 , le poids de la substitution entre les états "présent, actif" et "présent, en sommeil" est nul, ce qui veut dire que les deux états sont équivalents. C'est cette option qui nous a permis de conserver les trois états dans le

²Le poids de l'opération de substitution était toujours le même

modèle de présence sans "bruiter" les typologies du fait de la présence de l'état *sommeil*.

À l'issue de cette étape, 8 variantes sont envisagées, selon la méthode de subdivision de l'échantillon de départ et selon la similarité choisie pour définir la notion de proximité.

D.2.1.3 Méthode de classification

Pour identifier les typologies de profil de présence, on fait le choix d'une méthode de classification ascendante hiérarchique (notée *CAH* dans la suite) (même choix que dans [102] et [6]): cette méthode s'étant révélée bien adaptée pour la classification de *parcours de vie* [146]. Des détails sur le principe de la méthode et les choix du paramétrage sont disponibles dans [115]. Dans le paragraphe suivant, nous précisons le paramétrage de la classification.

Paramétrage de la CAH Parmi les méthodes d'agrégation possibles, nous avons identifié ³:

- Critère de Ward (*W*)
- Critère du lien complet (*C*)
- Critère du saut minimum (*UPGA*)
- Critère du saut maximum (*WPGA*)
- Critère de saut moyen pondéré/non pondéré flexible (le coefficient de paramétrage est noté β dans la suite)

Comme vu dans la partie D.1.2, nous avons fait le choix de conserver dans les échantillons un certain nombre de parcours atypiques (par exemple les jours *exceptionnels*), ainsi les critères de saut minimum et maximum risquent de produire des groupes peu robustes. Lesnards [104], en s'appuyant sur les travaux de Milligan [115] propose d'utiliser le critère du saut moyen pondéré flexible, avec $\beta = 0.25$, de même que dans [65]. Afin de s'assurer de la robustesse des résultats [146], nous avons conservé quatre critères *a priori* pour l'agrégation qui sont reproduits dans le tableau D.5.

À l'issue de cette étape, on a donc envisagé 16 variantes selon les paramètres choisies pour la recherche des profils (4 variantes de similitudes, 4 méthodes de partitionnement de l'arbre), qu'on propose de tester pour deux choix de découpage initial de l'arbre, soit 32 variantes possibles.

³<http://www.jybaudot.fr/Analdonnees/agregcah.html>

Tableau D.5 Critères d'agrégation retenus

Critère	Notation	Remarques
Ward	W	
Complet	C	Tend à former des groupes avec effectifs homogènes
Moyenne non pondérée, $\beta = 0$	UPGA	Elle tend à réunir des clusters aux inerties faibles
Moyenne pondérée, $\beta = 0$	WPGA	Pondère chaque lien point à point en fonction du poids des clusters d'appartenance
Beta flexible, $\beta = -0.25$	$\beta_{0.25}$	Bien adapté pour l'étude des trajectoires

Découpage de l'arbre Les stratégies de découpage de l'arbre ont fait l'objet de nombreuses études, une revue des différents indicateurs peut être consultée dans [49]. Des critères basés sur le calcul d'indicateurs tels que le *HC* ou un critère quadratique type R^2 peuvent être envisagés. Le suivi de l'évolution de ces indicateurs selon le nombre de groupes formés montre la difficulté liée au partitionnement de l'arbre et la sensibilité de ce choix, ce qui est illustré sur la figure D.2.5 où on représente l'évolution des indicateurs les plus communément utilisés pour le choix du nombre de groupe d'une classification non supervisée de type *CAH* avec la similitude S_2 (paramètres 2/1/1) et l'échantillon $E_{a,ft}$. La correspondance pour les indicateurs utilisés est donnée dans le tableau, elle est issue de [49].

On remarque en analysant les groupes qu'à mesure que le nombre de groupes augmente, l'effet n'est pas le même suivant la méthode de partitionnement: lorsque le critère du lien *complet* est choisi, les effectifs des groupes formés sont relativement équilibrés tandis que les méthodes du saut conduisent plutôt à la création de groupes comportant peu d'individus mais dont le profil est nettement différencié du profil moyen global. Par conséquent, avec les méthodes de type *saut pondéré*, le nombre de groupe choisi est structurellement plus important qu'avec la méthode du lien complet, et certains groupes formés, dont l'effectif est trop faible ne pourront pas être exploités ensuite. On retrouve donc avec les données exploitées les principaux effets des différentes méthodes d'agréations testées (voir colonne *remarques* du tableau D.5).

On représente les profils selon les 3 états (repos, absent, présent et actif) des groupes identifiés de l'échantillon $E_{a,ft}$ avec la similarité dont les coûts sont 1/1/2, pour deux méthodes de partitionnement de l'arbre: méthode de *Ward*, la méthode du lien *complet*, le critère du lien moyen non pondéré (*WPGMA*), et méthode du lien pondéré avec $\beta = 0.25$, en choisissant pour les 4 cas de former 8 groupes sur les figures D.2.6, D.2.7, D.2.8 et D.2.9. Les effectifs de chaque groupe sont issus de l'exploitation de 10386 carnets et sont données pour chaque profil; les valeurs indiquées sur l'axe des abscisses correspondent aux points 10min d'une journée.

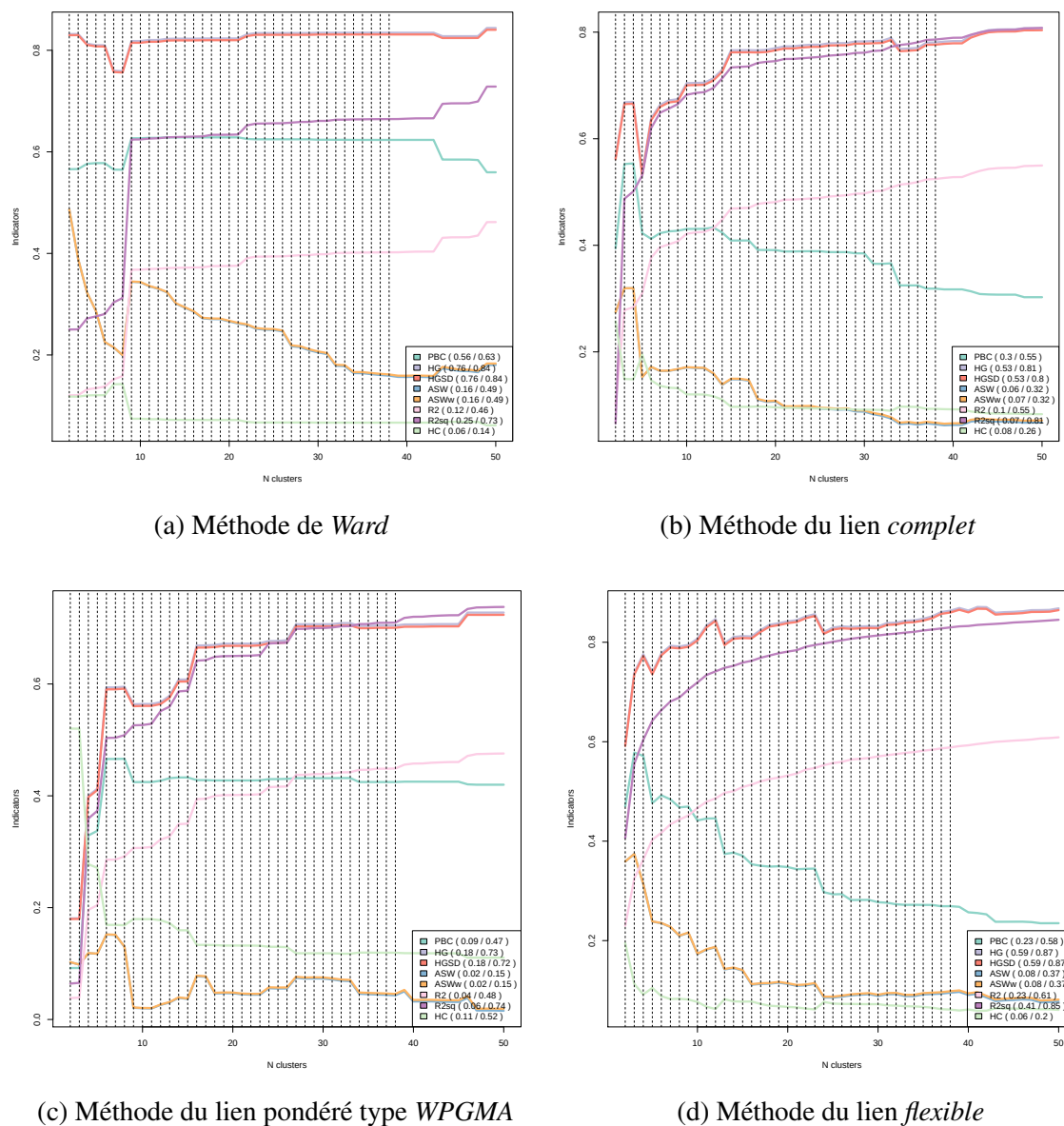


Figure D.2.5 Évolution des indicateurs les plus couramment utilisés pour déterminer le nombre de groupes à former pour les 4 méthodes d'agréations, similitude S_2 , échantillon $E_{a,ft}$

On représente pour l'échantillon Ech_S ne comportant que les jours de semaine l'évolution des effectifs de chaque groupe formé pour un nombre de groupe allant de 2 à 28 selon le choix de la similitude et de la méthode de découpage de l'arbre sur la figure D.2.10. Seuls les groupes comportant au moins 200 individus sont représentés. On retrouve les effets connus des méthodes de regroupement de type *ward* et *WPGMA*.

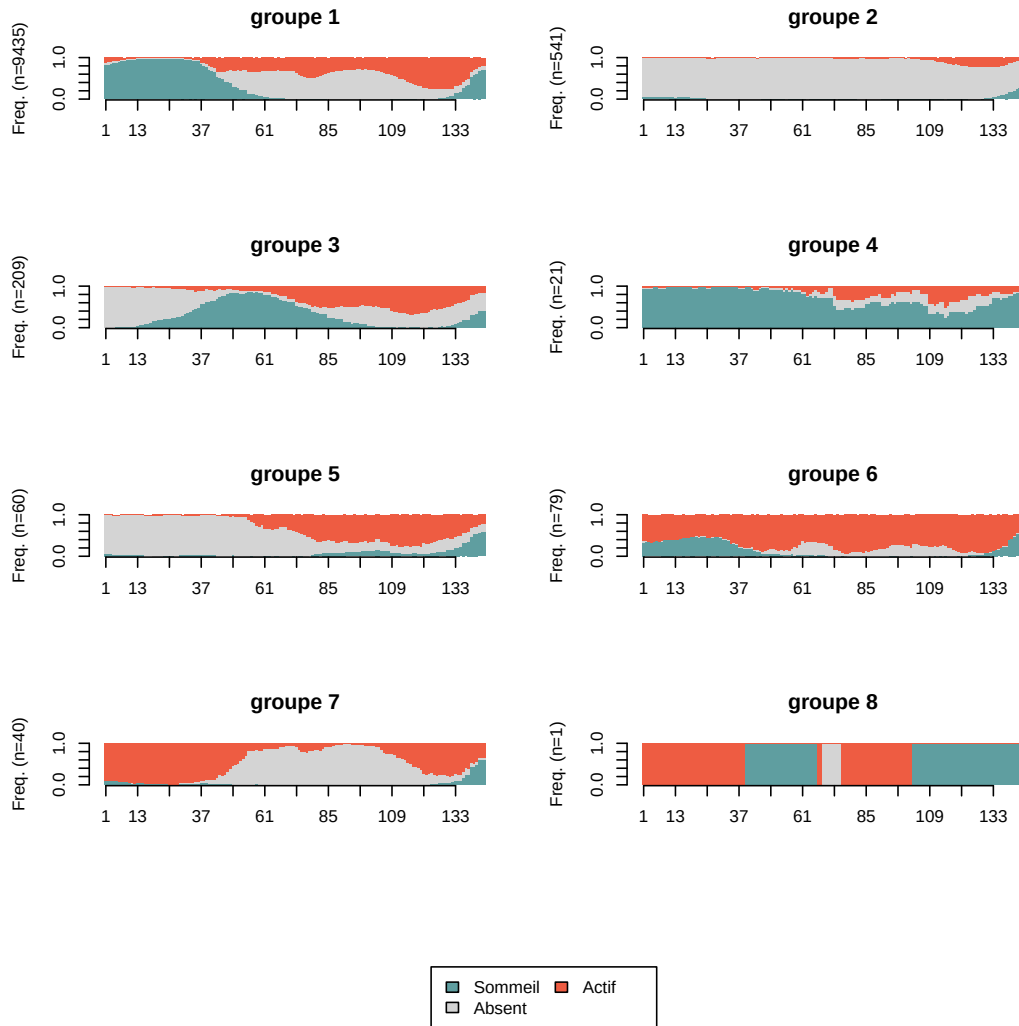


Figure D.2.6 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien moyen, et 8 groupes

On peut voir que la classification paraît en revanche plus robuste par rapport au choix de la similitude que par rapport à la méthode de regroupement. Cette remarque reste toutefois qualitative. Pour ces deux critères, on constate qu'à partir d'une dizaine de groupes, le nombre de groupes significatifs (selon le critère arbitrairement fixé d'un nombre minimal d'individus de 200) n'évolue sensiblement plus, ce qui donne déjà une idée d'un nombre de groupes *stables* qu'il est possible de constituer avec notre échantillon.

