

Table des matières

Remerciements	iii
Avant-propos	vii
Liste des Figures	xii
Liste des Tableaux	xiii
Liste des Acronymes	xiv
Nomenclature	xvii
1 Introduction	1
1.1 Contexte de la thèse	2
1.2 État de l’art et positionnement	14
1.3 Quelle optimisation pour l’aide à la décision territoriale ?	19
1.4 Objectifs de la thèse et enjeux associés	22
1.5 Structure du manuscrit	23
1.6 Publications issues de la thèse	24
2 Modélisation énergétique à l’échelle territoriale	25
Résumé du chapitre	26
2.1 Introduction	27
2.2 Une modélisation du territoire adaptée au contexte énergétique	28
2.3 Construction d’un modèle de territoire	30
2.4 Approches pour la modélisation énergétique des bâtiments	36
2.5 Modélisation énergétique territoriale : état de l’art	40
2.6 Construction d’un modèle de consommation pour l’optimisation	43
2.7 Conclusion	53
3 Modélisation de solutions techniques pour la rénovation énergétique	55
Résumé du chapitre	56
3.1 Introduction	57
3.2 Méthodologie et bases de données	58
3.3 Rénovation thermique des bâtiments	61

3.4	Systèmes de chauffage	69
3.5	Bases finales de solutions techniques	91
3.6	Conclusion	93
4	Problème d’optimisation pour la rénovation énergétique	95
	Résumé du chapitre	96
4.1	Introduction	97
4.2	Impact de la rénovation sur les indicateurs techniques	97
4.3	Optimisation adaptée à l’aide à la décision territoriale	103
4.4	Implémentation et performances	110
4.5	Modélisations supplémentaires et impact sur les performances	113
4.6	Conclusion	119
5	Rénovation énergétique : Résultats et cas d’études	121
	Résumé du chapitre	122
5.1	Introduction	123
5.2	Premier cas d’étude : territoire urbain	123
5.3	Second cas d’étude : Parc hétérogène	129
5.4	Troisième cas d’étude : territoires variés	135
5.5	Intégration dans un outil web pour les collectivités territoriales	138
5.6	Conclusion	139
6	Conclusions et perspectives	143
6.1	Conclusions et contributions	143
6.2	Limites et perspectives	147
	Bibliographie	152
	Annexe A Textes encadrant la planification énergétique locale	163
	Annexe B Inventaire des données utiles à la modélisation territoriale	167
	Annexe C MedPower 2018 : Caractérisation de la consommation électrique	171
	Annexe D Procédure d’inférences des données énergétiques	177
	Annexe E Analyse statistique de la base OPE	181
	Annexe F Pompes à chaleur: Estimation détaillée du COP saisonnier	185

Liste des Figures

1 Introduction

1.1	Évolution de la fourniture d'énergie depuis 1990	3
1.2	Schéma récapitulatif des textes de planification énergétique	6
1.3	Répartition des consommations d'énergie par secteurs	9
1.4	Répartition des usages de l'énergie par secteurs	9
1.5	Planning de publication des données de l'énergie en OpenData	11
1.6	Évolution du nombre de jeux de données disponibles en OpenData	12

2 Modélisation énergétique à l'échelle territoriale

2.1	Disparité géographique du taux de remplissage dans la BDTOPO v3	33
2.2	Procédure de construction du modèle de territoire	36
2.3	Approches de modélisation de la consommation énergétique	38
2.4	Comparaison des catégories de simulation énergétique dans le cadre urbain .	39
2.5	Modèle du bâtiment implémenté dans l'outil de simulation urbaine DIMOSIM	42
2.6	Estimation de la température du sol à partir de celle de l'air	48
2.7	Détermination des coefficients du méta-modèle du besoin énergétique	52
2.8	Typologies de territoires considérées	53
2.9	Performances du modèle simplifié amélioré du besoin énergétique	54

3 Modélisation de solutions techniques pour la rénovation énergétique

3.1	Arbre des leviers de la rénovation énergétique des bâtiments	57
3.2	Démarche de construction des bases de solutions techniques	58
3.3	Arbre des solutions techniques pour l'isolation des murs	62
3.4	Arbre des solutions techniques pour l'isolation du plancher	63
3.5	Arbre des solutions techniques pour l'isolation de la toiture	64
3.6	Arbre des solutions techniques pour le remplacement des fenêtres	65
3.7	Segmentation géographique du territoire français en zones climatiques	66
3.8	Niveaux de performance thermique observés dans le neuf - Murs	67
3.9	Niveaux de performance thermique observés dans le neuf - Toiture	68
3.10	Niveaux de performance thermique observés dans le neuf - Plancher	68
3.11	Distribution des systèmes de chauffage dans le neuf	70

3.12	Arbre des solutions techniques pour le remplacement du chauffage	73
3.13	Chaudières : Courbes d'efficacité à charge partielle des différentes technologies	74
3.14	Chaudières à condensation : Charge et température d'eau	75
3.15	Lois de régulation de température de l'eau de chauffage	75
3.16	Les modes de fonctionnement des pompes à chaleur : monovalent et bivalent .	77
3.17	Pompes à chaleur : Courbes de COP en fonction de la température extérieure.	79
3.18	Pompes à chaleur : Régimes de fonctionnement	80
3.19	Pompes à chaleur : Méthode d'estimation des performances saisonnières . . .	82
3.20	Pompes à chaleur : COPs saisonniers des différentes technologies	82
3.21	Pompes à chaleur : COPs saisonniers estimés pour différents climats	83
3.22	Pompes à chaleur : Évolution des coûts avec la puissance	86
3.23	Chaudières : Évolution des coûts avec la puissance	87
3.24	Radiateurs électriques : Évolution des coûts avec la puissance	88
3.25	Poêles/inserts : Évolution des coûts avec la puissance	88
3.26	Émetteurs : Évolution des coûts avec la puissance	91
4	Problème d'optimisation pour la rénovation énergétique	
4.1	Visualisation du problème du sac à dos (KP)	110
4.2	Évolution du temps de calcul en fonction du nombre de bâtiments considérés	111
4.3	Sur-dimensionnement du chauffage suite à une rénovation thermique	114
4.4	Estimation des coefficients du modèle de dégradation par interpolation	115
4.5	Distribution des systèmes de ventilation dans le neuf	116
4.6	Saturation du coût d'investissement du chauffage	117
4.7	Courbe de coûts des émetteurs avec prise en compte de perte de puissance . .	118
4.8	Évolution du temps de calcul pour les différents modèles affinés.	120
5	Rénovation énergétique : Résultats et cas d'études	
5.1	Synthèse DPE de l'état initial du territoire d'étude	124
5.2	Proportion de surfaces rénovées selon la stratégie d'optimisation	125
5.3	Puissances installées selon la stratégie d'optimisation	125
5.4	Investissements dans la rénovation énergétique selon la stratégie d'optimisation	126
5.5	Visualisation du gisement de réduction de consommation énergétique	128
5.6	Investissements dans la rénovation thermique en fonction du climat	129
5.7	Investissements dans les systèmes de chauffage en fonction du climat	129
5.8	Scénario SNBC : Distribution des coûts en fonction des classes DPE	131
5.9	Scénario SNBC : Types de rénovations activées selon les DPE initiaux	131
5.10	Scénario SNBC : Distribution des énergies de chauffage - Avant/après	132
5.11	Contenu carbone : Évolution du besoin et de la fourniture de chauffage	134
5.12	Contraintes réseau : Évolution du besoin et modes de chauffages utilisés . . .	137

5.13	Plateforme web SHAPE : Formulaire de saisie des paramètres de l'optimisation.	139
5.14	Plateforme web SHAPE : Visualisation des indicateurs agrégés	140
5.15	Plateforme web SHAPE : Visualisation des indicateurs désagrégés	140



Liste des Tableaux

2 Modélisation énergétique à l'échelle territoriale

2.1	Inventaire des outils de modélisation énergétique territoriale	41
2.2	Distribution des caractéristiques attribuées aux bâtiments	47
2.3	Coefficients du méta-modèle de besoin annuel	51
2.4	Mesures d'erreur des trois modèles développés	51

3 Modélisation de solutions techniques pour la rénovation énergétique

3.1	Systèmes de chauffage observés dans la rénovation - 1	70
3.2	Systèmes de chauffage observés dans la rénovation - 2	71
3.3	Chiffres de ventes de PACs pour le chauffage en France en 2017	72
3.4	Efficacités des chaudières retenues pour la modélisation	76
3.5	Efficacités des chauffages conventionnels retenues pour la modélisation	83
3.6	Modélisation des coûts des systèmes et gammes identifiées	89
3.7	Hypothèses de prix et de contenu carbone des combustibles.	90
3.8	Base finale de solutions techniques - Murs	92
3.9	Base finale de solutions techniques - Toiture	92
3.10	Base finale de solutions techniques - Plancher	92
3.11	Base finale de solutions techniques - Vitrages	93
3.12	Base finale de solutions techniques - Chauffages (technique)	93
3.13	Base finale de solutions techniques - Chauffages (économique)	94

4 Problème d'optimisation pour la rénovation énergétique

4.1	Coefficients du méta-modèle de pic de besoin	103
4.2	Nombre de variables de décision et de contraintes induites pour la linéarisation	108
4.3	Coefficients de détérioration des performances des systèmes	115
4.4	Base finale de systèmes de ventilation	116

5 Rénovation énergétique : Résultats et cas d'études

5.1	Évolution des indicateurs en fonction de la stratégie d'optimisation adoptée .	127
-----	--	-----

Liste des Acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BBC	Bâtiment Basse Consommation
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BT	Basse Température
CES	City Energy Simulation
COP	Coefficient de Performance
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DGFiP	Direction Générale des Finances Publiques
DHU	Degrés Heure Unifiés
DPE	Diagnostic de Performance Énergétique
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EnR	Énergies Renouvelables
EPCI	Établissement Public de Coopération Intercommunale
FAIRE	Faciliter, Accompagner et Informer pour la Rénovation Énergétique
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
GRD	Gestionnaire du Réseau de Distribution
GRT	Gestionnaire du Réseau de Transport
HT	Haute Température
IGN	Institut Géographie National
IHU	Irradiances Heure Unifiées
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IRIS	Ilots Regroupés pour l'Information Statistique
ITE	Isolation Thermique par l'Extérieur
ITI	Isolation Thermique par l'Intérieur
KP	Problème du sac à dos
LC	Logement Collectif
LdB	Laine de Bois
LdR	Laine de Roche
LdV	Laine de Verre
LTECV	Loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte

MAE	Erreur absolue moyenne (<i>Mean Absolute Error</i>)
MCDA	Analyse de Décision Multicritère
MI	Maison Individuelle
MT	Moyenne Température
NRMSE	Erreur quadratique moyenne normalisée (<i>Normalized Root Mean Squared Error</i>)
OPE	Observatoire des Performances Énergétiques
OPF	Optimal Power Flow
PAC	Pompe À Chaleur
PCAET	Plan Climat Air Énergie Territorial
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PHEBUS	Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
PSE	Polystyrène Expansé
PU	Polyuréthane
RMSE	Erreur quadratique moyenne (<i>Root Mean Squared Error</i>)
RPT	Rupture de Ponts Thermiques
RSET	Récapitulatifs Standardisés d'Études Thermiques
S3REnR	Schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables
SCoT	Schéma de Cohérence Territoriale
SHAPE	Simulations pHysiques pour l'Aide à la Planification Énergétique
SIG	Système d'Information Géographique
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
SRADDET	Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires
SRCAE	Schéma Régional Climat Air Énergie
SRE	Schéma Régional de l'Éolien
TEE	Territory Energy Estimation
THT	Très-Haute Température
TREMI	Travaux de Rénovation Énergétique des Maisons Individuelles
UBES	Urban Building Energy Simulation
XPS	Polystyrène Extrudé

Nomenclature

Abréviations

CR	Charge réduite
GC	Générateur de chaleur
HP	Période de chauffe
IV	Installation de la ventilation
PC	Pleine charge
RC	Remplacement du chauffage
RT	Rénovation thermique

Ensembles

B	Bâtiments
P	Parois renouvelables
R	Solutions techniques de rénovation thermique
S	Systèmes de chauffage

Indices

b	Bâtiment
m	Modèle de chauffage
p	Paroi
r	Solution technique de rénovation thermique
s	Système de chauffage

Paramètres

α	Facteur de puissance des radiateurs [-]
β	Coefficients du méta-modèle de besoin [-]
ΔT	Différence de température [K]
δ	Proportion des surfaces orientées au sud [%]
η	Efficacité [%]
γ	Facteur de gamme [-]
λ	Conductivité thermique [W/m/K]
$\mathbb{1}^{elec}$	Présence de chauffage électrique [0-1]
μ	Coefficients du méta-modèle de pic de besoin [-]
τ^{vent}	Taux de renouvellement d'air [%/h]

ε	Erreur [-]
A	Surface d'une paroi [m^2]
C_e	PAC : coefficient de dégradation [%]
c_{air}	Capacité thermique volumique de l'air [$\text{kJ}/\text{m}^3/\text{K}$]
CF	Coût fixe [€]
CL	Coût de puissance [€/W]
COP	Coefficient de performance [%]
CS	Coût surfacique - fourniture et pose [€/m ²]
CV	Coût volumique - fourniture et pose [€/m ³]
D_p	PAC : Facteur de dégradation [%]
DHU	Degrés heure unifiés [K.h]
e	Epaisseur [m]
fc	Prix du combustible [€/Wh]
fe	Facteur d'émissions (ou contenu carbone) [gCO ₂ e/Wh]
g	Facteur de transmission solaire [%]
IHU	Irradiances heure unifiées [Wh/m ²]
J	Irradiation solaire verticale [W/m ²]
K_0	Cible liée à l'indicateur K
M	Constante de type "Big-M" [-]
N^{ctr}	Nombre de contraintes [-]
N^{log}	Nombre de logements [-]
N^{var}	Nombre de variables [-]
PLF	PAC : Facteur de charge [-]
PLR	PAC : Ratio de charge [%]
R	Résistance thermique [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
S^H	Surface habitable d'un bâtiment [m^2]
T	Température [K]
u	Coefficient de transmission thermique [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$]
V	Volume [m^3]

Variables

C	Fonction de coûts [€]
E	Consommation d'énergie [Wh]
F	Facture énergétique [€]
FC	Prix du combustible utilisé après rénovation [€/Wh]
FE	Facteur d'émissions du combustible utilisé après rénovation [gCO ₂ e/Wh]
G	Facteur solaire après rénovation [%]
H	Efficacité du chauffage après rénovation [%]
I	Coût d'investissement [€]
I'	Coûts de remplacement [€]

K	Indicateurs utilisés comme contraintes [-]
M	Coûts de maintenance [€]
P	Puissance [W]
Q	Besoin d'énergie [Wh]
U	Coefficient de transmission thermique après rénovation [W/m ² /K]
W	Émissions de GES [gCO ₂ e]

Variables de décision

em	Variable pour l'activation du remplacement des émetteurs [0-1]
v	Remplacement de la ventilation [0-1]
x	Rénovation thermique de l'enveloppe [0-1]
y	Changement du système de chauffage [0-1]
z	Activation d'un couple rénovation thermique-changement du chauffage [0-1]

Chapitre 1

Introduction

Contenu du chapitre

1.1	Contexte de la thèse	2
1.1.1	La transition énergétique territoriale	2
1.1.2	La digitalisation au cœur de la transition énergétique	10
1.2	État de l’art et positionnement	14
1.2.1	L’aide à la décision par une approche exploratoire	14
1.2.2	L’aide à la décision par l’optimisation	17
1.3	Quelle optimisation pour l’aide à la décision territoriale ?	19
1.3.1	Variables, contraintes et objectifs	19
1.3.2	Formulation générale	21
1.4	Objectifs de la thèse et enjeux associés	22
1.5	Structure du manuscrit	23
1.6	Publications issues de la thèse	24

1.1 Contexte de la thèse

1.1.1 La transition énergétique territoriale

1.1.1.1 Contexte environnemental et énergétique

L'Homme, de par ses activités, a toujours eu un impact sur son environnement : prélèvement des ressources, fabrication de biens, transport, agriculture et élevage, urbanisation ou encore production et consommation d'énergie. Si cet impact a longtemps été mineur, du fait de la faible population de la planète et d'un mode de vie rudimentaire, celui-ci a explosé suite à un événement majeur. La révolution industrielle, aux alentours du XIX^e siècle, a en effet fait basculer une société à dominante agraire et artisanale vers une société commerciale et industrielle et a ainsi engendré de nombreux effets : exode rural et urbanisation, développement des transports, mécanisation ou encore augmentation de la productivité. Si cette mutation sociétale profonde a radicalement transformé et considérablement amélioré les conditions de vie, elle exerce désormais une forte pression sur l'environnement.

Le nombre croissant d'habitants sur Terre, couplé avec ces nouveaux modes de vie, induit des problématiques majeures : épuisement des ressources, pollution et destruction des habitats. Ces trois impacts sont, à des degrés divers, à l'origine de nombreuses crises environnementales parmi lesquelles :

- L'érosion de la biodiversité
- L'évolution de la disponibilité et de la qualité de l'eau
- La production de déchets
- La désertification
- La dégradation des océans
- Le changement climatique

Le changement climatique, également appelé dérèglement ou réchauffement climatique, a depuis des années concentré la majorité de l'attention publique. On appelle changement climatique la modification durable du climat de la Terre et à l'augmentation des températures océanique et de l'air. S'il y eut un temps où certaines voix s'élevaient encore pour remettre en cause le rôle de l'Homme dans ce changement, voire son existence même, force est de constater qu'elles sont désormais bien moins nombreuses. L'origine anthropique de ce dérèglement est maintenant considérée comme "extrêmement probable" par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC) [1] chargé d'étudier les causes et les conséquences du réchauffement climatique, affirmant qu'il est induit par l'augmentation des Gaz à Effet de Serre (GES) liés aux activités humaines.

Ce dérèglement climatique a de nombreux effets, en plus de l'augmentation des températures en elle-même, comme la montée des eaux et l'augmentation de phénomènes météorologiques extrêmes (ouragans, inondations, sécheresses) et est devenu une thématique centrale dans le débat public.

Face à ce constat, un large mouvement dit de **transition écologique** voit le jour pour construire un monde plus durable, visant à réduire l’impact des activités humaines sur son environnement.

Parmi les activités à fort impact environnemental, nombreuses sont celles qui sont en lien avec le domaine de l’énergie.

Les Hommes ont des besoins énergétiques pour de nombreux usages personnels (chauffage, éclairage, transport...) ou professionnels (industrie...). Ces besoins entraînent une certaine consommation d’énergie et la fourniture (production) correspondante. L’observation des données relatives à la fourniture d’énergie révèle d’ailleurs une croissance quasi ininterrompue au niveau mondial, reflétant l’augmentation des besoins énergétiques (voir Fig. 1.1). Le constat est différent aux niveaux européens et français où, après avoir observé une augmentation similaire, la tendance semble être à une légère baisse sur les 10 dernières années.

Une seconde observation concerne les sources d’énergie. Au niveau mondial et européen, les sources employées sont en majorité des sources dites *fossiles* (pétrole, charbon, gaz). Les sources d’énergie fossiles possèdent des ressources limitées et les stocks disponibles s’amenuisent. De plus, leur exploitation est productrice de GES. La France présente quant à elle une situation particulière du fait de la forte utilisation de l’énergie nucléaire pour produire de l’électricité, mais demeure consommatrice de produits pétroliers et de gaz en particulier. Si le nucléaire présente un bilan carbone limité en comparaison avec les autres sources fossiles, il n’en demeure pas moins issu d’un combustible présent en quantité limitée sur notre planète et le traitement des déchets issus de la fission est un problème non résolu à ce jour et sujet à controverses.

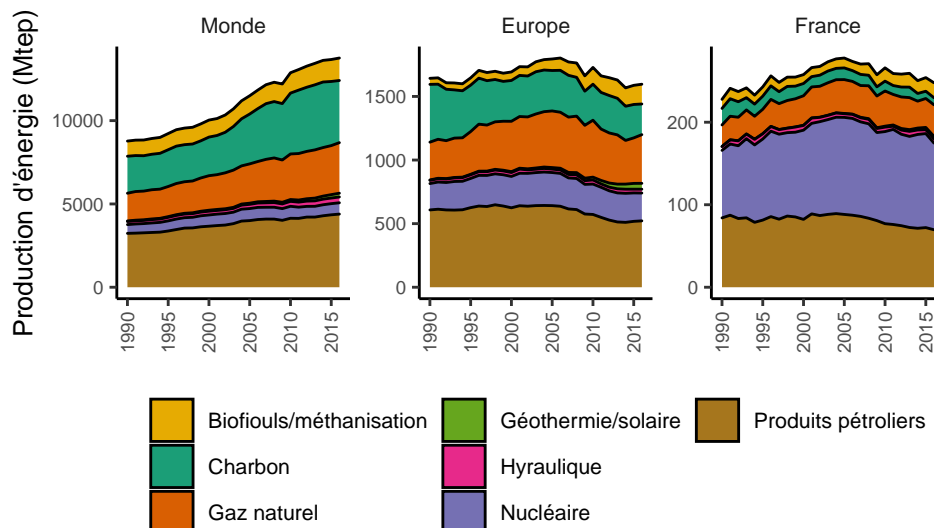


FIGURE 1.1 – Évolution de la fourniture d’énergie dans le monde, en Europe et pour le cas français depuis 1990. Données : IEA World Energy Balances 2018.

Au regard de la situation énergétique présentée précédemment, il est possible d’identifier

trois grands moyens d'action permettant de réduire l'impact humain sur l'environnement du fait de sa dépendance énergétique :

1. La réduction du besoin énergétique aussi appelée sobriété énergétique
2. La réduction de la consommation énergétique ou amélioration de l'efficacité énergétique
3. L'amélioration de la fourniture énergétique par l'utilisation de moyens de production et des combustibles plus propres

Ce volet majeur de la transition écologique lié au domaine de l'énergie est appelé **transition énergétique**. Ressource fondamentale dans la société actuelle, l'énergie thermique, électrique ou mécanique est actuellement produite et consommée avec peu de considérations envers l'environnement, en générant notamment des déchets, des émissions polluantes localement ou globalement. Les trois grands axes présentés précédemment doivent être pensés et appliqués dans tous les secteurs de l'énergie (agricole, industriel, résidentiel, tertiaire et transport) afin d'aboutir à une utilisation plus raisonnée de l'énergie.

1.1.1.2 Contexte politique

Le contexte environnemental et énergétique décrit dans la section précédente a engendré une prise de conscience globale sur la nécessité de penser le futur différemment. Sous l'impulsion d'initiatives internationales, de nombreux pays ont engagé un processus de transition écologique au sens large, afin de construire demain une société plus juste et respectueuse de l'environnement. Depuis le début des années 2000, certaines avancées ont été réalisées à de nombreux niveaux, internationaux comme nationaux. Au niveau mondial, différents accords ont été signés : lors de la conférence de Rio de Janeiro en 1992 (Agenda 21), le protocole de Kyoto de 1995 ou plus récemment les conférences des Nations unies sur les changements climatiques (aussi appelées COP) de Copenhague en 2009 et Paris en 2015. Si les résultats restent mitigés, les textes signés lors de ces événements définissent des engagements concrets pris par les différents états pour limiter le changement climatique, et servent généralement de base pour définir des politiques énergétiques à une maille géographique plus fine. Ainsi, l'Union européenne a fixé en 2008 les objectifs "20-20-20" d'ici 2020 : réduction de 20% des émissions de CO₂, augmentation de 20% de l'efficacité énergétique et augmentation de 20% de la part des énergies renouvelables dans le mix de production [2–4]. Ceux-ci ont été réévalués en 2014 à "40-27-27" à l'horizon 2030 [5].

Tous ces engagements internationaux et européens ont poussé les gouvernements de chaque état, parmi lesquels le gouvernement français, à établir des lois nationales sur la transition énergétique. Dans l'hexagone, les lois Grenelle (2009), Grenelle 2 (2010), Brottes (2013) ou dernièrement la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2015) ont apporté un cadre légal aux orientations énergétiques nationales qui sont

décrites concrètement et régulièrement actualisées au sein de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE).

Bien que l'échelle nationale se prête particulièrement à la définition d'orientations *macro*, le pilotage concret d'un chantier de cette ampleur est extrêmement complexe à un tel niveau du fait de la grande diversité de facteurs locaux (climat, urbanisme, densité de population, ressources naturelles, tissu économique...). Si les actions engagées à l'échelle nationale visent à donner une direction commune à l'ensemble du pays, les compétences et la mise en œuvre des actions concrètes sont déléguées aux collectivités locales [6] - régions, départements, villes et communes - qui doivent traduire ces engagements en actes. L'importance de la planification énergétique à l'échelle urbaine dans la lutte contre le réchauffement climatique a également été particulièrement soulignée par le GIEC [1]. Ces collectivités ont comme mission d'établir leurs propres objectifs stratégiques, mais aussi opérationnels, c'est-à-dire en matière d'actions concrètes dans le temps et l'espace, décrivant ainsi leur propre **planification énergétique**.

1.1.1.3 Planification énergétique territoriale

La délégation de la mise en œuvre de la transition énergétique aux territoires est décrite dans les différentes lois précédemment citées, qui définissent notamment l'obligation des régions administratives à rédiger un Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET), anciennement Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE), qui définit les objectifs environnementaux de la région et les plans d'action prévus pour les atteindre. Un Schéma Régional de l'Éolien (SRE) y est attaché pour définir les zones favorables au développement de l'énergie éolienne [7]. Le Gestionnaire du Réseau de Transport (GRT) et le Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD) d'électricité, RTE et généralement Enedis, doivent alors établir le Schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables (S3REnR), qui établit les capacités réservées aux Énergies Renouvelables (EnR) pour chaque poste de transformation haute-tension/moyenne tension (aussi appelé poste source), ainsi que les investissements qui seront nécessaires pour que le réseau supporte les nouveaux moyens de production prévus dans le SRADDET. Une quote-part à payer par les producteurs EnR y est ainsi définie, afin de répartir les coûts de renforcement du réseau entre tous les producteurs entrants.

De manière similaire, des documents-cadres sur la transition énergétique doivent être rédigés à une échelle plus fine : le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) pour toutes les intercommunalités de plus de 20 000 habitants, ainsi que le Plan Local d'Urbanisme (PLU) et le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) qui doivent être ajustés pour être cohérents avec tous les précédents documents [7]. Les relations et connexions entre les différents plans et schémas sont résumées en Figure 1.2 tandis que le détail de l'ensemble des plans, engagement et schéma incombant aux territoires sont recensés en Annexe A.

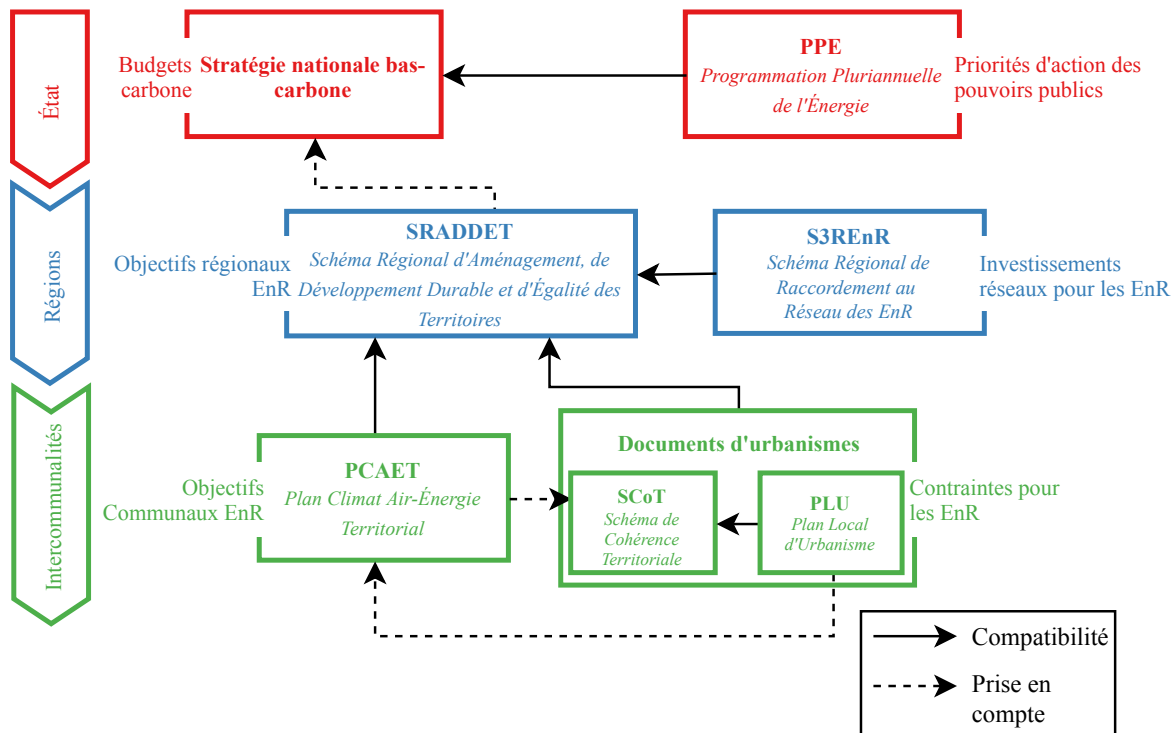


FIGURE 1.2 – Schéma récapitulatif des textes de planification énergétique : Les plans sont déclinés aux niveaux national, régional et intercommunal, et des compatibilités sont requises entre un certain nombre de plans. Source : inspiré de Boyette [7]

Il est important de noter que certains territoires vont même plus loin que les obligations imposées par l'état, en adhérant à des programmes ambitieux tels que les programmes "Territoires à énergie positive" (TEPOS)¹, ou encore en rejoignant l'initiative européenne qu'est la convention des maires².

Cependant, le pilotage de la transition énergétique et l'établissement d'une planification énergétique propre comportent un certain nombre de difficultés pour les collectivités. Il s'agit en effet pour elles d'avancer de manière pondérée sur plusieurs leviers d'action très variés (rénovation thermique, systèmes énergétiques, production renouvelable, transports...), liés les uns aux autres et qui doivent être considérés comme faisant partie d'un même problème global. Tout comme une bonne solution ne doit pas faire l'impasse sur l'un des leviers cités précédemment, il faut également que les spécificités d'un territoire soient prises en compte (politique, géographie, structure foncière, climat...). Tous les territoires ne peuvent pas nécessairement se doter d'une expertise technique sur l'ensemble de ces domaines, pour des raisons financières ou de ressources humaines notamment. C'est d'autant plus vrai que la planification énergétique à l'échelle locale est un problème présentant des composantes politiques, techniques et économiques complexes dans un contexte parfois incertain [8, 9].

1. <http://www.territoires-energie-positive.fr/>

2. <https://www.conventiondesmaires.eu/>

La planification énergétique, qu'elle soit territoriale ou nationale, est généralement définie et évaluée par rapport à différents facteurs, que l'on nomme *indicateurs*. Ceux-ci peuvent être économiques, techniques ou environnementaux (voir Déf. 1.1).

Définition 1.1

Les **indicateurs de la transition énergétique** sont des indicateurs mesurables qui servent à quantifier la performance d'un territoire en lien avec le contexte de la transition énergétique. Ces indicateurs peuvent être classés en trois catégories :

- Les indicateurs économiques : Des indicateurs économiques courants sont par exemple le coût d'investissement ou le montant de la facture énergétique.
- Les indicateurs énergétiques : La demande énergétique et la consommation énergétique sont deux indicateurs énergétiques courants de la transition énergétique.
- Les indicateurs environnementaux : Les émissions de gaz à effet de serre constituent un indicateur environnemental courant.

Pour assister les collectivités dans leur démarche de planification énergétique, l'utilisation d'outils capables de transcrire leurs objectifs stratégiques en plans d'action concrets (c.-à-d. en matière d'actions tangibles à mener), pertinents et adaptés aux spécificités du territoire est souvent perçue comme un véritable manque par les collectivités [10]. Le travail de recherche mené dans cette thèse cherche à combler ce manque en développant un outil capable d'aider les territoires à faire des choix éclairés sur des thématiques liées à la transition énergétique.

1.1.1.4 Périmètre d'étude de la thèse

La présente thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) : le projet SHAPE (Simulations pHysiques pour l'Aide à la Planification Énergétique). Né de l'observation de cet environnement technique et normatif complexe et fort d'une volonté d'apporter une aide adaptée aux territoires, ce projet cherche à répondre à la problématique suivante : *comment organiser la convergence des outils de simulation des systèmes énergétiques décentralisés, développés dans le cadre d'une démarche scientifique, avec les attentes des collectivités engagées dans une démarche de transition énergétique.*

L'objectif est alors de développer un prototype d'outil d'aide à la décision pour la planification énergétique des territoires qui, tout en tirant parti des dernières avancées scientifiques en termes de simulations énergétiques détaillées, soit l'émanation de besoins concrets exprimés par les collectivités.

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) est partenaire des Mines Pa-

risTech dans le cadre du projet SHAPE. Cet acteur reconnu du secteur de l'environnement et du bâtiment apporte son expertise sur de nombreuses thématiques, notamment la thermique du bâtiment et les énergies renouvelables. Un certain nombre de leurs outils sont utilisés dans cette thèse et seront introduits dans le manuscrit.

Définition 1.2

L'**aide à la décision** décrit l'ensemble des techniques permettant à un acteur de prendre la meilleure décision possible face à un problème.

Si cette définition peut sembler sujette à interprétation, on peut garder à l'esprit que l'aide à la décision est d'autant plus grande que l'acteur pourra prendre une décision éclairée sans posséder de connaissance préalable particulière du sujet en jeu.

Le projet SHAPE ne se limite *a priori* pas à un secteur en particulier et cherche à intégrer un maximum de dimensions du problème de la transition énergétique (consommation, production, réseaux, transport, etc.). Cependant, dans le cadre de cette thèse, toutes les thématiques ne peuvent être considérées et nous choisissons la thématique du bâtiment comme périmètre d'étude. Plus particulièrement, la consommation d'énergie de chauffage dans le cas des usages résidentiels est considérée.

La consommation énergétique finale est en effet issue de cinq secteurs majeurs : l'agriculture, l'industrie, le transport, le résidentiel et le tertiaire. En 2016, les secteurs résidentiel et tertiaire pesaient pour plus de 30% dans la consommation énergétique mondiale, divisée entre le résidentiel (24.15%) et les usages commerciaux et d'administration (9.09%) (voir Fig. 1.3). En France comme dans l'Union européenne, cette part s'élève même à 45% environ, faisant du secteur du bâtiment un gisement important d'économies d'énergie et justifie qu'une attention particulière y soit prêtée. De plus, l'usage le plus consommateur d'énergie pour le résidentiel et le tertiaire est le chauffage, qui compte en France pour environ 66% de la consommation d'énergie dans le résidentiel et 47% dans le tertiaire (voir Fig. 1.4). De plus, les secteurs résidentiel et tertiaire représentaient à eux deux environ 20% des émissions de GES en 2017 [11]. Ce rôle prépondérant peut notamment s'expliquer par le mauvais état du parc bâti en France : près de la moitié des bâtiments français ont en effet été construits avant 1975, date de la première réglementation thermique (1974).

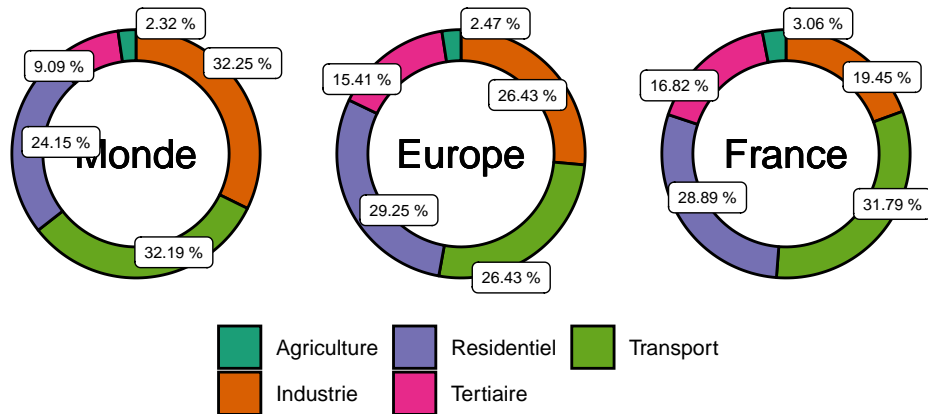


FIGURE 1.3 – Répartition des consommations d'énergie par secteurs dans le monde, en Europe et pour le cas français en 2016. Données : IEA World Energy Balances 2018.