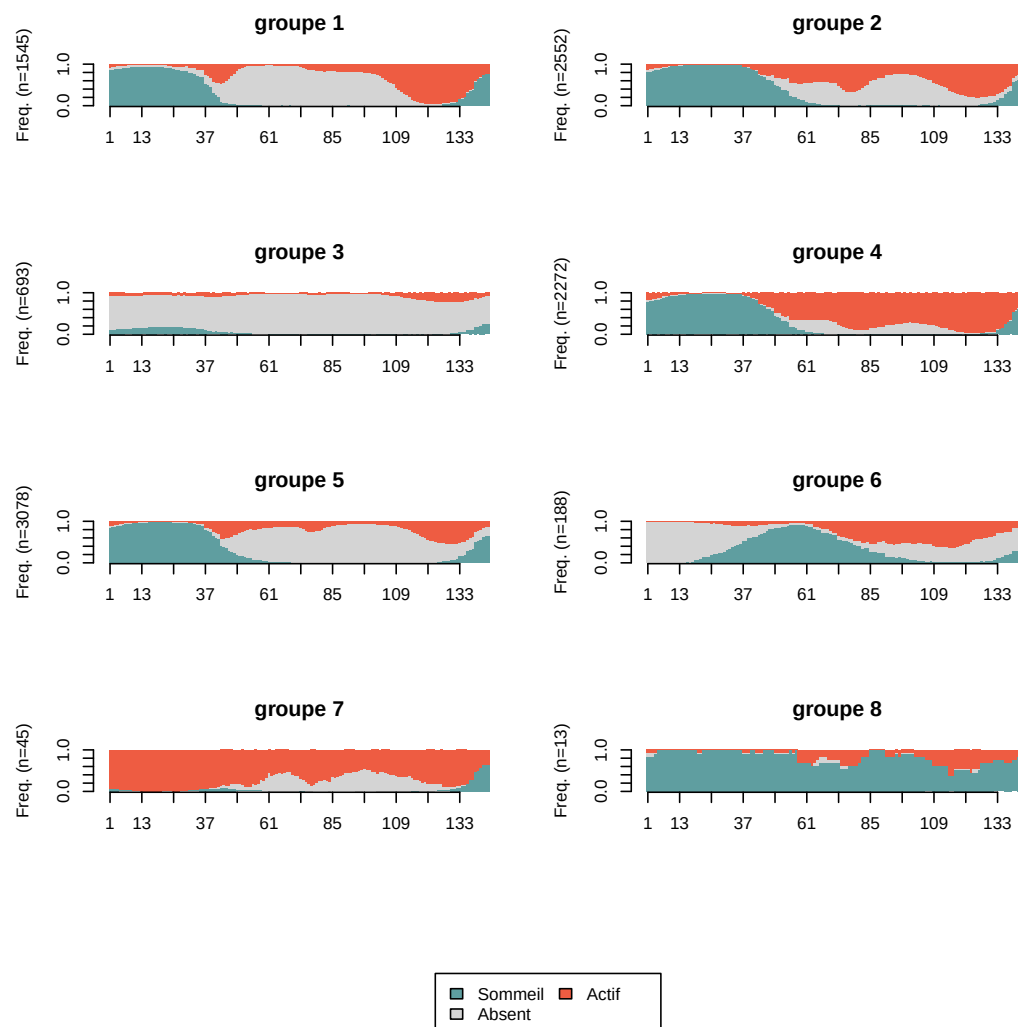


Figure D.2.7 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien complet, et 8 groupes

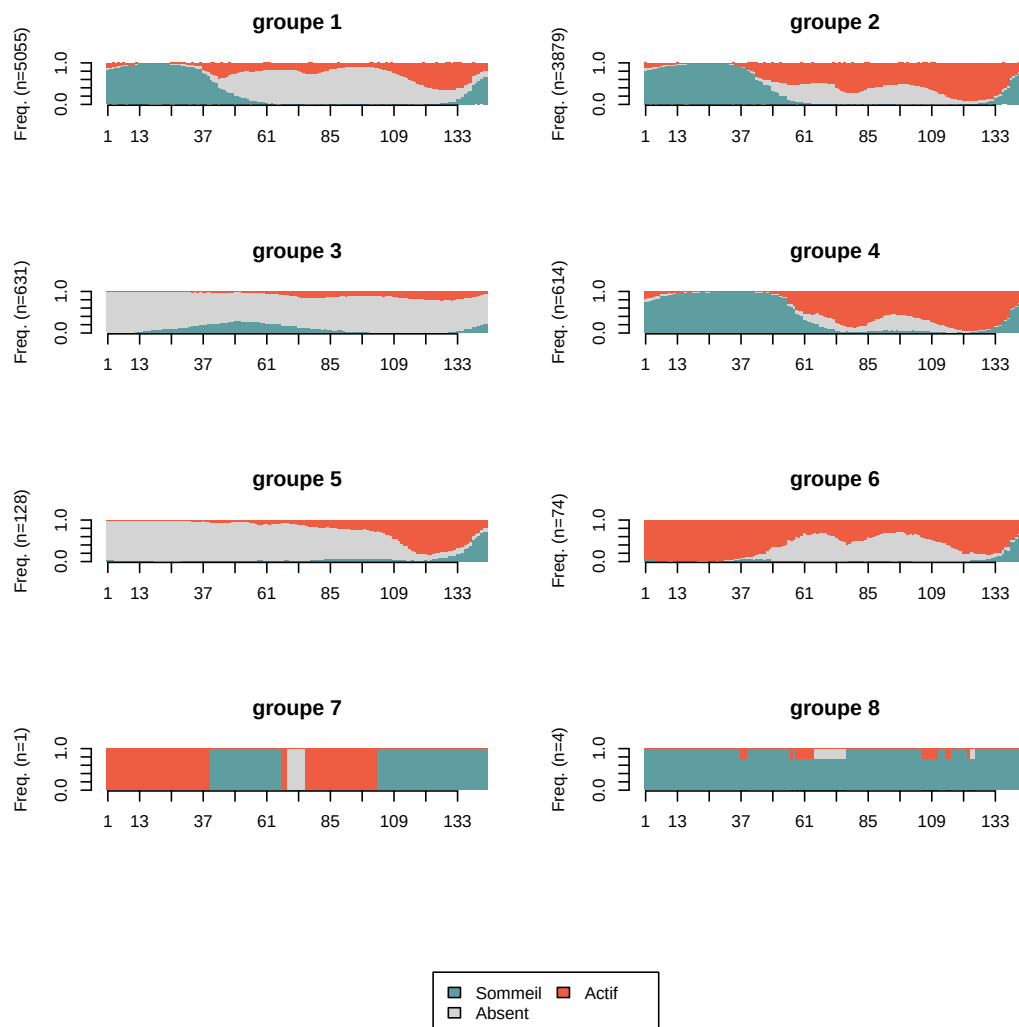


Figure D.2.8 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien moyen pondéré, et 8 groupes

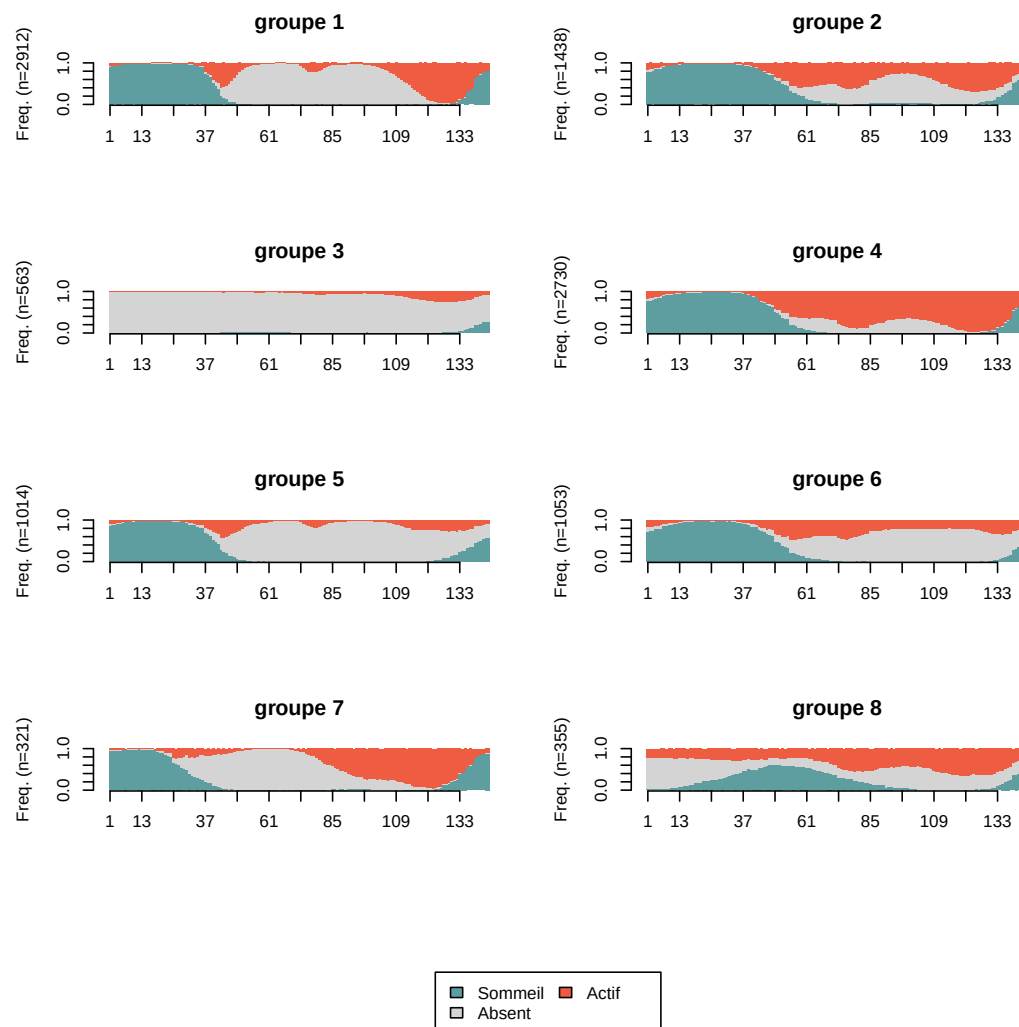


Figure D.2.9 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien flexible - $\beta = 0.25$, et 8 groupes

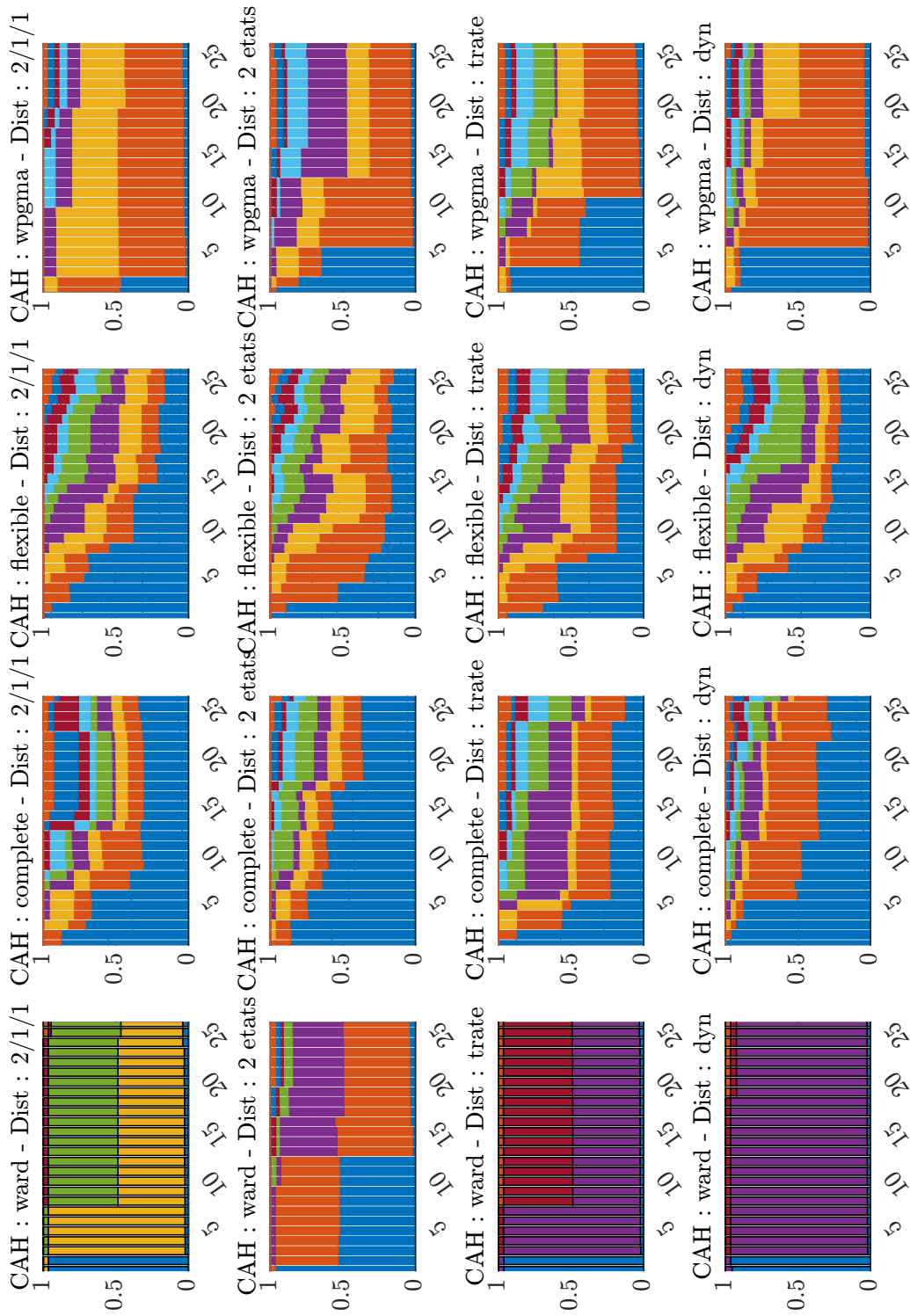
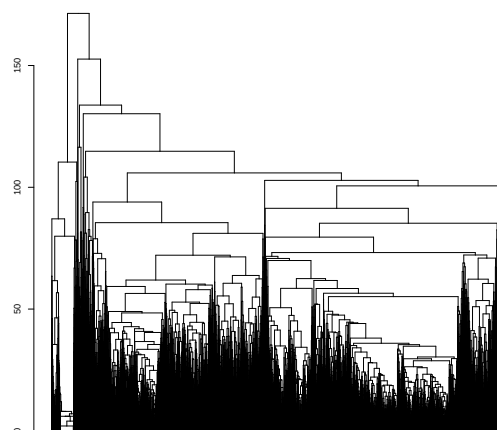
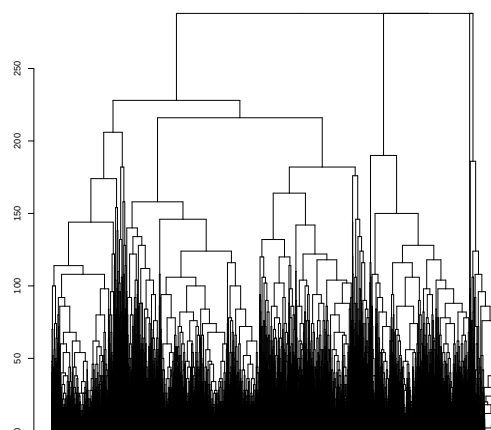


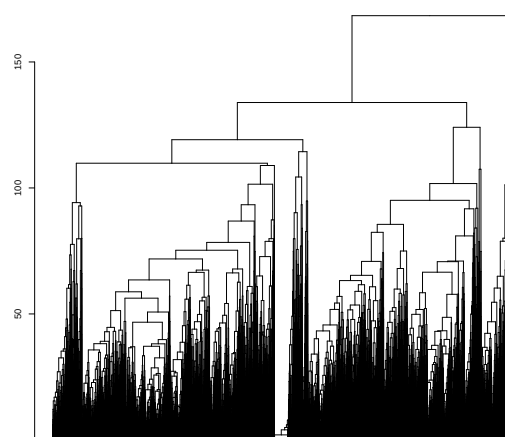
Figure D.2.10 Effectifs des groupes formés selon le nombre de classe (2 à 28) pour différents paramètres de classification



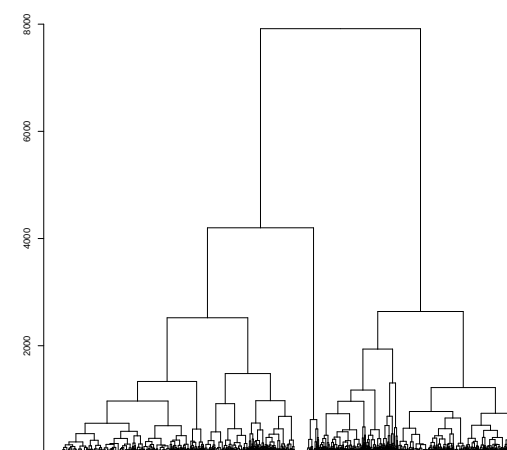
(a) Méthode de Ward



(b) Méthode du lien complet



(c) Méthode du lien pondéré type WPGMA



(d) Méthode du lien flexible

Figure D.2.11 Arbres construits avec 4 méthodes de regroupement

On donne l'allure des arbres obtenus pour les 4 méthodes de regroupement, avec l'échantillon $E_{a,ft}$ et la similitude S_2 (paramètres 2/1/1) sur la figure D.2.11.

Les méthodes du lien *complet* et *pondéré flexible* donnent des groupes plus équilibrés, elles ont donc été privilégiées dans la suite du travail. On présente dans la suite les résultats obtenus avec l'échantillon $E_{a,ft}$ (ensemble des individus ayant un emploi à temps plein). La méthode d'agrégation retenue est de type *flexible* avec $\beta = 0.25$. Ce choix résulte dans la formation de groupes plus équilibrés en terme d'effectifs qu'avec les autres méthodes. D'après la figure D.2.5, il semble que l'ordre de grandeur du nombre de groupes (profils) à rechercher soit d'une dizaine. Au delà de ce seuil, on constate que ce sont plutôt les groupes

de faible effectif qui sont à nouveau scindé, ce qui est attendu compte tenu de la méthode de classification (effet lié à l'inertie intra-classe des groupes).

D.2.1.4 Choix retenus pour l'identification des trajectoires

On retient la méthode du lien complet pour la suite, compte tenu de l'analyse qualitative proposée dans la partie D.2.1.3.

Afin de choisir le nombre de groupes (soit la hauteur de découpage de l'arbre issu de la classification), on s'intéresse à l'évolution de l'inertie suivant le nombre de groupes formés. Un choix satisfaisant consiste à choisir le nombre de groupes juste après un *saut d'inertie* important et à partir duquel les sauts d'inertie suivants sont plus faibles. Cette approche est donc basée sur l'analyse des *distances* entre les différentes classes, la notion de distance étant issue du choix de la méthode d'agrégation. Une fois ce nombre de groupes choisi, on analyse *a posteriori* les classes formées. Comme nous cherchons à identifier des *typologies de présence*, on ne conserve que les groupes qui contiennent *suffisamment* d'individus pour pouvoir ensuite être exploités. Le critère retenu est basé uniquement sur le nombre d'individus de chaque groupe: seuls les groupes composés d'au moins 200 individus sont conservés.

Avec ces hypothèses, on identifie 8 profils de présence avec l'échantillon $E_{a,ft}$ et la similitude S_2 .

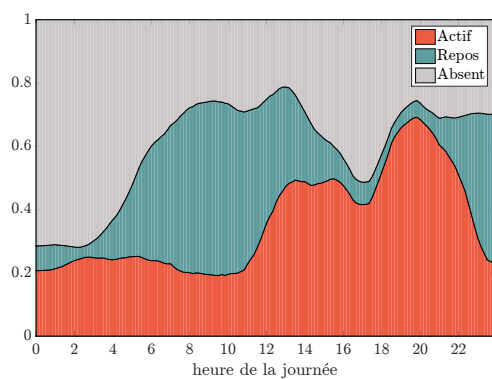
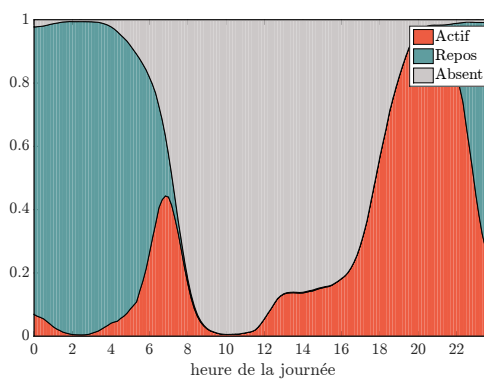
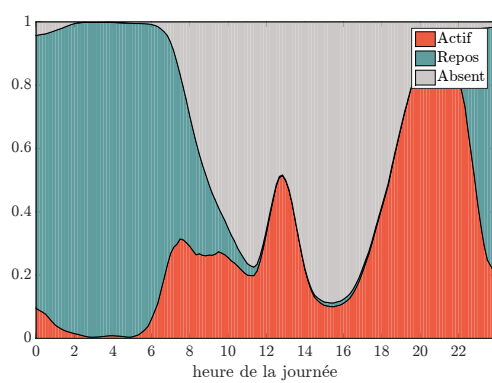
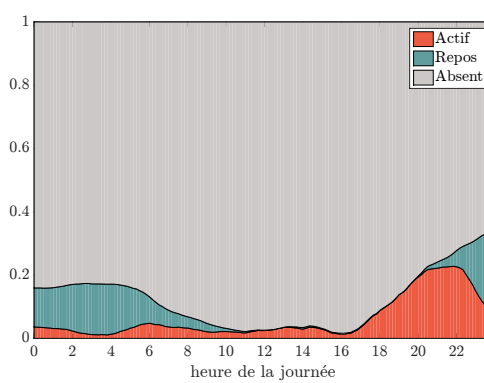
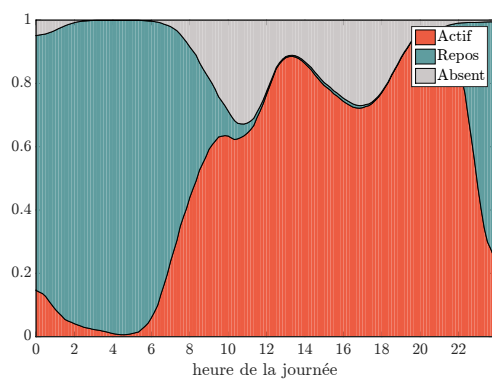
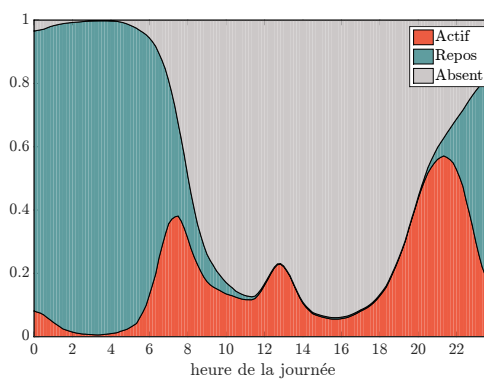
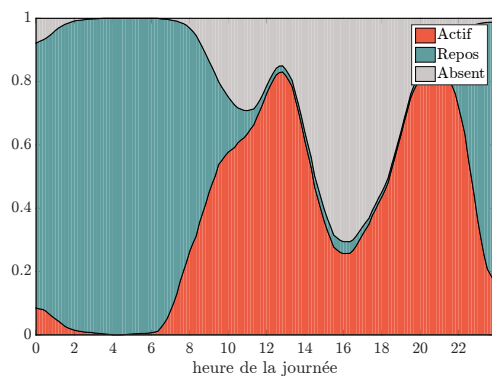
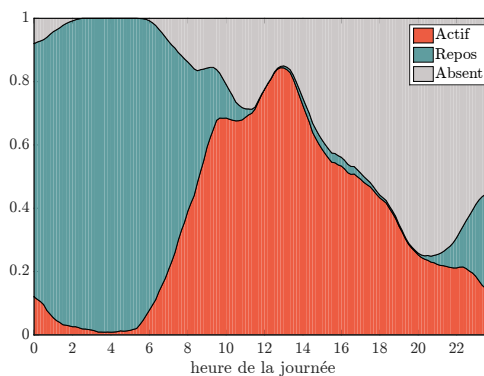
La même procédure est appliquée pour les autres échantillons. 4 profils sont identifiés à partir de l'échantillon des individus n'ayant pas d'emploi à temps plein.

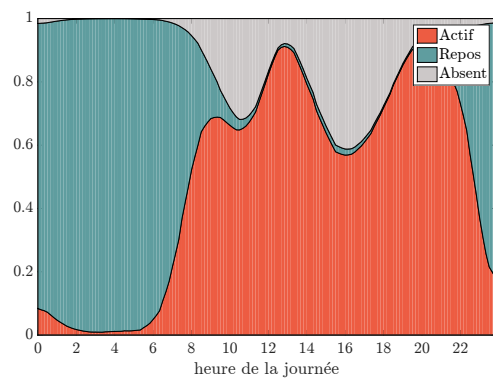
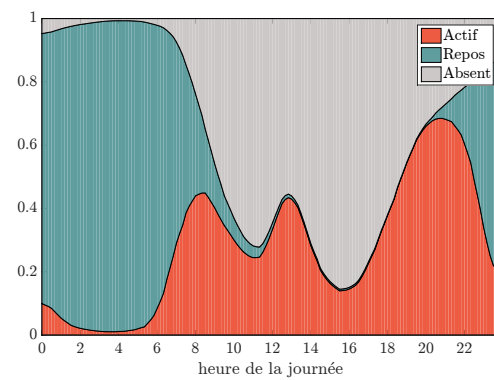
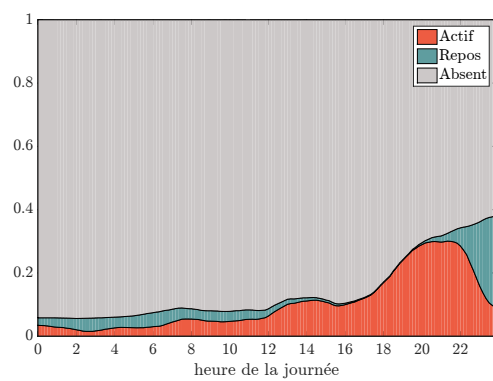
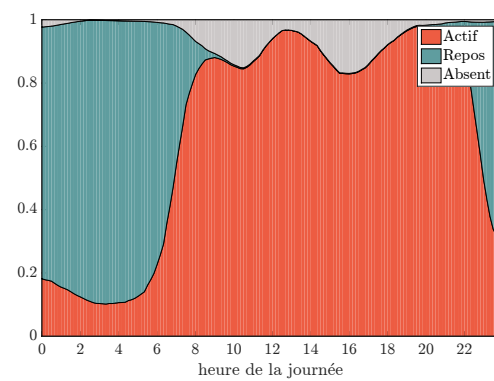
L'ensemble des profils identifiés sont représentés dans la partie D.3.

La distinction *a priori* entre jours de semaine et jours de week-end donne des profils dont la forme est similaire mais dont la probabilité de présence (état *présent et actif*) est différente selon le groupe considéré. Les résultats obtenus dans ce cas ne permettent pas de mettre en évidence des *trajectoires* à partir des emplois du temps.

Nous avons donc retenu pour la suite 12 groupes d'individus dont 8 profils pour les individus ayant un emploi à temps plein et 4 pour ceux n'ayant pas d'emploi à temps complet. Les profils retenus sont représentés sur les figures D.3.1 et D.3.2.