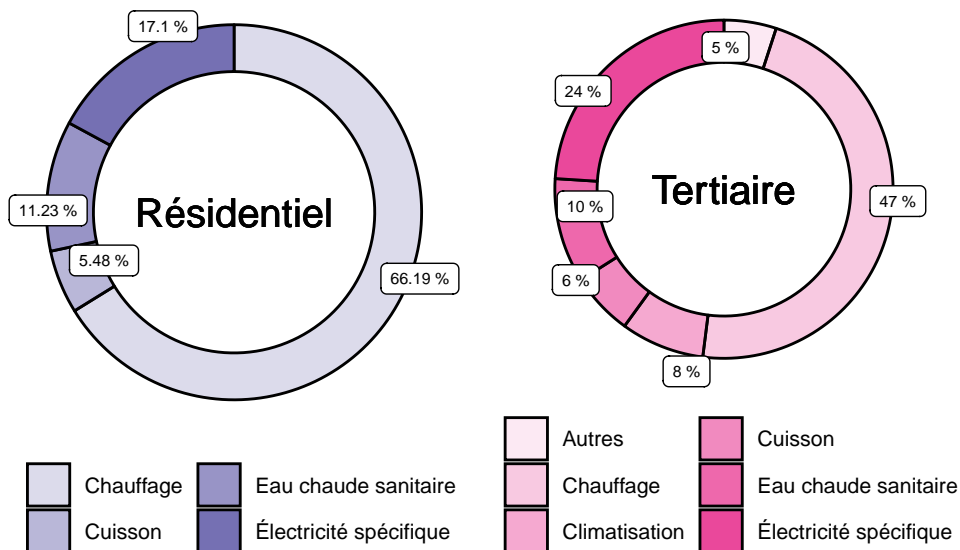


FIGURE 1.4 – Répartition des usages de l'énergie pour les secteurs résidentiel et tertiaire en 2016. Données : CEREN³.

De ce constat est né un fort intérêt pour la thématique de la réduction de la consommation et des émissions dans le secteur du bâtiment. Ainsi, un effort tant industriel, institutionnel qu'académique s'est intensifié dans les dernières années pour :

1. Modéliser le comportement énergétique d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments
2. Développer des moyens de contrôler et réduire cette consommation énergétique
3. Identifier les stratégies de mise en œuvre des solutions développées pour les appliquer à la vie réelle

En cherchant à développer une méthode capable de proposer aux territoires des plans

d'action concrets pour réduire la consommation énergétique du secteur résidentiel-tertiaire, la présente thèse contribue donc principalement à la troisième thématique. Cette approche ne peut cependant pas faire l'impasse sur une bonne connaissance des deux premiers points pour proposer des stratégies adéquates à mettre en œuvre sur le parc bâti du territoire.

1.1.2 La digitalisation au cœur de la transition énergétique

Depuis plusieurs années et notamment depuis l'avènement de l'ère du numérique, les acteurs du monde de l'énergie tels que les GRT et GRD ont suivi une tendance générale consistant à collecter de plus en plus de données issues des consommateurs, de réseaux ou encore de l'environnement. Si eux s'en servent principalement à des fins techniques (facturation, détection de défaillances, connaissances métier, etc.), un certain nombre de ces données s'avèrent utiles pour les collectivités désireuses de réduire leur empreinte énergétique, notamment celle de leurs secteurs résidentiel et tertiaire. En effet, elles représentent une observation fine et surtout fiable du comportement énergétique de leur territoire.

1.1.2.1 Des données variées et nombreuses

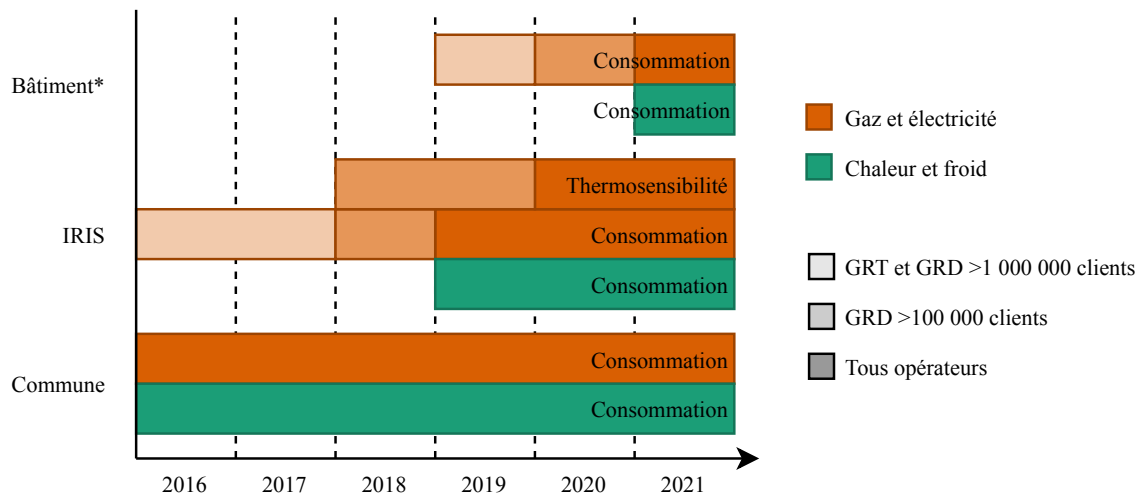
Big Data ? Des données à profusion

Avec le temps, les données amassées par les divers acteurs forment des bases toujours plus massives, jusqu'à devenir redondantes et démesurées. Ainsi donc, les acteurs publics comme privés de l'énergie et d'autres domaines, se retrouvent souvent confrontés à ce que l'on appelle le Big Data : un ensemble de données qui est tellement massif et complexe que son traitement n'est pas intuitif. La frontière entre base de données classique et Big Data n'est pas parfaitement claire. À titre d'exemple, l'utilisation de données de consommation issue des compteurs intelligents Linky, déployés à l'échelle nationale, relève du Big Data.

OpenData ? Des données pour tous

L'OpenData, ou donnée ouverte, est une donnée numérique dont l'accès et l'usage sont libres. Les données proposées en OpenData peuvent aussi bien provenir d'organismes publics (collectivité, service public, état) que privés (gestionnaire de réseau, entreprise). Durant la dernière décennie, la tendance est clairement à l'ouverture des données pour les rendre accessibles au plus grand nombre, en faisant ainsi un bien commun dont la diffusion est d'intérêt public et général. Cette tendance se traduit par une évolution de la législation, tant au niveau international que national. En effet, dès 2003 le Conseil de l'Union européenne a adopté une directive en ce sens, avant de lancer la directive INSPIRE en 2007 [12]. Cette directive vise à harmoniser la structure des données géographiques en Europe afin d'en assurer l'interopérabilité et faciliter la disponibilité, la diffusion, l'utilisation et la réutilisation de l'information géographique en Europe. Allant dans le même sens, les chefs d'État ont signé une "Charte du G8 pour l'ouverture des données publiques" lors du Sommet du G8

de 2013⁴. Ces données peuvent emprunter différentes formes et finalités, incluant bien entendu celles ayant attrait à l'énergie. Au niveau national, dès le début des années 2000, le mouvement a été initié pour rendre accessibles les données publiques essentielles. Celles-ci sont majoritairement d'ordres juridiques. En 2011, le portail `data.gouv.fr` est ouvert et est géré par la mission Etalab. Celle-ci accueille les données mises en OpenData par l'état et ses sous-autorités, mais toujours peu de données concernent le monde de l'énergie qui demeure fermé à l'OpenData. Les données des GRT et GRD ne sont alors pas accessibles à tous. Il faudra attendre le 17 août 2015 et la Loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte (LTECV) pour voir l'apparition de l'article 179 qui impose la publication des données de consommation et de production annuelles, par énergie et par secteur à différentes échelles spatiales, la plus fine étant l'Ilots Regroupés pour l'Information Statistique (IRIS), issue du découpage INSEE. Les obligations de publication des données s'échelonnent dans le temps, et petit à petit des données de plus en plus fines sont disponibles et des données devraient être proposées à l'échelle du bâtiment dans un futur proche (initialement prévu en 2019, voir Fig. 1.5).



*Si le bâtiment contient plus de 10 points de livraisons. Sinon, les bâtiments sont regroupés pour garantir l'anonymat

FIGURE 1.5 – Planning de publication des données en OpenData par les gestionnaires des réseaux de transport et de distribution d'énergie. Source : inspiré de [13] (Janvier 2017)

Les différents textes et directives présentés plus haut ont eu pour effet une explosion du nombre de jeux de données disponibles sur les plateformes dédiées. À titre d'exemple, la Figure 1.6 présente l'évolution du nombre de jeux de données mises à disposition chaque année sur le site de données du gouvernement `data.gouv.fr`, (a) au total et (b) dans le cas restreint des données en lien avec la thématique énergie, environnement et logement. Etalab a par ailleurs pris de l'ampleur ces dernières années, au point d'être reconnue comme un exemple au niveau mondial. [14]

4. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/207772/Open_Data_Charter.pdf

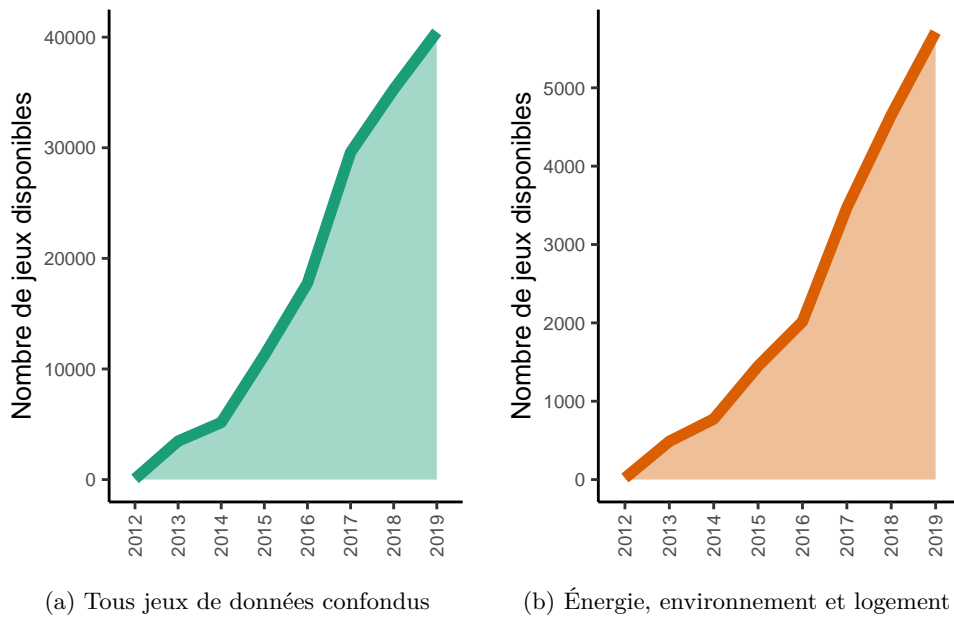


FIGURE 1.6 – Évolution du nombre de jeux de données disponibles sur la plateforme Open-Data du gouvernement depuis son ouverture en décembre 2011. Source : `data.gouv.fr`

SIG ? Des données géolocalisées

Le terme de Système d’Information Géographique (SIG) désigne généralement une base de données géolocalisée. Ce système d’information est conçu pour pouvoir stocker, traiter et analyser des données spatiales. En soi, une base de données à laquelle on ajoute une information de localisation devient de facto un SIG. La localisation peut être ponctuelle, linéaire ou polygonale, mais également sous forme de relief ou d’objet 3D. Ainsi, la base de données de consommation d’électricité à l’échelle de la maille IRIS, fournie en Open Data par les GRD est un SIG car elle est géolocalisée sur le polynôme de la maille correspondante.

1.1.2.2 Inventaire des données pour la modélisation territoriale

En France, de nombreux acteurs gèrent des bases de données, aux origines et applications multiples. On peut bien entendu faire une distinction entre les acteurs publics et privés, mais aussi entre les données qui sont ou en accès libre (Open Data) ou en accès privé (propriétaire ou accessible, mais payant). Ces acteurs font parfois partie du monde de l’énergie, auquel cas leurs données ont un intérêt certain pour la transition énergétique, mais d’autres données provenant d’instituts plus “généraux” ou ayant des objectifs premiers éloignés de l’énergie s’avèrent également précieuses comme les données de cadastre ou les données de recensement.

L’**Institut Géographie National (IGN)** est l’acteur cartographique national principal et fournit un grand nombre des services au grand public. Quelques produits sont disponibles en accès libre comme des outils de cartographie à faible résolution, mais l’IGN fournit

surtout des données aux secteurs privés et académiques. Ils entretiennent de nombreux SIG, lesquels décrivent l’environnement (modèle numérique de terrain, base topographique, hydrographique, etc.), mais également les constructions humaines (bâtiments, routes, etc.). Les données sont proposées dans des formats vectorisés et utilisables sur des moyens informatiques. Le produit phare proposé par l’IGN est la BDTOPO (pour base de données topographique). Parmi les données qu’elle contient, on peut citer l’empreinte au sol des bâtiments avec des informations sur la hauteur et les usages.

L’**Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE)** est l’organisme public responsable du recensement de la population Française, et de toutes les études statistiques qui y sont liées. La plupart des statistiques et études sont disponibles en accès libre à une échelle spatiale fine, définie par un découpage géographique appelé maille IRIS (de l’ordre de 2000 habitants, et au minimum de la taille d’une commune administrative). Parmi les données disponibles, on peut notamment citer les données de recensement qui sont publiées chaque année. On y retrouve à l’échelle de la maille IRIS de l’information sur les ménages tel que leur taille, leurs équipements de confort, leur profession, etc. L’INSEE a également procédé à des campagnes de sondage plus précises comme l’enquête PHEBUS portant sur les performances énergétiques de 10,000 bâtiments en France, ou l’enquête logement (voir Sec. 2.3.3). Les données brutes de ces travaux sont généralement disponibles sur demande.

Le **gouvernement** possède lui aussi de nombreuses données pouvant servir la modélisation territoriale. Certaines sont proposées en accès libre sur le site de données OpenData du gouvernement, par exemple le cadastre français, rendu public courant 2017, ou encore une base détaillée sur les logements sociaux, décrivant le parc Français constitué de près de 5 millions de logements. D’autres données sont en accès restreint, notamment proposées aux collectivités, comme la base MAJIC de la DGFIP/CEREMA qui décrit tous les logements de France en termes d’âge de construction, de surface habitable, de nombre de chambres et d’autres données permettant d’établir la taxe foncière des propriétaires. D’autres organismes peuvent y accéder, sous réserve de s’affranchir d’un coût d’acquisition.

Les grands acteurs de l’énergie, tels que les fournisseurs d’énergie, les gestionnaires de réseaux d’électricité et de gaz, possèdent des données propriétaires (qui leur sont propres) bien entendu liées à leur domaine d’expertise. Ainsi, **Enedis** possède des données de consommation de ses clients, relatives à la puissance souscrite, au type de contrat, à la puissance de raccordement, au poste électrique de raccordement, etc. Ils possèdent aussi des données précises issues de l’instrumentation de leurs équipements comme les postes de transformation. De même, **GRDF** possède des données de consommation de gaz, le nom et la localisation de ses clients, etc. Suite à la LTECV, GRDF et ENEDIS proposent leur propre site de données OpenData, où l’on peut trouver des données agrégées de consommation à une échelle cohérente avec l’INSEE, à savoir la maille IRIS, mais aussi à la maille régionale, la maille départementale, communale ou EPCI. D’autres données comme la consommation à

l'échelle nationale, des profils de consommateurs ou des localisations de bornes électriques pour véhicules électriques et hybrides sont également disponibles.

Le domaine de la donnée est très complexe : du fait de la difficulté d'harmonisation, le format et le contenu des bases de données sont grandement dépendants de la zone géographique d'étude et du contexte politique. Ce domaine est également très dynamique : comme illustré par la Figure 1.6, de nouvelles informations paraissent régulièrement et une veille doit être menée pour rester à jour sur les bases de données disponibles. C'est pourquoi nous avons réalisé un inventaire détaillé des bases de données disponibles en France, pouvant servir la modélisation énergétique territoriale. Une synthèse est présentée en Annexe B sous la forme d'un tableau recensant les bases de données décrivant le contexte énergétique, environnemental, bâti, socio-économique ou encore les bases utiles pour l'identification de potentiel renouvelable.

Cet état des lieux met en valeur la grande quantité de données disponibles, possédant pour certaines une résolution spatiale fine qui offre des perspectives intéressantes pour modéliser précisément le comportement énergétique des territoires.

1.2 État de l'art et positionnement

La présente thèse se propose de répondre à un problème d'aide à la décision appliqué à la transition énergétique. Un certain nombre de travaux tant académiques qu'opérationnels (les deux mondes se recouvrant même parfois) cherchant à répondre à cette problématique ont été identifiés. Cette section passe en revue les approches existantes pour l'aide à la décision territoriale, afin d'identifier les principaux manques et établir un positionnement de la méthode à développer. L'objectif ici est de situer l'outil que l'on souhaite développer dans le paysage des outils d'aide à la décision territoriale. Les états de l'art techniques en lien avec les modèles scientifiques développés pour construire l'outil seront eux présentés au sein du manuscrit, notamment en introduction des chapitres respectifs.

1.2.1 L'aide à la décision par une approche exploratoire

La grande dimension du problème de planification énergétique à une échelle territoriale rend l'identification d'une solution idoine compliquée. Par exemple, comme expliqué dans le travail de Nutkiewicz et al. [15] pour le cas de la rénovation du bâtiment, il peut exister pour chaque bâtiment des centaines de plans de rénovation qui sont la combinaison de dizaines de possibilités de rénovation par type de paroi (mur, toit, sol) ainsi que de nombreuses alternatives de changement de systèmes de chauffage et de froid. Le nombre de combinaisons de rénovation à l'échelle d'un territoire croît alors de manière exponentielle avec le nombre de bâtiments, et l'identification d'un plan d'action adapté s'avère dès lors complexe.

Les méthodes d'exploration, aussi appelées *scenario-based*, sont alors particulièrement prisées. Leur principe est relativement simple : un certain nombre de scénarios, ou plans

d'action, sont définis par l'utilisateur et simulés individuellement, avant d'être comparés les uns aux autres. La génération des plans d'action se fait en amont, soit par un groupe d'experts définissant lui-même les mesures à activer [16], ou en fixant un curseur caractérisant le niveau d'application des différents leviers (par exemple remplacer 30% des fenêtres simple vitrage par du double vitrage)[17, 18]. Les scénarios sont simulés à l'aide soit de modèles s'appuyant sur une représentation physique du problème tel que l'outil MEU de l'EPFL [19], LEAP [20], EnergyPlus [21] ou EnergyPLAN [22], ou sur des modèles simplifiés *macros* si la résolution est grossière. L'utilisation de tels outils de simulation est possible du fait du nombre limité de scénarios à évaluer. Suite aux simulations, un certain nombre de scénarios peuvent être écartés de l'ensemble des solutions, car ils ne respectent pas une ou plusieurs contraintes définies par le décideur, comme la réduction des émissions de GES par exemple. Les scénarios restants sont en général évalués et comparés les uns aux autres, en se basant sur l'Analyse de Décision Multicritère (MCDA), souvent utilisée du fait de sa simplicité mathématique[17, 18]. Cette approche tient compte des préférences spécifiées par le décideur pour attribuer des poids aux différentes composantes du problème et ensuite une note à chaque scénario. Le scénario le mieux noté est présenté comme le plan d'action idéal pour le territoire.

Ces méthodes reposent sur la définition des scénarios à simuler, lesquels représentent un point critique de la méthode. Des scénarios mal définis empêchent d'atteindre une solution réellement efficace pour le contexte étudié et entraînent alors l'adoption d'une solution inadaptée.

Si les précédents travaux émanent du monde académique, on peut constater que les outils opérationnels, c'est-à-dire utilisés par des territoires, utilisent des approches similaires pour accompagner les territoires dans leur transition énergétique.

Nous avons identifié six outils opérationnels comme proposant une aide à la modélisation énergétique territoriale.

ForCity⁵, de la société Lyonnaise éponyme, propose divers outils pour les collectivités sur les thématiques économiques, de gestion de l'eau et des déchets, mais aussi énergétiques. Le volet énergétique permet une modélisation de la consommation énergétique du bâtiment d'un territoire à partir des données accessibles en Open Data pour planifier ou piloter les réseaux de chaleur. Cet outil de modélisation ne propose pas d'aide à la décision concernant la transition énergétique. Qui plus est, il est voué à disparaître étant donné que l'entreprise a annoncé sa cessation d'activité en août 2019.

Le projet Equitée, mené par le BURGEAP⁶ possède des points communs avec l'approche que nous souhaitons adopter. Un diagnostic énergétique est fourni à partir de données statistiques agrégées disponibles à la maille géographique dite IRIS (plus de détail dans le Chapitre 2). L'outil de prospective et aide à la décision se concentre sur la simulation de

5. <https://www.forcity.com/>

6. <http://www.equitee.fr/>

scénarios d'aménagement proposés par le territoire et ne lui fait pas de propositions.

MEU⁷, développé par l'EPFL [19] est un outil d'aide à la décision pour l'aménagement urbain, qui permet de réaliser un état des lieux énergétique des territoires. Encore une fois, la dimension d'aide à la décision se limite à la construction de scénarios énergétiques par l'utilisateur suivie de simulations précises pour permettre de les évaluer.

Prosper⁸ est un outil de prospective énergétique qui permet à l'utilisateur de créer des scénarios énergétiques et de tester leur impact à différents horizons temporels à une maille assez fine (EPCI voire commune).

EDF, propose l'outil en ligne MonSTER⁹ qui propose de visualiser les effets de scénarios de transition énergétique (volontariste, tendanciel, 3x20...) sur des indicateurs (consommation, production, émissions...) à l'échelle régionale. L'étude se réalise à l'échelle *macro*, sans détails sur les bâtiments, et les plans d'action sont encore une fois à l'initiative des territoires. Cet outil s'avère instructif pour dessiner une tendance à l'échelle globale et régionale, mais demeure insuffisant lorsqu'il s'agit de définir des politiques énergétiques précises, en termes d'actions concrètes.

Enfin, La société Artelys¹⁰ a développé une suite logicielle Artelys Crystal, composée de nombreux modules ayant attrait à la modélisation énergétique. Le volet City est un outil d'aide à la planification territoriale et propose là aussi de simuler des scénarios proposés par les territoires, en intégrant les thématiques de consommation, de production ou économiques.

Si l'on se réfère à la classification des méthodes des modèles énergétiques établie par van Beeck [23], ensuite reprise par la revue de littérature de Prasad et al. [24] ou encore la thèse de Neves [25], tous ces outils opérationnels d'aide à la décision reposent sur des outils de simulation. Leur utilisation pour l'identification d'une solution *optimale* dans le domaine de la planification énergétique repose sur une approche exploratoire, où les gouvernances locales simulent des effets de plans d'actions qu'elles ont auparavant élaborées, afin d'en évaluer leur pertinence.

L'aide à la décision de l'ensemble des méthodes présentées dans cette section se limite donc finalement à la simulation de scénarios énergétiques fournis par l'utilisateur. Ce fonctionnement comporte deux principales limites :

1. La construction de scénarios est demandée aux territoires, ce qui requiert une forte implication et expertise. Si la participation des acteurs locaux est raisonnable pour la définition d'objectifs, l'observation faite dans la Section 1.1.1.2 sur la difficulté des territoires à appréhender toutes les composantes du problème de planification énergétique laisse penser que leur participation dans la définition des actions concrètes à mener peut se révéler bloquante.

7. <https://www.crem.ch/MEU>

8. <http://www.energies-demain.com/planification/>

9. <https://www.edfmonster.com/>

10. <https://www.artelys.com/fr/applications/artelys-crystal-city>

2. Les scénarios construits “manuellement” n’ont aucune garantie d’être optimaux, ou même efficaces. En effet, on peut vérifier qu’un plan d’action permet d’atteindre les objectifs du territoire, mais rien ne garantit qu’il n’existe pas une autre solution plus en adéquation avec les caractéristiques du territoire, ses ressources naturelles et son parc immobilier par exemple. En cela, les outils existants ne sont pas à proprement parler des outils d’aide à la décision, car ils ne permettent pas “à un acteur (personne, collectivité) de prendre la meilleure décision possible face à un problème.” (cf. définition plus haut).

Au vu de ces conclusions, il semble que l’approche exploratoire ne soit pas adaptée à la planification d’actions concrètes à l’échelle du bâtiment du fait de la taille de l’espace de décision à couvrir et donc de la difficulté pour les territoires d’établir des plans d’actions efficaces à évaluer. Une approche utilisant des modèles d’optimisation semble plus adéquate, notamment afin que l’outil soit capable de générer un (des) plan(s) d’action pertinent(s), car optimal(aux).

1.2.2 L’aide à la décision par l’optimisation

Pour pallier les manques de ces approches exploratoires utilisant les modèles de simulation, celles dites par optimisation ont été développées. L’étude de la littérature académique permet de réaliser trois observations principales, lesquelles permettront d’orienter notre travail.

Capacité de résolution ou précision des modèles ?

Dans le cadre de la rénovation thermique du bâtiment, de nombreuses études utilisent des modélisations complexes. Certains travaux optimisent ainsi la rénovation thermique d’un bâtiment en utilisant des modèles statistiques complexes de la demande (quadratiques,...)[26, 27] alors que de nombreux autres travaux utilisent directement des modèles dynamiques [28–31].

Ces modèles présentent une grande précision et permettent une bonne représentativité des phénomènes physiques en jeu, mais aussi des particularités propres à chaque bâtiment. En revanche, ils sont difficilement compréhensibles (par les acteurs territoriaux notamment) et l’identification des facteurs déterminants n’est pas facilitée. Enfin, leur utilisation au sein d’un processus d’optimisation est complexe et nécessite l’utilisation d’algorithmes dits heuristiques, comme les algorithmes génétiques (*Genetic Algorithm*), de colonies de fourmis (*Ant Colony*) ou les essaims particulaires (*Particle Swarm*). Si de tels algorithmes peuvent être adaptés pour des problèmes d’optimisation de petite taille comme l’optimisation à l’échelle d’un bâtiment, ils deviennent inadaptés lorsqu’on considère un territoire complet.

Pour pallier ce problème, notamment lorsque l’on cherche à travailler sur des problèmes de plus grande dimension, des modèles statiques très simples sont utilisés [32, 33]. Cette

approche permet une résolution plus aisée à l'échelle d'un territoire, mais fait forcément l'impasse sur une certaine précision des modèles en se basant sur des effets moyens. La compréhension des différents facteurs d'influence est en revanche facilitée.

À la suite de ces observations faites sur une branche précise de l'aide à la décision territoriale, il est possible de conclure que le fait de travailler à une maille géographique conséquente comme celle d'un territoire impose certaines contraintes sur les modèles à employer. Si des modèles élaborés sont inadaptés, une sur simplification des modèles entraînerait des erreurs importantes dans les recommandations apportées aux territoires. Un équilibre doit donc être trouvé entre la finesse des modèles et leur utilisation dans une optique d'aide à la décision territoriale.

Quelle optimisation pour l'aide à la décision ?

L'approche d'optimisation classique qui cherche à fournir une solution unique à un problème tel que celui de la rénovation énergétique doit être considérée avec précaution. En effet, une étude approfondie de la littérature académique portant sur les problèmes de planification énergétique nous amène en effet à deux observations :

- Un problème de planification n'est pas cartésien, simple et donc sa solution n'est pas facilement identifiable. En effet, lorsque l'on s'intéresse à un problème impliquant de nombreux acteurs, notamment publics, la modélisation est complexe et toutes les variables ne peuvent pas être incluses dans un modèle mathématique [34, 35].
- La considération d'un optimum unique dans les modèles de prospective est souvent remise en question [36–38]. Ces travaux appuient l'argument que la recherche d'une solution idéale, représentée par un optimum économique unique, ne permet pas de répondre à un problème de planification. En particulier, Trutnevyte [36] souligne l'importance de ces approches pour décrire l'évolution d'un système énergétique dans un marché parfait, pour décrire “ce qui devrait se passer” (c'est ce qu'on appelle la prospective énergétique), mais qu'ils n'ont pas vocation à définir une politique énergétique. Ce même travail introduit la notion de “near-optimal”. Ce nouveau paradigme propose désormais de travailler dans des espaces proches de l'optimum économique, mais en autorisant une certaine liberté autour de celui-ci.

Ces deux observations doivent être prises en compte dans le développement de l'outil, et en particulier dans la formulation du problème d'optimisation à implémenter. Ainsi, il semble que l'outil doit être en mesure de proposer non pas un optimum unique, mais un panel d'alternatives, toutes crédibles et efficaces, car *near-optimales*.

Une temporalité pour l'aide à la décision ?

L'optimisation dans la planification énergétique est particulièrement prisée dans le domaine

de la prospective énergétique. Les modèles MARKAL/TIMES [39–44] et MESSAGE¹¹ y sont couramment utilisés et consistent en une modélisation simplifiée d'un système énergétique et la description de son évolution à moyen et long terme par un problème d'optimisation. Ils cherchent généralement à minimiser les coûts actualisés du système, tout en imposant le respect d'un certain nombre de contraintes : l'équilibre offre-demande à chaque pas de temps, taux d'installation de moyens de production ou de rénovation ou respect d'objectifs en matière d'émissions de GES ou de consommation par exemple. Connaissant les informations relatives au système énergétique telles que la demande énergétique du territoire, le modèle va dérouler l'évolution du système énergétique de l'année initiale jusqu'à la fin de la période d'évaluation, à un pas de temps fin. En sortie de ces outils, un plan d'action unique à appliquer au territoire est décrit, avec également la temporalité des actions à mener. Si l'approche de prospective énergétique s'appuie sur une prise en compte de la temporalité des actions, notamment dû à la nécessité de conserver un équilibre offre-demande, l'aide à la décision territoriale peut *a priori* s'en affranchir. En effet, le territoire, s'il ne doit pas raisonner sans considérer l'échelon supérieur dans sa planification énergétique, n'est pas dans la nécessité de fournir sa propre énergie. Il est connecté aux réseaux nationaux de gaz et d'électricité et peut de se fait être parfois demandeur, parfois producteur d'énergie.

On observe d'ailleurs que les études visant à optimiser la rénovation thermique du bâtiment ne prennent pas en compte la temporalité des actions, et ce, quelle que soit la modélisation adoptée.

Aussi, l'outil d'aide à la décision vise principalement à offrir une photographie de l'état actuel du territoire et des actions les plus pertinentes à mettre en œuvre à un instant t . La temporalité des actions est donc exclue du périmètre de la thèse.

1.3 Quelle optimisation pour l'aide à la décision territoriale ?

Cette section définit la forme générique d'un problème d'optimisation permettant de représenter le contexte de la planification énergétique. Si elle sera par la suite appliquée au problème de la mise en œuvre de la rénovation thermique, cette formulation es plus générale. Elle représente un contexte de politique publique et peut être étendue à d'autres leviers et d'autres secteurs.

1.3.1 Variables, contraintes et objectifs

Suite aux observations issues de la littérature, il est alors possible d'établir une approche globale pour l'optimisation des mesures de transition énergétique.

La définition d'un problème d'optimisation passe par la définition de trois éléments principaux :

11. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html>

- Les variables de décision : quels sont les leviers d'action disponibles ?
- Le ou les objectifs : Quel(s) indicateur(s) souhaite-t-on optimiser (maximiser ou minimiser) ?
- Les contraintes : Quelles limites pèsent sur le problème ?

Dans le contexte de la transition énergétique, les variables de décision, notées X se déclinent en fonction des leviers d'action considérés. Certaines variables vont modéliser la mise en œuvre de mesures de réduction de la demande, de la consommation ou d'amélioration de la fourniture.

Les territoires définissent des objectifs stratégiques au sein de documents comme les SRADDET ou les PCAET (voir Sec. 1.1.1.3). Ceux-ci utilisent un certain nombre d'indicateurs énergétiques et environnementaux impactés par les mesures de transition. Ces objectifs stratégiques des territoires, également appelés cibles, sont *de facto* des valeurs minima à atteindre (de consommation, d'émissions, etc.). Dans le contexte de la planification énergétique territoriale, on peut donc considérer ces objectifs stratégiques comme des contraintes et non des objectifs de minimisation.

$$\text{Indicateur}^k(X) \leq \text{Cible}^k \quad (1.1)$$

En revanche, ce sont les facteurs économiques qui semblent, eux, diriger les choix de mise en œuvre. Plusieurs points de vue co-existent, lesquels vont impacter le choix de la fonction objectif. Nous distinguons trois approches principales :

Minimisation des investissements : cette approche ne prend en compte que les coûts d'investissement dans la fonction objectif. On se place alors dans une position de gestionnaire de parc (non-habitant). On cherche à investir un minimum d'argent, tout en s'assurant d'atteindre le ou les objectifs stratégiques du territoire. Cette stratégie peut par exemple correspondre aux collectivités ou aux bailleurs, disposant d'un budget limité ou souhaitant que leurs administrés n'aient pas un coût d'investissement trop dissuasif. Cette approche a l'avantage d'être facile à interpréter.

La fonction objectif est simplement définie comme la somme des coûts d'investissement sur l'ensemble du territoire.

$$\text{Objectif} = \min \sum_{\text{Territoire}} \text{Invest.}(X) \quad (1.2)$$

Minimisation des coûts totaux : en plus des coûts d'investissement, cette approche considère les coûts et bénéfices économiques futurs induits par la rénovation du bâtiment. Ainsi, la réduction des factures énergétiques par les travaux de rénovation est considérée comme un paramètre important, mais également les frais d'entretien et de remplacement des différents systèmes. Ceux-ci sont alors intégrés dans la fonction objectif.

Cette approche modélise par exemple le comportement d'un particulier, propriétaire occupant, souhaitant rénover son bien et qui va considérer les bénéfices de ses travaux de rénovation à plus ou moins long terme dans son calcul économique. Cette prise en compte de l'ensemble des coûts liés à l'énergie considère la réduction de la consommation non plus uniquement comme une contrainte, mais comme pouvant fournir un bénéfice.

Dans cette approche dite en coûts totaux, la fonction objectif est définie comme la somme sur l'ensemble du territoire des coûts d'investissement initiaux ainsi que l'ensemble des coûts de maintenance, de remplacement et de facturation annuelle de l'énergie décomptés au cours d'une période d'évaluation. L'investissement est en revanche toujours décidé au début de la période d'évaluation.

$$\text{Objectif} = \min \sum_{\text{Territoire}} \left(\text{Invest.}(X) + \sum_{\text{Temps}} \left(\text{Maint.}(X, t) + \text{Rempl.}(X, t) + \text{Fact.}(X, t) \right) \right) \quad (1.3)$$

Optimisation multi-objectif : la dernière approche envisagée correspond à un point de vue omniscient. Cette approche considère un objectif non pas centré sur des considérations économiques, mais cherchant un équilibre entre plusieurs objectifs concurrents. Cette approche apporte des enseignements théoriques, mais est détachée du contexte de la planification énergétique territoriale où l'objectif demeure avant tout économique. Les coûts d'investissements, la consommation d'énergie et la production renouvelable peuvent être considérés comme des objectifs.

$$\text{Objectifs} = \begin{cases} \min \sum_{\text{Territoire}} \text{Invest.}(X), \\ \min \sum_{\text{Territoire}} \text{Conso.}(X), \\ \max \sum_{\text{Territoire}} \text{Prod.}(X), \\ \dots \end{cases} \quad (1.4)$$

La résolution de problèmes d'optimisation multi-objectifs permet d'atteindre une meilleure utilisation des ressources, et des situations plus globalement optimales. C'est pourquoi, bien qu'éloignée d'une réalité de terrain, elle est souvent observée dans la littérature [30–32, 45]. Cette approche n'est pas considérée dans un premier temps étant donné que l'on cherche à construire une méthode opérationnelle, adaptée aux besoins des territoires.

1.3.2 Formulation générale

Nous adoptons la forme suivante comme structure générale du problème d'optimisation des mesures de rénovation du bâtiment suivante :

$$(P-1) \quad \begin{array}{ll} \underset{X}{\text{minimiser}} & \text{Coûts}(X) \\ \text{tel que} & \text{Indicateur}^k(X) \leq \text{Cible}^k, \quad \forall k \in K \end{array}$$

L'objectif est une fonction économique pouvant intégrer, selon l'approche adoptée, les investissements, les coûts de maintenance et de remplacement ou les facturations. Les différents engagements stratégiques des territoires, basés sur des indicateurs énergétiques et environnementaux comme la réduction de la consommation ou des émissions des GES, sont passés en contrainte. L'ensemble des indicateurs considérés comme contraintes est noté K . La valeur de chaque indicateur k doit respecter la contrainte *macro*, qui correspond à l'objectif stratégique.