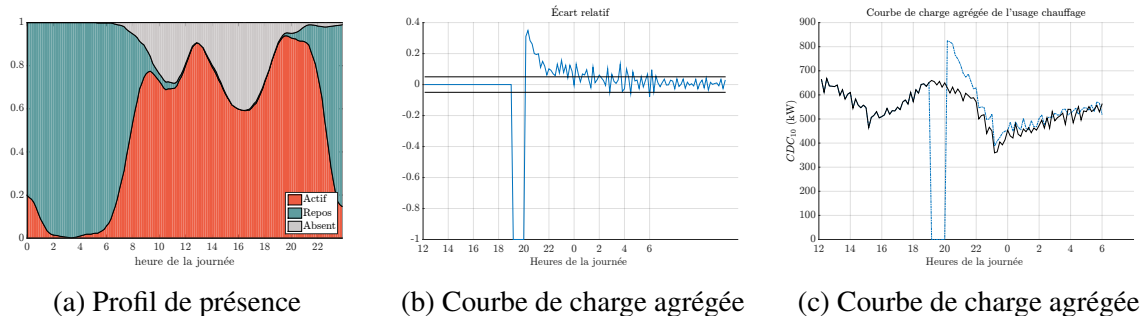
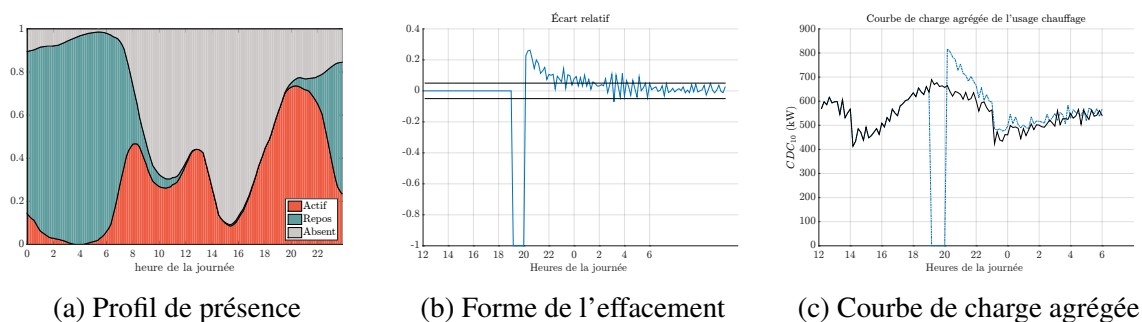
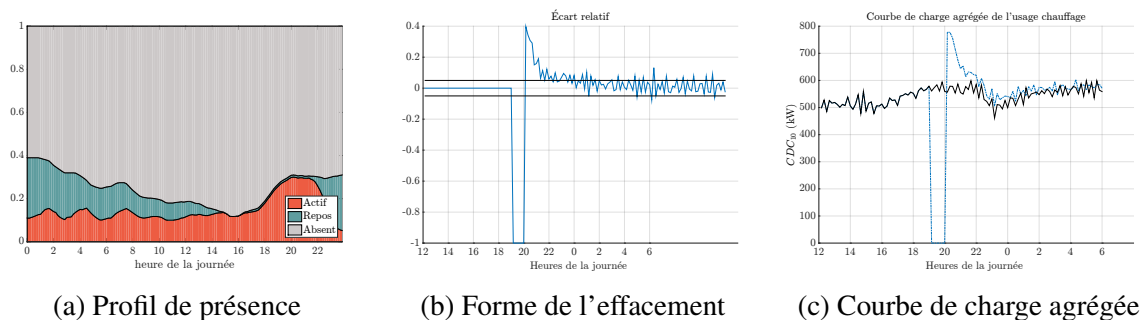
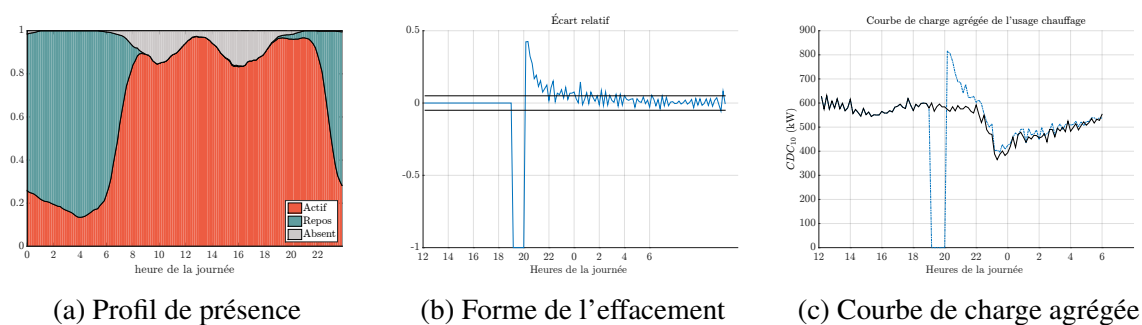
D.3 Détails des profils de présence identifiés

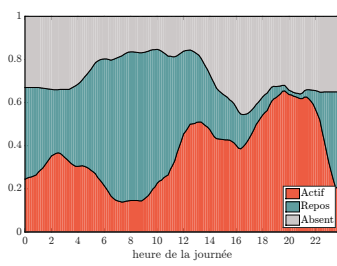
(a) $E_{a,ft}$, groupe 1(b) $E_{a,ft}$, groupe 2(c) $E_{a,ft}$, groupe 3(d) $E_{a,ft}$, groupe 4(e) $E_{a,ft}$, groupe 5(f) $E_{a,ft}$, groupe 6(g) $E_{a,ft}$, groupe 7(h) $E_{a,ft}$, groupe 8Figure D.3.1 Profils de présence identifiés pour l'échantillon $E_{a,ft}$

(a) E_c , groupe 1(b) E_c , groupe 2(c) E_c , groupe 3(d) $E_{a,ft}$, groupe 4Figure D.3.2 Profils de présence identifiés pour l'échantillon E_c

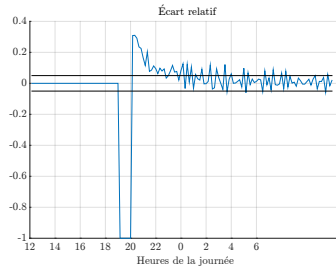
Annexe E

Détail des effacements réalisés selon les profils de présence

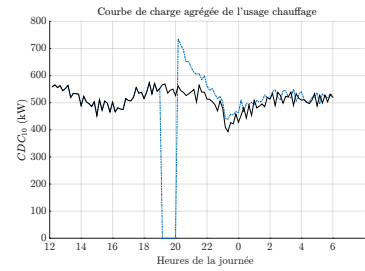
Figure E.0.1 Effacements réalisés pour le groupe 1, échantillon E_c Figure E.0.2 Effacements réalisés pour le groupe 2, échantillon E_c Figure E.0.3 Effacements réalisés pour le groupe 3, échantillon E_c Figure E.0.4 Effacements réalisés pour le groupe 4, échantillon E_c



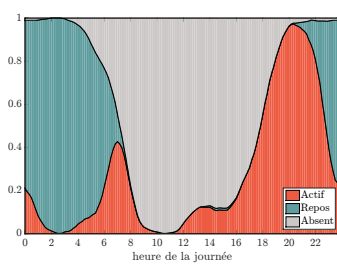
(a) Profil de présence



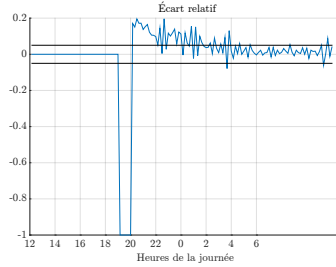
(b) Forme de l'effacement



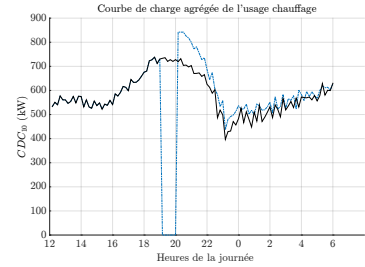
(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.5 Effacements réalisés pour le groupe 1, échantillon $E_{a,ft}$ 

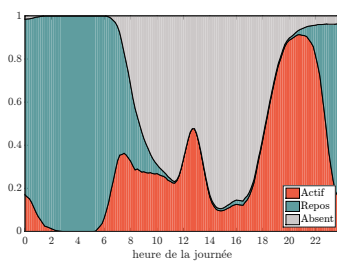
(a) Profil de présence



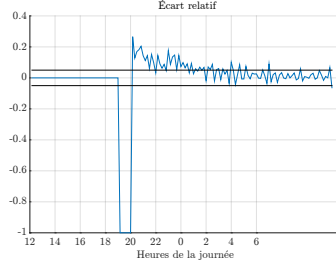
(b) Forme de l'effacement



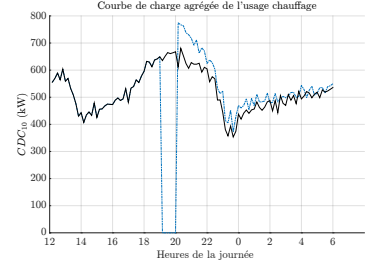
(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.6 Effacements réalisés pour le groupe 2, échantillon $E_{a,ft}$ 

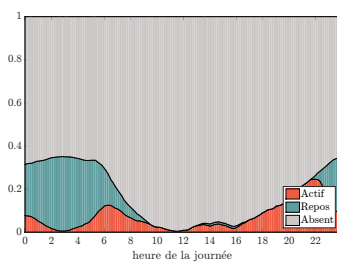
(a) Profil de présence



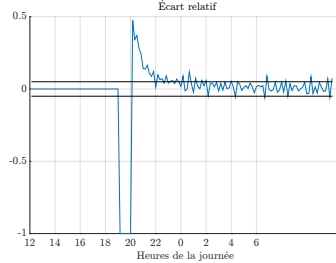
(b) Forme de l'effacement



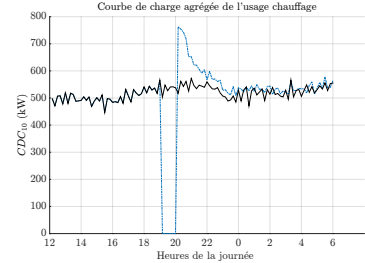
(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.7 Effacements réalisés pour le groupe 3, échantillon $E_{a,ft}$ 

(a) Profil de présence

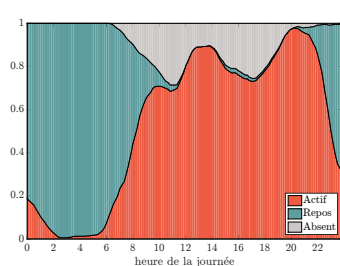


(b) Forme de l'effacement

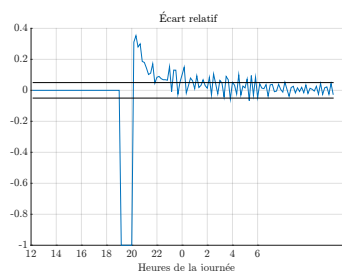


(c) Courbe de charge agrégée

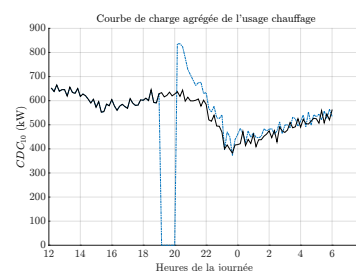
Figure E.0.8 Effacements réalisés pour le groupe 4, échantillon $E_{a,ft}$



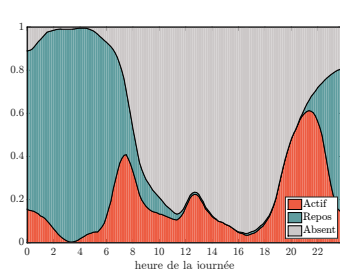
(a) Profil de présence



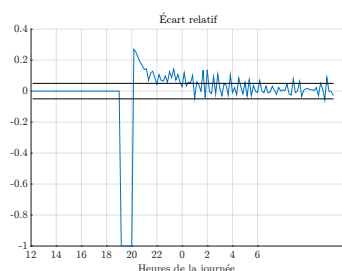
(b) Forme de l'effacement



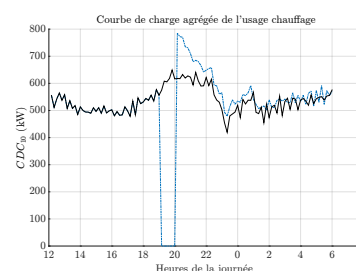
(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.9 Effacements réalisés pour le groupe 5, échantillon E_{a,ft}

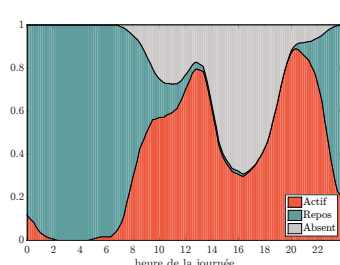
(a) Profil de présence



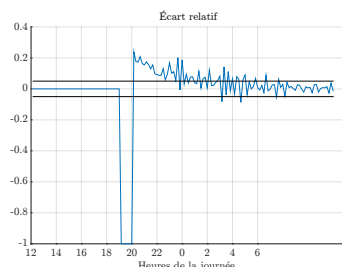
(b) Forme de l'effacement



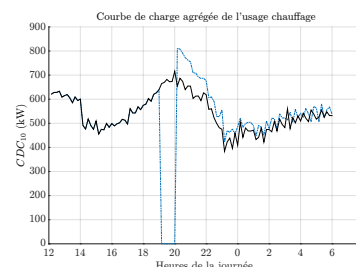
(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.10 Effacements réalisés pour le groupe 6, échantillon E_{a,ft}

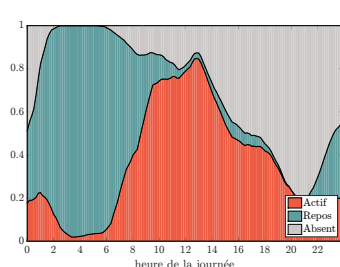
(a) Profil de présence



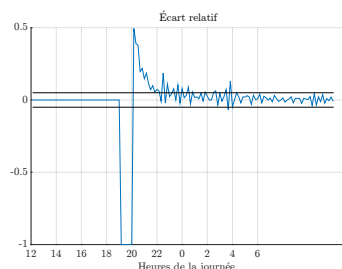
(b) Forme de l'effacement



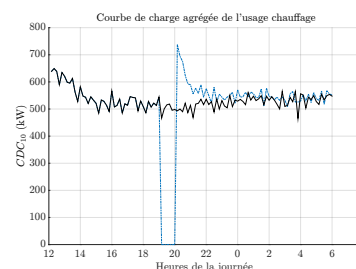
(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.11 Effacements réalisés pour le groupe 7, échantillon E_{a,ft}

(a) Profil de présence



(b) Forme de l'effacement



(c) Courbe de charge agrégée

Figure E.0.12 Effacements réalisés pour le groupe 8, échantillon E_{a,ft}

Bibliographie

- [1] (2012). Typology approach for building stock energy assessment. main results of the tabula project. Technical report, Institut Wohnen und Umwelt GmbH.
- [2] (2013). Identification des caractéristiques énergétiques initiales d'un bâtiment : moyens et méthodes à employer, tâche 2.1. Technical report, Fondation Bâtiment-Energie.
- [3] Abras, S. (2009). *Coopération entre agents embarqués pour la gestion d'énergie dans l'habitat*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [4] ADEME (2012). L'effacement diffus. les avis de l'ademe.
- [5] AEIC Load Research Committee (2009). Demand response measurement and verification. Technical report, Association of Edison Illuminating Companies.
- [6] Aerts, D. (2015). *Occupancy and activity modelling for Building energy demand simulation, comparative feedback and residential electricity demand characterisation*. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel.
- [7] AGENT (1999). Selection of basic measures. Technical report, Report DC1 of the AGENT project, ESPRIT/LTR/24939.
- [8] Agneholm, E. and Daalder, J. (2000). Cold load pick-up of residential load. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 147(1):44–50.
- [9] Alaoui El Azher, A. (1992). *Identification des systèmes à deux constantes de temps et application au chauffage Intermittent de bâtiments*. PhD thesis, École nationale supérieure des Mines de Paris.
- [10] Allibe, B. (2012). *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme-Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes*. PhD thesis, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS).
- [11] Audlin, L., Pratt, M., and McConnel, A. (1949). New relay assures feeder resumption after outage. *Parts*, 1:99–103.
- [12] Azou, S. (1997). *Réalisation équilibrée de systèmes par orthogonalisation de fonctions d'entrée- Grammiens et approximation*. PhD thesis, Université de Brest.
- [13] Bacher, P. and Madsen, H. (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43(7):1511–1522.

- [14] Barteczko-Hibbert, C. (2015). After diversity maximum demand (admd) report. Technical report, University of Durham.
- [15] Beeker, N., Malisani, P., and Petit, N. (2016). Statistical properties of domestic hot water consumption. In *CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress*.
- [16] Benoit, C. (2015). *Models for investigation of flexibility benefits in unbalanced Low Voltage Smart Grids*. PhD thesis, Université de Grenoble Alpes.
- [17] Berthou, T. (2013). *Développement de modèles de bâtiment pour la prévision de charge de climatisation et l'élaboration de stratégies d'optimisation énergétique et d'effacement*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [18] Bézian, J.-J. (1996). *Les émetteurs de chaleur: étude comparée*. Presses des MINES.
- [19] Blight, T. S. and Coley, D. A. (2013). Sensitivity analysis of the effect of occupant behaviour on the energy consumption of passive house dwellings. *Energy and Buildings*, 66:183 – 192.
- [20] Boait, P., Advani, V., and Gammon, R. (2015). Estimation of demand diversity and daily demand profile for off-grid electrification in developing countries. *Energy for Sustainable Development*, 29:135 – 141.
- [21] Bode, J. L., Sullivan, M. J., Berghman, D., and Eto, J. H. (2013). Incorporating residential ac load control into ancillary service markets: Measurement and settlement. *Energy policy*, 56:175–185.
- [22] Boggis, J. (1953). Diversity, bias and balance. *Distribution of Electricity*, pages 357–362.
- [23] Booth, A., Choudhary, R., and Spiegelhalter, D. (2012). Handling uncertainty in housing stock models. *Building and Environment*, 48:35–47.
- [24] Braithwait, S. and Armstrong, D. (2009). 2008 evaluation of california statewide aggregator demand response programs volume 2 : Baseline analysis of amp demand response porogram. Technical report, Christensen Associates Energy Consulting, LLC.
- [25] Brisepierre, G. (2011). *Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d'énergie dans l'habitat collectif*. PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- [26] Brohus, H., Heiselberg, P., Hesselholt, A., and Rasmussen, H. (2009). *Application of Partial Safety Factors in Building Energy Performance Assessment*, pages 1014–1021. The International Building Performance Simulation Association Conference. Published on a DVD.
- [27] Campolongo, F., Cariboni, J., and Saltelli, A. (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software*, 22(10):1509 – 1518. Modelling, computer-assisted simulations, and mapping of dangerous phenomena for hazard assessment.

- [28] Carlson, S. W. (1988). *Using comprehensive room transfer functions*. PhD thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [29] Carroll, J. A. (1980). An mrt method of computing radiant energy exchange in rooms. *System Simulation and Economic Analysis*, pages 343–348.
- [30] Chelmiss, C., Saeed, M. R., Frincu, M., and Prasanna, V. (2015). Curtailment estimation methods for demand response: Lessons learned by comparing apples to oranges. In *Proceedings of the 2015 ACM Sixth International Conference on Future Energy Systems*. ACM.
- [31] Chen, S., Yang, W., Yoshino, H., Levine, M. D., Newhouse, K., and Hinge, A. (2015). Definition of occupant behavior in residential buildings and its application to behavior analysis in case studies. *Energy and Buildings*, 104:1 – 13.
- [32] Clarke, J. A. (2001). *Energy simulation in building design*. Routledge.
- [33] Corbin, C. (2014). *Assessing impact of large-scale distributed residential HVAC control optimization on electricity grid operation and renewable energy integration*. PhD thesis, University of Colorado.
- [34] Corrado, V. and Mechri, H. E. (2009). Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating. *Journal of Building Physics*, 33(2):125–156.
- [35] Couillaud, N. (2006). *Amélioration de l’efficacité énergétique des réseaux hydraulique: optimisation de la conception*. PhD thesis, Université de Marne-La-Vallée.
- [36] CREEDAC (2001). *Energuides for houses database analysis*. Technical report, Canadian Residential Energy End-use Data and Analysis Centre Dalhousie University.
- [37] Da Silva, D. (2011). *Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels: application aux usages thermiques*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [38] Dautin, S. (1997). *Réduction de modèles thermiques de bâtiments: amélioration des techniques par modélisation des sollicitations météorologiques*. PhD thesis, Université de Poitiers.
- [39] de France, E., editor (1981). *Le bâti ancien en Lyonnais*.
- [40] de Meester, T., Marique, A.-F., De Herde, A., and Reiter, S. (2013). Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. *Energy and Buildings*, 57:313–323.
- [41] de Rocquigny, E., Devictor, N., and Tarantola, S. (2008). *Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management*. Wiley.
- [42] de Wit, S. and Augenbroe, G. (2002). Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings*, 34(9):951 – 958. A View of Energy and Building Performance Simulation at the start of the third millennium.

- [43] Dehausse, R. (1988a). *Énergétique des bâtiments 2 - Calcul des enveloppes*. pyc édition.
- [44] Dehausse, R. (1988b). *Énergétique des bâtiments 3 - Les bâtiments et leurs équipements*. pyc édition.
- [45] Déqué, F., Delille, S., and Dautin, S. (1997). Réduction d'un système linéaire et invariant par la technique de moore. application à la thermique du bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, 36(3):170 – 179.
- [46] Derbez, M., Berthineau, B., Cochet, V., Lethrosne, M., Pignon, C., Ribéron, J., and Kirchner, S. (2011). Evaluation de la qualité de l'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles des bâtiments performants en énergie. Technical report, N ESE-SB / 2011-068, Septembre 2011, Rapport final, CSTB, 117 pages.
- [47] Derbez, M., Berthineau, B., Cochet, V., Lethrosne, M., Pignon, C., Ribéron, J., and Kirchner, S. (2012). Méthodologie d'évaluation de la qualité d'air intérieur, du confort et des consommations énergétiques des logements performants en énergie. *Environnement, Risques & Santé*, 11(1):40–51.
- [48] Derbez, M., Bruno, B., Cochet, V., Lethrosne, M., Mahendran, S., Mandin, C., Pignon, C., Ribéron, J., Wyart, G., and Kirchner, S. (2013). Suivi longitudinal de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles de deux bâtiments performants en énergie sur une durée de trois ans. Technical report, N ESE-SB / 2013-035, Juin 2013, Rapport final, CSTB, 95 pages.
- [49] Desgraupes, B. (2013). Clustering indices. *University of Paris Ouest-Lab Modal'X*, 1:34.
- [50] Dickert, J. and Schegner, P. (2011). A time series probabilistic synthetic load curve model for residential customers. In *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, pages 1–6. IEEE.
- [51] Diduch, C., Shaad, M., Errouissi, R., Kaye, M., Meng, J., and Chang, L. (2012). Aggregated domestic electric water heater control-building on smart grid infrastructure. In *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, volume 1, pages 128–135. IEEE.
- [52] Duchêne, C., Bard, S., Barillot, X., Ruas, A., Trévisan, J., and Holzapfel, F. (2003). Quantitative and qualitative description of building orientation. In *7th ICA Workshop*.
- [53] Dujin, A. and Maresca, B. (2010). La température du logement ne dépend pas de la sensibilité écologique. *Consommations et modes de vie*, 227.
- [54] Dumay, J.-M. (1997). *Chauffage électrique et confort thermique*.
- [55] E-CUBE (2013). étude des avantages que l'effacement procure à la collectivité et de leur intégration dans un dispositif de prime.
- [56] El Guedri, M. (2009). *Caractérisation aveugle de la courbe de charge électrique: Détection, classification et estimation des usages dans les secteurs résidentiel et tertiaire*. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI.

- [57] Emery, A. and Kippenhan, C. (2006). A long term study of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the pacific northwest constructed according to improved thermal standards. *Energy*, 31(5):677–693.
- [58] Energy Information Administration (2009). Residential Energy Consumption Survey (RECS). <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2009/index.cfm?view=microdata>.
- [59] Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British journal of industrial medicine*, 30(4):313–324.
- [60] Forssell, U. (1997). *Properties and Usage of Closed-loop Identification Methods*. PhD thesis, Linköping University.
- [61] Frachet, L. (2013). *Tarifs résidentiels pour la réduction de la consommation électrique: une évaluation expérimentale d'acceptation et d'impact*. PhD thesis, Université de Grenoble.
- [62] Garcia Sanchez, D. (2012). *Modeling energy demand of buildings at urban scale*. PhD thesis, École des Mines de Nantes.
- [63] Gauvrit, J. and Ansanay-Alex, G. (2014). Comparative analysis of model reduction methods applied to building simulation benchmarks. In *SSB2014, 9th International Conference on System Simulation in Buildings*.
- [64] Gellings, C. (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, 73(10):1468 – 1470.
- [65] Glorieux, I., Mestdag, I., Minnen, J., and Vandeweyer, J. (2009). The myth of the 24-hour society: Non-standard work hours in belgium, 1966 and 1999. *Social indicators research*, 93(1):177–183.
- [66] Glover, K. (1984). All optimal hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their l_∞ -error bounds. *International Journal of Control*, 39(6):1115–1193.
- [67] Goffart, J. (2013). *Impact of the variability of weather data on a low energy house. Application of sensitivity analysis for correlated temporal inputs*. PhD thesis, Université de Grenoble Alpes.
- [68] Goldberg, M. L. and Agnew, G. K. (2013). Measurement and verification for demand response. *US Department of Energy: Washington, DC, USA*.
- [69] Grandjean, A. (2013). *Introduction de non linéarités et de non stationnarités dans les modèles de représentation de la demande électrique résidentielle*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [70] Grandjean, A., Adnot, J., and Binet, G. (2012). A review and an analysis of the residential electric load curve models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9):6539–6565.
- [71] Greening, L. A., Greene, D. L., and Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey. *Energy Policy*, 28:389 – 401.

- [72] Grimm, C. and Energy, D. (2008). Evaluating baselines for demand response programs. In *2008 AEIC Load Research Workshop*.
- [73] Gros, A. (2013). *Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- [74] Gugercin, S. and Antoulas, A. (2000). A comparative study of 7 algorithms for model reduction. In *Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on*, volume 3, pages 2367–2372. IEEE.
- [75] Ha, D. L. (2007). *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [76] Hatton, L., Charpentier, P., and Matzner-Løber, E. (2015). Online residential demand reduction estimation through control group selection. In *Modeling and Stochastic Learning for Forecasting in High Dimensions*, pages 147–160. Springer.
- [77] Heussen, K., Koch, S., Ulbig, A., and Andersson, G. (2010). Energy storage in power system operation: The power nodes modeling framework. In *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, pages 1–8. IEEE.
- [78] Hiller, C. (2012). Influence of residents on energy use in 57 swedish houses measured during four winter days. *Energy and buildings*, 54:376–385.
- [79] Husaunndee, A. M. I. (1999). *Modélisation des installations de génie climatique en environnement de simulation graphique Méthodologie de description et réalisation d'une bibliothèque de modèles composants*. PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech.
- [80] Hyland, P. and McQueen, D. (2000). Using a residential electricity model for sizing low voltage networks. In *EEA Conference, New Zealand*.
- [81] IEA (2011). Technology roadmap smart grids. Technical report, International Energy Agency, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf.
- [INSEE2006] INSEE2006. Logement - 2006. ADISP-CMH.
- [INSEE2008] INSEE2008. Recensement - 2008.
- [INSEE2010] INSEE2010. Emploi du temps (EDT) - 2010. ADISP-CMH.
- [85] Iooss, B. and Lemaître, P. (2015). A review on global sensitivity analysis methods. In Meloni, C. and Dellino, G., editors, *Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*. Springer.
- [86] Jacques, J. (2011). Pratique de l'analyse de sensibilité : comment évaluer l'impact des entrées aléatoires sur la sortie d'un modèle mathématique. Technical report, IRMA Lille Vol. 71-III, eric.univ-lyon2.fr/~jjacques/Download/Publi/Intro-SA.pdf.
- [87] Jameson, A. (1968). Solution of the equation $ax+xb=c$ by inversion of an $m*m$ or $n*n$ matrix. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 16(5):1020–1023.

- [88] Johnson, B. J., Starke, M. R., Abdelaziz, O. A., Jackson, R. K., and Tolbert, L. M. (2014). A method for modeling household occupant behavior to simulate residential energy consumption. In *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*, pages 1–5. IEEE.
- [89] Jonas, P. A. (2011). Predictive power dispatch for 100% renewable electricity scenarios using power nodes modeling framework. Master's thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.
- [90] Kämpf, J. H. (2009). *On the modelling and optimisation of urban energy fluxes*. PhD thesis, école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [91] Katipamula, S. and Lu, N. (2006). Evaluation of residential hvac control strategies for demand response programs. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*, 112(1):535.
- [92] KEMA, D. (2013). Development of demand response mechanism. baseline consumption methodology - phase 1 result. Technical report, Australian Energy Market Operator.
- [93] Kempton, W. (1986). Two theories of home heat control. *Cognitive Science*, 10(1):75–90.
- [94] Koch, S. (2012). *Demand response methods for ancillary services and renewable energy integration in electric power systems*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich.
- [95] Lang, W. W., Anderson, M. D., and Fannin, D. R. (1982). An analytical method for quantifying the electrical space heating component of a cold load pick up. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, (4):924–932.
- [96] Laret, L. (1980). *Contribution au développement de modèles mathématiques du comportement thermique transitoire de structures d'habitation*. PhD thesis, Université de Liège, faculté des sciences appliquées, laboratoire de physique du bâtiment.
- [97] Le, H. B. (2010). *Contribution aux méthodes de synthèse de correcteurs d'ordres réduits sous contraintes de robustesse et aux méthodes de réduction de modèles pour la synthèse robuste en boucle fermée*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [98] Lefebvre, S. and Desbiens, C. (2002). Residential load modeling for predicting distribution transformer load behavior, feeder load and cold load pickup. *International journal of electrical power & energy systems*, 24(4):285–293.
- [99] Lefort, A. (2014). *A smart grid ready building energy management system based on a hierarchical model predictive control*. PhD thesis, Supélec.
- [100] Lesnard, L. (2009a). Annexe 2. les méthodes d'appariement optimal. *Le Lien social*, pages 196–197.
- [101] Lesnard, L. (2009b). Cost setting in optimal matching to uncover contemporaneous socio-temporal patterns.