Nous devons modéliser chacun des indicateurs impliqués dans le problème d'optimisation en tenant compte des observations issues de la littérature, notamment concernant le compromis entre la simplicité et la précision. Le problème d'optimisation pourra être adapté pour sortir du paradigme de la solution unique et chercher à générer des alternatives crédibles et efficaces.

1.4 Objectifs de la thèse et enjeux associés

Au vu de l'état de l'art présenté dans la Section 1.2, basé sur un grand nombre de méthodes et d'outils académiques comme opérationnels, on peut établir que l'objectif de cette thèse est **le développement d'un outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre des mesures de rénovation énergétique des secteurs résidentiel**. Les leviers d'actions pris en compte incluent la rénovation thermique des bâtiments ainsi que le remplacement des systèmes de chauffage. L'outil doit s'adapter au contexte du territoire, notamment politique en intégrant ses objectifs *macro*, et prendre en compte ses spécificités (type de bâtiments, climat, ressources économiques et naturelles...) tout en intégrant une modélisation réaliste des enjeux techniques de la transition énergétique.

L'objectif principal de la thèse peut se décomposer en trois sous-objectifs et leurs enjeux scientifiques associés.

- Établir un problème d'optimisation capable d'arbitrer entre les différents leviers de la transition énergétique pour proposer aux territoires une aide à la décision pertinente. L'outil d'optimisation doit fournir un plan d'action détaillé à appliquer au territoire. L'enjeu scientifique réside dans l'adaptation d'un problème d'optimisation à la problématique de la mise en œuvre de la transition énergétique : choix des objectifs et contraintes, choix des variables, génération de plusieurs solutions *near-optimales*...
- Intégrer une modélisation fiable des leviers de la transition énergétique adaptés à la taille du problème à résoudre et à sa nature opérationnelle.

L'enjeu scientifique réside dans l'adoption de modèles réalisant le compromis entre une finesse permettant une bonne représentativité de la réalité et un niveau de complexité permettant leur intégration dans un problème d'optimisation dont la formulation permet une résolution à l'échelle territoriale.

- Baser l'ensemble de la méthode sur des données d'observation.

L'enjeu scientifique réside dans l'identification et l'exploitation des bases de données permettant de modéliser le contexte propre au territoire ainsi que le contexte technico-économique de la transition énergétique (les solutions techniques).

1.5 Structure du manuscrit

Pour atteindre les différents objectifs établis dans la section précédente, le présent manuscrit s'articule en quatre chapitres.

Le premier chapitre du manuscrit se concentre sur la modélisation énergétique à l'échelle territoriale. Cette modélisation consiste dans un premier temps dans la description détaillée du territoire à partir de bases de données accessibles aux acteurs locaux. Dans un second temps, un modèle permettant l'estimation de la consommation des bâtiments est construit. Celui-ci repose sur un méta-modèle du besoin de chauffage et dépend des caractéristiques physiques des bâtiments. Le modèle adopte une structure permettant des estimations rapides à l'échelle du territoire.

Le second chapitre détaille la modélisation technico-économique des solutions de rénovation énergétique qui seront intégrées dans l'outil d'optimisation. Une analyse statistique des performances des constructions neuves permet notamment de définir les solutions de rénovation thermique. Les systèmes de chauffage comme les chaudières et les pompes à chaleur font l'objet d'une modélisation dédiée. Encore une fois, tous les modèles sont développés pour faciliter leur intégration dans un problème d'optimisation de grande dimension.

Le troisième chapitre du manuscrit présente le modèle d'optimisation à proprement parler. Une attention particulière est encore une fois portée à la dimensionnalité du problème et à sa capacité de résolution à grande échelle, notamment à travers le choix des variables de décisions. Les performances de la méthode développée sont quantifiées sur des territoires virtuels.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre du manuscrit présente différentes applications de la méthode développée. La procédure complète de modélisation et d'optimisation des mesures de rénovation énergétique est mise en œuvre à un territoire d'étude, permettant d'observer divers comportements. Enfin, diverses problématiques énergétiques, techniques ou politiques sont analysées en utilisant l'outil d'optimisation.

1.6 Publications issues de la thèse

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont été valorisés par la publication d'un article dans un journal à comité de lecture.

- A. Rogeau, R. Girard, Y. Abdelouadoud, M. Thorel, and G. Kariniotakis. Joint Optimization of Building-envelope and Heating-system Retrofits at Territory Scale to Enhance Decision-aiding. *Applied Energy, Volume 264*, April 2020.
(doi : 10.1016/j.apenergy.2020.114639) (postprint : hal-02491850)

La participation à deux conférences internationales ont également permis de communiquer sur les travaux réalisés sur diverses problématiques.

- A. Rogeau, R. Girard, G. Kariniotakis and N. Kong. An address-matching algorithm for household-scale databases to enhance electricity demand characterization. *MED-POWER conference*, November 2018.
(doi : 10.1049/cp.2018.1893) (postprint : hal-01948608)
- A. Rogeau, R. Girard, Y. Abdelouadoud, and G. Kariniotakis. Retrofitting a building stock : modeling and optimization for decision aiding at territory scale. *Journal of Physics : Conference Series, Volume 1343*, November 2019.
(doi : 10.1088/1742-6596/1343/1/012029) (postprint : hal-02337521)

Enfin, deux articles sont en cours de rédaction en vue d'une soumission à un journal à comité de lecture.

- A. Rogeau , R. Girard, G. Kariniotakis. Parametric analysis of energy-retrofit actions at territory-scale based on an integrated optimization formulation.
Statut : en cours de rédaction (Soumission prévue en Juillet 2020)
- A. Rogeau, R. Girard, G. Kariniotakis. A method for estimating seasonal performances of heat-pumps from temperature time-series considering part-load operation.
Statut : en cours de rédaction rédaction (Soumission prévue en Juillet 2020)

Chapitre 2

Modélisation énergétique à l'échelle territoriale

Contenu du chapitre

Résumé du chapitre	26
2.1 Introduction	27
2.2 Une modélisation du territoire adaptée au contexte énergétique	28
2.2.1 Un modèle de territoire, qu'est-ce que c'est ?	28
2.2.2 Quel modèle de territoire pour la rénovation énergétique ?	29
2.3 Construction d'un modèle de territoire	30
2.3.1 Le socle : les empreintes au sol	30
2.3.2 Enrichissement : informations structurelles	30
2.3.3 Inférence des caractéristiques énergétiques	32
2.3.4 Validation du modèle de territoire et perspectives	35
2.4 Approches pour la modélisation énergétique des bâtiments	36
2.4.1 Les différents modèles <i>bottom-up</i>	37
2.4.2 Modélisation statistique de la consommation électrique	37
2.4.3 Classification des modélisations ingénieures de la consommation	38
2.5 Modélisation énergétique territoriale : état de l'art	40
2.5.1 Les modèles réduits dynamiques pour la simulation urbaine	40
2.5.2 Les modèles réduits (quasi-)statiques pour la simulation urbaine	43
2.6 Construction d'un modèle de consommation pour l'optimisation	43
2.6.1 Une base : le modèle simplifié de besoin de chauffage	44
2.6.2 Amélioration du modèle simplifié	47
2.6.3 Méta-modèle du besoin de chauffage	49
2.6.4 Autres indicateurs énergétiques et dérivés	51
2.7 Conclusion	53

Résumé du chapitre

La modélisation est un enjeu clé de l'aide à la planification territoriale, notamment en ce qui concerne l'obtention de données fiables et la réalisation du compromis complexité-précision. Ce chapitre décrit donc l'approche de modélisation énergétique territoriale adoptée, laquelle se décompose en deux temps.

Dans un premier temps, une procédure de construction d'un modèle de territoire est présentée. Celle-ci vise à décrire l'état initial du parc bâti à partir de diverses bases de données. L'empreinte au sol des bâtiments sert de socle à ce modèle, et est enrichie d'informations structurales (année de construction, matériaux ou encore usage) et énergétiques (caractéristiques thermiques, ventilation et systèmes de chauffage) successivement. Deux processus d'enrichissement différents sont décrits, l'un s'appuyant sur un appariement à l'adresse et l'autre sur une inférence statistique. Les perspectives d'une modélisation territoriale fine et fiable autorisent alors la construction des modèles de consommation à l'échelle désagrégée du bâtiment.

La seconde partie de ce chapitre présente alors différentes méthodes de modélisation de la consommation énergétique des bâtiments. Celles-ci sont analysées au regard de leur compatibilité avec un usage territorial, et leur capacité d'intégration dans un problème d'optimisation de grande dimension. Sur les bases de cette analyse, un modèle de consommation de chauffage est construit.

Un modèle permanent du besoin est dans un premier temps utilisé, intégrant les conditions climatiques du territoire *via* des degrés de chauffe annuels et leur pendant en termes d'apports solaires. Celui-ci est confronté à des simulations dynamiques territoriales qui mettent en lumière les limites d'un tel modèle. Pour pallier ces limites, les ombrages entre bâtiments sont considérés en amont de l'évaluation et un méta-modèle du besoin est entraîné sur le modèle dynamique. Ce méta-modèle présente de bonnes performances (erreur absolue moyenne inférieure à 4%) tout en gardant une structure linéaire.

2.1 Introduction

Il existe de nombreuses approches pour la modélisation de la consommation énergétique des bâtiments, lesquelles sont habituellement divisées en deux catégories principales [23, 46–48] (voir Fig. 2.3) :

- Les approches descendantes ou *top-down* utilisent la consommation énergétique globale ainsi que d'autres variables pertinentes d'un parc bâti pour attribuer la consommation d'énergie à certaines de ses caractéristiques structurelles générales. Les différents éléments qui composent le parc, comme les bâtiments, ne sont pas considérés de manière explicite. Cette modélisation de la consommation globale repose par exemple sur une description par des paramètres macro-économiques (prix de l'énergie, revenus des ménages), ainsi que des paramètres techniques (densité de population, surface de logements).
- Les approches ascendantes ou *bottom-up* reposent quant à elles sur le calcul de la consommation énergétique à partir d'une description riche et détaillée des éléments qui composent le parc bâti. Ces approches considèrent notamment les technologies en lien avec la demande et la fourniture d'énergie. La modélisation repose sur l'impact quantifié de sous-éléments du territoire sur son comportement global. Le comportement total est obtenu par agrégation du comportement des sous-briques le composant.

Les modèles *top-down*, notamment économétriques, sont particulièrement adaptés pour représenter une évolution douce et globale de la consommation pour mesurer l'impact de politiques (taxes, subventions) sur celle-ci. En revanche, ils ne permettent pas de modéliser des comportements n'ayant pas été observés par le passé comme des ruptures technologiques et des changements de comportements des consommateurs. Cela rend leur utilisation compliquée pour la modélisation de la transition énergétique. La description de la consommation par les sous-ensembles qui la compose fait des modèles *bottom-up* des modèles idoine pour une utilisation dans le cadre d'une modélisation des mesures de la transition énergétique, qui vont impacter chaque bâtiment individuellement.

La mise en place d'une démarche ascendante requiert la construction d'une *modélisation énergétique* adaptée. De manière générale, la modélisation peut se décomposer en trois blocs distincts :

- La description structurelle du territoire : quels sont les éléments qui composent le territoire, et quelles sont leurs caractéristiques techniques ?
- La construction et l'utilisation d'un modèle de consommation énergétique : connaissant les caractéristiques des éléments composant le territoire, comment se calcule la consommation énergétique ? Quelle est-elle ?
- La validation des résultats : les estimations de la consommation sont-elles fiables ? Dans le cas où un écart serait observé, une calibration de la méthode d'estimation est

alors possible.

Ces trois étapes sont étroitement liées les unes aux autres. Notamment, le niveau de détail des données doit être suffisant pour permettre l'utilisation du modèle de consommation choisi, tout comme le modèle de consommation doit se satisfaire des données disponibles au niveau territorial.

Nous avons identifié deux limites principales, en lien avec les blocs cités plus haut, concernant l'utilisation des approches *bottom-up* pour la modélisation énergétique territoriale :

- La difficulté de la collecte de données : les modèles de consommation énergétique reposent souvent un grand nombre de données d'entrée. Si des campagnes de mesure *in situ* peuvent être mises en œuvre à l'échelle du bâtiment, une telle précision des données est inimaginable à l'échelle du territoire. Ainsi, la problématique de l'accès aux données devient cruciale pour les modèles énergétiques territoriaux. Se posent alors plusieurs questions : comment obtenir ces données ? Quelle résolution peut-on atteindre ?
- La complexité des modèles de consommation énergétiques et les longs temps de calcul induits : le passage de l'échelle du bâtiment à celle du territoire entraîne une augmentation inéluctable des temps de calcul. Ainsi, le choix du modèle de consommation énergétique doit être en adéquation avec le contexte spatial de l'évaluation.

Au vu des problématiques identifiées, ce premier chapitre présente la construction d'une modélisation énergétique territoriale pour l'optimisation des mesures de rénovation énergétique. Une première section présente la construction d'une description structurelle du territoire à partir de bases de données accessibles aux acteurs locaux. Une seconde section établit une modélisation de la consommation énergétique qui peut être utilisée en grandes dimensions et qui s'appuie sur les données accessibles au niveau territorial.

2.2 Une modélisation du territoire adaptée au contexte énergétique

2.2.1 Un modèle de territoire, qu'est-ce que c'est ?

Comme présenté en introduction, il existe un grand nombre de données disponibles à l'échelle territoriale. De natures variées (sondages, SIG, tableaux, recensements...) et issues de sources diverses, elles décrivent le territoire sous de nombreux aspects (démographique, structurel, géographique,...). La combinaison judicieuse de ces données afin de construire une *méta*-base décrivant l'état énergétique d'un territoire représente un enjeu scientifique important. La nature et le contenu des différentes bases de données dépendent du contexte local (notamment des gestionnaires de données nationaux), et voient certains pays bénéficier de données plus facilement exploitables pour modéliser le comportement énergétique d'un

territoire. Par exemple, l'outil MEU précédemment présenté [19] tire profit de données suisses relativement complètes décrivant en détail l'état du parc bâti des territoires, fournies par les collectivités elles-mêmes. Cependant, la France ne dispose pas d'une telle richesse et il s'avère alors nécessaire de mener un travail d'enrichissement des différentes bases de données pour modéliser un territoire de manière précise et fiable.

Du fait de l'approche adoptée dans cette thèse, le modèle énergétique du territoire est orienté autour de la thématique du bâtiment, et se concentre principalement sur la consommation due au chauffage. Chaque territoire est composé d'une même structure, définissant sa consommation énergétique : un parc bâti, constitué de bâtiments présentant une grande diversité. Cette diversité peut être une diversité d'usages (résidentiel, tertiaire, . . .), structurelle (maison individuelle ou logement collectif) ou encore constructive (matériaux de construction, isolation. . .). Une bonne modélisation de ce parc permet d'une part une compréhension profonde du contexte initial, mais également une identification fiable des potentiels offerts par les mesures de transition énergétique.

2.2.2 Quel modèle de territoire pour la rénovation énergétique ?

Le modèle de territoire doit être pensé au regard de son utilisation future. Dans notre cas, ce modèle cherche d'une part à représenter le comportement énergétique d'un territoire à un instant t , mais également à servir de support pour l'optimisation à venir des mesures de transition énergétique. Le niveau auquel sont prises les décisions en lien avec la transition énergétique va déterminer la résolution à adopter dans la modélisation du territoire. Les mesures de transition peuvent être divisées en deux catégories principales :

1. La sobriété énergétique \rightarrow la rénovation thermique du bâtiment permet de réduire le besoin de chauffage. Différentes mesures peuvent être mises en œuvre sur chaque paroi des bâtiments. Le principal effet de la rénovation thermique réside dans la réduction du coefficient de transmission thermique des parois (u), dont l'impact sur la consommation sera détaillé au Chapitre 3.
2. L'efficacité énergétique \rightarrow le remplacement des systèmes énergétiques permet de réduire l'énergie consommée pour satisfaire le besoin de chauffage. Le remplacement des systèmes peut s'effectuer pour chacun des bâtiments, et son principal effet réside dans l'amélioration du rendement de conversion combustible-chaleur η , dont l'impact sur la consommation sera là aussi détaillé au Chapitre 3.

On observe que les mesures de transition énergétique identifiées ici sont activables au niveau *infra*-bâtiment, c'est à dire sur des sous-éléments de celui-ci (murs, toit, fenêtres, chauffage, etc.). Afin de pouvoir modéliser au mieux la mise en œuvre des leviers, la résolution spatiale du modèle de territoire doit donc idéalement être capable de représenter ce niveau de prise de décision.

2.3 Construction d'un modèle de territoire

L'objectif de cette section est de développer une procédure complète permettant de construire un modèle de territoire détaillé à partir des diverses bases de données accessibles aux territoires.

2.3.1 Le socle : les empreintes au sol

La géométrie des bâtiments a un fort impact sur leur consommation énergétique. En effet, le besoin de chauffage résulte principalement des déperditions thermiques à travers les parois, qui peuvent être atténuées en cas d'adjacence avec d'autres bâtiments, mais aussi à travers les apports solaires par les vitrages. Une modélisation complète des surfaces en jeu est donc cruciale. De ce fait, une base de données décrivant l'empreinte au sol et la hauteur des bâtiments semble pertinente comme socle du modèle du territoire. Dans le contexte français, deux bases de données fournissent cette donnée : le cadastre et la BDTOPO.

- **Cadastre/BD Parcellaire** : Le cadastre français (découpage du territoire en parcelles cadastrales) est diffusé par deux organismes, l'IGN et EtaLab. Depuis janvier 2018, le cadastre est libre d'accès, *via* le site OpenData du gouvernement (<http://www.data.gouv.fr>). La version fournie par l'IGN est quant à elle proposée aux organismes à mission de service public, aux collectivités territoriales et aux Établissement Public de Coopération Intercommunale (EPCI). Dans cette base, chaque bâtiment est découpé par parcelle (un bâtiment ne peut pas chevaucher deux parcelles), et n'est décrit que par son empreinte au sol (localisation) et un identifiant unique. L'information de la parcelle dans laquelle il se situe peut également être associée au bâtiment.
- **BDTOPO** : La BDTOPO est un produit livré par l'institut national IGN, mais dont l'accès est restreint (<http://www.professionnels.ign.fr/bdtopo>). L'accès gratuit est garanti pour les missions de service public, les collectivités territoriales et les EPCI à fiscalité propre. Dans le cadre du projet de recherche SHAPE, l'accès à cette base de données est possible. Cette modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures contient une description vectorielle, structurée en objets, de précision métrique. La couche bâtiment décrit l'empreinte au sol de toutes les constructions (indifférenciées, industrielles et remarquables). Des informations précieuses telles que l'altitude ou la hauteur des bâtiments sont également fournies.

La BDTOPO étant plus complète (elle inclut notamment une partie des informations de la BD Parcellaire), elle est choisie comme couche socle pour notre modélisation.

2.3.2 Enrichissement : informations structurelles

La BDTOPO représente uniquement la géométrie des bâtiments, mais aucune information concernant leurs caractéristiques structurelles. Une base de données, MAJIC, contient

des informations concernant les logements des Français.

2.3.2.1 La base MAJIC

La base MAJIC est un ensemble de fichiers décrivant les propriétés bâties, fournis par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP) et utilisés par les territoires pour établir les taxes foncières notamment. Depuis 2009, le CEREMA retraite, géolocalise et enrichit les fichiers fonciers afin de permettre aux acteurs publics de réaliser facilement des analyses fines et comparables sur leur territoire. Les fichiers MAJIC décrivent les caractéristiques structurelles des logements et sont divisés en différentes sous-parties qui contiennent notamment :

- L'identification du local : identifiant unique, adresse, parcelle cadastrale...
- Une description générale : type (maison, appartement, commercial, industriel), année de construction, nombre de niveaux, occupation (propriétaire, locataire, vacant)...
- Une description structurelle : présence de gaz, chauffage central, nombre de pièces, de chambres, matériaux des murs, toitures, surface au sol...

2.3.2.2 Procédé d'appariement

La base BDTOPO peut être enrichie des données de la base MAJIC. Cependant, l'entité de référence de MAJIC est le local fiscal, c.-à-d. le logement, quand le niveau de détail de la BDTOPO se limite au bâtiment. Plusieurs locaux MAJIC peuvent donc être attribués à un bâtiment BDTOPO.

Nous avons alors établi un procédé d'appariement, aussi appelé *matching*, qui se réalise en 3 temps :

1. Les locaux MAJIC sont appairés à une base d'adresses de l'IGN (la BD ADRESSES) par le biais d'un algorithme développé au cours de la thèse. Les différents champs (numéro, complément, rue) sont uniformisés pour assurer une bonne correspondance. Une table de correspondance matricielle est établie pour permettre différents niveaux de qualité au sein d'un même matching, et une opération à l'échelle départementale.
2. Si une bonne correspondance d'adresse est identifiée (rue et numéro correspondent) et si l'adresse est liée à un unique bâtiment, on attribue à ce dernier les caractéristiques structurelles du local MAJIC. Plusieurs locaux appartiennent parfois au même bâtiment (collectif notamment).
3. Si aucune correspondance n'a été trouvée, si la correspondance est de mauvaise qualité ou si l'adresse matchée est attribuée à plusieurs bâtiments, on doit passer par une correspondance locaux-bâtiment au sein d'une parcelle cadastrale. On tira alors parti de l'information contenue dans MAJIC concernant la parcelle cadastrale d'appartenance des locaux. Dans le cas où plusieurs bâtiments seraient présents sur une parcelle, les

locaux sont regroupés en bâtiments et sont attribués de manière à réaliser la meilleure correspondance en termes de surface.

Note : Ces travaux d'appariement ont fait l'objet d'une présentation à la conférence internationale MedPower 2018 à Dubrovnik, Croatie.

Référence : A. Rogeau, R. Girard, G. Kariniotakis and N. Kong. An address-matching algorithm for household-scale databases to enhance electricity demand characterization. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER)*, November 2018 (10.1049/cp.2018.1893) (hal-01948608)

2.3.2.3 Vers un appariement par les acteurs nationaux : la BDTOPO v3

En avril 2019, l'IGN a publié une version de la base BDTOPO enrichie avec les fichiers fonciers de la DGFIP. Cette nouvelle version inclut une grande partie des informations dont nous avons besoin pour la mise en place d'un modèle de territoire : année de construction, matériau des parois, nature et usage. La fourniture d'un tel produit met en lumière l'importance et la pertinence du travail d'appariement. Un tel travail mené conjointement par les propriétaires des bases de données BDTOPO et MAJIC laisse augurer des perspectives intéressantes quant à la disponibilité d'une base unifiée de qualité. Cependant, le taux de remplissage des informations issues de l'appariement est pour l'instant très faible. Un taux de remplissage des données issues de MAJIC observé dans la BDTOPO v3 est de 46% à l'échelle de la France. De plus, il existe une forte disparité de la qualité du *matching* sur le territoire, comme présenté par la Figure 2.1.

Il est possible que l'institut géographique soit tenu de ne publier que des informations dont la fiabilité est jugée importante, laissant un grand nombre de champs vides faute de fiabilité suffisante. Ce faible taux de remplissage pose problème pour une utilisation territoriale où l'on souhaite avoir des informations sur un maximum de bâtiments. De plus, toutes les informations ne sont pas remontées par l'IGN pour des raisons de confidentialité. Le développement de notre propre algorithme d'appariement permet d'obtenir plus de données sur les bâtiments, énergétiques comme la présence de gaz, ou sociales comme le nombre de chambres. L'utilisation de l'algorithme développé dans le cadre de cette thèse demeure donc utile tant que les données fournies par l'IGN ne sont que partiellement remplies.

2.3.3 Inférence des caractéristiques énergétiques

Que ce soit par le biais de la BDTOPO v3 ou *via* un appariement manuel entre l'empreinte au sol et les fichiers fonciers, nous sommes désormais en possession d'une base unifiée. Celle-ci contient la géométrie des bâtiments (empreinte au sol et hauteur) ainsi que leurs caractéristiques constructives (années de construction, usage, matériau des parois...). Des

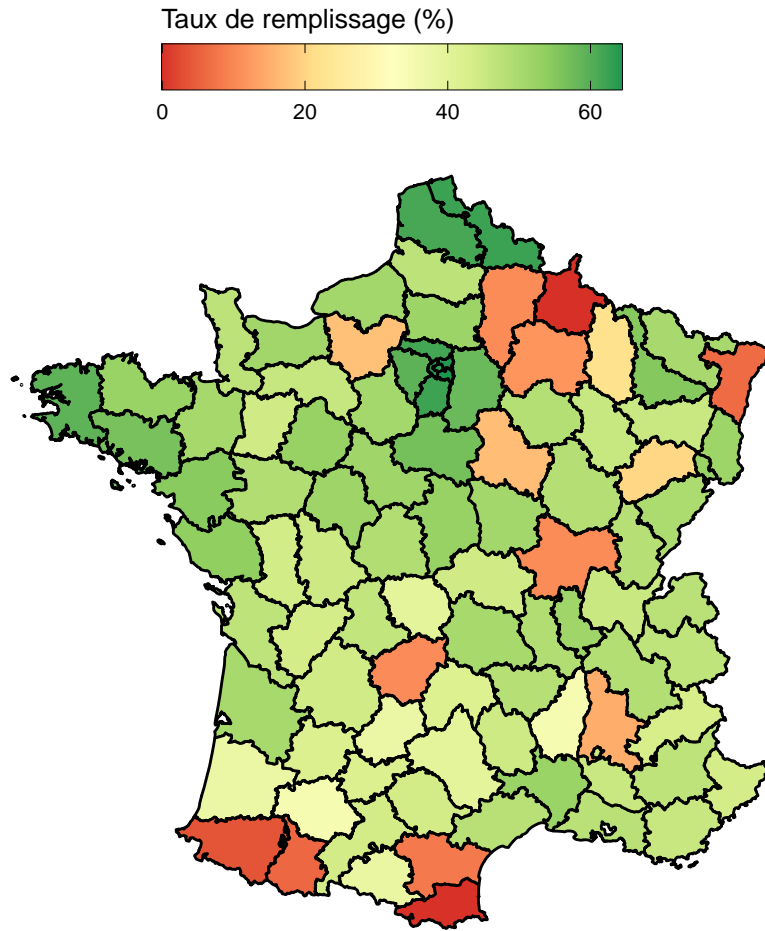


FIGURE 2.1 – Disparité géographique du taux de remplissage des informations provenant de MAJIC dans la BD TOPO v3. Données téléchargée en décembre 2019.

informations concernant les caractéristiques thermiques de parois et les systèmes de chauffage sont nécessaires pour pouvoir utiliser un modèle de consommation des bâtiments.

2.3.3.1 L'enquête PHEBUS

L'enquête PHEBUS (Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie) est une enquête ponctuelle menée en 2013, qui vise à fournir une photographie des performances énergétiques du parc des résidences principales. Cette enquête permet de faire le lien entre la typologie du logement (maison individuelle/immeuble collectif, année d'achèvement, nombre d'étages, zone climatique) ses équipements énergétiques (chauffage, ecs) et la performance de son enveloppe (parois opaques, vitrages, ponts thermiques). Le volet DPE (Diagnostic de Performance Énergétique) présente des données issues de diagnostics de performance énergétique menés sur un échantillon de logements. L'échantillon des logements est tiré dans l'échantillon maître de l'INSEE de l'enquête annuelle de recensement 2011. Il est constitué de 8 000 logements représentatifs des régions, des zones climatiques, des types

d'habitats (maison individuelle ou logement collectif) et des années de construction.

2.3.3.2 Le recensement INSEE

Le recensement permet de connaître la population de la France, dans sa diversité et son évolution. Il fournit des statistiques sur le nombre d'habitants et sur leurs caractéristiques : répartition par sexe et âge, professions exercées, conditions de logement, modes de transport, déplacements domicile travail ou domicile-études, etc. Le recensement est effectué tous les ans. Parmi les informations utiles à la modélisation, car non contenues dans les bases de données utilisées jusque là, les proportions de modes de chauffage (collectif, central électrique, central thermique...) et les proportions de combustibles (fioul, gaz, électricité, biomasse...) sont disponibles à une maille fine : l'IRIS (voir Déf. 2.1).

Définition 2.1

L'IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique) est un découpage géographique définie par l'INSEE, et permet de diviser le territoire français en mailles de taille homogène. L'IRIS constitue la brique de base en matière de diffusion de données infra-communales. Les communes d'au moins 10 000 habitants et une forte proportion des communes de 5 000 à 10 000 habitants sont découpées en IRIS. Ce découpage constitue une partition de leur territoire. La France compte environ 16 100 IRIS, dont 650 dans les DOM.

2.3.3.3 Attribution de caractéristiques énergétiques

Nous avons développé un procédé d'attribution des caractéristiques thermiques des parois des bâtiments par analogie. Celui-ci peut être synthétisé en trois étapes :

1. Définition de groupes de bâtiments en fonction de caractéristiques constructives : année de construction, zone géographique, type de logement, altitude, etc. Les groupes sont notamment définis en cohérence avec les différentes réglementations thermiques historiques, qui correspondent à des évolutions fortes des procédés de construction.
2. Division de la base PHEBUS et de la base BDTPOPO enrichie en fonction de l'appartenance de chacun des bâtiments aux groupes définis à l'étape précédente.
3. Pour chacun des bâtiments de la BDTPOPO, on tire au sort des caractéristiques thermiques d'enveloppe parmi les observations appartenant au même type dans PHEBUS.

Les systèmes de chauffage présents dans chaque bâtiment doivent également être définis. Pour cela, nous mettons en œuvre la procédure suivante :

1. Attribution des modes de chauffage : Le volet logement du recensement de l'INSEE permet d'extraire, à la maille IRIS, la proportion des différents modes de chauffage

(combustible + type) observée localement, en termes surfaciques (% des surfaces chauffées à l'électricité, au gaz, etc.). Les modes de chauffage sont attribués aux bâtiments afin de respecter ces proportions.

2. Définition des systèmes : Pour chaque mode de chauffage, plusieurs systèmes peuvent être mis en œuvre. Les systèmes sont distribués afin de respecter des proportions observées dans l'échantillon représentatif que constituent les logements de l'enquête PHEBUS.

Plus de détails sur la méthode d'inférence développée sont présentés en Annexe D.

2.3.4 Validation du modèle de territoire et perspectives

Afin de s'assurer de la bonne représentativité de la description structurelle du territoire, une validation est nécessaire. Si le tirage pondéré permet de s'assurer de la représentativité du contexte énergétique local, une comparaison entre la consommation du territoire modélisé et des observations garantirait une cohérence en termes de performances du parc bâti.

L'échelle la plus fine à laquelle il est possible d'obtenir des observations de consommation est la maille IRIS, à laquelle des consommations annuelles thermosensibles sont diffusées en OpenData par les gestionnaires de réseaux (voir Sec. 1.1.2.1). Du fait de l'utilisation d'un tirage aléatoire sur un échantillon relativement restreint, les caractéristiques thermiques du parc modélisé peuvent varier d'un tirage à l'autre. Le procédé présenté dans la section précédente est réalisé plusieurs fois pour un même territoire (au moins une dizaine), afin d'obtenir différentes configurations crédibles.

Un outil de simulation dynamique territorial validé, tel DIMOSIM [49], peut être utilisé pour estimer la consommation énergétique des parcs de bâtiments modélisés en prenant en compte sa variation temporelle, dynamique. On compare alors les valeurs annuelles de consommation pour chaque vecteur énergétique (gaz, électricité, bois, fioul et chaleur) et on retient la description structurelle dont la consommation est la plus proche des observations.

Cette tâche de validation n'a pas été menée dans le cadre de cette thèse, et l'obtention d'un modèle de territoire cohérent avec l'observation représente un réel challenge. Il est probable que les procédés d'inférence et d'appariement comme établis aujourd'hui ne permettent pas d'obtenir des simulations de la consommation en accord total avec les observations.

Néanmoins, le CSTB mène des travaux sur cette thématique. Notamment, un stage intitulé "Validation d'outils de simulation énergétique urbaine" effectué en 2019 par Lucie Lefort [50] encapsule à la fois la validation de la méthode d'inférence des données et du modèle thermique. Une méthodologie analogue à celle présentée dans cette section est validée sur différentes IRIS, en confrontant les énergies simulées aux observations. Cette méthode

plus aboutie intègre notamment des modèles d'occupation. Ce stage est d'ailleurs poursuivi par une thèse, débutée en octobre 2019 portant sur la même thématique.

Ces résultats laissent présager qu'une description structurale d'un territoire représentant la diversité des bâtiments en son sein est possible, notamment par l'utilisation de méthodes d'enrichissement et d'inférence. Ils justifient également que l'on construise notre modèle énergétique de territoire (et le modèle d'optimisation de la rénovation énergétique) avec une résolution spatiale de l'ordre du bâtiment et de ses sous-éléments.

La Figure 2.2 résume l'ensemble de la procédure de construction du modèle de territoire.

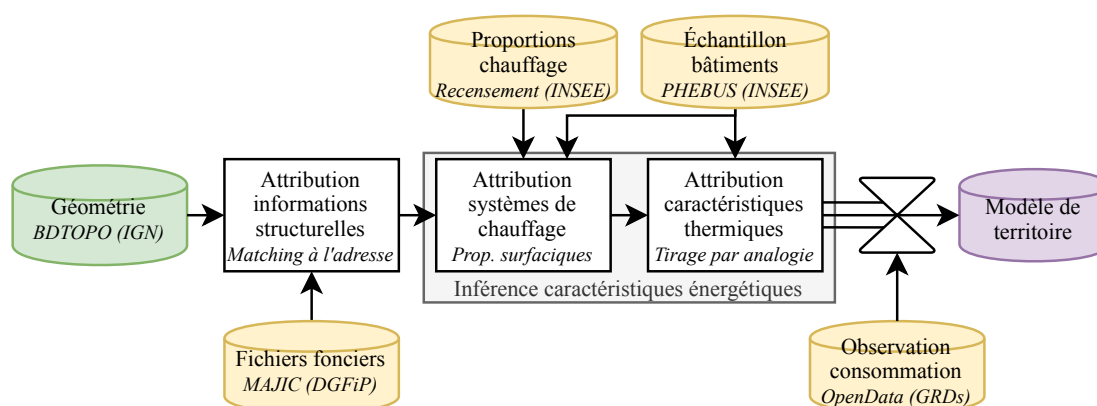


FIGURE 2.2 – Procédure de construction du modèle de territoire à partir d'une description géométrique avec attribution des données structurales et énergétiques.

Note : L'ensemble des méthodes et résultats développés jusqu'ici a été présenté lors de la conférence *CISBAT 2019* du 4 au 6 septembre 2019 et publiés dans le journal *Journal of Physics : Conference Series*.

Référence : A. Rogeau, R. Girard, Y. Abdelouadoud, and G. Kariniotakis. Retrofitting a building stock : modeling and optimization for decision aiding at territory scale. *Journal of Physics : Conference Series*, Volume 1343, November 2019. (10.1088/1742-6596/1343/1/012029) (hal-02337521)

2.4 Approches pour la modélisation énergétique des bâtiments

De nombreuses approches existent pour modéliser la consommation énergétique de chauffage des bâtiments. Cette section décrit les différents modèles observés dans la littérature et permet de situer l'approche que l'on cherche à développer.

Hypothèse :

Étant donnés les conditions météorologiques françaises, le besoin de chauffage est largement majoritaire par rapport au besoin de refroidissement. De plus, encore peu de logements sont équipés en climatisation, ce qui explique la prédominance des usages de chauffage dans la consommation des foyers (voir Fig. 1.4). Pour cette raison, nous avons fait le choix de concentrer la thèse sur la modélisation de la consommation de chauffage.

2.4.1 Les différents modèles *bottom-up*

L'introduction de ce chapitre a présenté la distinction entre les approches de modélisation descendantes et ascendantes, et la pertinence de ces dernières pour modéliser le contexte de la rénovation énergétique. Au sein de ces approches *bottom-up*, on peut distinguer deux familles de modèles (voir Fig. 2.3) :

- Les modèles statistiques, ou “Data-driven models”, sont appliqués à des données historiques, issues du terrain, et cherchent à identifier un lien entre la consommation d'énergie et certaines caractéristiques des consommateurs par le biais d'analyses statistiques comme des régressions. Celles-ci peuvent être d'ordre technique, socio-économique, etc. Ces modèles ne s'appuient pas sur une description de phénomènes physiques, mais sur l'observation de liens qui sont parfois difficilement interprétables. C'est pourquoi on les classe souvent dans les modèles dits boîte noire, ou *black-box*.
- Les modèles ingénieurs, ou “Engineering models”, s'appuient sur une description technique des usages désagrégés. Les modèles peuvent reposer sur les équations de la physique, notamment de la thermodynamique : on parle alors de modèles physiques (des équipements et systèmes, des éléments structurels, etc.). Ils peuvent également s'appuyer sur des analogies, par exemple la modélisation des échanges thermiques par des circuits électriques équivalents : ce sont les modèles RC, calibrés pour correspondre à un contexte de demande consommation énergétique. Ces modèles ont toujours pour objectif de décrire des phénomènes physiques quantifiables, c'est pourquoi ils sont transparents et présentent une bonne interprétabilité : ce sont des modèles dits boîte blanche, ou *white-box*.

2.4.2 Modélisation statistique de la consommation électrique

Une tendance nette de digitalisation est observée dans le secteur de l'énergie (voir Sec. 1.1.2) et l'exploitation des données remontées du terrain représente un enjeu d'avenir certain. Dans le cadre d'un partenariat avec ENEDIS, gestionnaire du réseau de distribution d'électricité, nous avons pu exploiter des données de consommation à l'échelle individuelle. Nous avons cherché à valoriser ces données par le biais d'une modélisation statistique de la consommation électrique des ménages. L'analyse statistique développée recherche les dé-

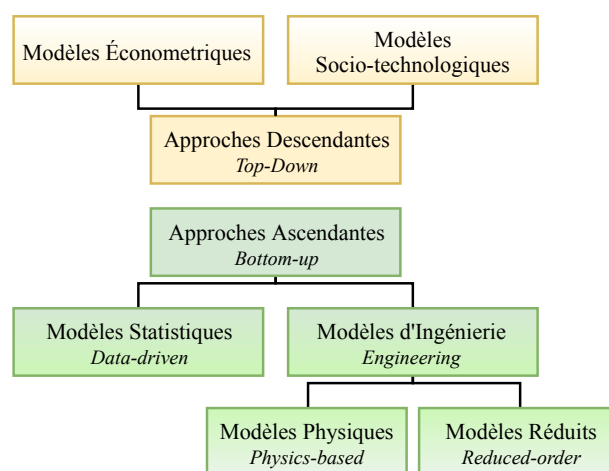


FIGURE 2.3 – Catégorisation des approches de modélisation de la consommation énergétique.
Source : Inspiré de Brøgger and Wittchen [51]

terminants de la consommation des ménages, et met à profit un travail d'enrichissement de bases de données similaire à celui présenté en Section 2.2. Néanmoins, la approche statistique que nous avons développé présente des limites claires la rendant inapte à modéliser la consommation énergétique à l'échelle territoriale.

- La résolution de la caractérisation (au niveau du bâtiment) demande une grande fiabilité du procédé de *matching*. L'incertitude quant à la fiabilité du procédé d'appariement rend difficile l'analyse des modèles statistiques générés.
- La consommation électrique dépend grandement des équipements présents dans les logements, et surtout de la présence éventuelle d'un système de chauffage ou d'ECS électrique. Or, cette information, non disponible à l'échelle du bâtiment, introduit de grandes incertitudes et limite la fiabilité des modèles de consommation énergétique développés.
- Enfin, l'absence d'informations énergétiques (coefficients thermiques des parois notamment) oblige la classification des bâtiments par typologies (d'âge par exemple) qui ne permettent pas de modéliser les leviers de la transition de manière désagrégée (ou *infra*-bâtiment).

Bien qu'elle n'ait pas été exploitée dans la suite de ces travaux de thèse, cette étude de caractérisation a fait l'objet d'une présentation à la conférence internationale MedPower en 2018 à Dubrovnik, Croatie. Dans un souci de concision et de clarté du manuscrit, le détail de l'étude est présenté en Annexe C à travers le postprint de l'article de conférence.

2.4.3 Classification des modélisations ingénieures de la consommation

Les modèles ingénieurs sont utilisés pour décrire la consommation énergétique des logements. Au sein même de ces modèles, on peut distinguer les approches par modèles physiques et par modèles réduits (voir Fig. 2.3). Le choix entre l'une ou l'autre dépend notamment de

la résolution spatiale et temporelle souhaitée, mais aussi de la taille du parc bâti à simuler ou de l'horizon de simulation. Une description physique détaillée des phénomènes thermiques permet de modéliser précisément la consommation énergétique, mais également le confort (ambiance) et l'hygrométrie d'un bâtiment. Néanmoins, un tel niveau de détail requiert des données d'entrée très précises qui ne sont généralement pas disponibles pour un parc complet et générique de bâtiments. Aussi, des calculs d'une telle précision demandent un effort de calcul important qui rend ce type de modèle inadapté pour la modélisation urbaine. À l'inverse, les modèles réduits, plus simples, permettent de modéliser la consommation énergétique d'un groupe de bâtiment au prix d'une résolution temporelle plus faible. Ils peuvent cependant s'avérer imprécis pour un pas de temps plus fin.

Ce compromis entre la finesse des modèles et leur capacité à opérer sur des problèmes de grande taille est synthétisé par la Figure 2.4, inspirée du travail de Frayssinet et al. [48]. On observe notamment que plus la taille du domaine à simuler augmente, plus la résolution temporelle diminue. Sur ce graphique sont situés deux grands types de modèles : ceux visant à simuler le comportement d'un bâtiment dans un environnement urbain, dits Urban Building Energy Simulation (UBES), et ceux décrivant le comportement énergétique dynamique d'un ensemble de bâtiments, dits City Energy Simulation (CES). Enfin, une dernière approche a été identifiée, celle des modèles les plus simplifiés qui permettent une estimation des besoins à grande échelle avec assez peu de données et pour des horizons temporels qui permettent de négliger des phénomènes transitoires, dits Territory Energy Estimation (TEE).

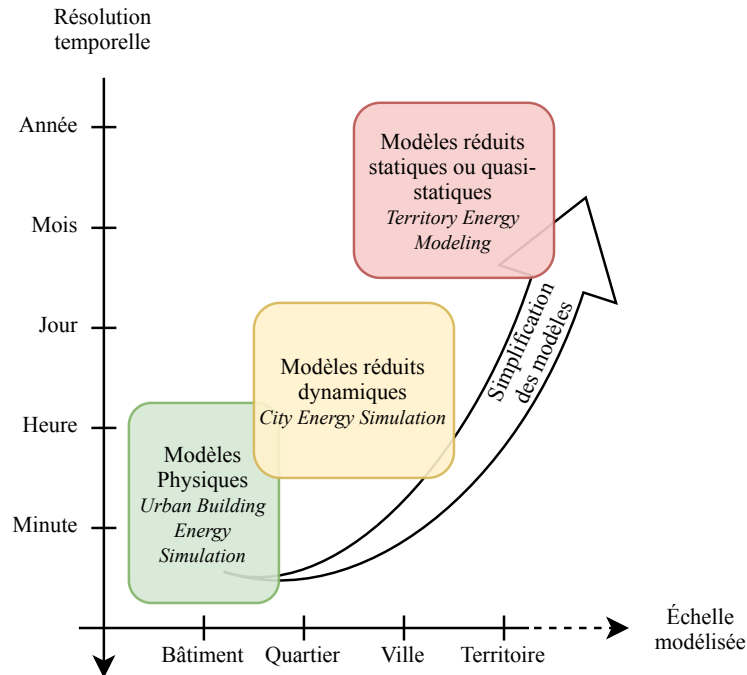


FIGURE 2.4 – Comparaison des catégories de simulation énergétique dans le cadre urbain. Inspiré de Frayssinet et al. [48]

Pour la modélisation et l'optimisation des mesures de transition énergétique à l'échelle territoriale, les deux dernières approches sont particulièrement pertinentes. Elles se distinguent principalement par la résolution temporelle des modèles (fine pour les CES et grossière pour les TEE) et donc également par les données qui peuvent être obtenues en sortie. En conséquence, ces approches sont employées dans des contextes différents. Les CES permettent la simulation dynamique du parc bâti, aboutissant par exemple à des courbes de charges. Les TEE sont pertinents pour l'estimation de potentiel d'économie d'énergie à l'échelle territoriale ou, et c'est l'objet de cette thèse, l'optimisation des mesures de transition énergétique. Ainsi, pour une montée d'échelle dans la simulation urbaine, il faut soit passer par une simplification des modèles (qui implique une perte de précision) ou augmenter les capacités de calcul.

2.5 Modélisation énergétique territoriale : état de l'art

2.5.1 Les modèles réduits dynamiques pour la simulation urbaine

De nombreux travaux ont été réalisés ces dernières années pour permettre la montée d'échelle entre les outils de modélisation énergétique du bâtiment et ceux au niveau urbain. Plusieurs outils ont alors été développés, et une synthèse inspirée du travail de Lefort [50] est présentée dans la Tableau 2.1.

L'une des différences majeures entre ces outils de simulation urbaine réside dans les modèles sous-jacents. En effet, certains de ces outils, comme CityBES [52] ou UMI [58], s'appuient sur des modèles physiques, ou *physics-based*, dans le sens où ils reposent sur les équations complètes et détaillées de la physique et en particulier de la thermodynamique. Ces logiciels sont généralement initialement voués à la simulation précise d'un seul élément comme le logiciel EnergyPlus [21]. Si ces logiciels ont été éprouvés et validés à de maintes reprises par la communauté scientifique, ils n'ont pas été développés pour la simulation urbaine. Dès lors, leur emploi présente deux inconvénients : la complexité des calculs et le niveau de détail des données nécessaires. Sur ce dernier point, il est important de relever que ces données ne sont généralement pas disponibles à l'échelle urbaine et une approche par archétypes (des bâtiments types parfaitement décrits) est alors utilisée.

Les autres outils présentés dans le Tableau 2.1 utilisent des modèles réduits, ou *reduced-order models*. Ces modèles permettent une évaluation plus rapide de la consommation énergétique des bâtiments, et ce, malgré un grand nombre d'éléments à simuler. L'utilisation d'analogies comme l'analogie thermique-électrique *via* des modèles RC permet de représenter de manière assez fine la dynamique des bâtiments.

L'implication du CSTB dans le projet Simulations pHysiques pour l'Aide à la Planification Énergétique (SHAPE) et dans le cadre d'une collaboration au sein de la présente thèse, nous a facilité l'accès à l'outil de simulation urbain DIMOSIM [49]. Le modèle réduit de zone thermique implémenté dans DIMOSIM est appelé RiCj (voir Fig. 2.5). Celui-ci

	Outil	Modèle de données	Modèle thermique	Objectif	Réf.
LBNL, <i>Berkeley</i>	CityBES	Archétypes	EnergyPlus	Simulation énergétique des territoires	[52]
ETHZ, <i>Zurich</i>	City Energy Analyst	Archétypes	Modèles simplifiés + R6	Planification urbaine	[53]
EPFL, <i>Lausanne</i>	CitySim	Informations par bâtiment	Modèle RC équivalent (R5C2)	Planification urbaine	[54]
	EnerGis	Archétypes	Modèles simplifiés calibrés (statistiques)	Intégration de systèmes énergétiques	[55]
	MEU	Archétypes et mesures	Simulations CitySim calibrées	Simulation énergétique des territoires	[19]
CSTB, <i>Sophia-Antipolis</i>	DIMOSIM	Informations par bâtiment : Enrichissement de bases	Modèle RC équivalent (RiCj)	Simulation réseaux et bâtiments	[49]
Mines ParisTech, <i>Paris</i>	Smart-E	Informations par bâtiment : Observations, distributions	Modèle RC équivalent (inconnu)	Simulation de l'effet de mesures de <i>Demand Response</i>	[56]
	MOSAIC	Archétypes et mesures	Modèle RC équivalent (R1C1)	Simulation du réseau électrique	[57]
MIT, <i>Berkeley</i>	UMI	Informations par bâtiment	EnergyPlus	Orienté ambiance et microclimat urbain	[58]
Laboratoire BHEE : CE-THIL/EDF, <i>Lyon</i>	Module BuildSys-Pro	Informations par bâtiment	Modèles d'état réduits	Simulation quartier, ville et couplage réseau	[59]
	MODEM	Informations par bâtiment	Modèles détaillés adaptés graduellement	Simulation quartier, ville + analyse et évaluation des simplifications	[60]

Tableau 2.1 – Inventaire des principaux outils de modélisation de la consommation énergétique à l'échelle territoriale

s'adapte aux données fournies en entrées ou peut être simplifié pour permettre une opération à plus grande échelle. Ce modèle a été validé dans sa version R4C7 suivant une procédure

2.5.2 Les modèles réduits (quasi-)statiques pour la simulation urbaine

Les modèles inventoriés précédemment permettent de représenter le comportement dynamique des bâtiments, prenant ainsi en compte des phénomènes tels que l'inertie thermique pour décrire à un pas de temps fin l'évolution de la demande énergétique des bâtiments.

Complexes, ces modèles demeurent gourmands en temps de calcul lorsque plusieurs centaines de bâtiments sont modélisés. Ils sont aussi fortement non-linéaires ce qui rend difficile leur intégration dans des algorithmes d'optimisation, du moins à l'échelle urbaine (voir Chapitre 4).

Pour pallier ce problème, une simplification des modèles s'avère nécessaire. Les modèles dits statiques ou quasi-statiques (steady-state) représentent le moyen le plus simple de modéliser les besoins thermiques d'un bâtiment. Ceux-ci font l'hypothèse que lorsqu'on travaille avec une résolution temporelle suffisamment faible (mensuelle, voire annuelle), il est possible de négliger les phénomènes transitoires. Ils peuvent néanmoins présenter différents niveaux de complexité, prenant en compte les différentes parois, les ponts thermiques, la ventilation, les apports internes ou solaires notamment.

Très utilisés pour estimer le besoin énergétique de chauffage annuel des bâtiments, ces modèles interviennent notamment dans le cadre des certifications thermiques. Ainsi, en France, la réglementation thermique RT2012 s'appuie sur la méthodologie 3CL-DPE [63] qui utilise un modèle statique. De la même manière, la norme ISO 52016-1 :2017 s'appuie sur ce type de modèles pour calculer le besoin d'énergie de chauffage d'un bâtiment.

Leur linéarité par rapport aux caractéristiques impactées par la rénovation thermique les rend particulièrement adaptés pour l'usage visé par cette thèse : l'optimisation des mesures de rénovation. Il est d'ailleurs à noter que des travaux d'optimisation des rénovations thermiques ont été menés en utilisant des modèles statiques [32, 33, 64].

2.6 Construction d'un modèle de consommation pour l'optimisation

Le besoin annuel de chauffage Q d'un bâtiment b dépend de ses caractéristiques thermiques, des conditions météorologiques et des réglages de confort. Sa consommation énergétique annuelle E est étroitement liée au besoin, par le biais de l'efficacité η du système de chauffage présent dans le logement (voir Éq. (2.1)).

$$E_b = \frac{1}{\eta_b} Q_b \quad (2.1)$$

L'efficacité des systèmes de chauffage fera l'objet d'une modélisation propre qui sera présentée plus loin dans le manuscrit, lors de la définition des systèmes modélisés pour

Définition 2.2

La température à laquelle est chauffé un logement pour garantir le confort de ses occupants est appelée **température de consigne de chauffe**.

L'énergie à apporter à un logement pour le maintenir à la température de consigne est appelée **besoin de chauffage**.

L'énergie consommée par un système pour assurer le besoin de chauffage d'un logement est appelée la **consommation énergétique de chauffage**.

Les moyens de chauffage ne sont pas activés toute l'année, mais uniquement pendant une certaine période appelée **période de chauffe**. Il est généralement admis que la période de chauffe en France s'étale du 1^{er} octobre au 20 mai.

Toutes ces définitions sont applicables à la climatisation pour assurer une température plus faible que la température extérieure.

la rénovation. Pour une modélisation adaptée à l'échelle territoriale, une valeur moyenne annuelle de l'efficacité doit être définie pour chaque système.

La modélisation du besoin doit faire l'objet d'une attention particulière, intégrant la dépendance aux conditions climatiques, aux réglages de confort et aux caractéristiques du bâtiment au sein d'une modélisation adaptée à l'échelle de travail.

2.6.1 Une base : le modèle simplifié de besoin de chauffage

Nous utilisons un modèle simplifié du besoin comme point de départ. Celui-ci contient trois termes présentés par l'Équation (2.2), décrivant trois types majeurs de transferts thermiques :

- Les pertes de chaleur à travers les diverses parois, représentées par le terme Q^{paroi} . Quatre parois sont généralement considérées dans ce modèle, regroupées dans l'ensemble $P = \{Toit, Sol, Murs, Vitres\}$.
- Les pertes dues au renouvellement d'air par la ventilation (naturelle ou forcée) du bâtiment, représentées par le terme Q^{vent} .
- Les gains solaires à travers les parois vitrées, représentés par le terme Q^{gain} .

$$Q_b = (Q_b^{paroi} + Q_b^{vent} - Q_b^{gain}) \quad (2.2)$$

Pertes à travers les parois

L'Équation (2.3) modélise les pertes de chaleur à travers les parois. À chaque instant, l'hypothèse de régime permanent permet d'exprimer les pertes en fonction de la différence de température entre l'ambient (intérieur du bâtiment) T_{in} et l'extérieur T_{ext} . Une période de chauffe HP est définie, en dehors de laquelle le chauffage est désactivé. Pendant la période

de chauffe, le besoin de chauffage est considéré comme nul si la différence $\Delta T = T_{in} - T_{ext}$ est négative. La participation de chaque paroi p aux pertes thermiques par conduction dépend de son coefficient thermique u_p et de sa surface A_p .

$$Q_b^{paroi} = \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} \left(\Delta T(t) \sum_{p \in P} u_{b,p} A_{b,p} \right) \quad (2.3)$$

Pertes par renouvellement d'air

L'Équation (2.4) décrit les pertes par renouvellement d'air. Elles dépendent notamment du taux de renouvellement d'air τ et du volume V du bâtiment. On considère que l'air renouvelé entre à la température extérieure T_{ext} . La capacité thermique volumique de l'air c_{air} permet le calcul des pertes par ventilation.

$$Q_b^{vent} = \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} \left(\Delta T(t) \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \right) \quad (2.4)$$

Apports solaires

Enfin, les apports solaires vont venir contrebalancer les pertes précédemment citées. Ils sont modélisés par l'Équation (2.5). Ceux-ci peuvent être calculés pour chaque type de paroi, en prenant en compte leur orientation à l'aide du facteur δ , représentant la proportion de la paroi orientée vers le soleil. Ces gains dépendent également de l'irradiation solaire directe verticale J décomptée lorsqu'il y a un besoin de chauffe (lorsque $\Delta T(t) > 0$). Tout comme pour les pertes par conduction, la participation de chaque paroi p dépend de son facteur solaire g représentant sa propension à transmettre le rayonnement solaire, et de sa surface A_p . Il est souvent supposé que le facteur solaire g est égal à zéro pour les parois opaques, ne laissant que les vitrages participer aux apports.

$$Q_b^{gain} = \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} \left(J(t) \sum_{p \in P} g_{b,p} A_{b,p} \delta_{b,p} \right) \quad (2.5)$$

$$g_{b,p} = 0, \quad \forall p \in \{\text{parois opaques}\}$$

Modèle final et performances

Étant donné que seules la différence de température ΔT et l'irradiation verticale J dépendent du temps, le calcul du besoin de chauffage annuel se réalise simplement. Ainsi, en considérant un pas de temps horaire pour le calcul du besoin énergétique, celui-ci peut s'exprimer de la façon suivante :

$$Q_b = DHU \left(\sum_{p \in P} u_{b,p} A_{b,p} + \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \right) - IHU g_{b,vitres} A_{b,vitres} \delta_{b,vitres} \quad (2.6)$$

où

$$DHU = \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} (T_{in} - T_{ext}(t))$$

$$IHU = \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} J(t)$$

La métrique DHU correspond aux Degrés Heure Unifiés, qui donnent une indication de la rigueur d'un climat, et décompte un nombre équivalent de degrés-heure de chauffe nécessaire. La métrique IHU fonctionne de manière analogue en décomptant l'énergie impactant le bâtiment lors des heures de chauffe, dénommée Irradiations Heure Unifiées. Ces métriques (et particulièrement les DHU) sont couramment utilisées, car elles permettent de synthétiser de manière très concise les conditions climatiques d'une localité.

Afin de caractériser les performances du modèle simplifié, et en l'absence d'observations de la consommation fiables, ces estimations du sont confrontées à des simulations de DIMOSIM, un outil validé utilisé comme référence.

Pour réaliser cette étude de performances, nous avons mis en place la procédure suivante :

1. Récupération des empreintes des bâtiments : les empreintes sont extraites de la BD-TOPO sur un territoire test, choisi pour la diversité des typologies de bâtiments (maisons individuelles, logements collectifs...). Le territoire retenu est la commune de Sainte-Colombe, dans le département du Rhône (69). Celui-ci comporte 525 bâtiments et présente une diversité de contextes intéressante avec un mélange de maisons individuelles, d'immeubles et de maisons de bourg.
2. Attribution de caractéristiques structurelles : pour chaque bâtiment, et pour chaque paroi, on attribue les coefficients thermiques, les taux de vitrage et de renouvellement d'air de manière arbitraire, en utilisant une distribution uniforme sur une plage de valeur réaliste. Les distributions sont présentées dans le Tableau 2.2. Pour le modèle simplifié, on considère dans un premier temps que 25% des surfaces sont orientées vers le soleil à tout instant.

Ces informations constituent des entrées suffisantes pour le modèle simplifié et le modèle dynamique DIMOSIM.

3. Estimation du besoin énergétique : les deux modèles sont utilisés pour estimer du besoin annuel de chauffage de chaque bâtiment du territoire. On utilise pour cela les données météorologiques de l'IWEC [65], qui reconstruit une année météo type à partir de différentes années mesurées.

Élément	Caractéristique	Distribution
Parois opaques	coefficient u	$\mathcal{U}(0.15, 2)$
Parois opaques	Inertie	$\mathcal{U}(\{\text{légère, moyenne, lourde}\})$
Parois vitrées	coefficients (u, g)	$\mathcal{U}(\{(5, 0.789), (1.8, 0.7), (0.8, 0.6)\})$
Bâtiment	Taux ventilation	$\mathcal{U}(\{0.5, 0.6, 0.8\})$
Bâtiment	Taux de vitrage	$\mathcal{U}(0.1, 0.25)$

Tableau 2.2 – Distribution des caractéristiques attribuées aux bâtiments pour entraîner le méta-modèle de besoin

4. Comparaison des estimations : Les estimations sont comparées afin d'observer le comportement du modèle simplifié et identifier d'éventuelles pistes d'amélioration.

La Figure 2.9 quantifie les performances des modèles simplifiés développés en comparaison avec DIMOSIM. On observe, à gauche et en vert, que le modèle simplifié surestime le besoin de chauffage. Pour comprendre d'où proviennent ces différences de performances, l'erreur d'estimation du besoin de chauffage pour chaque bâtiment est calculée comme suit :

$$\varepsilon_b = \frac{Q_b^{\text{modèle}} - Q_b^{\text{DIMOSIM}}}{Q_b^{\text{DIMOSIM}}} \quad (2.7)$$

La répartition des erreurs est analysée en fonction de la performance moyenne de l'enveloppe (c'est-à-dire la somme pondérée des coefficients thermiques des parois rapportée au mètre carré, voir Éq. (2.8)). On observe alors une tendance générale : plus le bâtiment présente de bonnes performances thermiques, plus l'erreur d'estimation est importante. De cette observation, il est possible de supposer que la modélisation des apports solaires pose problème. En effet, plus le bâtiment est performant, plus les apports solaires jouent un rôle important dans le bilan énergétique du bâtiment. On peut imaginer que la considération de l'unique irradiation verticale directe et l'hypothèse simplificatrice des parois orientées vers le soleil ne permettent pas une bonne estimation des apports solaires. L'erreur normalisée (NRMSE) avoisine les 83% et l'erreur absolue moyenne (MAE) est d'environ 50%, comme présenté par le Tableau 2.4.

$$U_b^{\text{moy}} = \frac{\sum_{p \in P} u_{b,p} A_{b,p}}{\sum_{p \in P} A_{b,p}} \quad (2.8)$$

2.6.2 Amélioration du modèle simplifié

Suite à l'observation des performances du modèle simplifié "brut", nous décidons d'apporter deux évolutions majeures : la prise en compte de l'inertie du sol et l'utilisation d'un modèle d'ombrage pour le calcul du gain solaire d'une part et la calibration sur un modèle dynamique d'autre part.

2.6.2.1 Premières évolutions : sol et ombrages

Prise en compte de l'inertie du sol

La température du sol T_{sol} n'est pas la même que celle de l'air. Le sol présente une certaine inertie et les variations de sa température sont amorties et déphasées par rapport à la température de l'air. La température souterraine peut être modélisée à une profondeur d à l'aide de la formule présentée par Kusuda and Achenbach [66] dont la bonne représentativité a été prouvée [67]. La Figure 2.6 représente l'estimation de la température du sol *via* cette formulation. Cette température dépend de la température extérieure T_{ext} et de son amplitude annuelle ΔT_{ext} , mais également de la diffusivité thermique du sol κ , du déphasage dans l'année θ et de la constante de temps τ égale à 8760. On peut alors calculer un nouveau DHU_{sol} qui représente les degrés-heure de chauffe pour le sol. Les déperditions par le plancher ne sont décomptées que lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à la température intérieure.

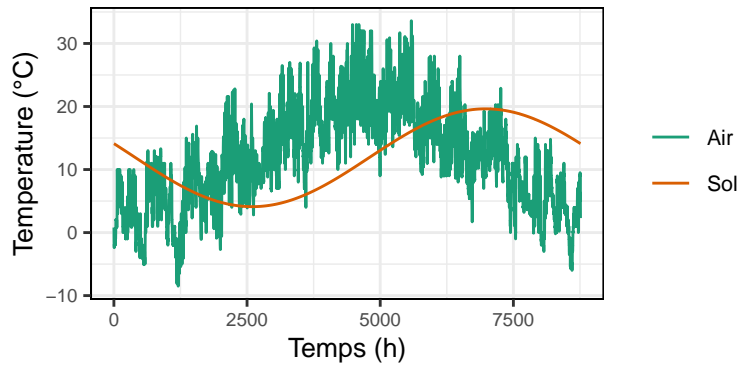


FIGURE 2.6 – Estimation de la température du sol à partir de celle de l'air

Exploitation du modèle d'ombrage de DIMOSIM

Pour la simulation d'un quartier, les ombrages et leurs positions en fonction de l'horizon sont essentiels pour décrire les apports solaires, particulièrement dans les zones urbaines. Afin de prendre en compte ce contexte urbain, le modèle dynamique DIMOSIM intègre un modèle d'ombrage. Celui-ci fournit au niveau d'un point de référence spécifié (le centre de chaque surface), le masque azimuthal à 360° induit par l'environnement : les autres bâtiments et la topographie du terrain. L'algorithme utilisé est de type tracé de rayons [68].

Cette problématique forte n'est pas considérée par le modèle simplifié. La rénovation énergétique n'impactant pas la géométrie des bâtiments, il est possible d'effectuer une analyse des masques solaires une fois pour toutes en amont de la simulation du besoin. On peut ainsi calculer, pour chaque bâtiment, l'irradiation qui impacte ses parois. On réutilise pour cela le processeur intégré dans DIMOSIM.

Une valeur d'irradiation annuelle totale $IHU_{b,vitres}$ sur l'ensemble des parois vitrées peut alors être calculée pour chaque bâtiment, correspondant au cumul des irradiances sur les

vitrages $J_{b,vitres}$ lorsque T_{ext} est inférieure à T_{in} . On s'affranchit ainsi de la projection des bâtiments et de la surface vitrée, qui sont incluses dans ce nouvel indicateur IHU .

Modèle final et performances

Le modèle simplifié amélioré, appelé modèle "Simplifié+" est alors décrit par l'Équation (2.9).

$$Q_b = \left(\sum_{p \in P} DHU_p u_{b,p} A_{b,p} + DHU \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \right) - IHU_{b,vitres} g_{b,vitres} \quad (2.9)$$

où

$$DHU_p = \begin{cases} \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} (T_{in} - T_{ext}(t)), & \text{si } p \neq sol, \\ \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} (T_{in} - T_{sol}(t)), & \text{si } p = sol \end{cases}$$

$$IHU_{b,vitres} = \sum_{\substack{t \in HP \\ T_{in} > T_{ext}(t)}} J_{b,vitres}(t)$$

Les performances de ce nouveau modèle amélioré sont alors comparées au modèle initial (en orange sur Fig. 2.9 et Tab. 2.4). On observe une bien meilleure correspondance entre le modèle Simplifié+ et la simulation *via* DIMOSIM et surtout, la dépendance de l'erreur aux l'isolation globale du bâtiment disparaît. Cependant, les erreurs demeurent assez conséquentes, avec un Erreur quadratique moyenne normalisée (*Normalized Root Mean Squared Error*) (NRMSE) de 32% et un Erreur absolue moyenne (*Mean Absolute Error*) (MAE) de 18%, et ce modèle n'est pas assez fiable pour l'évaluation du besoin pour la rénovation thermique.

2.6.3 Méta-modèle du besoin de chauffage

L'utilisation d'un modèle simplifié est la première réponse possible face à la complexité des approches dynamiques. Une seconde possibilité a été identifiée pour réduire le temps de calcul induit par la montée d'échelle : l'utilisation de méta-modèles. Un méta-modèle signifie littéralement "modèle du modèle", et a donc pour but de construire une nouvelle représentation d'un modèle existant en l'observant sous un certain prisme. Bien qu'assez récente, l'utilisation de méta-modèles en vue d'une optimisation des performances des bâtiments dans le domaine de la conception des bâtiments et des systèmes est assez courante [69–71], ce qui nous a amenés à nous intéresser à cette technique.

Le travail de Østergård et al. [71] présente une bonne synthèse des méta-modèles utilisés dans le domaine de la simulation des performances des bâtiments. Une étude comparative de six techniques de méta-modélisation les plus courantes est réalisée, lesquelles s'échelonnent de la plus simple (régression linéaire) aux plus élaborées, dites d'apprentissage comme les approches par forêts aléatoires ou réseaux de neurones. Sans surprise, les modèles les plus complexes présentent de meilleures performances générales, notamment du fait de la forte

non-linéarité des fonctions à estimer. En revanche, on peut observer que l'approche par régression linéaire présente des performances intéressantes quand l'énergie est la variable qu'on cherche à modéliser. Surtout, le travail de Østergård et al. [71] insiste sur l'interprétabilité qu'offrent les différentes méthodes et les modèles de régression sont les plus faciles à comprendre.

Dans notre cas, il est crucial que le modèle final explicite clairement l'impact des caractéristiques thermiques des différents éléments sur le besoin de chauffage du bâtiment. Ainsi, nous allons adopter l'approche de méta-modélisation en conservant la structure du modèle simplifié établi plus haut. Le modèle final pourra alors être à la fois performant et interprétable.

En conséquence, nous avons construit un méta-modèle de régression multi-linéaire pour estimer le besoin énergétique à partir de DIMOSIM. On définit β le vecteur de paramètres du méta-modèle, correspondant aux différents termes établis dans le modèle simplifié, lesquels sont utilisés comme variables explicatives.

Le méta-modèle se présente alors sous la forme suivante :

$$Q_b = \left(\sum_{p \in P} \beta_p DHU_p u_{b,p} A_{b,p} + \beta_{vent} DHU \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \right) - \beta_{gain} IHU_{b,vitres} g_{b,vitres} \quad (2.10)$$

La procédure menée pour déterminer les paramètres du méta-modèle est représentée par la Figure 2.7 :

1. Les empreintes au sol des bâtiments sont extraites de la BDTOPO pour 9 territoires, présentant différentes typologies. On cherche notamment à avoir une bonne représentativité des types de bâtiments et des types de territoires. Pour cela, des contextes résolument urbains (centre-ville), très ruraux, des zones résidentielles à maisons individuelles (mitoyennes ou non), des zones comprenant principalement des immeubles et enfin des zones mixtes sont considérées. Les 9 typologies de territoires utilisées pour l'entraînement du méta-modèle sont visualisés sur la Figure 2.8. Au total, ce sont 3,335 bâtiments qui sont modélisés et qui seront simulés.
2. À chaque parc de bâtiments sont attribuées les 12 conditions climatiques différentes provenant des fichiers météo proposés par l'IWEC. Celles-ci, réparties sur le territoire français, représentent une certaine diversité de climats, notamment en termes de températures et d'ensoleillement.
3. En plus de la diversité géométrique et climatique, une diversité structurelle est introduite en définissant les caractéristiques thermiques des enveloppes. Les caractéristiques principales à définir sont : les coefficients de conduction thermique des parois opaques, les types de vitrages (qui définissent les facteurs solaires et les coefficients de conduction thermiques), les taux de vitrages et de renouvellement d'air. Ces caractéristiques

sont réparties selon les mêmes lois que précédemment (voir Tab. 2.2). L'utilisation de lois uniformes permet de garantir une bonne performance du méta-modèle, quel que soit le niveau d'isolation du bâtiment. Enfin, l'inertie des parois, non représentée dans le modèle simplifié, mais présente dans DIMOSIM, est elle aussi distribuée uniformément, pour tenter d'en capturer ses impacts dans le méta-modèle.

4. Une simulation des 108 configurations (12 climats et 9 territoires) est réalisée par le biais de DIMOSIM. Il est alors possible de récupérer en sortie : les irradiances sur les parois vitrées et les besoins énergétiques annuels simulés par le modèle dynamique pour chaque bâtiment.
5. Le modèle multi-linéaire est entraîné sur les données de besoin simulées, en réalisant une procédure de validation croisée dite "*k-fold cross-validation*". Pour ce faire, les 40,020 observations (3,335 bâtiments simulés et 12 climats) sont divisées en 10 échantillons.

Les paramètres du méta-modèle résultant de la procédure décrite ci-dessus sont présentés dans le Tableau 2.3.

β_{murs}	β_{toit}	β_{vitres}	β_{sol}	β_{vent}	β_{gain}
0.779	0.873	1.527	0.360	0.641	0.606

Tableau 2.3 – Paramètres du méta-modèle de besoin annuel obtenus par entraînement d'un modèle multi-linéaire sur les parcs bâtis simulés dans DIMOSIM

Les performances du méta-modèle du besoin sont illustrées en mauve sur la Figure 2.9. On observe, comme présenté dans le Tableau 2.4, une corrélation bien meilleure, de l'ordre de 99.8%, et des erreurs réduites et uniformément réparties, quel que soit le niveau d'isolation du bâtiment. L'erreur moyenne est d'environ de 6%, que l'on considère comme satisfaisant pour un modèle simplifié du besoin de chauffage.