- [102] Lesnard, L. (2014). Using optimal matching analysis in sociology: Cost setting and sociology of time. In *Advances in Sequence Analysis: Theory, Method, Applications*, pages 39–50. Springer.
- [103] Lesnard, L. and de Saint Pol, T. (2009). Organisation du travail dans la semaine des individus et des couples actifs: le poids des déterminants économiques et sociaux. *Economie et statistique*, 414:53–74.
- [104] Lesnard, L. and Kan, M. Y. (2009). Two-stage optimal matching analysis of workdays and workweeks.
- [105] Litz, L. (1981). Order reduction of linear state-space models via optimal approximation of the non-dominant modes. *Large Scale Syst*, 2(3):171–184.
- [106] Liu, Y. and Anderson, B. D. (1989). Singular perturbation approximation of balanced systems. *International Journal of Control*, 50(4):1379–1405.
- [107] Ljung, L. (1998). *System Identification: Theory for the User*. Pearson Education.
- [108] Ljung, L. (2007). System identification toolbox for use with {MATLAB}.
- [109] Lucas, J.-P., Ramalho, O., Kirchner, S., Ribéron, J., and des Environnements Intérieurs, P. E. (2009). Etat de la ventilation dans le parc de logements français. *OQAI (observatoire de la qualité de l’air intérieur) Juin*.
- [110] Madsen, H. and Melgaard, H. (2003). Ctsm user guide. *Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, Technical University of Denmark, Lyngby*.
- [111] Marchal, J. (2008). Modélisation des performances énergétiques du parc de logements, état énergétique du parc en 2008, modèle prospectif à l’horizon 2050. Technical report, ANAH.
- [112] Marra, F., Jensen, M. M., Garcia-Valle, R., Træholt, C., and Larsen, E. (2011). Power quality issues into a danish low-voltage grid with electric vehicles. In *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, pages 1–6.
- [113] McQueen, D. H., Hyland, P. R., and Watson, S. J. (2004). Monte carlo simulation of residential electricity demand for forecasting maximum demand on distribution networks. *IEEE Transactions on power systems*, 19(3):1685–1689.
- [114] Mejri, O., Del Barrio, E. P., and Ghrab-Morcos, N. (2011). Energy performance assessment of occupied buildings using model identification techniques. *Energy and Buildings*, 43(2):285–299.
- [115] Milligan, G. W. and Cooper, M. C. (1986). A study of the comparability of external criteria for hierarchical cluster analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 21(4):441–458.
- [116] Moezzi, M. and Lutzenhiser, L. (2010). What’s missing in theories of the residential energy user. In *ACEEE Summer study on energy efficiency in buildings*, pages 207–221.

- [117] Mohajeryami, S., Doostan, M., and Asadinejad, A. (2016). An investigation of the relationship between accuracy of customer baseline calculation and efficiency of peak time rebate program. In *2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, pages 1–8. IEEE.
- [118] Moore, B. (1981). Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability, and model reduction. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 26(1):17–32.
- [119] Morosan, P.-D. (2011). *Commande prédictive distribuée. Approches appliquées à la régulation thermique des bâtiments*. PhD thesis, Supélec.
- [120] Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2):161–174.
- [121] Mouel, A. L. (1995). *Contribution à l'étude des caractéristiques dynamiques réduites des systèmes thermiques linéaires*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [122] Muratori, M., Roberts, M. C., Sioshansi, R., Marano, V., and Rizzoni, G. (2013). A highly resolved modeling technique to simulate residential power demand. *Applied Energy*, 107:465–473.
- [123] Neirac, F. (1989). *Approche théorique et expérimentale des modèles réduits du comportement thermique des bâtiments*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [124] Neveu, A. (1984). *Étude d'un code de calcul d'évolution thermique d'une enveloppe de bâtiment*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [125] Oppenheim, A. (1956). Radiation analysis by the network method. *Trans. ASME*, 78(4):725–735.
- [126] Orphelin, M. (1999). *Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [127] Özkizilkaya, Ö. (2014). *Thermosensibilité de la demande électrique: identification de la part non linéaire par couplage d'une modélisation bottom-up et de l'approche bayésienne*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [128] Park, H., Martaj, N., Ruellan, M., Bennacer, R., and Monmasson, E. (2013). Modeling of a building system and its parameter identification. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 8(5):975–983.
- [129] Park, S., Ryu, S., Choi, Y., Kim, J., and Kim, H. (2015). Data-driven baseline estimation of residential buildings for demand response. *Energies*, 8(9):10239–10259.
- [130] Pfeffer, T., Burke, W., and Auslander, D. (2010). Response: modeling the wide variability of residential energy consumption. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, pages 260–271.

- [131] Peffer, T., Pritoni, M., Meier, A., Aragon, C., and Perry, D. (2011). How people use thermostats in homes: A review. *Building and Environment*, 46(12):2529–2541.
- [132] Penot-Antoniou, L. and Zobiri, R. (2013). *Les déterminants de la température de chauffage adoptée par les ménages*. Commissariat général au développement durable, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- [133] Perera, D., Pfeiffer, C. F., and Skeie, N.-O. (2014). Modelling the heat dynamics of a residential building unit: Application to norwegian buildings.
- [134] Petit, D. (1991). *Réduction de modèles de connaissance et identification de modèles d'ordre réduit. Application aux processus de diffusion thermique*. PhD thesis.
- [135] Pigenet, N. (2009). *Mise en place des outils de suivi de prédiction de la demande électrique à l'échelle d'un territoire, application au département du Lot*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- [136] Protopapadaki, C., Reynders, G., and Saelens, D. (2014). Bottom-up modelling of the belgian residential building stock: impact of building stock descriptions. In *Proceedings of the 9th International Conference on System Simulation in Buildings-SSB2014*.
- [137] QDR, Q. (2006). Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them.
- [138] Rabenstein, R. (1994). Application of model reduction techniques to building energy simulation. *Solar energy*, 53(3):289–299.
- [139] RAGE, R. (2012). Analyse détaillée du parc résidentiel existant. Technical report, Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012.
- [140] Raynaud, M. (2014). *Evaluation ex-post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [141] Réseau de transport d'Electricité, R. (2015). Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en france.
- [142] Réseau de transport d'Electricité, R. (2016). Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en france.
- [143] Reynders, G., Diriken, J., and Saelens, D. (2014). Bottom-up modeling of the belgian residential building stock: influence of model complexity. In *Proceedings of the 9th International Conference on System Simulation in Buildings - SSB2014*.
- [144] Richalet, V. (1991). *Caractérisation énergétique des bâtiments sur site. Identification de modèles dynamiques. Méthodes de signature énergétique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- [145] Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., and Clifford, C. (2010). Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings*, 42(10):1878 – 1887.
- [146] Robette, N. (2011). Explorer et décrire les parcours de vie: les typologies de trajectoires.

- [147] Roche, R. (2012). *Algorithmes et architectures multi-agents pour la gestion de l'énergie dans les réseaux électriques intelligents*. PhD thesis, Belfort-Montbéliard.
- [148] Rodler, A., Joseph, V., Jean-Jacques, R., Eui-Jong, K., and Jean-luc, H. (2013). Impact de la tâche solaire sur un modèle thermique tridimensionnel de bâtiment. In *Proceedings de la conférence CIFQ*.
- [149] Royer, S., Thil, S., Talbert, T., and Polit, M. (2014). Black-box modeling of buildings thermal behavior using system identification. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):10850–10855.
- [150] Saker, N. (2013). *Contribution au pilotage de la charge pour accroître la flexibilité du système électrique*. PhD thesis, Supélec.
- [151] Saltelli, A., Tarantola, S., and Campolongo, F. (2000). Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Statist. Sci.*, 15(4):377–395.
- [152] Sargent, A., Broadwater, R. P., Thompson, J. C., and Nazarko, J. (1994). Estimation of diversity and kwhr-to-peak-kw factors from load research data. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 9(3):1450–1456.
- [Sarte et al.] Sarte, R., Hokoi, S., and Inoue, H. Influence of furniture on the peak load of an intermittent heating system.
- [154] Schilders, W. (2008). Introduction to model order reduction. In *Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications*, pages 3–32. Springer.
- [155] Schneider, C. (2012). Campagne de mesures de la qualité de l'air intérieur dans des logements alsaciens se chauffant au bois. Technical report, ASPA 12062901-ID, http://www.atmo-alsace.net/medias/produits/Campagne_de_mesures_de_19.pdf.
- [156] Schneider, C. (2014). Rapport relatif à la campagne de mesures au sein de 7 logements alsaciens (2012-2013). Technical report, ASPA 13121003 - ID.
- [157] Seryak, J. and Kissock, K. (2003). Occupancy and behavioral affects on residential energy use. In *Proceedings of the Solar Conference*, pages 717–722. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY; AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS.
- [158] Shaad, M., Momeni, A., Diduch, C. P., Kaye, M., and Chang, L. (2012). Parameter identification of thermal models for domestic electric water heaters in a direct load control program. In *Electrical & Computer Engineering (CCECE), 2012 25th IEEE Canadian Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- [159] Sobol, I. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1-3):271 – 280. The Second IMACS Seminar on Monte Carlo Methods.
- [160] Soderstrom, T. and Stoica, P. (1989). *System Identification*. Prentice Hall International Series In Systems And Control Engineering. Prentice Hall.
- [161] Spitz, C. (2012). *Analysis of simulation tools reliability and measurement uncertainties for Energy Efficiency in Buildings*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.

- [162] Steinman, M., Kalisperis, L., and Summers, L. (1989). The mrt-correction method: a new method of radiant heat exchange. *ASHRAE transactions*, 95:1015–1027.
- [163] Subrémon, H. (2009). *Living with Energy. For a sensible anthropology of energy consumption*. Theses, Université de Nanterre - Paris X.
- [164] Swan, L. G. (2010). *Residential sector energy and GHG emissions model for the assessment of new technologies*. PhD thesis, Dalhousie University.
- [165] Swan, L. G. and Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8):1819 – 1835.
- [166] Taarit, K. I. (2010). *Contribution à l'identification des systèmes à retards et d'une classe de systèmes hybrides*. PhD thesis, École Centrale de Lille; École Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- [167] Tanimoto, J., Hagishima, A., and Sagara, H. (2008). Validation of probabilistic methodology for generating actual inhabitants' behavior schedules for accurate prediction of maximum energy requirements. *Energy and Buildings*, 40(3):316–322.
- [168] Tian, W. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20:411 – 419.
- [169] Tittlein, P. (2008). *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*. PhD thesis, Université de Savoie.
- [170] Ucak, C. and Pahwa, A. (1994). An analytical approach for step-by-step restoration of distribution systems following extended outages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(3):1717–1723.
- [171] Underwood, C. and Yik, F. (2008). *Modelling methods for energy in buildings*. John Wiley & Sons.
- [172] Van den Hof, P. (1998). Closed-loop issues in system identification. *Annual reviews in control*, 22:173–186.
- [173] van der Linden, A., Boerstra, A., and Kurvers, S. (2002). Thermal indoor climate as a building performance: Proposal for new criteria, design aids and assessment methods in the netherlands. In Anson, M., Ko, J., and Lam, E., editors, *Advances in Building Technology*, pages 1375 – 1382. Elsevier, Oxford.
- [174] van der Linden, A., Boerstra, A., Raue, A., Kurvers, S., and de Dear, R. (2006). Adaptive temperature limits: A new guideline in the netherlands: A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy and Buildings*, 38(1):8 – 17.
- [175] Vanrolleghem, P. and Association, I. (2010). *Modelling Aspects of Water Framework Directive Implementation*. European Water Research Series. IWA Publishing.
- [176] Vorger, É. (2014). *Study of the influence of the inhabitants behavior on the energy performance of buildings*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- [177] Vuillecard, C. (2013). *Development methodology of electricity demand side management scheme with natural gas technologies*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [178] Wall, M. (1997). Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. a comparison of simulation programs. *Energy and Buildings*, 26(2):129–135.
- [179] Walter, E. and Pronzato, L. (1997). *Identification of parametric models from experimental data*. Springer Verlag.
- [180] Walton, G. N. (1980). A new algorithm for radiant interchange in room loads calculations. *ASHRAE transactions*, 86(2):190–208.
- [181] Wei, S., Jones, R., and de Wilde, P. (2014). Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings. *Energy and Buildings*, 70:36–44.
- [182] Widén, J., Lundh, M., Vassileva, I., Dahlquist, E., Ellegård, K., and Wäckelgård, E. (2009). Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data-modelling approach and validation. *Energy and Buildings*, 41(7):753–768.
- [183] Wilke, U. (2013). *Probabilistic bottom-up modelling of occupancy and activities to predict electricity demand in residential buildings*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [184] Wit, M. D. (1997). Identification of the important parameters in thermal building simulation models. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57(1-4):305–320.
- [185] Woods, J. (2006). Fiddling with thermostats: energy implications of heating and cooling set point behavior. In *Proceedings of the 2006 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings*.
- [186] Wortelboer, P. M. and Bosgra, O. H. (1992). Generalized frequency weighted balanced reduction. In *Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on*, pages 2848–2849. IEEE.
- [187] Xu, X., Culligan, P. J., and Taylor, J. E. (2014). Energy saving alignment strategy: achieving energy efficiency in urban buildings by matching occupant temperature preferences with a building’s indoor thermal environment. *Applied Energy*, 123:209–219.
- [188] Yahia, A. A. and Barrio, E. P. D. (1999). Thermal systems modelling via singular value decomposition: direct and modular approach. *Applied Mathematical Modelling*, 23(6):447–468.
- [189] Yamaguchi, N., Han, J., Ghatikar, G., Kiliccote, S., Piette, M. A., and Asano, H. (2009). Regression models for demand reduction based on cluster analysis of load profiles. In *2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE)*, pages 1–7. IEEE.
- [190] Zayane, C. (2011). *Identification d’un modèle de comportement thermique de bâtiment à partir de sa courbe de charge*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- [191] Zhao, X., Venkateswaran, J., and Son, Y.-J. (2005). Modeling human operator decision-making in manufacturing systems using bdi agent paradigm. In *IIE Annual Conference. Proceedings*, page 1. Institute of Industrial Engineers-Publisher.
- [192] Zhou, K. and Doyle, J. C. (1998). *Essentials of robust control*, volume 104. Prentice hall Upper Saddle River, NJ.
- [193] Zhou, K., Doyle, J. C., Glover, K., et al. (1996). *Robust and optimal control*, volume 40. Prentice Hall New Jersey.