Modèle	R ² (%)	NRMSE (%)	MAE (%)
Simplifié	0.615	0.827	0.504
Simplifié+	0.944	0.317	0.176
Méta-modèle	0.998	0.057	0.033

Tableau 2.4 – Mesures de l'erreur des trois modèles de besoin énergétique développés, par rapport au besoin de chauffage simulé par DIMOSIM

2.6.4 Autres indicateurs énergétiques et dérivés

Comme présenté par l'Équation (2.1), la consommation énergétique de chauffage peut être calculée par le biais de l'efficacité du système. D'autres indicateurs de la transition peuvent être dérivés du besoin. Les émissions de GES W dépendent de l'efficacité du système

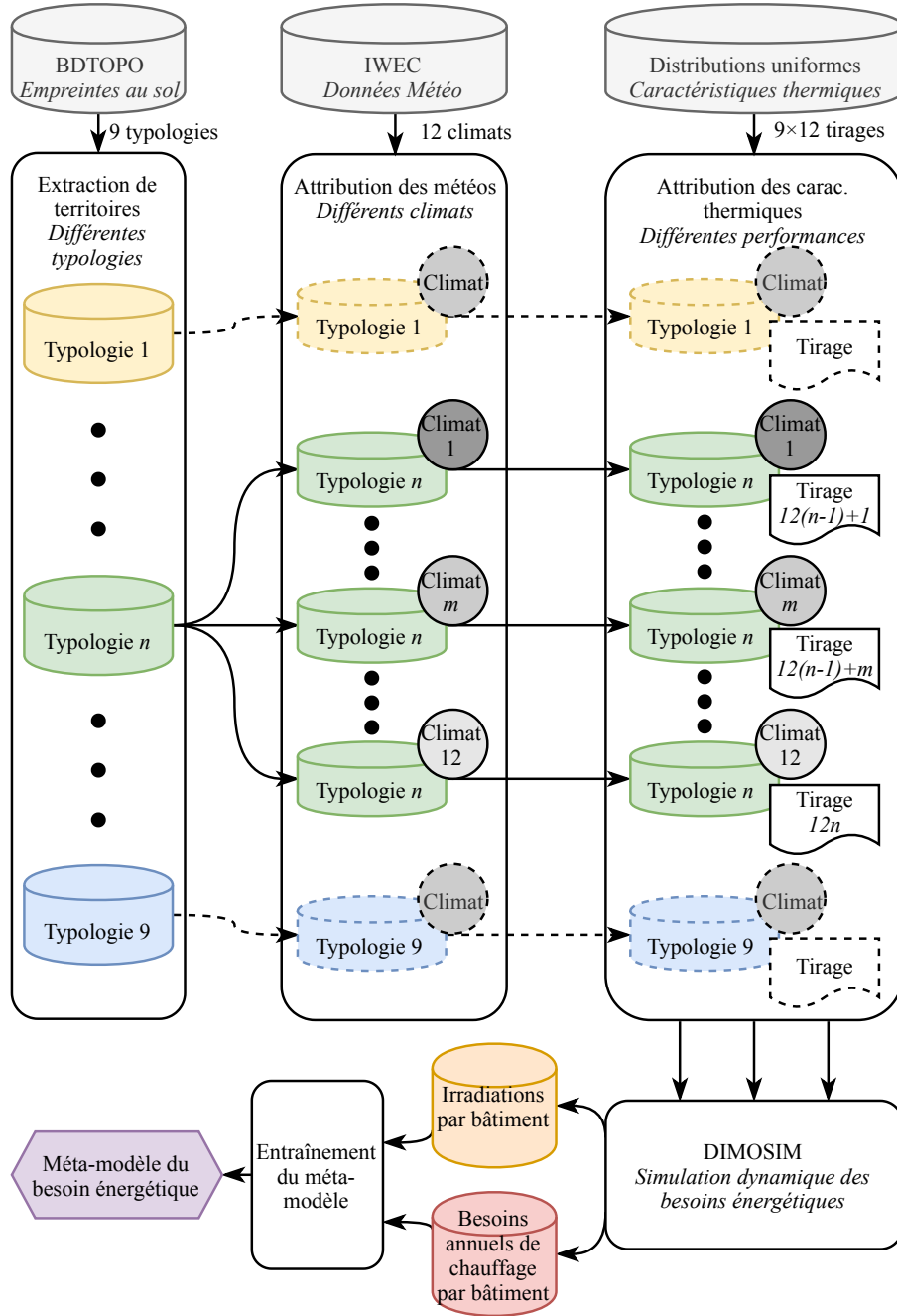


FIGURE 2.7 – Procédure de détermination des coefficients du méta-modèle du besoin énergétique

de chauffage et du facteur d'émissions fe de son combustible tandis que le montant de la facture énergétique F dépend du rendement et du prix de l'énergie utilisée fc .

$$W_b = \frac{fe}{\eta} Q_b \quad (2.11)$$

$$F_b = \frac{fc}{\eta} Q_b \quad (2.12)$$

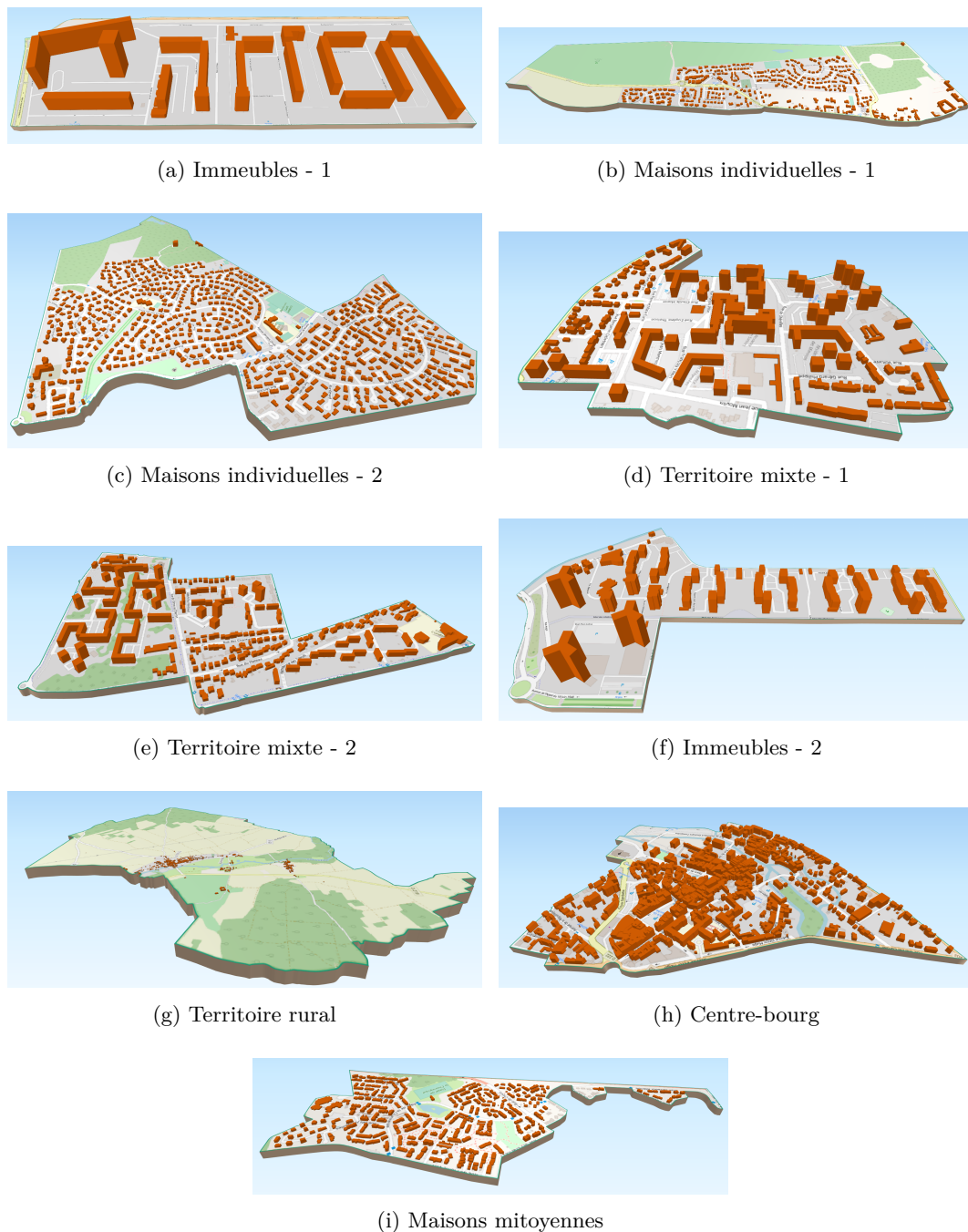


FIGURE 2.8 – Typologies de territoires considérées pour l'entraînement du méta-modèle de consommation

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir une modélisation énergétique territoriale complète, à savoir :

1. Un modèle de territoire adapté au contexte énergétique, permettant une représentation fine (bâtiment et infra-bâtiment) et considérant la diversité des bâtiments qui le composent. Pour cela, un SIG décrivant la géométrie des bâtiments est enrichie par

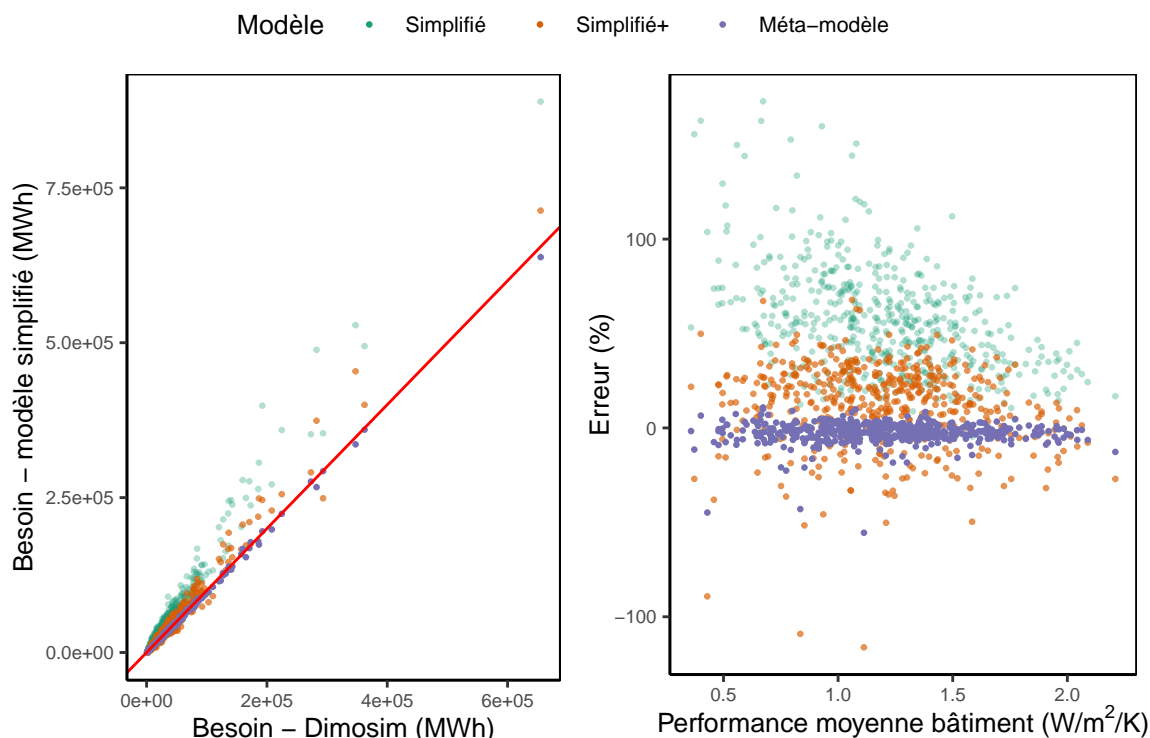


FIGURE 2.9 – Performances du modèle simplifié amélioré du besoin énergétique, en termes d'énergie (à gauche) et d'erreur (à droite). La droite affine rouge représente la corrélation parfaite $x = y$.

le biais d'un appariement et d'une inférence. Une validation du protocole complet n'a pas encore été réalisée à grande échelle. Cependant, la mise à disposition d'une base enrichie par l'IGN et les travaux de thèse menés actuellement sur cette thématique de validation rendent crédible l'obtention d'un modèle de territoire fiable dans un futur proche.

2. Nous avons établi un modèle de consommation énergétique annuelle. Celui-ci est adapté aux données disponibles à l'échelle territoriale, performant et *a priori* utilisable dans le cadre d'une optimisation. Sa structure, basée sur les équations des transferts thermiques en régime permanent, permet de représenter l'impact des différentes parois sur le besoin de chauffage. La calibration sur un modèle dynamique validé aboutit à un méta-modèle garantissant une évaluation rapide et performante des besoins annuels de chauffage à l'échelle du bâtiment.

Cette modélisation complète permet notamment de caractériser l'état initial d'un territoire. Celui-ci peut être impacté par un certain nombre de mesures de rénovation énergétique, dont l'identification et la modélisation font l'objet dans le Chapitre 3.

Chapitre 3

Modélisation de solutions techniques pour la rénovation énergétique

Contenu du chapitre

Résumé du chapitre	56
3.1 Introduction	57
3.2 Méthodologie et bases de données	58
3.2.1 Méthodologie générale	58
3.2.2 Des retours d'expérience pour construire les bases de solutions . .	58
3.2.3 Autres sources d'information utiles pour construire les bases . . .	60
3.3 Rénovation thermique des bâtiments	61
3.3.1 Identification des solutions techniques	61
3.3.2 Modélisation technique	62
3.3.3 Modélisation économique	66
3.4 Systèmes de chauffage	69
3.4.1 Identification des solutions techniques	70
3.4.2 Modélisation technique	73
3.4.3 Modélisation économique	83
3.4.4 Modélisation technico-économique des combustibles de chauffage	89
3.4.5 Modélisation des émetteurs de chaleur	90
3.5 Bases finales de solutions techniques	91
3.5.1 Rénovation thermique des bâtiments	91
3.5.2 Systèmes de chauffage	91
3.6 Conclusion	93

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'établir une base de solutions techniques disponibles pour la rénovation énergétique des bâtiments.

Pour cela, les techniques de rénovation ainsi que les systèmes de chauffages sont identifiés à partir d'observations issues de la construction neuve comme de la rénovation, assurant ainsi leur crédibilité pour l'usage visé. Une modélisation technico-économique est alors menée pour l'ensemble des solutions identifiées.

Pour la rénovation thermique, des niveaux de performance cible sont définis afin de ramener les bâtiments anciens à des niveaux identifiés : minimum (RT), standard ou performant. Ces derniers sont issus d'une analyse statistique de la construction neuve. Une estimation des coûts s'appuie ensuite sur des travaux précédents menés au CSTB sur la base de données constructeur.

Les systèmes de chauffage font quant à eux l'objet d'une modélisation technique fine. En effet, une démarche d'évaluation des performances saisonnières à partir de séries temporelles de température est établie pour les chaudières et les pompes à chaleur. Cette dernière permet d'estimer l'efficacité saisonnière des pompes à chaleur en amont de l'optimisation, pour des conditions climatiques données et indépendamment des performances thermiques des bâtiments. Les performances de différentes technologies sont comparées, ainsi que l'influence des conditions climatiques. Les modèles de coûts des systèmes de chauffage sont établis en compilant et en analysant des données constructeurs. La notion de gamme est introduite et permet de définir les coûts des solutions modélisées.

Le résultat de ce chapitre est une base complète de solutions techniques à intégrer dans l'outil d'optimisation des mesures de rénovation énergétique des bâtiments. Pour chaque type d'action, des coûts et des performances sont mis en regard des solutions techniques. L'ensemble des modèles est construit dans l'optique d'une utilisation à grande échelle, et s'appuie donc sur une structure simple, c.-à-d. linéaire.

3.1 Introduction

La première partie du manuscrit a permis d'établir la granularité qu'il est possible d'atteindre au sein du modèle énergétique du territoire, à savoir celle du bâtiment et de ses sous-éléments. Sur cette base, nous avons développé un méta-modèle du besoin énergétique permettant de réaliser un compromis entre la précision de l'évaluation et son utilisation à l'échelle territoriale. Ces deux étapes permettent la **caractérisation de l'existant**.

Une fois cette caractérisation réalisée, il est nécessaire :

1. d'identifier les différentes solutions techniques permettant de modifier ce comportement initial.
2. de modéliser l'impact des solutions techniques sur les indicateurs de la transition énergétique.
3. de modéliser les coûts induits par les solutions techniques, notamment les grandeurs identifiées en Sec. 1.3 : investissement, maintenance, remplacement et facturation.

L'identification des solutions techniques permettra de construire une base de solutions disponibles. Celle-ci doit être représentative du marché actuel de la rénovation énergétique en France. L'ensemble des modèles de coûts et d'impact doivent, d'une part, adopter un formalisme qui permette leur intégration simple dans l'outil d'optimisation, et d'autre part être basés sur des observations afin de garantir une bonne représentativité de la réalité.

Ce chapitre présente dans un premier temps les sources d'information qui vont permettre d'identifier et de caractériser les différentes solutions techniques de rénovation. La suite du chapitre présente la construction des bases de solutions techniques en lien avec deux axes principaux d'action : la rénovation thermique de l'enveloppe des bâtiments (parois opaques et vitrées) et le remplacement des systèmes de chauffage (voir Fig. 3.1). La modélisation technico-économique des systèmes de chauffage fait l'objet d'une attention particulière.

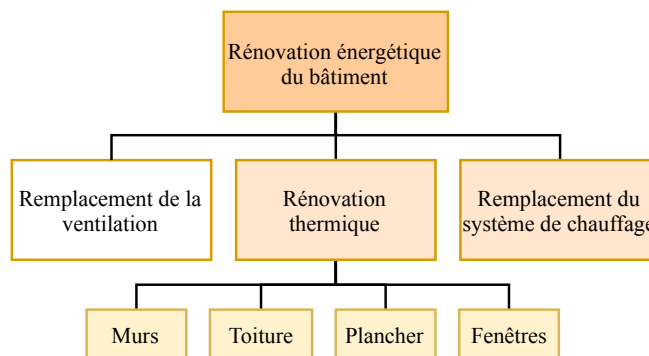


FIGURE 3.1 – Arbre des leviers de la rénovation énergétique des bâtiments modélisés dans la thèse

3.2 Méthodologie et bases de données

3.2.1 Méthodologie générale

La construction d'une base de solutions techniques pour la rénovation énergétique doit être menée pour chacun des leviers de la transition énergétique. Pour cela, nous établissons une procédure générale en 3 temps (voir Fig. 3.2) :

- Identification des solutions techniques : une analyse du secteur du bâtiment permet d'identifier l'ensemble des solutions techniques pouvant être employées dans le contexte de la rénovation.
- Caractérisation économique : le coût de chaque solution technique est estimé en se reposant au maximum sur des données de terrain propres au contexte français. Les coûts de fourniture, de mise en œuvre, d'entretien et de remplacement doivent être quantifiés à l'aide de modèles simples en vue de leur intégration dans l'outil d'optimisation.
- Modélisation technique : Chaque solution technique va impacter de manière différente la consommation énergétique. Ces impacts doivent être modélisés pour chacune des solutions.

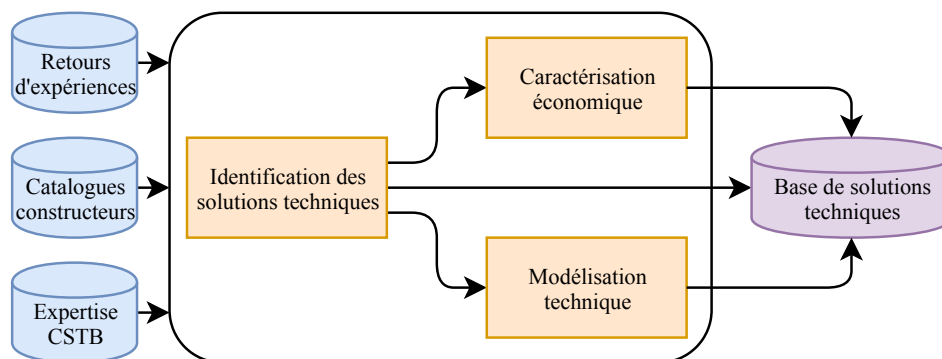


FIGURE 3.2 – Représentation de la démarche de construction des bases de solutions techniques, divisées en trois tâches distinctes.

Différentes bases de données, représentatives du contexte de la transition énergétique, peuvent être utiles pour chacune de ces trois tâches.

3.2.2 Des retours d'expérience pour construire les bases de solutions

3.2.2.1 L'Observatoire des Performances Énergétiques (OPE)

Du fait de l'exigence croissante des normes d'isolation thermique des bâtiments, la construction neuve fait l'objet de nombreuses certifications et de normes et est, par conséquent, soumise à de nombreux contrôles.

La réalisation d'études thermiques est obligatoire pour tout bâtiment neuf suite à la mise en place de la réglementation thermique de 2012 (dite RT2012). L'Observatoire des

Performances Énergétiques (OPE) collecte les données issues des Récapitulatifs Standardisés d'Études Thermiques (RSET). Ces données sont synthétisées et mises à disposition sous forme anonymisée sur la plateforme OpenData du gouvernement ¹. Les études thermiques présentes dans la base OPE ne représentent qu'une partie des projets de bâtiments neufs réalisés en France et OPE ne prétend donc en aucun cas être exhaustif.

Depuis 2012, ce sont donc plus de 360,000 constructions qui ont ainsi été évaluées *via* le RSET et dont les paramètres sont décrits en détail dans la base OPE. Si cette base de données décrit uniquement des projets de construction neuve, on peut imaginer que les technologies employées représentent une bonne photographie de ce qui se fait dans le domaine de la construction, notamment pour la rénovation. Surtout, travailler sur une base de données comme la base OPE (décrivant des bâtiments à objectif RT2012) nous assure que les niveaux de performance des éléments considérés sont ambitieux et représentatifs de l'état actuel du marché.

Ces données sont une source précieuse d'informations sur l'état technique actuel du domaine de la construction qui peuvent être extraites par le biais d'études statistiques notamment.

3.2.2.2 L'enquête TREMI

Fin 2018, l'ADEME a publié une synthèse des résultats de l'enquête TREMI (Travaux de Rénovation Énergétique des Maisons Individuelles) ². Cette enquête a été réalisée en ligne pendant le printemps 2017, auprès d'un échantillon représentatif de la population française, composé de 29,253 ménages résidant en maison individuelle en France continentale. L'enquête porte sur les travaux menés dans la période 2014-2016 et vise à améliorer la connaissance de la perception, sur le terrain, des politiques nationales et locales d'encouragement à la rénovation énergétique des logements. L'enquête TREMI ne se concentre pas uniquement sur les rénovations présentant un impact énergétique, mais analyse l'ensemble des travaux qui permettent d'embarquer de la performance énergétique. L'enquête TREMI est à ce jour la seule enquête nationale réalisée auprès d'un large échantillon de particuliers qui permet d'étudier finement :

- Les travaux de rénovation réalisés pour améliorer la performance énergétique des maisons
- Les motivations et freins des ménages pour réaliser les travaux ainsi que l'accompagnement dont ils ont bénéficié
- Les aspects financiers de ces travaux, depuis leurs coûts jusqu'au recours aux dispositifs d'aides.

1. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/observatoire-des-performances-energetiques/>

2. <https://www.ademe.fr/travaux-renovation-energetique-maisons-individueles-enquete-tremi>

Cette enquête fournit un retour d'expérience précieux sur des travaux récents et est menée à l'échelle nationale. Les données brutes sont accessibles sur demande et peuvent servir de socle pour une étude plus poussée et techniques des rénovations qui ont été menées. Son utilisation pour calibrer les solutions techniques semble néanmoins compliquée étant donné que l'enquête conclut sur l'insuffisance des travaux menés, mais elle peut permettre de confronter notre modélisation à une réalité de terrain.

3.2.2.3 L'étude des prix de la rénovation énergétique de l'ADEME

En novembre 2019, l'ADEME a publié les résultats d'une étude réalisée pour mieux comprendre les prix des gestes de rénovation. Cette étude a été menée sur des données remontées depuis le terrain *via* le réseau FAIRE (Faciliter, Accompagner et Informer pour la Rénovation Énergétique). Elle a pour objectif de fournir des fourchettes de prix observés pour les gestes classiques de la rénovation, et des informations sur certains facteurs influençant ces prix, afin de donner à l'ensemble des acteurs des repères. Une synthèse et un document plus détaillé présentant quelques analyses statistiques sont disponibles sur le site de l'ADEME³.

Environ 12,000 données ont été utilisées, ce qui représente un total assez faible pour pouvoir conclure à une représentativité du contexte de la transition énergétique dans sa globalité. De plus, les données présentent une faible diversité géographique, ce qui accroît les précautions qui doivent être prises quant à sa représentativité. Si une telle étude ne peut permettre seule d'établir une base de solution ou d'estimer des coûts, elle peut néanmoins être utile pour confirmer (ou infirmer) l'identification de systèmes et les gammes de prix obtenus par d'autres biais.

3.2.3 Autres sources d'information utiles pour construire les bases

Deux autres sources peuvent être utiles à la construction des bases de solutions techniques :

- Les catalogues constructeurs : Les constructeurs et fournisseurs des solutions identifiées fournissent généralement des informations techniques et économiques sur leurs produits. Celles-ci peuvent être exploitées pour la modélisation technico-économique des solutions.
- L'expertise CSTB : nous avons la chance de collaborer avec le CSTB, acteur majeur du secteur du bâtiment, qui possède une expertise sur ces thématiques. Ils peuvent fournir des évaluations économiques ou des modèles techniques si besoin, mais également orienter le choix des solutions techniques.

3. <https://www.ADEME.fr/renovation-energetique-logements-etude-prix>

Définition 3.1

On appelle *élément renouvelable* toute sous-partie d'un bâtiment qui peut être modifié dans le cadre d'une rénovation énergétique du bâtiment. Ainsi, chaque type de paroi d'un bâtiment (toit, sol, vitres, murs) est un élément renouvelable. De même, le système de chauffage et le système de ventilation sont des éléments renouvelables.

3.3 Rénovation thermique des bâtiments

3.3.1 Identification des solutions techniques

L'identification est réalisée à *dire d'experts* : on s'appuie sur les connaissances du CSTB pour identifier les différentes solutions techniques pour la rénovation thermique des bâtiments. Cette identification *a priori* est ensuite confirmée par l'observation de familles de solutions techniques similaires dans les bases d'observation de la transition énergétique. Les arbres de solutions techniques correspondants aux différentes parois renouvelables de l'enveloppe des bâtiments sont présentés sur les Figures 3.3 et 3.6.

Nous identifions alors deux types de mises en place de la rénovation :

- La rénovation par ajout (vert) : on vient poser l'isolant par-dessus la paroi, sans toucher à une éventuelle rénovation préexistante.
- La rénovation par remplacement (orange) : La paroi est mise à nue avant d'être rénovée, pour des raisons pratiques (gain d'espace), d'hygiène (moisissure) ou techniques (mauvais comportement thermique).

L'arbre des solutions techniques pour la rénovation thermique des murs se divise en trois modes d'isolation : l'Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI), l'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) et la combinaison ITI+ITE. Ceux-ci peuvent ensuite se décliner selon divers techniques et matériaux, présentant des propriétés différentes (coûts, thermique, contraintes).

Pour ce qui est de la rénovation thermique de la toiture, les techniques d'isolation sont grandement définies selon la configuration de la toiture et l'espace des solutions techniques disponibles pourra être réduit pour chaque bâtiment en fonction de sa typologie.

Toutes les options d'isolation des murs et de la toiture sont présumées compatibles avec le contexte de la rénovation. Il en va différemment pour le plancher et les vitrages. La rénovation thermique des planchers par une isolation sous-chape est considérée comme impossible, du fait des contraintes logistiques inhérentes : obligation de vider le bâtiment, de rehausser les portes, etc. Seule une isolation en sous-face est donc considérée. Si aucun sous-sol ou parking n'est présent, l'isolation du plancher n'est alors pas possible. De manière analogue, on considère les fenêtres triple vitrage comme incompatibles avec le contexte de la rénovation. En effet, s'ils sont parfois installés dans de la construction neuve, les triples

vitrages sont des ouvrages massifs : leur installation dans un bâtiment n’ayant pas été construit en conséquence peut poser problème.

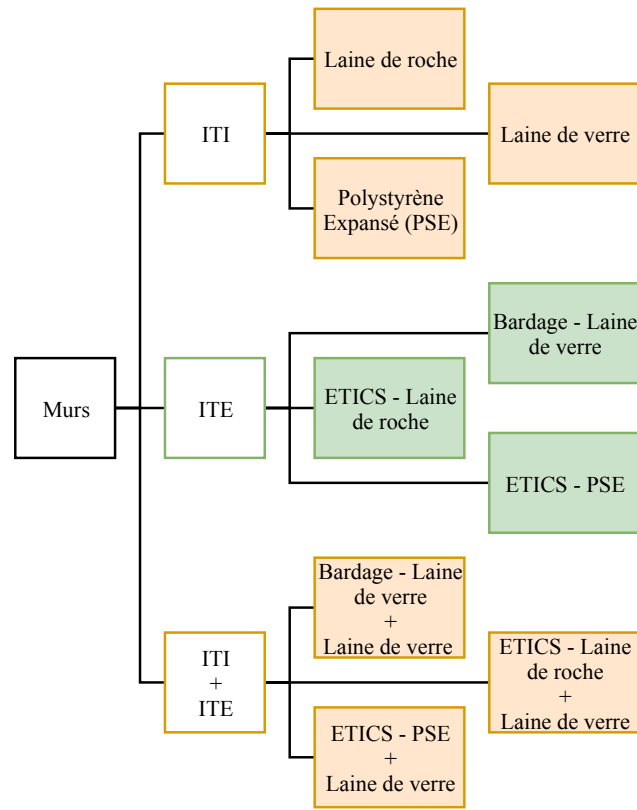


FIGURE 3.3 – Arbre des solutions techniques pour l’isolation des murs. Orange : mise en place avec remplacement de l’isolation initiale ; Vert : mise en place en ajout de l’isolation initiale.

3.3.2 Modélisation technique

La modélisation technique diffère entre les parois opaques et les parois vitrées.

3.3.2.1 Rénovation des parois opaques

En ce qui concerne les solutions techniques pour la rénovation des parois opaques, nous adoptons une démarche dite par “*niveau de performance visé*”. On ne définit pas une base fixe de solutions techniques à installer sur l’ensemble des bâtiments, mais un niveau de performance finale visée et un ensemble de techniques de rénovation disponibles à mettre en œuvre.

Une solution technique finale est caractérisée par sa résistance thermique R (ou son coefficient thermique u), laquelle dépend de l’épaisseur e d’isolant et de sa conductivité thermique λ . Les valeurs de conductivité thermique des différentes solutions sont consignées dans les Tableaux 3.8 et 3.10.

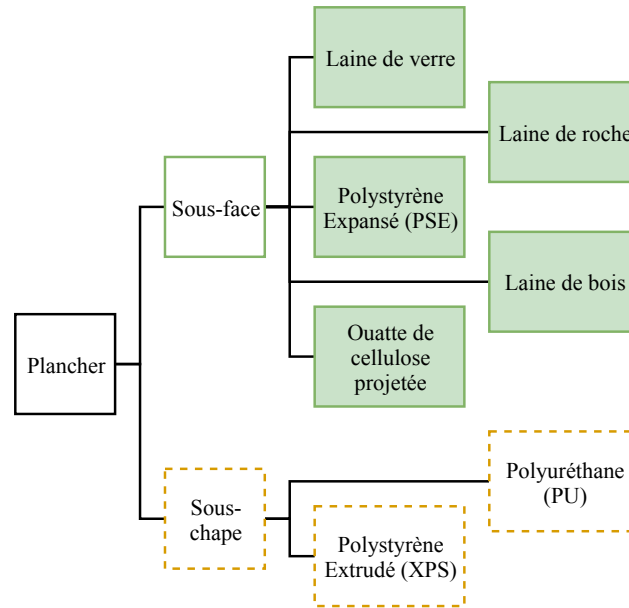


FIGURE 3.4 – Arbre des solutions techniques pour l’isolation du plancher. Orange : mise en place avec remplacement de l’isolation initiale ; Vert : mise en place en ajout de l’isolation initiale.

$$R = \frac{1}{u} = \frac{e}{\lambda} \quad (3.1)$$

L’épaisseur d’isolant à mettre en œuvre dépend du niveau de performance visé (u_f) et de l’état initial de la paroi (u_0). Selon la technique mise en œuvre, l’état initial correspond à la paroi à nu ou éventuellement déjà isolée.

$$\begin{aligned} \frac{1}{u_f} &= \frac{1}{u} + \frac{1}{u_0} \\ e &= \lambda \left(\frac{1}{u_f} - \frac{1}{u_0} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Les épaisseurs d’isolant à appliquer sont calculées pour chaque bâtiment, puis rapportées à des valeurs d’épaisseur standardisées, disponibles dans le commerce (multiples de 20mm).

Analyse des niveaux de performances

Afin de représenter les alternatives qui s’offrent aux preneurs de décisions, trois niveaux de performance cible sont intégrés :

- Réglementation thermique en vigueur (niveau minimum) : La cible correspond au niveau d’isolation minimum requis par la RT2012 (RT), laquelle possède un volet concernant les bâtiments existants. Y sont définies, paroi par paroi, les résistances thermiques finales minimales devant être atteintes.

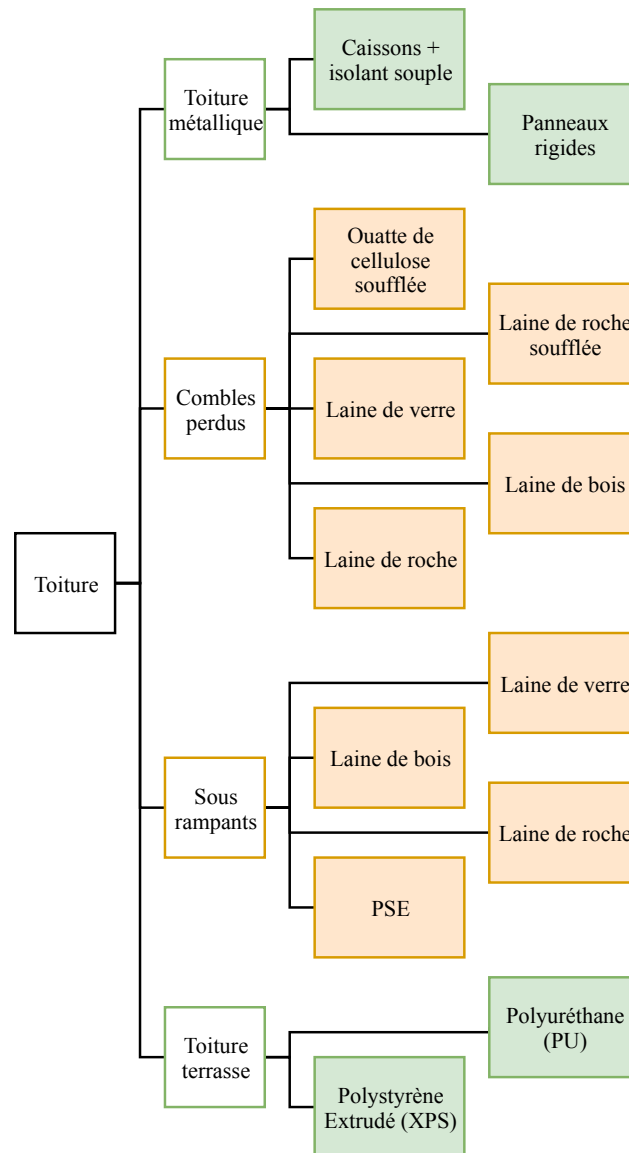


FIGURE 3.5 – Arbre des solutions techniques pour l’isolation de la toiture. Orange : mise en place avec remplacement de l’isolation initiale ; Vert : mise en place en ajout de l’isolation initiale.

- Observations (niveau standard) : La cible correspond à un niveau médian de performance observé dans le neuf (base OPE). Le niveau médian (M) correspond au niveau d’isolation observé dans 50% des constructions neuves aux normes RT2012.
- Observations (niveau performant) : Le niveau performant (P) correspond au niveau d’isolation des 20% des constructions les plus performantes dans le neuf.

Nous avons alors établi les niveaux de performances cibles pour chacune des techniques d’isolation identifiées lors de l’étape 1, afin de représenter les différents niveaux d’ambition proposés par les différentes technologies. Les données OPE peuvent être divisées en différents groupes d’étude si nécessaire, en fonction notamment du type de bâtiment - Maison Individuelle (MI) ou Logement Collectif (LC), et de la zone climatique (voir Déf. 3.2).

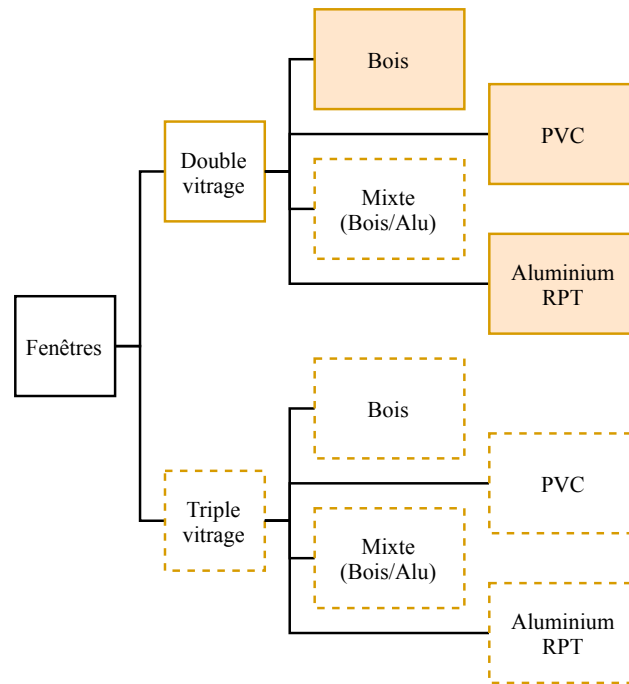


FIGURE 3.6 – Arbre des solutions techniques pour le remplacement des fenêtres

Dans un souci de clarté et de concision, les niveaux de performance présentés dans cette section sont issus d’une analyse toutes zones climatiques et tous usages confondus. Le détail par zone climatique et par usage est disponible en Annexe E. Pour chaque élément renouvelable, un tableau détaille l’analyse des niveaux de performance thermique dans le neuf en termes de coefficients thermiques, permettant d’établir les niveaux d’isolation médians et performants observés dans le neuf. On observe globalement des niveaux d’isolation assez similaires dans les zones climatiques H1 et H2, tandis que l’isolation en zone H3 est généralement plus légère. Cette différence est due à la douceur du climat de la zone H3 (qui correspond au pourtour méditerranéen), qui peut donc se satisfaire d’une isolation plus légère pour valider les standards de la RT2012. Il est toutefois nécessaire de garder une réserve concernant certaines valeurs obtenues du fait de la taille des échantillons parfois réduite, notamment dans la zone H3, qui peut altérer sa représentativité.

Les Figures 3.8 et 3.10 présentent les distributions des niveaux de performance observés dans la base OPE, ainsi que les niveaux de performance médians, performants et exigés dans le RT existant.

Rénovation des parois vitrées

Les parois vitrées (fenêtres et baies vitrées) sont des produits standardisés dont les performances varient peu au sein d’un même type de vitrages. Ainsi, la construction d’une base de solutions ne nécessite pas d’analyse statistique des performances.

La caractérisation technique des solutions identifiées se réalise sur la base de données constructeurs. Différentes valeurs de coefficients thermiques (u) et de facteur solaire (Sw)

Définition 3.2

Les départements français sont répartis en **zones climatiques** déterminées selon la température en période hivernale en vertu de l'annexe 1 de la RT 2012 (Réglementation Thermique 2012) du 28 décembre 2012. Les pouvoirs publics ont distingué :

- La zone H1, où les températures hivernales sont les plus froides : départements de l'Est et du Nord de la France au climat semi-continental.
- La zone H2, où les hivers sont plus tempérés : départements de l'Ouest de la France au climat océanique.
- La zone H3, où les hivers sont doux : départements du Sud de la France au climat méditerranéen.

Une segmentation plus fine du territoire existe, mais n'est pas utilisée dans cette thèse.

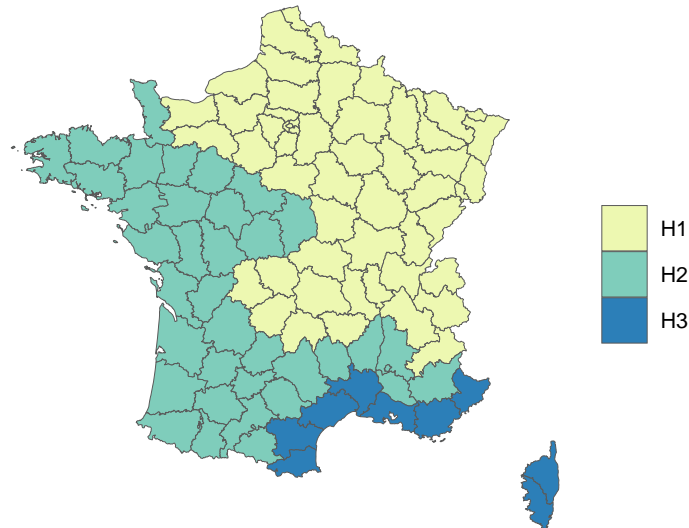


FIGURE 3.7 – Segmentation géographique du territoire français en zones climatiques

sont consignées dans le Tableau 3.11.

3.3.3 Modélisation économique

3.3.3.1 Coûts d'investissements

Le coût d'investissement de la rénovation thermique des parois opaques est modélisé par un coût variant linéairement avec la surface à rénover. Cette approche est régulièrement employée dans les problèmes d'optimisation des rénovations [30, 32, 33]. Ainsi, le coût d'investissement $I_{p,r}^{RT}$ pour l'installation d'une solution d'isolation r sur une paroi p dépendra

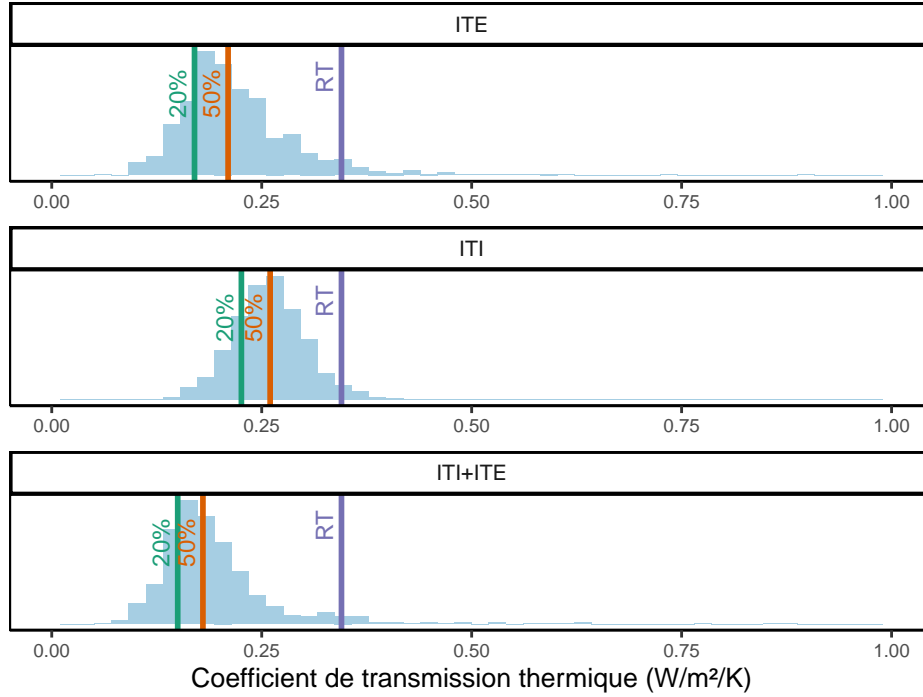


FIGURE 3.8 – Distribution des niveaux de performance thermique des murs observés dans le neuf en fonction de la technique de rénovation. Source : Base OPE

de la surface à couvrir A_p et du coût surfacique de la rénovation CS , lequel comprend à la fois le coût de fourniture et le coût de pose.

Le coût d'investissement réel des vitrages est assez dépendant de leur nombre et dimensions. Cependant, la modélisation territoriale, du fait du manque de données, nous amène à considérer également un coût d'investissement variant linéairement avec la surface à rénover.

$$I_{p,r}^{RT} = CS_r A_p \quad (3.3)$$

Le CSTB possède une base de coûts de solutions techniques de rénovation thermique, issue d'une analyse de données constructeur/fournisseur menée au cours de précédents projets. Nous avons donc décidé d'utiliser ces coûts et de ne pas mener de nouvelle étude des coûts de la rénovation thermique.

La base du CSTB décrit les coûts de différentes solutions techniques. Pour les solutions de rénovation des parois opaques, une interpolation de ces coûts permet d'obtenir des coûts continus dépendant de l'épaisseur d'isolant (voir Éq. (3.4)). Ces coûts sont présentés dans les Tableaux 3.8 et 3.10, présentant les bases finales de solutions techniques. Si certaines solutions semblent être des solutions *dominées* (plus chères et moins performantes que d'autres solutions), elles sont conservées pour deux raisons : elles peuvent être plus performantes sur d'autres critères non présentés ici (environnementaux par exemple) et peuvent devenir les plus intéressantes si certaines contraintes empêchent la mise en œuvre des solutions plus

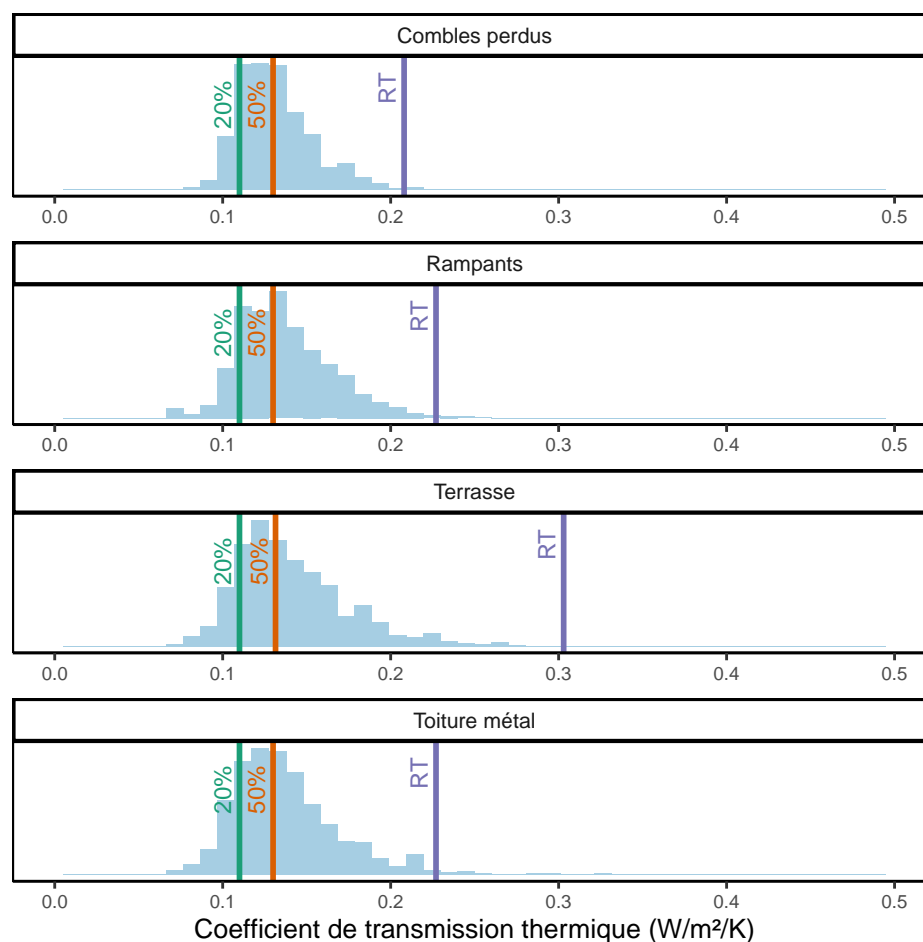


FIGURE 3.9 – Distribution des niveaux de performance thermique des toitures observés dans le neuf en fonction de la technique de rénovation. Source : Base OPE

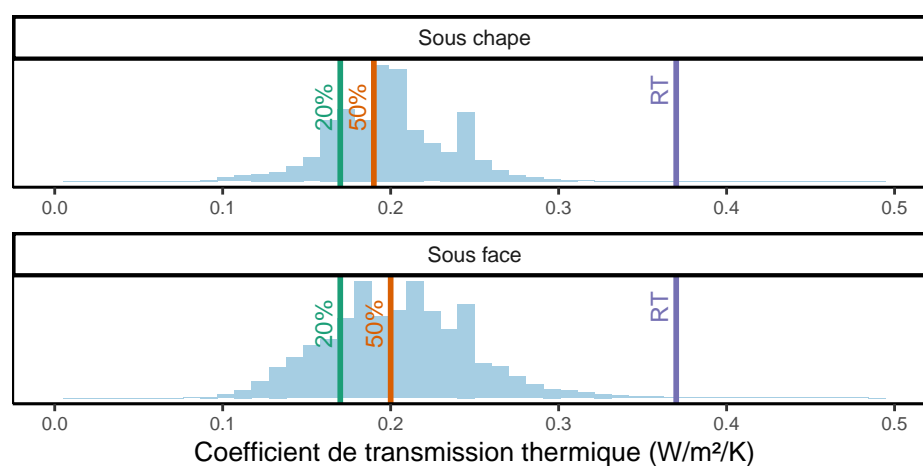


FIGURE 3.10 – Distribution des niveaux de performance thermique du plancher observés dans le neuf en fonction de la technique de rénovation. Source : Base OPE

économiques.

$$CS_r = CS_r^0 + e \times CV_r \quad (3.4)$$

3.3.3.2 Coûts d'entretien

Les matériaux de rénovation thermique ne demandent pas d'entretien particulier, et n'induisent en conséquence aucun coût de maintenance durant l'ensemble de leur durée de vie.

3.3.3.3 Coûts de renouvellement

Du fait de la durée de vie des isolants et du contexte de la rénovation énergétique, on considère que les bâtiments ne seront plus modifiés d'ici leur fin de vie et aucun remplacement des solutions techniques de rénovation thermique n'est considéré.

3.3.3.4 Valeur résiduelle

À la fin de la période d'évaluation, la valeur résiduelle de la rénovation thermique est estimée en considérant un amortissement linéaire tout au long de la durée de vie, estimée à 50 ans.

3.4 Systèmes de chauffage

On appelle **système de chauffage** l'ensemble des systèmes permettant de générer, de distribuer et d'émettre la chaleur nécessaire au chauffage.

Il existe deux grandes familles de chauffage :

1. Les chauffages centralisés : Un seul générateur est utilisé pour chauffer plusieurs pièces d'une maison, d'un appartement ou d'un bâtiment. La chaleur est acheminée au moyen d'un fluide caloporteur vers des émetteurs de chaleur, par le biais d'un système de distribution de chaleur. Les exemples typiques de chauffages centralisés sont les chaudières, les réseaux de chaleur et les pompes à chaleur air-eau ou sol-eau.
2. Les chauffages décentralisés : Chaque pièce est chauffée séparément, la génération et l'émission sont assurées conjointement au sein de chaque appareil. Il n'y a pas de système de distribution de chaleur et donc pas de fluide caloporteur. Les exemples typiques de chauffages décentralisés sont les poêles (à bois, gaz...), les convecteurs et panneaux radiants électriques ou les pompes à chaleur air-air monosplit.

Un moyen de chauffage centralisé, nécessitant un système de distribution de chaleur, doit être compatible avec les émetteurs de chaleur, c'est-à-dire que ceux-ci doivent être capables de diffuser la chaleur produite par le générateur.

3.4.1 Identification des solutions techniques

La Figure 3.11 présente les systèmes de chauffage installés dans le neuf. Ces données permettent d’avoir une vision des systèmes performants qui peuvent être proposés dans le cadre d’un remplacement du chauffage. Les Tableaux 3.1 et 3.2 présentent les données remontées par les enquêtes de l’ADEME sur la rénovation.

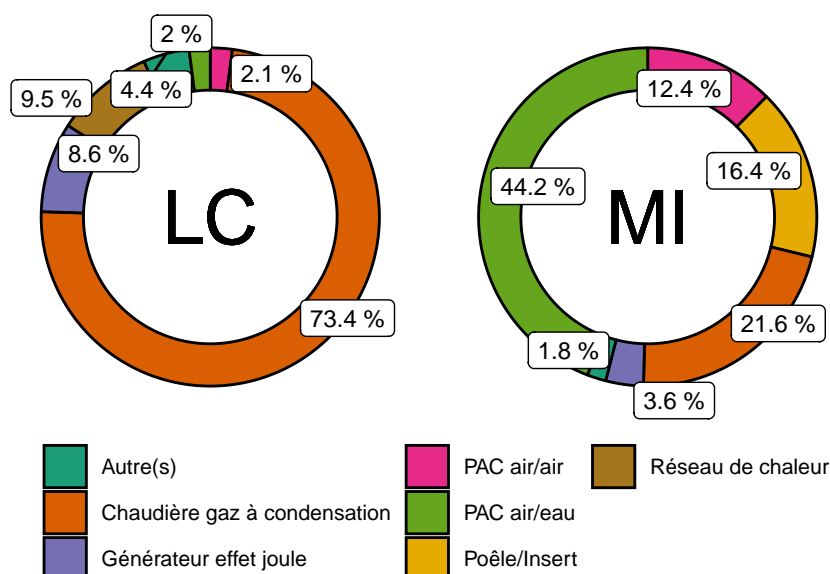


FIGURE 3.11 – Distribution des différents systèmes de chauffage observés dans la construction neuve (RT2012). MI : Maison individuelle ; LC : Logement collectif. Source : Base OPE

Système	Technologie	Combustible	Observations	
			MI	LC
Chaudière	Basse température	Gaz	6,7	22,8
		Fioul	2,8	1,3
	Condensation	Gaz	23,9	24,6
		Fioul	3,3	0,6
	-	Électricité	2,7	11,3
Pompe à Chaleur (PAC)	air-air	Électricité	7,2	3,9
	air-eau	Électricité	7,1	0,7
	sol-eau	Électricité	1,6	0,4
Radiateurs	-	Électricité	10,9	26,4
Poêle ou insert	-	Bois	21,8	1,7
Autres	-	-	11,9	6,5

Tableau 3.1 – Systèmes de chauffage observés dans l’enquête TREMI. Source : ADEME

Au regard de ces différentes observations, plusieurs remarques peuvent être faites :

Système	Technologie	Combustible	Observations
Poêle ou insert	-	Bois	33%
Chaudière	-	Gaz	21%
	-	Fioul	4%
	-	Bois	37%
Pompe À Chaleur (PAC)	air-air	Électricité	1%
	air-eau	Électricité	4%

Tableau 3.2 – Systèmes de chauffage observés dans l’étude de prix ADEME. Source : ADEME

- La solution de chauffage décentralisé au bois (poêle/insert) est quasi absente dans les logements collectifs. Ceci est sans doute dû aux problématiques de stockage du combustible, en l’occurrence les pellets de bois.
- Le chauffage décentralisé électrique est quasiment absent des maisons individuelles dans la construction neuve, avec une proportion inférieure à 4%. Les systèmes centralisés lui sont largement préférés, notamment les Pompe À Chaleur (PAC). En revanche, ce moyen de chauffage est encore largement utilisé en rénovation.
- Les PACs sont très peu observées dans les logements collectifs. Celles-ci sont peu adaptées à des usages de chauffage collectif pour lesquels les chaudières leur sont préférées. Pour les usages de chauffage individuels, les PACs présentent des inconvénients esthétiques et d’encombrement qui expliquent leur faible utilisation. Les générateurs à effet joule ou les chaudières sont souvent privilégiés.
- Les réseaux de chaleur, non considérés dans cette thèse pour la rénovation du bâtiment, représentent une part non négligeable des sources de chaleur dans le collectif. Près de 10% des bâtiments y ont recours.
- Les chaudières électriques, très peu observées dans la construction neuve, constituent néanmoins une solution économique pour la rénovation de petits logements collectifs aux besoins de chauffage réduits.
- Les chaudières bois apparaissent dans les données de l’étude de prix de l’ADEME, justifiant leur considération dans le contexte de rénovation des bâtiments.

Hypothèses :

- L'utilisation d'un réseau de chaleur urbain comme mode de chauffage n'est pas considérée dans cette thèse. En effet, le tracé, le dimensionnement et la gestion d'un réseau de chaleur représentent un problème complexe, nécessitant de nombreuses études et optimisations propres et ne peut être réduit à une simple décision binaire de raccordement/non-raccordement. Afin de ne pas considérer une représentation simpliste et donc erronée de ce type de chauffage, nous faisons le choix de ne pas donner la possibilité de chauffer un bâtiment par ce biais.
- On considère que la mise en œuvre d'émetteurs basse température (c.-à-d. un plancher chauffant) n'est pas possible dans le cadre d'une rénovation. En effet, les travaux induits sont conséquents, onéreux et dépendent grandement de l'état initial du bâtiment.

Si on peut s'étonner de l'absence des pompes à chaleur géothermique des bases étudiées, celle-ci s'explique au regard des statistiques du marché des PACs (voir Tab. 3.3). En effet, les PACs géothermiques ne représentent qu'une part marginale des ventes des PACs en France. Ainsi, en 2017, le nombre de PAC géothermiques vendues est estimé à environ 2,500, quand les PACs aérothermiques représentent des ventes d'environ 130,000 exemplaires. Ces chiffres ne comptent que les pompes à chaleur installées dans un but principal de chauffage, et écartent donc les usages de climatisation pure.

Technologie	Ventes	(%)
Géothermie (sol/eau ou eau/eau)	2,500	(1.9)
Aérothermie (air-eau)	83,800	(62.4)
Aérothermie (air-air)	48,000	(35.7)

Tableau 3.3 – Chiffres de vente de pompes à chaleur à usage principal de chauffage en 2017 en unités vendues. Source : AFPAC⁴

Au vu de ces remarques, seule la restriction des systèmes de type poêle/insert aux maisons individuelles est retenue dans le cadre de la rénovation. L'arbre des solutions techniques pour le chauffage est présenté en Figure 3.12. Pour chacun des systèmes, différentes valeurs d'efficacité pourront être définies pour représenter les anciennes technologies (présentes dans le parc existant) et les nouvelles technologies (disponibles pour la rénovation). Les blocs gris représentent des différences de technologies au sein d'une classe de systèmes, qui feront l'objet d'une modélisation propre (voir Sec. 3.4.2). Seuls les blocs pleins peuvent être installés dans le cadre d'une rénovation.

4. <https://www.afpac.org/file/198879/>

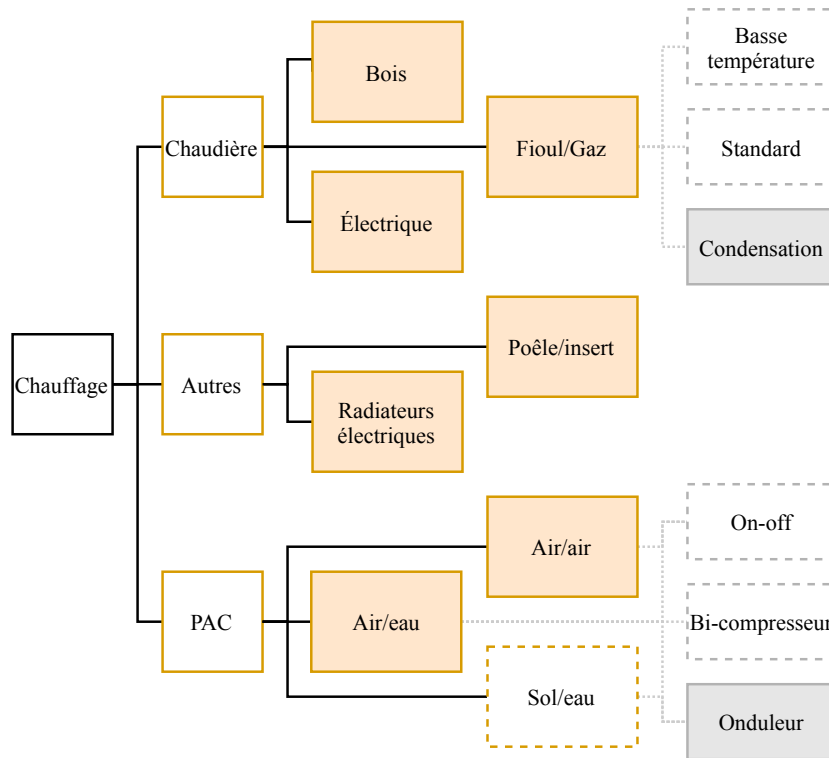


FIGURE 3.12 – Arbre des solutions techniques pour le remplacement du chauffage

3.4.2 Modélisation technique

La modélisation technique des systèmes de chauffage consiste en l'estimation de leur efficacité moyenne sur une saison de chauffe. Deux méthodes de modélisation principales sont utilisées, en fonction des systèmes considérés :

- Pour les systèmes dont les performances dépendent des conditions climatiques, l'efficacité saisonnière est estimée à partir d'une série temporelle de température. La dépendance aux conditions climatiques peut être directe (PAC) ou indirecte, à travers une modélisation de la charge partielle (chaudières).
- Pour les systèmes hors PACs et chaudières, la valeur standard d'efficacité est issue des données constructeur.

3.4.2.1 Chaudières

Différentes courbes d'efficacité à charge partielle sont considérées pour modéliser le comportement des technologies de chaudières (voir Fig. 3.13). L'efficacité saisonnière est alors estimée à partir de ces courbes et d'une série temporelle de températures.

Le ratio de charge partielle (*part load ratio, PLR*) se calcule comme le rapport entre l'énergie à fournir et la puissance nominale du système, c'est-à-dire la puissance pour laquelle il a été dimensionné.

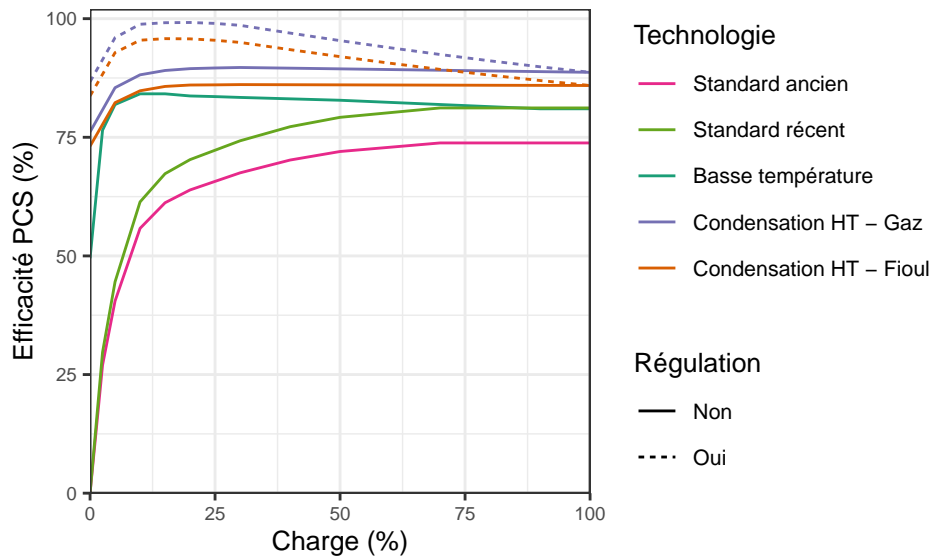


FIGURE 3.13 – Chaudières : Courbes d'efficacité à charge partielle des différentes technologies. Les courbes sont issues d'hypothèses propres ou établies à partir de courbes observées dans la littérature. [72, 73]

Hypothèse :

On considère que les systèmes de chauffage sont correctement dimensionnés, que ce soit dans le parc existant ou au cours d'une rénovation. Ainsi, les performances des systèmes de chauffage sont optimisées.

Pour les chaudières à condensation, les performances dépendent de la température de retour de l'eau, qui va influencer la qualité de ladite condensation (voir Fig. 3.14). Une régulation en température, appelée loi d'eau, peut être mise en œuvre pour adapter la température de départ à la température extérieure. Cette régulation impacte les performances saisonnières. Quatre courbes de régulation présentées en Fig. 3.15 sont retenues pour chacun des régimes de températures modélisés à savoir Basse Température (BT), Moyenne Température (MT), Haute Température (HT) et Très-Haute Température (THT).

Le Tableau 3.4 présente les efficacités saisonnières des chaudières pour un usage de chauffage principal avec et sans régulation de température ainsi que l'efficacité des systèmes lorsqu'ils sont utilisés comme appoint de PAC (la description des systèmes hybrides PAC-chaudières sera présentée en Sec. 3.4.2.2). Les efficacités sont données en référentiel PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) étant donné que c'est l'unité de facturation des fournisseurs.

3.4.2.2 Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur font l'objet d'une modélisation propre, permettant d'estimer leurs performances saisonnières à partir d'une série temporelle de températures. En effet, l'efficacité des PACs - on parle de Coefficient de Performance (COP) - dépend grandement des conditions climatiques. Deux facteurs principaux sont en jeu : la température de la source

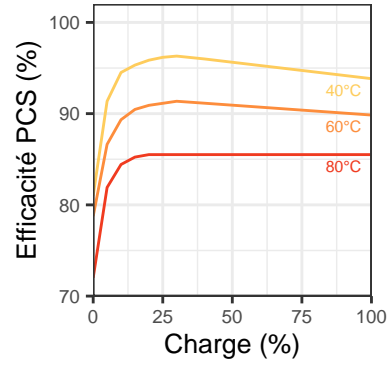


FIGURE 3.14 – Chaudières : Efficacité des chaudières à condensation en fonction de la charge et de la température de départ d’eau. Source : issu de [72]

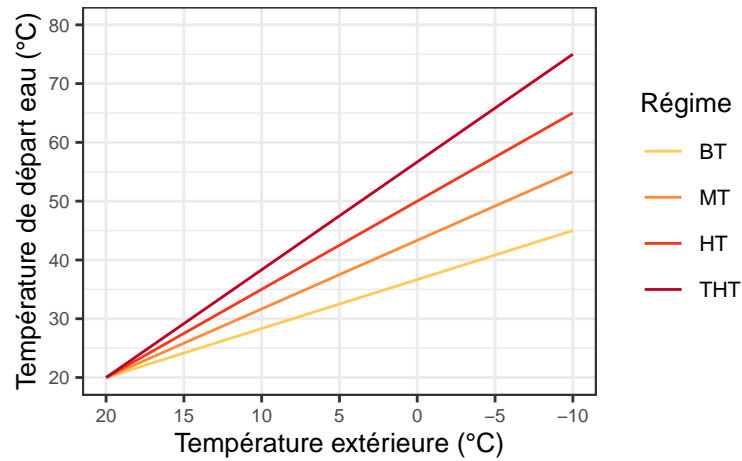


FIGURE 3.15 – Lois de régulation de température de l’eau de chauffage pour une température de base de -10°C.

froide T^f de laquelle est extraite la chaleur et celle de la source chaude T^c , à laquelle est restituée la chaleur. Afin de modéliser au mieux cette dépendance, l’efficacité des PACs n’est pas considérée comme une donnée fixe propre au système, mais est évaluée en fonction du climat du territoire étudié.

Plusieurs technologies de PACs existent, parmi lesquelles nous choisissons d’en modéliser deux : les PACs simples n’ayant qu’un compresseur fonctionnant en marche/arrêt (PAC mono-compresseur) et celles utilisant compresseur piloté par un onduleur (PAC à vitesse variable). Chacune gère le régime de charge partielle de manière différente. La technologie à onduleur, ultra-majoritaire sur le marché actuel, est considérée pour les PACs proposées à la rénovation, tandis que les PACs mono-compresseurs représentent les technologies anciennes, pouvant être présentes dans le parc initial.

Modes de fonctionnement

Premièrement, deux fonctionnements principaux sont considérés et modélisés dans cette

Technologie	Combustible	Émetteurs	Efficacité* (%)		
			Standard	Régulation	Appoint
Standard ancien	Gaz/Fioul	Radiateurs THT	69.7	-	-
Standard récent	Gaz/Fioul	Radiateurs HT	76.6	-	32.0
Basse température	Gaz/Fioul	Radiateurs MT	82.8	-	82.0
Condensation	Gaz	Radiateurs THT	86.8	94.7	-
		Radiateurs HT	89.4	95.8	91.0
		Radiateurs MT	91.9	97.0	91.3
		Radiateurs BT	94.4	98.2	95.4
	Fioul	Radiateurs THT	83.5	91.3	-
		Radiateurs HT	86.0	92.5	89.0
		Radiateurs MT	88.5	93.6	90.1
		Radiateurs BT	91.1	94.8	92.0
Gazéification	Bois	Radiateurs HT	75.5	-	61.6
Effet joule	Électricité	Radiateurs HT/MT	100	100	100

* Valeurs d'efficacité PCS (pouvoir calorifique supérieur)

Tableau 3.4 – Efficacités des chaudières retenues pour la modélisation. Conditions climatiques : Lyon.

thèse (voir Fig. 3.16) :

- Fonctionnement monovalent : La PAC fournit 100% du besoin de chauffage durant l'année. Elle est donc dimensionnée pour pouvoir fournir la puissance requise à l'instant où la température extérieure est la plus basse. C'est le fonctionnement le plus simple, mais il implique un fort coût d'investissement.
- Fonctionnement bivalent : La PAC fournit la chaleur seule la majorité de l'année, lorsque les températures sont relativement élevées ($\geq -5^{\circ}\text{C}$ environ) est aidée d'une chaudière pour les températures très faibles. Pour des questions de simplicité de modélisation, on considère que la PAC est dimensionnée pour pouvoir fournir 50% du pic de chauffage. Ce fonctionnement semble particulièrement adapté à la rénovation, où le système de chauffage présent initialement dans le logement peut servir d'appoint à moindres coûts. Des détériorations des performances peuvent cependant être observées (voir Tab. 3.4).

Les performances des pompes à chaleur dépendent, entre autres, des températures des sources chaudes et froides. L'évolution du coefficient de performances est souvent modélisé à l'aide d'une courbe de COP caractéristique du système. De nombreuses courbes existent dans la littérature et les performances atteintes par ces courbes peuvent varier assez largement selon les sources. Les constructeurs fournissent généralement des courbes théoriques. Si elles décrivaient par le passé des conditions d'utilisation parfois éloignées des usages réels, les nouvelles régulations imposent des tests qui tiennent compte des régimes de charge partielle [74]. Des études de performances en conditions réelles sont par ailleurs menées,

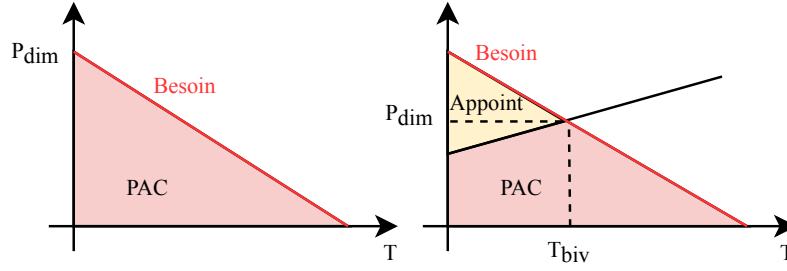


FIGURE 3.16 – Les modes de fonctionnement des pompes à chaleur : monovalent et bivalent

notamment dans le cadre de projets allemands [75, 76]. Les résultats détaillés de ces études sont néanmoins rarement accessibles.

Dans le cadre de ce travail, une modélisation simplifiée des performances des pompes à chaleur est développée en tenant compte de deux régimes de fonctionnement :

- Pleine charge : La puissance demandée pour le chauffage est supérieure ou égale à la puissance P_{dim} que peut fournir la PAC. La PAC fonctionne alors à son régime nominal.
- Charge partielle : La puissance demandée pour le chauffage est inférieure à la puissance P_{dim} que peut fournir la PAC. La PAC fonctionne alors soit à un régime de charge réduite ou en marche/arrêt.

Si le fonctionnement réel des PACs est évidemment plus complexe, ces modèles permettent d'estimer la sensibilité des performances aux conditions climatiques et aux variations de charge. De plus, une telle modélisation permettra de représenter les détérioration des performances des PACs suite à une rénovation thermique (voir Sec. 4.5.1).

Pleine charge et COP nominal

À pleine charge (PC), on considère que la PAC fonctionne à son régime nominal. Dans ce régime, l'évolution du COP des PACs air-air et air-eau est modélisé par deux courbes théoriques issues des travaux de Ruhnau et al. [77] et Barrett et al. [78] respectivement (voir Éqs. (3.5) et (3.6)). Ces courbes théoriques sont établies à partir de données constructeurs et décrivent les performances des PAC dans leur régime nominal.

$$COP_{a/a}(\Delta T) = 4.27 - 0.09\Delta T + 0.0005\Delta T^2 \quad (3.5)$$

$$COP_{a/e}(\Delta T) = 5.60 - 0.09\Delta T + 0.0005\Delta T^2 \quad (3.6)$$

Ces équations décrivent une évolution quadratique du COP avec de la différence de température entre la source chaude et la source froide. Comme pour les chaudière, la température de la source chaude peut être asservie sur la température extérieure par le biais

d'un système de régulation, dit de loi d'eau (voir Fig. 3.15). Cette régulation permet d'améliorer nettement les performances de la PAC en diminuant l'écart entre la source chaude et la source froide.

Nous apportons une légère modification afin de modéliser l'impact d'un système annexe, le dégivrage, qui est activé pour les températures froides. Pour modéliser une stratégie de dégivrage réelle, une approche simplifiée consistant à considérer une température de rupture et deux courbes différentes [79] est généralement préférée à des approches plus complexes [80].