Liste des figures

0.0.1 Part thermosensible des consommations selon deux scénarios climatiques. Source : [142]	2
0.0.2 Perspectives d'évolution des usages de l'électricité du secteur résidentiel. Source : [142]	3
0.0.3 Évolution du système électrique. Source : [81]	4
0.0.4 Positionnement de l'opérateur d'effacement dans la chaîne de valeur du système électrique. Source : [147]	5
0.0.5 Mécanismes de marché. Source : [137]	6
1.1.1 Répartition de la consommation en fonction des usages (Globale et Électricité spécifique) – Source des données : EDF	12
1.1.2 Classification des services énergétiques (Source : [75])	13
1.1.3 Mécanismes de maîtrise de la demande. Source de la figure : [147]	18
1.2.1 Exemple d'erreur de mesure de température intérieure dans les logements associée à un mauvais positionnement de la sonde. Données extraites d'une expérimentation <i>smart-grids</i>	22
1.2.2 Répartition des températures moyennes de consigne déclarées dans les loge- ments - Source des données : <i>Maitrise de l'énergie, Bilan 2011 et 2013</i> . . .	26
1.2.3 Températures moyennes mesurées pour plusieurs pièces dans 6 logements instrumentés (notés MI1 à MI6) dans le cadre de l'étude de l'OQAI. La moyenne issue de l'enquête de l'ADEME est indiquée par une étoile bleue. Sources des données : [46] et [48]	28
1.2.4 Courbe de charge (période de mesure 10 minutes) agrégée de l'usage chauffage de 23 logements participants à une expérimentation <i>smart-grids</i> pour deux jours consécutifs <i>quelconques</i>	29

1.2.5 Températures de chauffage déclarées et modes de gestion du chauffage (périodes avec réduit de consigne) pour un échantillon de ménages (~ 100 ménages) participant à une opération de rénovation de leur habitat (avant opération) dans les départements <i>Meurthe</i> et <i>Moselle</i> . Graphiques extraits de [140]	32
1.2.6 Températures de chauffage déclarées et modes de gestion du chauffage (périodes avec réduit de consigne) pour un échantillon de ménages (~ 100 ménages) participant à une opération de rénovation de leur habitat (avant opération) dans la région <i>PACA</i> . Graphiques extraits de [140]	32
2.1.1 Système étudié : bâti dans son environnement	37
2.2.1 Evolution du quotient du critère de Moore pour l'enveloppe du bâtiment de référence	45
2.3.1 Diagramme fonctionnel du système <i>bâti</i> muni de sa régulation	50
2.3.2 Modélisation d'un émetteur	51
2.3.3 Régulateur <i>Tout ou Rien</i>	53
3.2.1 Représentation des différentes phases d'un effacement	66
3.2.2 Évolution de l'écart entre les index normalisés	67
3.2.3 Représentation de l'évolution de la phase de recouvrement	69
3.2.4 Représentations de l'effet de relance à l'issue d'un coupure réseau	73
3.2.5 Représentation des grandeurs utiles à la caractérisation des effacements en puissance	75
3.2.6 Formes types d'un effacement avec et sans stratégie de contrôle de la phase de la relance des équipements. Source de la figure: [16]	77
4.2.1 Sollicitations liées aux conditions climatiques dans le cas de référence	89
4.2.2 Scénario conventionnel issu de la <i>RT</i> pour la consigne	90
4.2.3 Scénarios conventionnels issus de la <i>RT</i> pour les apports internes	90
4.2.4 Synthèse des scénarios de consigne et gains internes possibles	93
4.2.5 Distributions des consommations énergétiques annuelles surfaciques des systèmes simulés pour l'analyse de <i>Morris</i>	96
4.2.6 Graphique (μ^*, σ) lorsque le critère d'évaluation est la consommation énergétique annuelle pour l'usage chauffage	97
4.2.7 Résultat du criblage de <i>Morris</i> , indicateurs moyens sur les 22 effacements, systèmes avec une régulation <i>TOR</i> , deux périodes constructives type	99
4.2.8 Distribution des indicateurs de sortie compte tenu des hypothèses de l'étude paramétrique	100

4.2.9 Évolution de la courbe de charge moyenne et de la température intérieure moyenne pour les 22 jours avec effacement	101
4.3.1 Représentation des transitions entre les 3 états du modèle de présence. Figure adaptée de [6]	107
4.3.2 Distribution de l'état <i>être au domicile</i> suivant les variables <i>age, emploi, jour (ouvré, week-end)</i> . Exploitation des données de l'EDT - Source [INSEE2010]	108
4.3.3 Profil de présence au niveau ménage pour différentes <i>taille de ménage</i> . Exploitation des données brutes issues de l'EDT. Source : [INSEE2008] . .	110
4.3.4 Distribution du type et de la <i>taille</i> du ménage occupant un logement de surface $S \in [70; 130[m^2$ par rapport à l'ensemble des ménages (source des données : [INSEE2008])	111
4.3.5 Distributions des variables caractérisant les ménages simulés	112
4.3.6 Variabilité des scénarios (présence et consigne) simulés pour 1000 ménages	114
4.3.7 Scénarios de présence et de consigne moyen, cas avec réduit, 1000 ménages simulés	114
4.3.8 Évolution des scénarios moyens selon le nombre de ménages simulés . . .	115
4.3.9 Scénarios moyens simulés (<i>dynamique</i> et <i>conventionnel</i>), ménages construits à partir des données de l'enquête [INSEE2010]	117
4.3.10 Évolution du facteur de diversité pour 2 périodes constructives, 3 modèles de présence et gestion de consigne	119
4.3.11 Évolution demi-horaire du report, modèle de présence dynamique, maison type <i>RT75, inertie légère</i>	127
4.3.12 Évolution demi-horaire du report, modèle de présence dynamique, maison type <i>RT89, inertie lourde</i>	127
4.3.13 Facteur de diversité à 30 minutes, scénario dynamique, effacement <i>E3</i> (18h, 2h), maison type <i>RT75, inertie légère</i> , 3 stratégies d'effacement . . .	128
4.3.14 Facteur de diversité à 30 minutes, scénario dynamique, effacement <i>E3</i> (18h, 2h), maison type <i>RT89, inertie lourde</i> , 3 stratégies d'effacement . . .	128
4.3.15 Courbes de charge moyennes à 30 minutes, scénario dynamique, maison type <i>RT75, inertie légère</i> , 3 stratégies d'effacement	129
4.3.16 Courbes de charge moyennes à 30 minutes, scénario dynamique, maison type <i>RT89, inertie lourde</i> , 3 stratégies d'effacement	129
4.3.17 Distribution du temps à pleine puissance (h) pour la maison de type <i>RT75, inertie légère</i> , scénario de consigne dynamique, selon le type d'effacement (ligne) et la stratégie de contrôle (colonne)	130

4.3.18	Évolution moyenne de la température intérieure (température opérative selon la définition de l'équation (??) pour les cas étudiés (3 effacements, 3 stratégies de pilotage), maison de type <i>RT75</i> , <i>inertie légère</i>	131
4.3.19	Évolution moyenne de la température intérieure (température opérative selon la définition de l'équation (??) pour les cas étudiés (3 effacements, 3 stratégies de pilotage), maison de type <i>RT89</i> , <i>inertie légère</i>	131
4.3.20	Distributions des $^{\circ}\text{C.h}$ d'inconfort, maison type <i>RT75</i> , <i>inertie légère</i> , modèle de présence dynamique, 3 effacements, 3 stratégies	132
4.3.21	Distributions des $^{\circ}\text{C.h}$ d'inconfort, maison type <i>RT89</i> , <i>inertie lourde</i> , modèle de présence dynamique, 3 effacements, 3 stratégies	133
5.1.1	Distributions des caractéristiques des participants de l'échantillon utiles dans le cadre de ce travail	141
5.1.2	Courbes de charge moyennes à 10 et 30 minutes, de l'un des logements de l'échantillon, série de données sur 4 jours	144
5.1.3	Consommations énergétiques journalières selon les participants et les jours disponibles	145
5.1.4	Distribution des consommations journalières pour les 3000 CDC de l'échantillon de référence exploité	146
5.1.5	Variabilité journalière des courbes de charges agrégées	147
5.1.6	Indicateurs du foisonnement sur l'échantillon des N_L logements obtenus pour 1000 tirages des <i>CDC</i>	149
5.3.1	Évaluation des 5 jours d'effacements, estimation de la référence (noir) en recherchant des jours similaires (consommations globales), exploitation des données $CDC_{10,\text{agg.hecs}}$	155
5.3.2	Écart relatif entre la référence estimée CDC_{10}^* et la courbe effacée $CDC_{10,i}$, $i \in \llbracket 1, 5 \rrbracket$ selon les données $CDC_{\text{agg.hecs}}$ et CDC_{agg} utilisées pour la reconstruction de la référence	156
5.3.3	Écart relatif entre la référence estimée CDC_{30}^* et la courbe effacée $CDC_{30,i}$, $i \in \llbracket 1, 5 \rrbracket$ en considérant les données $CDC_{\text{agg.hecs}}$ et CDC_{agg}	157
5.3.4	Effacement moyen réalisé et $C\bar{D}C^*$ en considérant les 5 jours consécutifs avec effacement	158
5.3.5	Courbes de consommation normalisée, à 10 min, superposition selon les abonnements	160
5.3.6	Courbes de consommation normalisée, à 30 min, superposition selon les abonnements	160
5.3.7	Schéma bloc d'un système ECS régulé	162

5.3.8 Courbe de charge journalière d'un ballon $\mathcal{B}$	163
5.3.9 Schéma électrique équivalent du modèle de ballon utilisé	164
5.3.10 Forme des monotones de l'usage ECS et distribution des puissances nominales des chauffe-eaux estimées	166
5.3.11 Nuages de points entre la puissance nominale calculée des chauffe-eaux P_{max}^* et la taille des logements (nombre de pièces et surface habitable)	167
5.3.12 Superposition des courbes de charges réelles et simulées	171
5.3.13 Exemple de séquence de données disponibles après retraitement	174
5.3.14 Exemple de nuages de points obtenus pour l'un des logements	176
5.3.15 Étapes du processus d'identification. Adapté de [107]	179
5.3.16 Autocorrélation des résidus pour l'un des modèles <i>ARMAX</i> candidat	181
5.3.17 Intercorrélation entre les résidus et l'entrée en puissance pour l'un des modèles <i>ARMAX</i> candidat	181
5.3.18 Intercorrélation entre les résidus et l'entrée représentant la température extérieure pour l'un des modèles <i>ARMAX</i> candidat	181
5.3.19 Résultats sur une séquence de validation, modèle R_3C_2 , prédiction à 10 min	185
5.3.20 Résultats sur une séquence de validation, modèle R_3C_2 , prédiction à 1 h . .	186
5.3.21 Analyse des résidus, modèle R_3C_2 , prédiction à 10 min	187
5.3.22 Analyse des résidus, modèle R_3C_2 , prédiction à 1 h	188
6.1.1 Schéma général pour la simulation parc	198
6.1.2 Schéma des interactions modélisées entre les 3 éléments d'un logement . .	199
6.1.3 Schéma des interactions au niveau du parc	200
6.2.1 Nombre de logements du type <i>MI</i> et <i>LC</i> dans le Grand Lyon. Source données: [INSEE2008]	202
6.2.2 Mode de chauffage et répartition dans le grand Lyon. Source des données: [INSEE2008]	203
6.2.3 Logements avec chauffage électrique par rapport à l'ensemble des logements du parc (Maisons Individuelles / Logements Collectifs)	205
6.2.4 Logements avec chauffage électrique par type dans le parc	207
6.2.5 Répartition des périodes d'achèvement pour les logements principaux avec système de chauffage électrique. Source des données: [INSEE2008]	208
6.3.1 Représentation schématique des <i>MI</i> modélisées (adapté de [181]	230
6.3.2 Découpages possibles des logements collectifs en bâtis unitaires	231
6.3.3 Typologies de bâtis de maisons individuelles dans le parc	231
6.3.4 Typologies de bâtis de logements collectifs dans le parc	232

6.3.5 Répartition des surfaces habitables pour les logements principaux avec système de chauffage électrique. Source des données: [INSEE2008]	233
6.3.6 Répartition entre bâtis isolés et bâtis mitoyens pour les logements principaux type "maison, chauffage électrique". Source des données: [INSEE2008] . . .	234
6.3.7 Répartition entre simple et double vitrage pour les maisons individuelles en fonction de la période constructive. Source des données: [INSEE2006] . . .	235
6.3.8 Parc de maisons individuelles suivant la période d'achèvement et la surface. Source des données : INSEE	235
6.3.9 Principe de la méthode de calcul du rectangle minimal (<i>SMBR</i>). Source : [52]	236
6.3.10 Exemple de retraitement des données de la BDTOPPO pour la construction du parc des maisons individuelles	236
6.4.1 Distribution des types de systèmes de chauffage électrique selon le type de bâti et la période constructive. Source des données : [?]	239
6.5.1 Profils de présence identifiés pour les échantillons E_c et $E_{a,ft}$	243
6.5.2 Exemple de profil simulé et issu des données de l'enquête emploi du temps pour l'un des groupe identifié	244
7.1.1 Distribution des attributs de construction des bâtis de type <i>maisons individuelles</i> du parc	249
7.1.2 Distribution des paramètres de gestion de la consigne dans le parc de référence	250
7.2.1 Pointe agrégée à moduler	252
7.2.2 Courbes de charge 10min avec effacement, pour des durées de contrôle de 10 à 120 minutes, en l'absence de stratégie de pilotage de la relance	253
7.2.3 Courbes de charge moyenne 30min avec effacement, pour des durées de contrôle de 10 à 120 minutes, en l'absence de stratégie de pilotage de la relance	254
7.3.1 Caractérisation de la demande du parc pour deux scénarios de gestion des consignes	258
7.3.2 Forme des effacements pour différents hypothèses des scénarios de gestions de consigne	259
7.4.1 Effacements réalisés pour deux profils du groupe $E_{a,ft}$	261
7.4.2 Effacements réalisés pour deux profils du groupe E_c	261
A.4.1 Sollicitations météorologiques pour les 22 jours avec effacement (chaque couleur représente un jour différent)	280
B.0.1 Exemple de nuages de points obtenus - logement 1	284
B.0.2 Exemple de nuages de points obtenus - logement 2	284
B.0.3 Exemple de nuages de points obtenus - logement 3	285

B.0.4 Exemple de nuages de points obtenus - logement 4	285
B.0.5 Exemple de nuages de points obtenus - logement 5	285
B.0.6 Exemple de nuages de points obtenus - logement 6	286
B.0.7 Exemple de nuages de points obtenus - logement 7	286
B.0.8 Exemple de nuages de points obtenus - logement 8	286
B.0.9 Exemple de nuages de points obtenus - logement 9	287
B.0.10 Exemple de nuages de points obtenus - logement 11	287
B.0.11 Exemple de nuages de points obtenus - logement 12	287
B.0.12 Exemple de nuages de points obtenus - logement 13	288
B.0.13 Exemple de nuages de points obtenus - logement 14	288
B.0.14 Exemple de nuages de points obtenus - logement 15	288
B.0.15 Exemple de nuages de points obtenus - logement 16	289
B.0.16 Exemple de nuages de points obtenus - logement 17	289
B.0.17 Exemple de nuages de points obtenus - logement 18	289
B.0.18 Exemple de nuages de points obtenus - logement 19	290
B.0.19 Exemple de nuages de points obtenus - logement 20	290
B.0.20 Exemple de nuages de points obtenus - logement 21	290
B.0.21 Exemple de nuages de points obtenus - logement 22	291
B.0.22 Exemple de nuages de points obtenus - logement 23	291
D.2.1 Profils moyens en coupant l'échantillon en 2 groupes avec tirage aléatoire sans remise	302
D.2.2 Profils obtenus pour les échantillons $E_{a,ft}$ et E_c	303
D.2.3 Profils obtenus pour les échantillons Ech_S et Ech_{WK}	303
D.2.4 Répartition du statut face à l'emploi à temps plein et des jours semaine/week- end	304
D.2.5 Évolution des indicateurs les plus couramment utilisés pour déterminer le nombre de groupes à former pour les 4 méthodes d'agrégations, similitude S_2 , échantillon $E_{a,ft}$	308
D.2.6 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien moyen, et 8 groupes .	309
D.2.7 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien complet, et 8 groupes	310
D.2.8 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien moyen pondéré, et 8 groupes	311
D.2.9 Profils obtenus avec la similitude S_2 , le critère du lien flexible - $\beta = 0.25$, et 8 groupes	312
D.2.10 Effectifs des groupes formés selon le nombre de classe (2 à 28) pour différents paramètres de classification	313

D.2.1 Arbres construits avec 4 méthodes de regroupement	314
D.3.1 Profils de présence identifiés pour l'échantillon $E_{a,ft}$	316
D.3.2 Profils de présence identifiés pour l'échantillon E_c	317
E.0.1 Effacements réalisés pour le groupe 1, échantillon E_c	320
E.0.2 Effacements réalisés pour le groupe 2, échantillon E_c	320
E.0.3 Effacements réalisés pour le groupe 3, échantillon E_c	320
E.0.4 Effacements réalisés pour le groupe 4, échantillon E_c	320
E.0.5 Effacements réalisés pour le groupe 1, échantillon $E_{a,ft}$	321
E.0.6 Effacements réalisés pour le groupe 2, échantillon $E_{a,ft}$	321
E.0.7 Effacements réalisés pour le groupe 3, échantillon $E_{a,ft}$	321
E.0.8 Effacements réalisés pour le groupe 4, échantillon $E_{a,ft}$	321
E.0.9 Effacements réalisés pour le groupe 5, échantillon $E_{a,ft}$	322
E.0.10 Effacements réalisés pour le groupe 6, échantillon $E_{a,ft}$	322
E.0.11 Effacements réalisés pour le groupe 7, échantillon $E_{a,ft}$	322
E.0.12 Effacements réalisés pour le groupe 8, échantillon $E_{a,ft}$	322

Liste des tableaux

1.1	Équipements électriques liés à l'usage chauffage	14
1.2	Synthèse des déterminants statistiquement significatifs sur la température intérieure mesurée selon l'affectation de la pièce - Tableau reproduit de [132]	25
1.3	Niveaux de consigne des systèmes de chauffage selon l'activité des usagers retenus pour définir les loi de commandes des systèmes par les ménages . .	34
2.1	Valeurs des parts convective et radiative pour les deux types d'émetteur étudiés	50
3.1	Paramètres du modèle identifié dans [8]	72
4.1	Paramètres géométriques de référence des bâtis étudiés	87
4.2	Coefficients d'échanges globaux ($Wm^{-2}K^{-1}$) pour les bâtis de référence .	88
4.3	Paramètres d'intérêt des scénarios de présence et consigne pour l'analyse et bornes de variations éventuelles	92
4.4	Paramètres d'intérêt pour les systèmes de chauffage et bornes associées . .	94
4.5	Paramètres choisis pour le criblage de Morris	95
4.6	Paramètres les plus influents issus criblage de <i>Morris</i>	102
4.7	Coefficients d'échanges globaux ($W.m^{-2}.K$) pour les bâtis types étudiés . .	104
4.8	Variables explicatives identifiées dans [6] (niveau individu et ménage) reprises pour le modèle de présence de cette section et nombre de modalités associées	107
4.9	Variables nécessaires pour simuler l'occupation d'un ménage	109
4.10	Typologie des ménages possibles(variable <i>typmen15</i> du tableau 4.9)	109
4.11	Effacements étudiés	121
4.12	Stratégies de contrôles considérées	121
4.13	Report moyen ($R_{\%} = \frac{E_{p1}+E_{p3}}{E_{p2}}$) suivant le type d'effacement, la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit	123
4.14	Durée moyenne du recouvrement théorique suivant le type d'effacement, la stratégie et la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit	123

4.15	Durée pour atteindre 80%, 90% et 95% du recouvrement théorique suivant le type d'effacement, la stratégie et la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit	124
4.16	Taux de recouvrement atteint 1 heure et 2 heures après la fin de l'évènement suivant le type d'effacement, la stratégie et la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit	124
4.17	Degrés-heures d'inconfort DH moyen ($^{\circ}C.h$) suivant le type d'effacement, la période constructive pour le scénario de consigne dynamique avec réduit	126
5.1	Caractéristiques connues des individus de l'échantillon	140
5.2	Indicateurs de foisonnement et diversité pour les 5 effacements (18h30, 1h), CDC à 10 minutes	152
5.3	Caractéristiques connues des logements avec chauffe-eau électrique	160
5.4	Paramètres de référence attribués aux ballons selon la puissance de chauffe estimée	168
5.5	Famille de modèles <i>boîte noire</i>	179
5.6	Schéma électrique du modèle « R1C1 »	182
5.7	Schéma électrique du modèle « R2C2 »	183
5.8	Schéma électrique du modèle « R3C2 »	183
5.9	Schéma électrique du modèle « R4C3 »	183
6.1	Grille d'analyse des modèles de parc existants	196
6.2	Fichiers INSEE exploitables pour la création du parc de logements	204
6.3	Regroupement des bâtis par période d'achèvement issu du fichier <i>LOGEMENT 2008</i> [INSEE2008]	206
6.4	Attribut d'intérêt des <i>bâtis indifférenciés</i> issus de la <i>BDTOPO</i>	210
6.5	Description des variables nécessaires pour modéliser un bâti	215
6.6	Variables INSEE nécessaires pour la reconstruction du parc	220
6.7	Paramètres géométriques issus de l'exploitation de la <i>BDTOPO</i>	226
6.8	Paramètres géométriques issus de l'exploitation des études de caractérisation du parc de logement	227
6.9	Données sur le bâti et son environnement issues de l' <i>ENL 2006</i> utilisée pour la reconstruction du parc de logements collectifs	227
7.1	Caractérisation de la déformation de la charge agrégée selon la durée de l'effacement	254
7.2	Caractérisation de la déformation de la charge agrégée pour les 4 modes de gestion étudiés	260

7.3	Caractérisation de la déformation de la charge agrégée selon le type de profil de présence	260
A.1	Principaux résultats issus du criblage de Morris issus de l'analyse bibliographique	271
A.2	Paramètres de référence des bâtis étudiés de type <i>RT75</i>	274
A.3	Paramètres de référence des bâtis étudiés de type <i>RT89</i>	275
A.4	Paramètres inclus dans le criblage de <i>Morris</i>	277
A.5	Températures extérieures moyennes sur la période 15 h – 0 h pour les 22 jours avec effacement	281
C.1	Valeurs possibles de U pour différentes parois pour les bâtis de type <i>maisons individuelles</i> reproduites depuis l'étude PROMENLAB (l'étude complète est disponible en ligne)	294
C.2	Valeurs possibles de U pour différentes parois pour les bâtis de type <i>petit collectif</i> reproduites depuis l'étude PROMENLAB (l'étude complète est disponible en ligne)	295
D.1	Heuristique pour la constitution des séries de données de présence issus de l'exploitation des variables <i>ACTPR</i> et <i>LIEUDET</i> de l' <i>EDT</i> 2010	298
D.2	Variables explicatives pour la description des individus issues de l'enquête et utilisées dans la suite	300
D.3	Interprétation des différentes similitudes proposées par Lesnards. Source: [101]	305
D.4	Similitudes testées	305
D.5	Critères d'agrégation retenus	307

Liste des notations

Roman Symbols

ADMD After Demand Maximum Diversity

AI Apports Internes

CDC Courbe de charge

ADEME Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AIC Akaike Information Criterion

ARMAX AutoRegressive Moving Average with *eXogenous*

ARX AutoRegressive with *eXogenous*

BDTOPO Base de Données TOPOgraphiques

BJ Box-Jenkins

CGDD Commissariat Général au Développement Durable

CLO Courtes Longueurs d'Onde

CLPU Cold Load Pick Up

ECS Eau Chaude Sanitaire

EDF Électricité de France

EJP Effacement Jours de Pointe. Offre d'abonnement destinée au secteur résidentiel proposée par *EDF*

ENL2002 Enquête Nationale Logement 2002

ENL2006 Enquête Nationale Logement 2006

FIR *Finite Impulse Response*

GLO Grandes Longueurs d'Onde

HP/HC Heures Pleines / Heures Creuses

INSEE Institut National de la Statistique et des Études Économiques

LC Logements(s) Collectif(s)

MI Maison(s) Individuelle(s)

MODELEC Expérimentation menée par *Direct Energie*

OE *Outpout Error*

OQAI Observatoire pour la Qualité de l'Air Intérieur

PRBS *Pseudo Random Binary Sequence*

RAGE 2012 *programme Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012*

RECS Residential Energy Consumption Survey

RTE Réseau de Transport d'Électricité

RT Réglementation thermique

SMBR *Smallest Minimal Bounding Rectangle*

SVD Singular Value Decomposition

TABULA *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*

TEMPO Offre d'abonnement destinée au secteur résidentiel proposée par *EDF*

TOR Tout Ou Rien

CEREN Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie

EDT enquête Emploi Du Temps

ENR ENergies Renouvelables

CFL Courant-Friedrichs-Lewy

MIMO Multiple Inputs Multiple Outputs

MISO Multiple Inputs Single Output

Index

ADMD, 61

MODELEC, 6, 139

BDTOPO, 210

coefficient de foisonnement, 60

courbes de charges, 58

degré heures d'inconfort, 79

Dimensionnement des systèmes, 54, 237

Durée du recouvrement, 68

effacements

effacements de consommation, 4

effacements diffus, 5

Facteur de charge, 59

Facteur de relance, 74

Forme du rebond, 74

Instant de relance, 76

mode de gestion, 18

nœud d'air, 38, 40, 218

niveaux de température, 18

Pic de surconsommation, 74

Rebond, 74

Report, 68

Résumé

Cette thèse se propose d'évaluer les produits d'effacement réalisés sur un ensemble de consommateurs, chacun étant défini par le triplet bâtiment, systèmes, ménage. On définit un produit d'effacement par la caractérisation de la déformation de la courbe de charge de l'ensemble des consommateurs suite à l'envoi d'un signal de contrôle (pilotage direct ou signal tarifaire).

Deux dimensions ont été considérées dans le cadre de ce travail : l'étude des variables d'influence sur les effacements de consommation en s'appuyant sur des données issues d'expérimentations ainsi que l'élaboration d'un modèle global permettant de reproduire une partie de la diversité observée sur les courbes de charge des clients expérimentateurs.

Afin d'analyser un échantillon bâtiments, systèmes, ménages, une attention particulière est portée à la dispersion des caractéristiques du bâti (enveloppes, expositions, ...) et aux éventuelles corrélations entre le ménage (mode de vie, choix des équipements, ...) et les systèmes (caractéristiques techniques), notamment pour l'usage "chauffage et climatisation".

Un travail de réconciliation de données (issues de statistiques, de travaux sur la caractérisation des logements métropolitains, d'études sur les habitudes de vie des ménages, ...) a permis de proposer une première évaluation en simulation d'effacement de l'usage chauffage au périmètre d'un parc de quelques milliers de logements. L'approche bottom-up proposée permet ainsi de rendre compte de la diversité technique, fonctionnelle et d'origine comportementale de l'usage étudié.

Mots Clés

MDE, Smart-Grid, Effacement

Abstract

This thesis aims at evaluating load curtailments packages over a set of electricity users, each being defined by the triolet building, system, household. We define a load curtailment package by the quantification of the load curve's deformation due to the emission of a control signal (direct control or price incentive).

Two dimensions were considered through this work: first the study of the different variables' influence using experimental data, and secondly the construction of a global model which can effectively reproduce the diversity observed on experimental load curves.

In order to analyse a sample building, system, household, the dispersion of the different characteristics of the building (envelope, exposure,...) were carefully studied, as well as the possible links between the household (lifestyle, choice of household equipments,...) and the systems (technical characteristics) especially for the electrical heaters and HVAC systems.

We work to reconcile data from different sources (statistical data, data from research on urban building characterization, on households' habits,...) and we are able to give a first evaluation of load curtailment products over the electrical heating usage in urban environment through numerical simulations of a few thousand housings. The bottom-up approach used accounts for the technical diversity, as well as the functional and behavioral diversity of the studied electrical usage.

Keywords

DSM, Smartgrid, Load Curtailment