Dans cette thèse, le dégivrage est modélisé de manière similaire à l'approche simplifiée, et deux courbes distinctes sont utilisées selon que la température extérieure est inférieure à -3°C ou supérieure à 6°C . Entre ces deux température, une dégradation proportionnelle des performances est considérée. La valeur du décalage est calibrée sur des données constructeur, et dépend également de la différence de température.

$$COP_{a/a}(\Delta T) = \begin{cases} COP_{a/a}^{deg}(\Delta T) = 4.27 - 0.09\Delta T + 0.0005\Delta T^2, & \text{si } T_{ext} \leq -3^{\circ}\text{C}, \\ COP_{a/a}^{nodeg}(\Delta T) = 7.972 - 0.223\Delta T + 0.0017\Delta T^2, & \text{si } T_{ext} \geq 6^{\circ}\text{C}, \\ \frac{(T_{ext}+3)}{9}(COP_{a/a}^{nodeg}(\Delta T)) - \frac{(T_{ext}-6)}{9}(COP_{a/a}^{deg}(\Delta T)), & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$COP_{a/e}(\Delta T) = \begin{cases} COP_{a/e}^{deg}(\Delta T) = 5.60 - 0.09\Delta T + 0.0005\Delta T^2, & \text{si } T_{ext} \leq -3^{\circ}\text{C}, \\ COP_{a/e}^{nodeg}(\Delta T) = 9.302 - 0.223\Delta T + 0.0017\Delta T^2, & \text{si } T_{ext} \geq 6^{\circ}\text{C}, \\ \frac{(T_{ext}+3)}{9}(COP_{a/e}^{nodeg}(\Delta T)) - \frac{(T_{ext}-6)}{9}(COP_{a/e}^{deg}(\Delta T)), & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.8)$$

La Figure 3.17 représente l'évolution du COP avec la différence entre le température extérieure pour une PAC air-air et une PAC air-eau moyenne température (55°C). Pour chacun de ces systèmes, l'amélioration des performances avec la régulation par loi d'eau est représentée. Cette amélioration est énorme pour les PAC air-eau, du fait de la forte différence de température entre la source chaude et froide si aucune régulation n'est mise en œuvre.

Une PAC fonctionnant à son régime nominal à une température extérieure T^{ext} consomme une puissance constante P_{nom}^{elec} . La puissance calorifique (P_{cal}^{PC}) fournie dépend alors de la puissance nominale consommée par la PAC et de son COP nominal. $\Delta T^{PAC} = T^f - T$ représente la différence entre la température de la source chaude (le fluide chauffé) et de la source froide (l'air extérieur pour une PAC aérothermique).

$$P_{PC}^{cal}(T) = P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \quad (3.9)$$

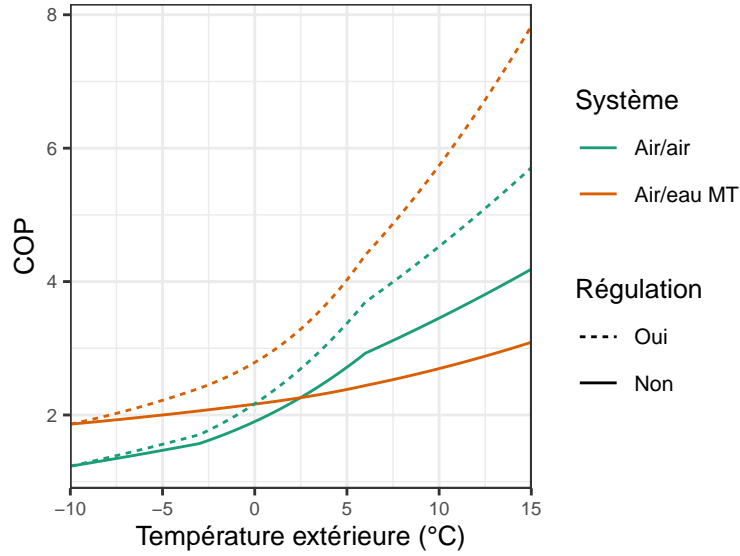


FIGURE 3.17 – Pompes à chaleur : Courbes de COP en fonction de la température extérieure.

Le point de passage du régime de pleine charge au régime de charge partielle s'appelle le point de bivalence. La température à ce point est la température de bivalence T_{biv} .

Charge réduite et COP ajusté

La technologie *Inverter* ou onduleur utilisée par les PACs récentes (appelées PAC à vitesse variable) permet de réduire la puissance de fonctionnement du compresseur. Sa puissance P_{CR}^{elec} s'adapte pour satisfaire le besoin de chauffage $Q(T)$ en évitant les cycles marche/arrêt qui détériorent les performances. La réduction de la puissance s'effectue jusqu'à une puissance minimale à partir de laquelle les cycles marche/arrêt sont inévitables. La réduction de la fréquence de fonctionnement par l'onduleur entraîne *de facto* une amélioration des performances de la PAC. Cette amélioration est modélisée par un facteur PLF [79]. Ce facteur dépend du ratio de charge PLR , qui représente le rapport entre la charge nominale de la PAC à cette température et la charge à assurer.

$$P_{CR}^{cal}(T) = Q(T) = P_{CR}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T) \quad (3.10)$$

$$PLF(T) = a \cdot PLR_{CR}(T) + b \quad (3.11)$$

$$PLR_{CR}(T) = \frac{Q(T)}{P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC})} \quad (3.12)$$

Marche/arrêt et COP dégradé

Le dernier régime considéré est le régime marche/arrêt. Lorsque le compresseur ne peut plus moduler sa puissance à la baisse, ou que la PAC n'est pas équipée d'onduleur, la puissance calorifique est fournie par l'intermédiaire de cycles courts marche/arrêt (*start/stop*). La puissance consommée pour fournir cette chaleur est notée $P_{m/a}^{elec}$. Les performances de la

PAC s'en trouvent détériorées. Les performances en mode marche arrêt sont modélisées par un facteur de dégradation des performances D_p , comme présenté par Naldi et al. [81] ou Bettanini et al. [82]. Ce facteur dépend d'un coefficient de dégradation C_e dont la valeur est fixée à 0.7 conformément aux recommandations de [80].

$$P_{m/a}^{cal}(T) = Q(T) = P_{m/a}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T) \cdot D_p(T) \quad (3.13)$$

$$D_p(T) = \frac{PLR_{m/a}(T)}{1 + C_e(PLR_{m/a}(T) - 1)} \quad (3.14)$$

$$PLR_{m/a}(T) = \frac{Q(T)}{P_{min}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T)} \quad (3.15)$$

Les différents régimes de fonctionnement sont représentés pour les deux technologies de PAC modélisées sur la Figure 3.18.

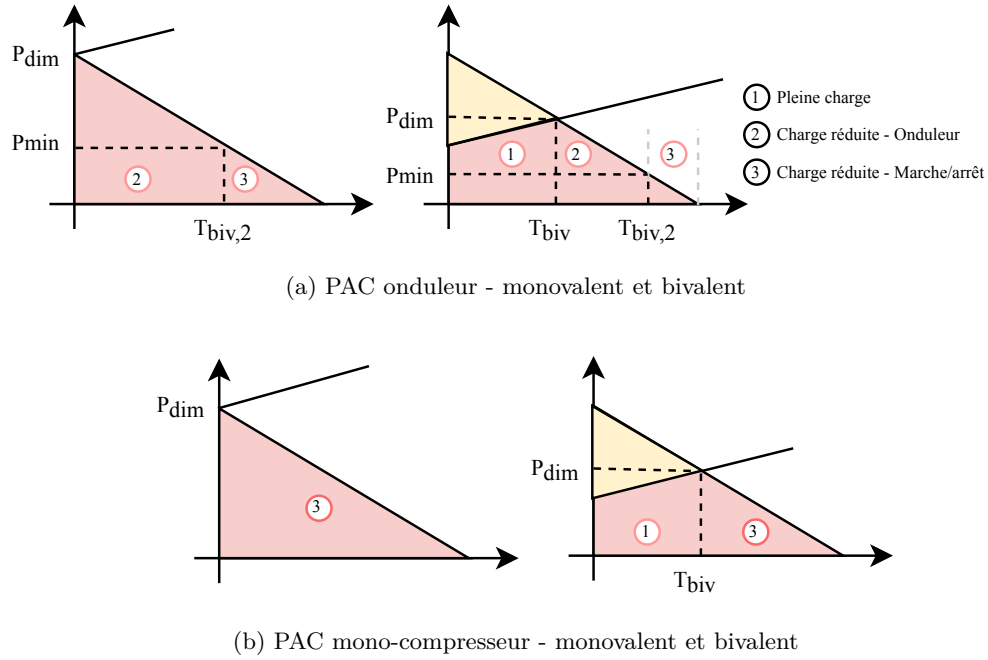


FIGURE 3.18 – Représentation des différents régimes de fonctionnement des pompes à chaleur en fonction de la technologie.

Estimation du COP saisonnier

À partir des régimes de fonctionnement précédemment définis, on peut estimer les performances saisonnières d'une PAC à partir d'une série temporelle de température. La Figure 3.19 présente la procédure suivie. Le détail de chacune des étapes est présenté en Annexe F.

1. Identification des points caractéristiques : La température de dimensionnement, nommée température de base (voir Déf. 3.3), est établie. En fonction de la technologie considérée et de cette température, les points de passage entre les régimes de pleine

- charge et de charge réduite (onduleur ou marche-arrêt) sont caractérisés (température et puissance).
2. Calcul de l'énergie fournie : On considère le besoin de chauffage d'un bâtiment comme étant du uniquement aux pertes thermiques par convection et conduction (on néglige les apports solaires). Cette hypothèse est considérée uniquement pour l'estimation en amont du COP saisonnier. La simplification consistant à négliger les apports solaires est raisonnable pour des bâtiments dont les performances ne sont pas trop bonnes et permet d'extraire les caractéristiques thermiques du calcul, rendant l'estimation indépendante des performances du bâtiment (voir Annexe F).
 3. Calcul de l'énergie consommée : Pour chacun des régimes de fonctionnement, on calcule l'énergie consommée par la pompe à chaleur, en utilisant les modèles définis plus haut.
 4. Estimation des métriques annuelles : le COP saisonnier est estimé comme le rapport entre l'énergie fournie et consommée pendant la période de chauffe. Une autre métrique peut être déduite : le rapport des énergies. Ce rapport définit la répartition des énergies fournies par la PAC et le système en appoint.

Définition 3.3

La **température extérieure de base** désigne la température la plus basse constatée au moins 5 jours par an. Les températures de base pour l'ensemble du territoire français sont définies dans la norme NF EN 12831. Celles-ci dépendent du département, de l'altitude et de la proximité de la mer. La température de base sert notamment pour dimensionner les moyens de chauffage. La température de dimensionnement correspond est alors fixée à 120% de la température de base.

Dans le cadre de cette thèse, les séries temporelles de températures considérées représentent des année-types [65]. La température de dimensionnement est alors fixée à 120% de la température minimale observée dans l'année. Cette hypothèse vise à pouvoir comparer les performances des systèmes à différentes localisations, sans dépendre de définitions arbitraires.

Résultats

La méthode d'estimation des performances saisonnières des pompes à chaleur est appliquée aux deux technologies précédemment identifiées (mono-compresseur et onduleur) et en considérant des conditions climatiques variées. Les données de température sont issues de l'IWEC, déjà introduites en Section 2.6.3, et représentent une année de conditions climatiques "type" de 12 villes françaises reconstituée à partir de données météo de plusieurs années.

La Figure 3.20 représente les valeurs de COP saisonniers estimés pour les PACs air-air et air-eau pour les conditions climatiques de Lyon. Dans le cas des PACs air-eau, les performances, qui dépendent de la température de la source chaude, sont donc déclinées

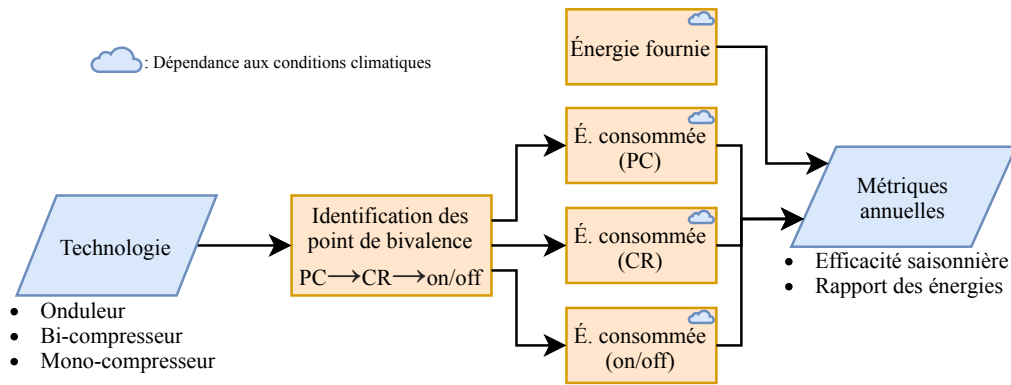


FIGURE 3.19 – Méthode d'estimation des performances saisonnières des PAC

en fonction de la température de distribution d'eau ainsi que selon la mise en place ou non d'une loi d'eau. La PAC à onduleur présente un COP saisonnier bien supérieur à la PAC mono-compresseur, avec une efficacité saisonnière dépassant les 4 pour les PACs basse-température. On observe également le fort impact de la régulation de la température d'eau sur les performances des PACs : elle permet un gain de COP saisonnier proche de 1 pour une PAC à onduleur.

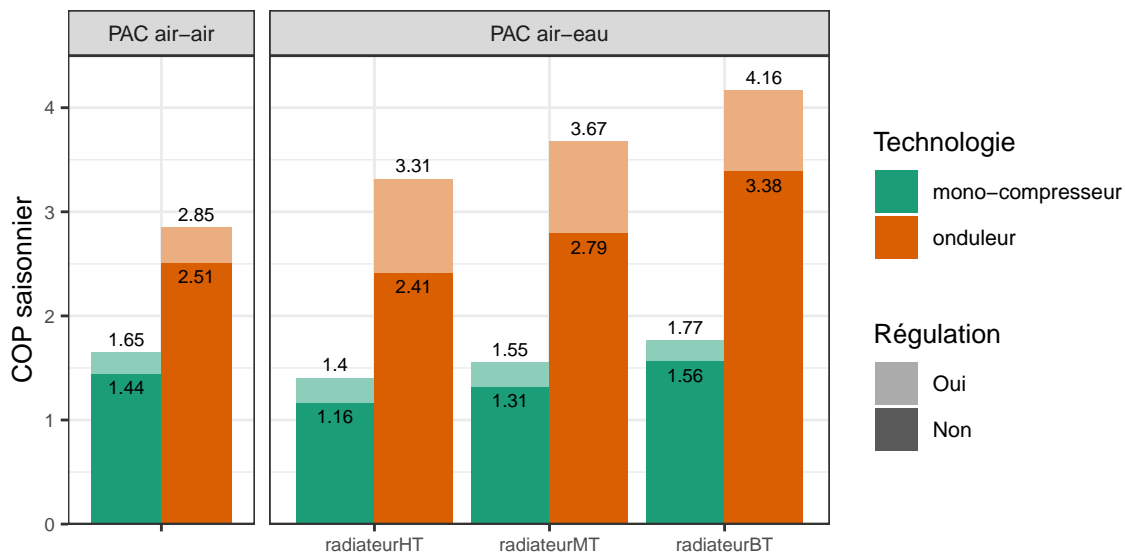


FIGURE 3.20 – Résultats de l'évaluation des COPs saisonniers pour les différentes technologies de PAC et modes de fonctionnements. Conditions climatiques : Lyon.

La Figure 3.21 représente les valeurs des COPs saisonniers pour différentes conditions climatiques. Les COPs les plus faibles sont observés dans la zone climatique H1, possédant un climat plus continental. Nice, avec son climat méditerranéen, présente le COP saisonnier le plus élevé. En revanche, les conditions climatiques de Brest permettent une bonne performance des PAC, malgré une latitude élevée du fait de la douceur du climat océanique à les températures sont rarement très basses. Une ville comme Montpellier, au climat supposé-

ment plus doux, aboutit à de moins bonnes performances. De manière générale, les valeurs de COP saisonnier sont en accord avec les valeurs rapportées par les projets européens cités précédemment [75, 76].

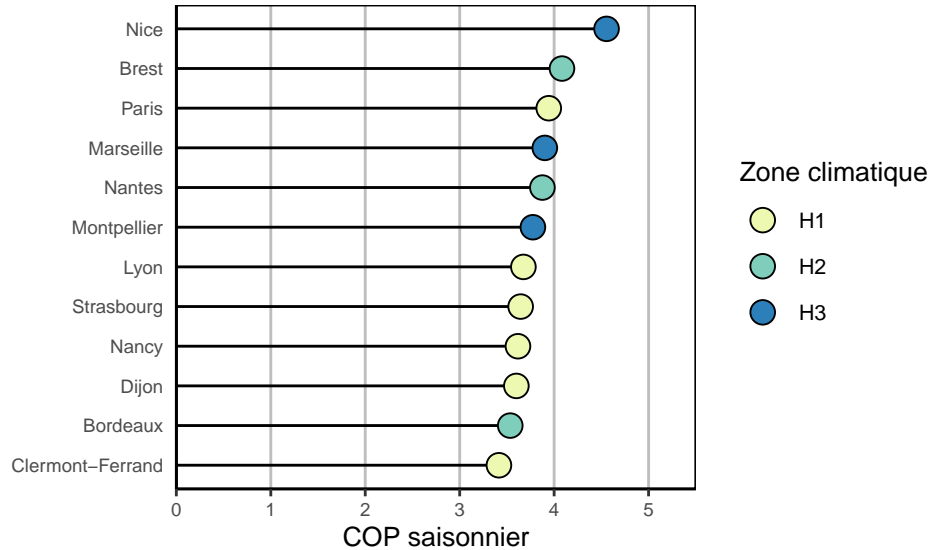


FIGURE 3.21 – Variation des COPs saisonniers des PACs en fonction des conditions climatiques pour une PAC air-eau monovalent moyenne température avec régulation.

3.4.2.3 Autres systèmes de chauffage

Les efficacités saisonnières retenues pour la modélisation des systèmes hors PACs et chaudières sont présentées dans le Tableau 3.5. Deux valeurs d'efficacité sont retenues afin de caractériser les performances des systèmes anciens et récents.

Système	Technologie	Combustible	Efficacité
Radiateurs	Convecteur	Électricité	95.0%
	Radiateur	Électricité	97.0%
Poêle/insert	Bûches	Biomasse	60.0%
	Granulés	Biomasse	80.0%

Tableau 3.5 – Efficacités des chauffages conventionnels retenues pour la modélisation

3.4.3 Modélisation économique

Afin de pouvoir établir une structure des coûts des différents systèmes de chauffage, nous avons compilé et analysé les prix publics français publiés par différents constructeurs. Les modèles construits réalisent, une fois de plus, le compromis entre une modélisation réaliste des coûts et une simplicité d'évaluation.

3.4.3.1 Coûts d'investissements

L'investissement réalisé lors du remplacement du système de chauffage comprend deux composantes :

- Le prix du générateur de chaleur
- Le coût d'installation par un professionnel

$$I_s^{RC} = I_s^{GC} + I_s^{Ins} \quad (3.16)$$

Les modèles de coûts d'investissement pour le générateur de chaleur reposent sur une structure commune, couramment utilisée dans la littérature [83, 84], caractérisée par deux facteurs :

- un coût fixe CF : il est inhérent à la construction du système
- un coût linéaire CL : il dépend du dimensionnement du système P^{dim} , lequel doit être adapté au pic de besoin du bâtiment

$$I_s^{GC} = CF_s^{GC} + CL_s^{GC} \cdot P^{dim} \quad (3.17)$$

Les coûts de chaque technologie sont évalués en considérant plusieurs modèles issus différents constructeurs et déclinés en versions de puissances variables.

Pompes à chaleur

Huit modèles de PAC air-air sont considérés dans l'étude de prix, provenant de trois constructeurs différents (Daikin, Panasonic et Samsung). les PACs fournissent une puissance dépendante de la température extérieure (et intérieure). Les prix des systèmes sont corrélés à la puissance fournie par le système à une température donnée, de 10°C dans le cas des PACs air-air.

L'interpolation des coûts des systèmes par un modèle linéaire par groupe présente un coefficient de détermination de $R^2 = 95.1\%$.

Pour un modèle m du système s , le coût fixe est ajusté en utilisant le facteur de gamme γ_m (voir Éq. (3.18)). Nous appellerons ce modèle de gamme : modèle *offset*.

$$CF_{s,m}^{GC} = \gamma_m + CF_s^{GC} \quad (3.18)$$

On observe sur la Figure 3.22 (a) que deux systèmes sont des produits assez clairement haut de gamme. Nous choisissons de proposer à la rénovation des systèmes se situant dans la

moyenne basse de la gamme, et les caractéristiques économiques du système de PAC air-air proposé sont présentées en fin de section (voir Tab. 3.13)

Neuf modèles de PAC air-eau dédiées au chauffage seul, provenant de cinq constructeurs différents (LG, Daikin, Saunier Duval, De Dietrich et Panasonic), sont considérées dans cette étude de prix. les PACs air-eau peuvent fonctionner à des régimes de température d'eau de départ variables, et leur consommation électrique dépend généralement de cette température⁵. L'Équation (3.19) décrit la dépendance définie entre la puissance consommée et la température de sortie d'eau.

$$P_{PACa/e}^{elec} = P_0^{elec} + \alpha T_f \quad (3.19)$$

Comme pour son homologue air-air, l'énergie fournie par une PAC air-eau dépend de la température extérieure, et donc de la température de chauffe. Afin de s'affranchir de la dépendance de puissance consommée à la température de chauffe, l'étude est menée sur des PACs fournissant toutes une eau à 35°C, et les prix des systèmes sont corrélés à la puissance consommée par la PAC à une température extérieure de 7°C. En considérant un facteur de gamme impactant l'ensemble des coûts à travers un rapport de proportionnalité, ce modèle, qu'on nomme modèle *proportionnalité* (voir Éq. (3.20)), permet d'atteindre $R^2 = 94.4\%$ (contre 92.7% pour le modèle de gamme *offset*).

$$\begin{aligned} CF_{s,m}^{GC} &= \gamma_m \times CF_s^{GC} \\ CL_{s,m}^{GC} &= \gamma_m \times CL_s^{GC} \end{aligned} \quad (3.20)$$

La Figure 3.22 (b) représente ces interpolations. Encore une fois, le facteur de gamme est choisi de manière à proposer un solution PAC de milieu de gamme pour l'optimisation des mesures de transition (voir Tab. 3.13).

On observe la même pente entre les PACs air-air et air-eau, ce qui est cohérent du fait de la similarité des deux technologies.

Chaudières

On procède de la même manière pour la modélisation des coûts des chaudières que pour les pompes à chaleur. Pour chacun des systèmes (gaz, fioul, électricité et bois), les données relatives à plusieurs chaudières sont utilisées pour établir la structure des coûts. Le modèle de gamme *offset* modélise correctement les coûts des chaudières gaz et fioul tandis que le modèle proportionnel sied mieux aux les chaudières bois et électriques (Fig. 3.23). La description des systèmes retenus pour la rénovation est consignée dans le Tableau 3.13.

Chauffage électrique

Le même type d'étude est mené sur un grand nombre de modèles de chauffages électriques

5. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/chauffage/dimensionner-l-installation-de-chauffage/dimensionner-les-pompes-a-chaleur-les-plus-courantes/>

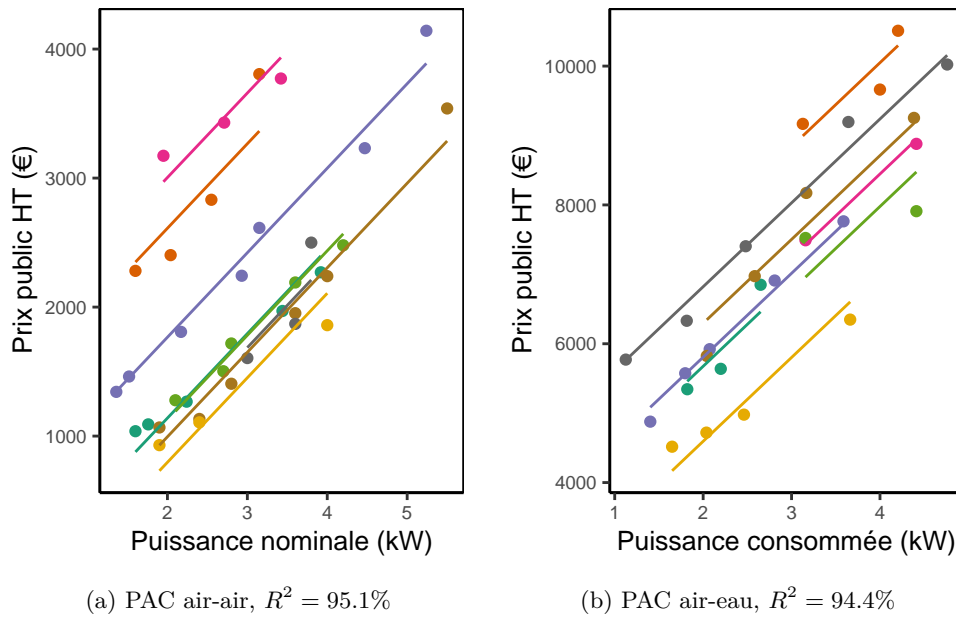


FIGURE 3.22 – Évolution des coûts des pompes à chaleur en fonction de leur puissance (nominale ou consommée). Chaque couleur représente un modèle de PAC avec ses déclinaisons de puissance. Données : Catalogues constructeurs 2019

décentralisés. La diversité des gammes de produits apparaît clairement sur la Figure 3.24, et le modèle de gamme adapté est le modèle proportionnel ($R^2 = 85.0\%$). Cette structure particulière peut être expliquée par le caractère décoratif des radiateurs, qui sont visibles de tous au contraire d'une chaudière qui est souvent dissimulée. Les différents niveaux de finition et les design expliquent ces variations de prix. Comme pour les autres systèmes, le chauffage électrique choisi pour l'optimisation se trouve dans la moyenne basse de la gamme.

Poêle/Insert

À l'inverse des systèmes précédents, les poêles et inserts à bois ne sont pas déclinés en modèles de puissance variable. Chaque produit possède généralement sa puissance propre. On observe néanmoins une corrélation entre le prix et la puissance du poêle, avec une dispersion qui peut s'expliquer par la fonction décorative de ce type de générateur (voir Fig. 3.25).

3.4.3.2 Coûts d'entretien

Les systèmes de chauffage centralisés nécessitent l'intervention d'un technicien pour effectuer une maintenance périodique, souvent annuelle, des générateurs de chaleur conformément à la législation en vigueur (décret n°2009-649). Un tarif forfaitaire est défini pour chaque technologie à partir de tarifs de contrats d'entretien proposés par les fournisseurs d'énergie (voir Tab. 3.13).

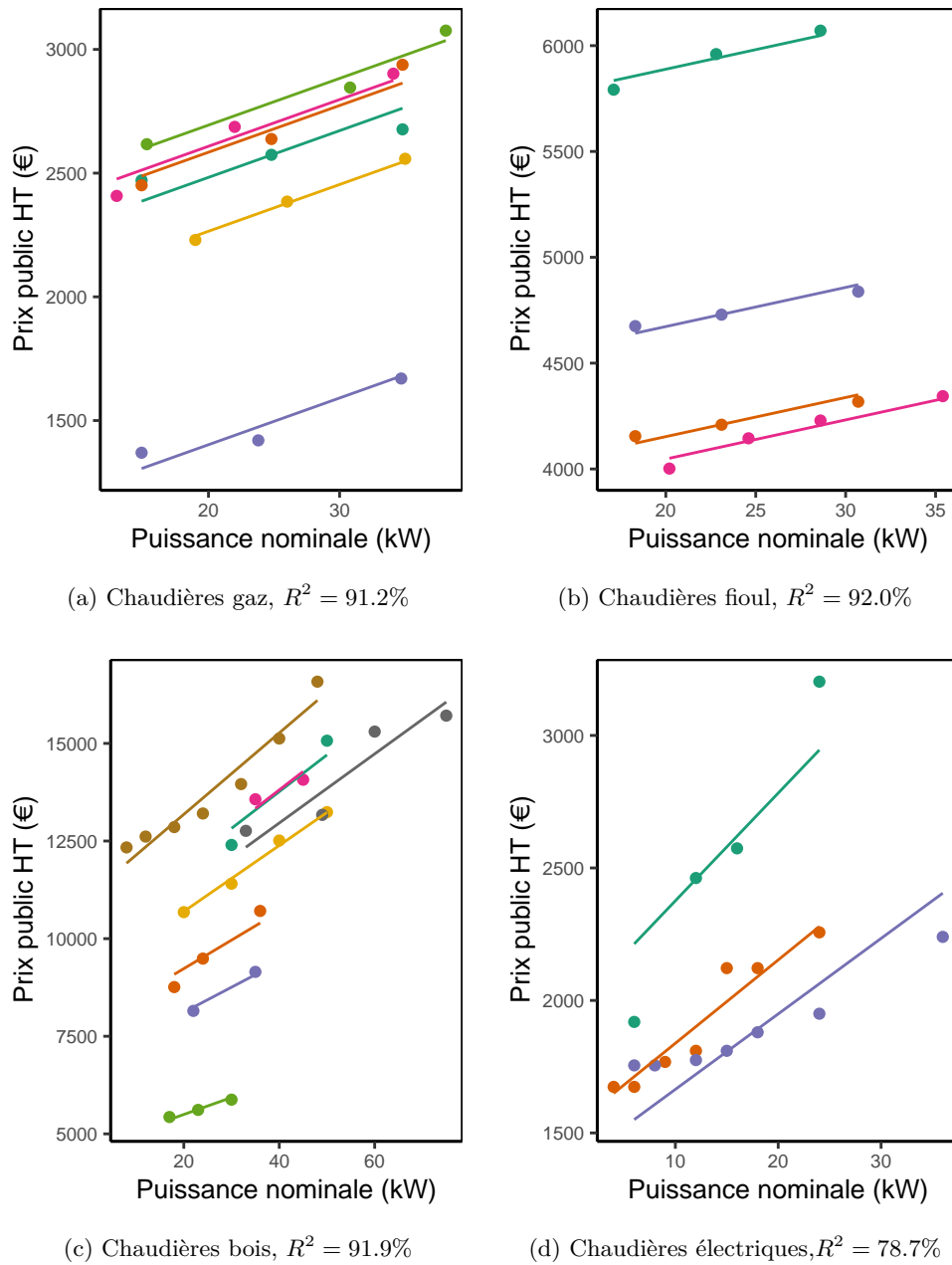


FIGURE 3.23 – Évolution des coûts des chaudières en fonction de leur puissance nominale. Chaque couleur représente un modèle de chaudière avec ses déclinaisons de puissance. Données : Catalogues constructeurs 2019

3.4.3.3 Coûts de renouvellement

Les générateurs de chaleur doivent être remplacés une fois devenus obsolètes (ou inopérants). On estime généralement la durée de vie des systèmes de chauffage entre 15 et 20 ans. La base de données environnementales et sanitaires de référence INIES⁶ considère une durée de vie de 17 ans pour tous les systèmes neufs. Nous considérons cette même durée de

6. <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>

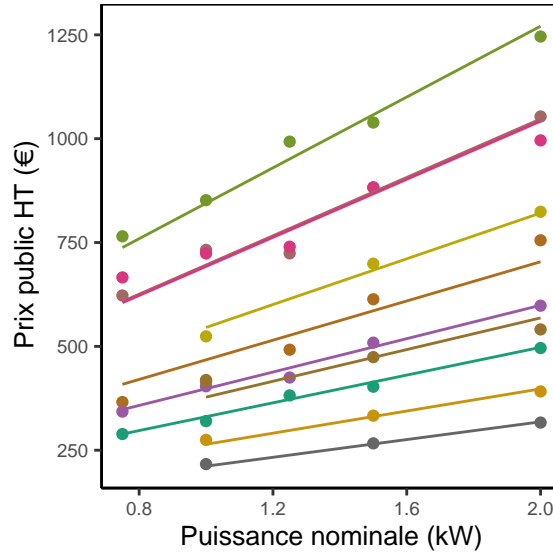


FIGURE 3.24 – Évolution des coûts des systèmes de chauffage électrique décentralisés en fonction de leur puissance nominale. Chaque couleur représente un modèle de radiateur électrique avec ses déclinaisons de puissance. Données : Catalogues constructeurs 2019

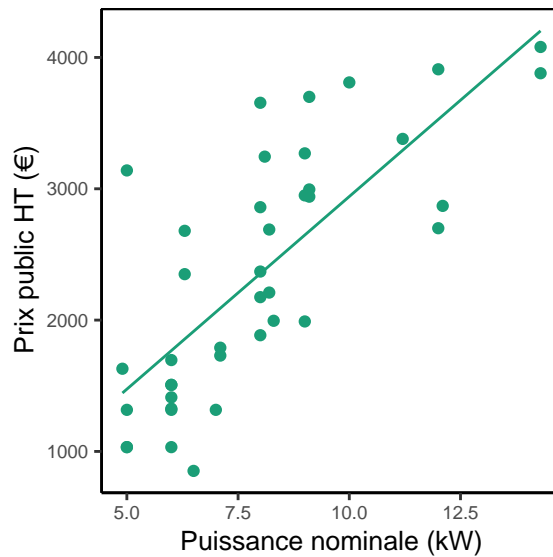


FIGURE 3.25 – Évolution des coûts des poêles et inserts en fonction de leur puissance nominale. Données : Catalogues constructeurs 2019

vie, suite à laquelle un nouvel investissement (générateur + installation) doit être réalisé.

Les systèmes de chauffage présents dans le parc sont renouvelés de manière automatique par des systèmes de même type, mais de nouvelle génération, plus performants, une fois leur durée de vie atteinte. La durée de vie restante des systèmes en place est définie selon leur technologie (et leur vétusté). Ne pas prendre en compte ce renouvellement naturel des systèmes de chauffage n'a pas d'impact sur les effets de la transition énergétique à court terme, mais reviendrait à surestimer les gains économiques sur le long terme, notamment

Système	Technologie	Combustible	Modèle	Facteur de gamme		CF (€)	CL (€/kW)
				Min	Max		
PAC	air-air	Électricité	offset	-636	1176	222	415
	air-eau	Électricité	proportionnel	0.704	1.117	3498	460
Chaudière	Condensation	Gaz	offset	-1080	211	2105	19
		Fioul	offset	-626	1216	4303	19
	-	Bois	proportionnel	0.549	1.317	8426	79
	-	Électricité	proportionnel	0.859	1.226	1606	33
Radiateur	Inertie	Électricité	proportionnel	0.456	1.770	262	228
Poêle/insert	Granulés	Bois	-	-	-	7.4	293

Tableau 3.6 – Modélisation des coûts des systèmes et gammes identifiées

par la réduction de la facture énergétique. L'efficacité du système de chauffage du bâtiment impacté est alors ajustée, et impacte également la consommation et la facture énergétique.

3.4.3.4 Valeur résiduelle

À la fin de la période d'évaluation, la valeur résiduelle du changement de chauffage est estimée en considérant un amortissement linéaire du coût du générateur tout au long de la durée de vie du système.

3.4.4 Modélisation technico-économique des combustibles de chauffage

Les systèmes de chauffage produisent la chaleur à partir de divers combustibles. Ceux-ci ont un impact direct sur les émissions de GES et sur la facture énergétique liée au chauffage à travers le contenu carbone, ou facteur d'émissions f_e et le prix f_c des combustibles respectivement. Les valeurs retenues pour chaque combustible sont présentées dans le Tableau 3.7. Les remarques suivantes viennent justifier ces choix :

- Le contenu carbone de chaque combustible est tiré de la Base carbone de l'ADEME [85]. Les valeurs les plus récentes disponibles sont retenues. La valeur la plus sensible est celle concernant l'électricité : la valeur du contenu carbone de l'électricité dépend très fortement de la méthode utilisée, laquelle fait l'objet de nombreux débats. La méthode saisonnalisée développée de l'ADEME, source relativement neutre, est retenue dans un premier temps. L'impact que peut avoir ce facteur sera discuté en Chapitre 5.
- Les prix des combustibles sont définis afin de représenter la réalité actuelle du marché de l'énergie. Aucune évolution dans le temps n'est considérée.
- L'énergie est décomptée en énergie finale. Dans le cas où l'on souhaiterait considérer l'énergie primaire, le facteur d'énergie primaire de l'électricité est considéré égal à 2.58, conformément aux textes en vigueur.

Combustible	Prix (€/MWh)	Contenu carbone (gCO ₂ e/kWh)
Électricité	158.9	147
Fioul	91.7	324
Bois	70.0	30.4
Gaz	71.5	244

Tableau 3.7 – Hypothèses de prix et de contenu carbone des combustibles.

3.4.5 Modélisation des émetteurs de chaleur

Les systèmes de chauffage centralisés (chaudières et PAC) doivent être compatibles avec les émetteurs de chaleur du bâtiment. En l'absence de compatibilité, on considère que le système peut être installé, moyennant un surcoût d'investissement correspondant au remplacement des émetteurs. Le prix de ces émetteurs est donc également modélisé.

La puissance émise par les émetteurs dépend de l'écart de température entre l'eau les traversant et la température ambiante. Le rapport de puissance émise entre deux régimes de température d'eau peut être estimé par l'Équation (3.21)⁷. Il dépend d'un facteur α , propre aux matériaux du radiateur et estimé à 1,3.

$$P(\Delta T_1) = P(\Delta T_2) \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)^\alpha \quad (3.21)$$

Le coût des émetteurs de chaleur est, de manière analogue aux générateurs de chaleur, corrélé à la puissance d'émission à $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, soit un fonctionnement à haute température.

$$I^E = CF^E + CL^E \cdot P^{dim}(50) \quad (3.22)$$

Le coût des émetteurs de chaque système de chauffage s considéré est ensuite décliné à partir de ce modèle de coûts, en prenant en compte la différence de puissance des émetteurs en fonction des régimes d'eau (caractérisés par la différence de température $\Delta T_{fl,s}$).

$$I_s^E = CF^E + CL^E \cdot P^{dim}(\Delta T_{fl,s}) \left(\frac{50}{\Delta T_{fl,s}} \right)^\alpha \quad (3.23)$$

Le modèle de gamme employé est le modèle proportionnel, permettant d'atteindre $R^2 = 89.9\%$ (voir Fig. 3.26). Les coûts aux autres régimes de fonctionnement sont déduits à l'aide du rapport de puissance adapté.

7. Documentation Acova : https://it4v7.interactiv-doc.fr/html/guide_acova_2020_pap_100dpi_607

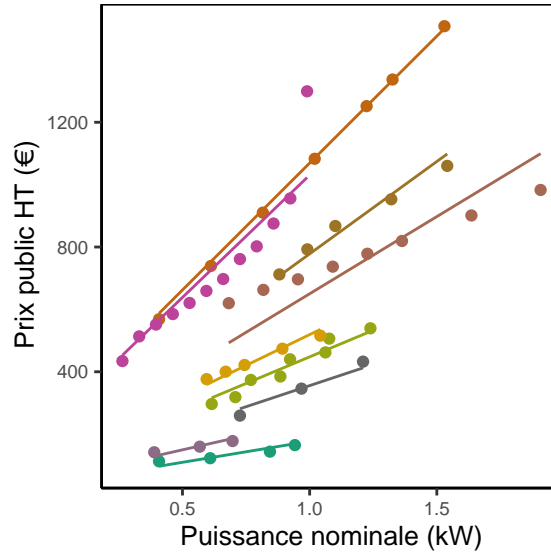


FIGURE 3.26 – Évolution des coûts des émetteurs de chaleur en fonction de la puissance émise à $\Delta T = 50^\circ\text{C}$. Chaque couleur représente un modèle d'émetteur de chaleur avec ses déclinaisons de puissance. Données : Catalogues constructeurs 2019

3.5 Bases finales de solutions techniques

Les précédentes sections ont permis d'identifier les solutions techniques disponibles pour la rénovation énergétique, et également de réaliser leur modélisation technico-économique. Cette section réalise la synthèse du chapitre en établissant les bases finales de solutions techniques considérées dans l'aide à la planification énergétique.

3.5.1 Rénovation thermique des bâtiments

Les quatre tableaux suivants présentent toutes les informations nécessaires à la définition des solutions techniques de rénovation thermique du bâtiment pour amener les différentes parois à un niveau de performance cible.

3.5.2 Systèmes de chauffage

Les Tableaux 3.12 et 3.13 présentent le détail de la base finale de solutions techniques pour le remplacement des systèmes de chauffage.

Le premier décrit les caractéristiques techniques retenues, en termes d'efficacité et de puissance minimum. Pour le cas des poêles et des PACs air-air, nous considérons que ces deux systèmes de chauffage décentralisés fournissent 50% de l'énergie nécessaire au chauffage d'un bâtiment, le reste étant fourni par des radiateurs électriques.

Le second tableau recense l'ensemble des coûts retenus pour les systèmes de chauffage : investissement dans le générateur, coût d'installation et coût annuel de maintenance. Pour le cas spécifique des radiateurs électriques, on ramène le coût d'une unité (un radiateur) à

Technique	Niveau perf. (u)			Matériau	λ (W/m/K)	CF_r (€/m ²)	CV_r (€/m ³)
	RT	Méd.	Perf.				
ITI	0.45	0.26	0.23	Laine de Verre (LdV)	0.04	11,00	36,25
				Laine de Roche (LdR)	0.038	11,00	37,50
				PSE	0.035	6,00	20,00
ITE	0.45	0.21	0.17	LdV	0.04	59,86	75,70
				LdR	0.038	129,70	47,00
				PSE	0.035	120,00	35,00
ITI+ITE	0.45	0.18	0.15	LdV + LdV	0.04	233,00	15,00
				LdR + LdV	0.039	138,86	52,86
				PSE + LdV	0.037	193,20	15,50

Tableau 3.8 – Base finale de solutions techniques pour la rénovation des murs

Technique	Niveau perf. (u)			Matériau	λ (W/m/K)	CF_r (€/m ²)	CV_r (€/m ³)
	RT	Méd.	Perf.				
Combles	0.21	0.13	0.11	Ouate de cellulose	0.04	15,00	5,00
				Laine de Roche (LdR) soufflée	0.045	16,77	8,85
				Laine de Bois (LdB)	0.04	8,58	10,96
				Laine de Verre (LdV)	0.04	2,46	8,27
				LdR	0.038	9,00	5,00
Sous rampants	0.23	0.13	0.11	LdB	0.04	49,30	23,5
				LdV	0.04	47,30	23,5
				LdR	0.038	47,70	23,7
				PSE	0.035	46,00	14,38
Terrasse	0.30	0.13	0.11	PU	0.025	63,50	33,75
				XPS	0.032	55,00	16,00
Bacs aciers	0.23	0.13	0.11	LdV	0.04	69,55	14,00
				PSE	0.035	70,24	13,81

Tableau 3.9 – Base finale de solutions techniques pour rénovation de la toiture

Technique	Niveau perf. (u)			Matériau	λ (W/m/K)	CF_r (€/m ²)	CV_r (€/m ³)
	RT	Méd.	Perf.				
Sous face	0.37	0.20	0.17	Laine de Verre (LdV)	0.04	59,40	48,79
				Laine de Roche (LdR)	0.038	60,00	48,75
				Laine de Bois (LdB)	0.04	63,01	48,02
				Ouate de cellulose	0.04	25,50	5,00
				PSE	0.035	31,88	12,37

Tableau 3.10 – Base finale de solutions techniques pour la rénovation du plancher

un coût linéaire fonction de de la puissance totale de chauffage, en considérant des unités de 1kW en moyenne.

Technique	Matériau	Niveau perf.	u (W/m ² /K)	Sw (-)	CS_r (€/m ²)
Double vitrage	Bois	Minimum	1,9	0,38	331
		Standard	1,4	0,36	426
		Performant	1,2	0,36	464
	PVC	Minimum	1,9	0,38	185,5
		Standard	1,4	0,34	303
		Performant	1,2	0,32	350
	Bois-Alu	Minimum	1,9	0,39	630
		Standard	1,2	0,36	980
		Performant	1,1	0,36	1030
	Alu-RPT	Minimum	1,9	0,36	537
		Standard	1,8	0,36	558
		Performant	1,6	0,36	600

Tableau 3.11 – Base finale de solutions techniques pour la rénovation des vitrages

Système	Technologie	Combustible	P_{min} (kW)	Efficacité (%)	Appoint	Type	Part du pic (%)
Chaudière	Condensation	Gaz	13	95.5-98.5	-	-	-
		Fioul	17	92.0-95.0			
	Gazéification	Bois	8	75.0			
	-	Électricité	4	100			
Radiateurs	Inertie	Électricité	-	97.0	-	-	-
Poêle	Granulés	Bois	5	80.0	Radiateurs	Spatial	50
PAC air-air	Onduleur	Électricité	2.5*	**	Radiateurs	Spatial	50
PAC air-eau	Onduleur	Électricité	3*	**	-	-	-
	Onduleur	Électricité	3*	**	Chaudière	Pic	50

* Puissance minimum électrique consommée par la PAC

** Efficacité dépendant des conditions climatiques

Tableau 3.12 – Base finale de solutions techniques pour le remplacement des systèmes de chauffage - Caractéristiques techniques.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie qui permet d'obtenir une base de solutions techniques disponibles pour la rénovation énergétique des bâtiments. Cette base repose sur trois choix de modélisation principaux :

- Le choix des solutions considérées repose sur l'observation du contexte de la construction en France en 2019. Ainsi, nous avons écarté certains systèmes ou techniques de rénovation, car peu, pas ou plus utilisées dans la rénovation énergétique des bâtiments.

Système	Technologie	Combustible	CF_s^{GC} (€)	CL_s^{GC} (€/kW)	CF_s^{Ins} (€)	CL_s^{Ins} (€/kW)	MC (€)
Chaudière	Condensation	Gaz	1890	19	1000	0	120
		Fioul	4020	19	1500	0	170
	Gazéification	Bois	7770	73	2000	0	160
	-	Électricité	1500	31.5	800	0	100
Radiateurs	Inertie	Électricité	0	395	0	100	0
Poêle	Granulés	Bois	10	295	1000	0	100
PAC air-air	Onduleur	Électricité	-78	415	800	0	130
PAC air-eau	Onduleur	Électricité	3155	1190*	4000	0	200

* Exprimé par rapport à la puissance nominale consommée par la PAC et non fournie

Tableau 3.13 – Base finale de solutions techniques pour le remplacement des systèmes de chauffage - Hypothèses économiques.

- Les modèles de coûts établis possèdent une structure simple afin de permettre leur utilisation dans un problème de grande taille. Néanmoins, les hypothèses de coûts sont basées au maximum sur des données constructeur afin de représenter le plus fidèlement possible la réalité économique du moment.
- Une modélisation technique a été mise en œuvre, encore une fois en cherchant le compromis entre simplicité et précision. En particulier, nous avons développé une procédure d'estimation du rendement saisonnier des systèmes de chauffage pour les chaudières et les pompes à chaleur. Les modèles développés prennent en compte le fonctionnement à charge partielle de ces systèmes, et les dégradations de performances associées. L'estimation est réalisée en amont de l'optimisation, de manière indépendante des caractéristiques du bâtiment, à partir d'une série temporelle de températures.

L'intégration des solutions techniques dans le problème d'optimisation de la mise en œuvre de la rénovation énergétique doit alors être détaillée. Le choix de variables de décision adaptées ainsi que la description du problème d'optimisation résultant sont détaillés dans le Chapitre 4.

Chapitre 4

Problème d'optimisation pour la rénovation énergétique

Contenu du chapitre

Résumé du chapitre	96
4.1 Introduction	97
4.2 Impact de la rénovation sur les indicateurs techniques	97
4.2.1 Choix des variables de décision	97
4.2.2 Impact sur le besoin de chauffage	100
4.2.3 Impact sur la consommation d'énergie et les indicateurs liés . . .	101
4.2.4 Impact sur les coûts	101
4.3 Optimisation adaptée à l'aide à la décision territoriale	103
4.3.1 Choix de la fonction de coûts et stratégies de rénovation	103
4.3.2 Intégration des contraintes locales (techniques, urbanisme)	104
4.3.3 Variables de décision et non-linéarités	105
4.3.4 Problème d'optimisation adapté - sac à dos	108
4.4 Implémentation et performances	110
4.4.1 Détails de l'implémentation	110
4.4.2 Évaluation du temps de calcul	111
4.4.3 Perspectives d'amélioration des performances	112
4.5 Modélisations supplémentaires et impact sur les performances	113
4.5.1 Sur-dimensionnement du chauffage (rénovation et appoint)	113
4.5.2 Ventilation des bâtiments rénovés	114
4.5.3 Puissance minimum de dimensionnement du chauffage	117
4.5.4 Réutilisation des émetteurs de chaleur	118
4.5.5 Performances des modèles affinés	119
4.6 Conclusion	119

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'intégrer l'ensemble des modèles technico-économiques développés dans les deux premiers chapitres au sein d'un formalisme d'optimisation.

Dans un premier temps, les variables de décision du problème sont définies. Des variables de décision binaires sont définies afin de représenter les choix de mise en œuvre sur les bâtiments, pour la rénovation thermique comme pour le remplacement des systèmes. Leur intégration au sein des fonctions du besoin, de la consommation et de coûts est alors détaillée. Pour l'estimation des coûts des systèmes de chauffage, un méta-modèle de la puissance de dimensionnement est établi. Celui-ci est construit suivant une procédure analogue à celle permettant d'estimer le besoin de chauffage, présentée dans le Chapitre 2.

La capacité du problème à opérer sur des problèmes territoriaux est alors discutée. La résolution fine de la modélisation (infra bâtiments) permet de représenter des contraintes techniques ou d'urbanisme locales. Cependant, des non-linéarités persistent, notamment dans les fonctions de coûts et l'estimation de la consommation énergétique. De nouvelles variables de décision couplant la rénovation thermique et le remplacement des systèmes sont définies. Celles-ci cherchent, comme depuis le début du manuscrit, à favoriser une opération en grande dimension en introduisant un nombre raisonnable de contraintes. La formulation finale du problème d'optimisation prend la forme d'une variante d'un problème récurrent en optimisation linéaire combinatoire : le problème du sac à dos (ou *knapsack problem*).

Les performances de la modélisation, dans son ensemble, sont étudiées. L'implémentation réalisée permet une optimisation des mesures de rénovation énergétique d'un territoire s'échelonnant de quelques minutes pour un petit territoire (moins de 5 minutes pour 1000 bâtiments) à quelques dizaines de minutes pour des territoires plus conséquents (environ 30 minutes pour 5000 bâtiments). Si le temps de prétraitement varie linéairement avec le nombre de bâtiments, celle de l'optimisation semble quadratique. À noter que ce temps de calcul est sensible au nombre de solutions techniques proposées.

Enfin, quatre modèles sont présentés, chacun pouvant être intégré de manière modulaire au problème d'optimisation. Ceux-ci permettent de prendre en compte (1) la détérioration des performances des systèmes de chauffage et (2) l'installation d'une ventilation à la suite d'une rénovation thermique, mais également (3) la puissance minimale disponible à l'achat de certains systèmes et enfin (4) la possibilité de réemploi des émetteurs de chaleur initiaux. Seule cette dernière modélisation a un fort impact sur les temps de calcul, justifiant de la considérer pour les territoires de petite taille.

4.1 Introduction

Les différentes modélisations développées dans les Chapitre 2 et Chapitre 3 doivent être intégrés au sein d'un problème d'optimisation à l'échelle territoriale dont le formalisme représente les préoccupations des dits territoires. S'il a été observé dans le Chapitre 1 que l'approche par optimisation semble adaptée, il est nécessaire d'établir la nature des variables ainsi que les fonctions utilisées comme objectifs et contraintes.

De la même manière que pour la modélisation de la consommation énergétique présentée dans le Chapitre 2, celle de la transition énergétique doit être pensée dans le contexte territorial : les variables, fonctions et le problème en lui-même doivent réaliser le compromis entre finesse et intégrabilité dans une optimisation à grande échelle.

Le présent chapitre s'articule alors autour de quatre sections. La première section détaille le choix des variables de décision ainsi que leur intégration dans les différentes fonctions permettant d'estimer les valeurs des indicateurs de la transition énergétique. La seconde section est consacrée à la description du modèle d'optimisation représentant le contexte de la transition énergétique ainsi que les choix de linéarisation associés tandis que la troisième section présente les performances du modèle établi. Enfin, la dernière section présente quatre modélisations fines de thématiques en lien avec la rénovation énergétique, et leur impact sur les performances du modèle.

4.2 Impact de la rénovation sur les indicateurs techniques

L'activation des différentes solutions techniques de la rénovation énergétique va impacter, selon la nature de l'action, le besoin de chauffage, sa consommation ou encore ses émissions de gaz à effet de serre. Cette section détaille donc la modélisation des actions de rénovation à travers des variables de décision adaptées ainsi que leur implication dans l'estimation des différents indicateurs de la transition.

4.2.1 Choix des variables de décision

Du fait de la construction de bases de solutions discrètes, et afin de représenter un contexte où les actions réalisées sur les bâtiments sont considérées comme des choix, la modélisation la plus naturelle réside dans l'adoption de variables de décisions binaires. L'ensemble des possibilités de rénovation ne constitue ainsi pas un espace continu, mais un ensemble discret de solutions techniques pouvant être activées, ou non. Nous définissons deux types de variables binaires, correspondant à deux leviers de la rénovation énergétique appliquée à la réduction de la consommation énergétique :

1. Les variables x décrivent la mise en place de solutions de rénovation thermique de l'enveloppe d'un bâtiment.

2. Les variables y décrivent le remplacement du système de chauffage dans un bâtiment.

Hypothèse :

Dans un premier temps, le changement du système de ventilation n'est pas considéré dans la modélisation de la rénovation thermique du bâtiment, bien que celui-ci ait un impact sur le besoin énergétique. En effet, la problématique de la ventilation est liée à des questions de confort et d'hygrométrie et n'est pas activée uniquement pour réduire la consommation énergétique d'un logement. Son remplacement sera considéré dans un second temps (voir Sec. 4.5).

4.2.1.1 Rénovation thermique de l'enveloppe

Une variable de décision binaire $x_{b,p,r}$ représente le choix de mettre en œuvre, ou non, une solution technique r sur une paroi p d'un bâtiment b .

$$x_{b,p,r} \in \{0, 1\}, \quad \forall b, p, r$$

Définition 4.1

On appelle **stratégie de rénovation thermique** d'une entité l'ensemble des variables de décision qui définissent des solutions techniques à activer à l'échelle de la paroi pour ladite entité. On peut alors définir la stratégie de rénovation thermique :

- d'une paroi p d'un bâtiment b : $X_{b,p} = (x_{b,p,r})_r$
- d'un bâtiment b : $X_b = (X_{b,p})_p$
- d'un territoire : $X = (X_b)_b$

Étant donné que plusieurs solutions techniques sont généralement disponibles pour une même paroi p , mais qu'une seule peut être mise en œuvre, la contrainte formalisée par l'Équation (4.1) garantit qu'une seule d'entre elles soit activée.

$$\sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} = 1, \quad \forall b, p \tag{4.1}$$

Il est important de noter que le fait de ne pas appliquer de rénovation et donc de laisser une paroi dans son état initial est considéré comme une solution technique à part entière.

Hypothèses :

1. Une paroi possède un et un seul état, c'est-à-dire que l'on considère que tous les murs extérieurs d'un bâtiment sont faits d'un même matériau, que tous les vitrages sont les mêmes, etc. Cette hypothèse simplificatrice est grandement motivée par l'échelle de modélisation et par les données d'entrée disponibles, issues de la modélisation du territoire.
2. Une paroi est toujours rénovée dans son ensemble, c'est-à-dire qu'on rénove aucun ou tous les murs, aucuns ou tous les vitrages, etc. Cette hypothèse vise à réduire la dimension du problème à résoudre sans pour autant trop s'écarter de la réalité du terrain.

4.2.1.2 Remplacement du chauffage

Une variable de décision binaire $y_{b,s}$ représente le choix de remplacer, ou non, le système de chauffage d'un bâtiment b par un nouveau système de chauffage s .

$$y_{b,s} \in \{0, 1\}$$

Définition 4.2

On appelle **stratégie de remplacement des systèmes de chauffage** d'une entité l'ensemble des variables de décision qui définissent les systèmes de chauffage à installer à l'échelle du bâtiment dans ladite entité. On peut alors définir la stratégie de remplacement des systèmes de chauffage :

- d'un bâtiment b : $Y_b = (y_{b,s})_s$
- d'un territoire : $Y = (Y_b)_b$

De manière analogue à la rénovation thermique, l'Équation (4.2) formalise la nécessité de ne voir qu'un seul système de chauffage activé par bâtiment. H représente l'ensemble des systèmes de chauffage disponibles.

$$\sum_{s \in S} y_{b,s} = 1 \tag{4.2}$$

De manière analogue à la rénovation thermique, nous laissons la possibilité de ne pas remplacer le système de chauffage par le biais d'une solution technique dédiée.

Hypothèse :

Si aucun système de distribution de chaleur n'est présent dans un bâtiment (c'est-à-dire qu'il utilise un moyen de chauffage décentralisé), on considère qu'il n'est pas possible d'installer un nouveau moyen de chauffage centralisé. En effet, les contraintes techniques ainsi que le coût d'investissement sont prohibitifs pour la réalisation de ce genre d'ouvrage, qui doivent être pensés à la construction du bâtiment. À l'inverse, dans le cas d'un bâtiment utilisant un système de chauffage centralisé, il est possible d'installer, au choix, un nouveau chauffage centralisé ou décentralisé.

4.2.2 Impact sur le besoin de chauffage

Le besoin de chauffage est impacté par les choix de rénovation thermique uniquement, par la modification du coefficient thermique des parois (et le facteur solaire pour les vitrages). Les caractéristiques finales des parois sont calculées comme la somme pondérée des variables binaires x .

$$U_{b,p} = U(X_{b,p}) = \sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} u_{b,p,r} \quad (4.3)$$

$$G_{b,p} = G(X_{b,p}) = \sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} g_{b,p,r} \quad (4.4)$$

Comme précisé au préalable, la possibilité de ne pas modifier les parois est intégrée comme une solution technique de rénovation à part entière. Dans ce cas particulier identifié par $r = r_0$, on a alors :

$$\begin{aligned} u_{b,p,r_0} &= u_{b,p}^0 \\ g_{b,p,r_0} &= g_{b,p}^0 \end{aligned}$$

où u_b^0 et g_b^0 décrivent l'état initial du bâtiment b .

Ainsi, la formule du besoin énergétique introduite par l'Équation (2.6) est modifiée pour intégrer le choix des solutions techniques de rénovation activées. On peut alors exprimer le besoin énergétique Q_b du bâtiment b en fonction de la stratégie de rénovation X_b qui lui est appliquée.

$$\begin{aligned} Q_b(X_b) = & \left(\sum_{p \in P} \beta_p DHU_p \left(\sum_{r \in R_{b,p}} x_{b,p,r} u_{b,p,r} \right) A_{b,p} + \beta_{vent} \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \right) \\ & - IHU_{b,vitres} \beta_{gain} \left(\sum_{\substack{r \in R_{b,p} \\ p=vitres}} x_{b,p,r} g_{b,p,r} \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.2.3 Impact sur la consommation d'énergie et les indicateurs liés

Si les actions de rénovation thermique impactent le besoin de chauffage (la demande), le remplacement du système de chauffage modifie quant à lui la fourniture par l'amélioration du rendement de conversion η et éventuellement le changement de combustible. L'effet est donc cette fois-ci répercuté non pas sur le besoin de chauffage, mais sur la consommation d'énergie et les autres indicateurs liés : environnementaux comme les émissions de GES, ou économiques comme la facture énergétique.

L'efficacité de chauffage finale H est obtenue *via* la somme des rendements de différents systèmes disponibles pondérés des variables de décision binaires. Le rendement et son inverse sont calculés de la même manière, pour éviter les non-linéarités.

$$H_b(Y_b) = \sum_{s \in S} y_{b,s} \eta_{b,s} \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{H_b}(Y_b) = \sum_{s \in S} y_{b,s} \frac{1}{\eta_{b,s}} \quad (4.7)$$

De manière analogue l'obtention de l'efficacité finale, les données environnementales et économiques définies en Section 2.6.4 sont obtenues par le biais de sommes pondérées.

$$fe_b(Y_b) = \sum_{s \in S} y_{b,s} fe_{b,s} \quad (4.8)$$

$$fc_b(Y_b) = \sum_{s \in S} y_{b,s} fc_{b,s} \quad (4.9)$$

La consommation d'énergie (E), les émissions de GES (G) et la facture énergétique (F) sont décrites par les Équations (4.10) - (4.12), et dépendent à la fois des mesures de rénovation thermique et de remplacement du chauffage.

$$E_b(X_b, Y_b) = \frac{1}{H_b}(Y_b) \times Q_b(X_b) \quad (4.10)$$

$$W_b(X_b, Y_b) = \frac{FE_b}{H_b}(Y_b) \times Q_b(X_b) \quad (4.11)$$

$$F_b(X_b, Y_b) = \frac{FC_b}{H_b}(Y_b) \times Q_b(X_b) \quad (4.12)$$

4.2.4 Impact sur les coûts

4.2.4.1 Rénovation thermique

Le Chapitre 3 a permis d'établir des structures de coûts d'investissement pour les différentes solutions techniques de la rénovation thermique des bâtiments. Leur structure linéaire

permet d'obtenir la valeur des coûts d'investissements dans la rénovation thermique *via* la somme pondérée des coûts de chaque solution de rénovation.

$$\begin{aligned}
 I_b^{RT}(X_b) &= \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} I_{b,p,r}^{RT} \\
 &= \sum_{p \in P} A_{b,p} \left(\sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} C S_r \right)
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

4.2.4.2 Remplacement du chauffage

Comme présenté dans le Chapitre 3, l'investissement dans le système de chauffage dépend de son dimensionnement.

$$I_s^{RC} = C F_s^{RC} + C L_s^{RC} . P^{dim} \tag{4.14}$$

La puissance de dimensionnement est impactée par d'éventuelles mesures de rénovation thermique de l'enveloppe. Plus celle-ci sera performante, plus le bâtiment pourra se satisfaire d'un système de chauffage de faible puissance.

On cherche alors à modéliser le pic de besoin de chauffage en fonction des caractéristiques thermiques de celui-ci. Dans un premier temps, nous estimons la pointe de besoin par le modèle simplifié du besoin décrit en Section 2.6.1 lequel présente un $R^2 = 88.3\%$. En utilisant les coefficients du méta-modèle de besoin annuel établi dans le Chapitre 2 pour prédire la pointe de chauffage, une erreur absolue MAE d'environ 4% et une erreur quadratique moyenne (Erreur quadratique moyenne (*Root Mean Squared Error*) (RMSE)) égale à 8% sont observées. Pour une estimation plus précise, nous allons établir un nouveau méta-modèle issu du modèle dynamique DIMOSIM, visant cette fois-ci à estimer la pointe du besoin de chauffage. La procédure pour construire ce méta-modèle est la même que celle présentée en Section 2.6.3. Cette fois-ci, les coefficients calibrés par régression multi-linéaire sont les μ présentés dans l'Équation (4.15).

$$P_b^{dim} = \left(\sum_{p \in P} \mu_p u_{b,p} A_{b,p} \Delta T_p^{max} + \mu_{vent} \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \Delta T^{max} \right) \tag{4.15}$$

où

$$\Delta T_p^{max} = \begin{cases} \max_t (T_{in} - T_{ext}(t)), & \text{si } p \neq sol, \\ \max_t (T_{in} - T_{sol}(t)), & \text{si } p = sol \end{cases}$$

L'entraînement du modèle sur l'ensemble des territoires considérés (voir Fig. 2.8) et en considérant des données météo de plusieurs localités permet d'établir les coefficients présentés dans le Tableau 4.1. En résumé, ce méta-modèle présente un RMSE de 4.2% et un MAE égal à 2.6%.

μ_{murs}	μ_{toit}	μ_{vitres}	μ_{sol}	μ_{vent}
0.806	0.806	1.375	0.116	0.830

Tableau 4.1 – Paramètres du méta-modèle du pic de besoin obtenus par entraînement d'un modèle multi-linéaire sur les parcs bâtis simulés dans DimoSim

L'investissement est donc calculé comme la somme des investissements dans chaque technologie pondérée par les variables binaires et dépend donc de la stratégie de remplacement des systèmes de chauffage Y_b , mais également de la stratégie de rénovation de l'enveloppe X_b .

$$\begin{aligned}
I_b^{RC}(X_b, Y_b) &= \sum_{s \in S} y_{b,s} I_s^{RC}(P^{dim}(X_b)) \\
&= \sum_{s \in S} y_{b,s} \left(C F_s^{RC} + C L_s^{RC} \left(\mu_{vent} \frac{c_{air}}{3.6} \tau_b^{vent} V_b \Delta T^{max} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} \mu_p u_{b,p,r} A_{b,p} \Delta T_p^{max} \right) \right)
\end{aligned} \tag{4.16}$$

L'ensemble des coûts (notamment de maintenance) sont calculés par le biais du même procédé, à savoir l'utilisation d'une somme pondérée des variables binaires.

4.3 Optimisation adaptée à l'aide à la décision territoriale

Suite à la formulation des différentes variables de décision, le problème d'optimisation établi en introduction (Sec. 1.3.2) peut être mis à jour. La fonction C représente la fonction de coûts choisie comme objectif tandis que les fonctions K correspondent aux différents indicateurs de la transition énergétique, considérés en contrainte.

$$\begin{aligned}
&\underset{X, Y}{\text{minimiser}} && \sum_{b \in B} C_b(X_b, Y_b) \\
&\text{tel que} && \sum_{b \in B} K^i(X_b, Y_b) \leq K_0^i, \quad \forall i \in I, \\
\text{(P-2)} &&& \sum_{r \in R_p} x_{b,p,r} = 1, \quad \forall b, p, \\
&&& \sum_{s \in S} y_{b,s} = 1, \quad \forall b, \\
&&& x_{b,p,r}, y_{b,s} \in \{0, 1\}, \quad \forall b, p, r, s
\end{aligned}$$

4.3.1 Choix de la fonction de coûts et stratégies de rénovation

Différentes fonctions de coûts peuvent être choisies et utilisées comme fonction objectif à minimiser. Comme présenté en Section 1.3.2, il est notamment possible d'adopter deux

points de vue :

- Gestionnaire de parc : On cherche à minimiser les investissements dans la rénovation énergétique en s'assurant de satisfaire les contraintes *macro*. La fonction à minimiser peut alors s'écrire conformément à l'Équation (4.17).

$$I(X, Y) = \sum_{b \in B} I_b(X_b, Y_b) \quad (4.17)$$

$$I_b(X_b, Y_b) = I_b^{RT}(X_b) + I_b^{RS}(X_b, Y_b)$$

- Propriétaire occupant : Les coûts sur un horizon d'évaluation sont également pris en compte lors du choix des rénovations à activer. Ainsi, on considère l'investissement mais également les coûts de remplacement (I'), la maintenance (M) ou encore la facture énergétique (F). On parle alors de coût total actualisé, ou *NPC* (pour *Net present costs*). Cette fonction de coûts est décrite par l'Équation (4.18). Les coûts estimés aux différents instants de l'horizon temporel sont ramenés à une valeur actualisée *via* un taux d'actualisation ρ .

$$NPC(X, Y) = \sum_{b \in B} NPC_b(X_b, Y_b)$$

$$NPC_b(X_b, Y_b) = I_b(X_b, Y_b) + \sum_t \frac{1}{(1 + \rho)^t} (I'_b(X_b, Y_b, t) + M_b(Y_b, t) + F_b(X_b, Y_b, t)) \quad (4.18)$$

4.3.2 Intégration des contraintes locales (techniques, urbanisme)

La modélisation au niveau bâtiment présente l'avantage majeur de permettre une représentation des contraintes qui peuvent exister à un niveau spatial fin. Ces contraintes peuvent être d'ordre technique ou dûes à des politiques particulières comme des règles d'urbanisme.

Il est par exemple possible que les solutions techniques de rénovation ne soient pas compatibles avec tous les bâtiments. Deux cas de figure peuvent notamment être identifiés :

- Raisons techniques : Certaines technologies sont incompatibles avec certaines caractéristiques structurelles des bâtiments. Par exemple, une isolation du plancher ne peut être réalisée que si le bâtiment possède un vide sanitaire ou un sous-sol étant donné qu'une isolation sous chape n'est pas envisageable dans le cadre d'une rénovation. De la même manière, les solutions techniques propres à l'isolation des combles sont incompatibles avec une toiture-terrasse.
- Raisons politiques : Des contraintes locales d'urbanisme peuvent empêcher la mise en œuvre de solutions sur certains bâtiments. Par exemple, le plan local d'urbanisme (PLU) est en droit d'interdire une isolation extérieure des façades, notamment dans les centres-bourgs historiques, pour des raisons esthétiques.

De même, il est possible que certains systèmes de chauffages ne puissent pas être installés dans tous les bâtiments. Un chauffage au gaz nécessite par exemple que le bâtiment soit raccordé à un réseau de distribution de gaz. Le chauffage au bois ou au fioul requiert une capacité de stockage importante, et peut s'avérer inadapté dans certains contextes. Aussi, des contraintes locales peuvent exister sur certains systèmes, comme la biomasse, pour des raisons d'émission de particules fines.

Pour ces raisons, nous définissons deux sous-ensembles :

- $R_{b,p} \subset R_p$ pour les solutions techniques de rénovation thermique disponibles pour chaque paroi p du bâtiment b
- $S_b \subset S$ pour les systèmes de chauffage disponibles pour chaque bâtiment b

Ces sous-ensembles permettent de décrire des contraintes sur les variables de décision afin de bloquer les solutions indisponibles :

$$\begin{aligned} x_{b,p,r} &= 0, & \forall b, p, r \notin R_{b,p} \\ y_{b,s} &= 0, & \forall b, s \notin S_b \end{aligned}$$

4.3.3 Variables de décision et non-linéarités

Jusqu'ici, nous avons défini et considéré les actions de rénovation séparément. Cette modélisation est très intuitive, les variables de décision x, y représentant chacune une action physique, de mise en œuvre d'une solution technique. Néanmoins, cette formulation implique des non-linéarités dans le problème d'optimisation. L'expression des coûts d'investissements (4.16) ou des indicateurs de la transition énergétique comme la consommation d'énergie et les émissions de GES (4.10)-(4.12) impliquent une multiplication des variables x et y . Les problèmes d'optimisation comportant une non-linéarité dans la fonction objectif ou dans les fonctions de contrainte sont complexes à résoudre, d'autant plus lorsqu'on travaille avec des variables binaires. Ceux-ci sont d'ailleurs considérés comme des problèmes NP-difficiles [86–88].

La formulation utilisant des variables séparées utilise le nombre minimal de variables de décisions. Le nombre de variables N^{var} et contraintes N^{ctr} peuvent être calculés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} N_{sep}^{var} &= \sum_{b \in B} \left(|S_b| + \sum_{p \in P_b} |R_{b,p}| \right) \\ N_{sep}^{ctr} &= \sum_{b \in B} (|P_b| + 1) \end{aligned}$$

Pour avoir une idée plus concrète du nombre de variables et de contraintes impliquées, et pour pouvoir les comparer aux alternatives proposées, le Tableau 4.2 présente ces nombres

pour le cas simplifié d'un territoire de 100 bâtiments, proposant d'arbitrer entre 10 solutions de remplacement du chauffage et 5 solutions de rénovation sur chacune des 4 surfaces rénovables.

Afin de pouvoir traiter le problème d'optimisation à grande échelle, les variables de décision doivent être adaptées, l'objectif étant de transformer le problème non linéaire en un problème linéaire dont la résolution serait facilitée. Deux approches peuvent être adoptées : la linéarisation par introduction de variables et le couplage des variables.

4.3.3.1 Linéarisation par introduction de variables intermédiaires

Une première approche consiste à linéariser le problème binaire non linéaire selon une technique proposée par Buchheim and Klein [89] : la non-linéarité du terme $x_{b,p,r}y_{b,s}$ est contournée en introduisant de nouvelles variables de décision, notées $z_{b,p,r,s}^{lin}$, définies et contraintes de manière judicieuse.

$$z_{b,p,r,s} \leq x_{b,p,r}, y_{b,s}, \quad \forall b, p, r, s \quad (4.19)$$

$$z_{b,p,r,s} \geq x_{b,p,r} + y_{b,s} - 1, \quad \forall b, p, r, s \quad (4.20)$$

Cette formulation aboutit à un problème d'optimisation linéaire (objectif et contraintes), mais génère un nombre important de variables et de contraintes, qui viennent s'ajouter à un problème qui est déjà de grande dimension. Pour chaque produit de variables, une nouvelle variable de décision et trois contraintes sont introduites.

$$N_{lin}^{var} = \sum_{b \in B} \left(|S_b| + \sum_{p \in P_b} |R_{b,p}| + |S_b| \sum_{p \in P_b} |R_{b,p}| \right)$$

$$N_{lin}^{ctr} = \sum_{b \in B} \left(|P_b| + 1 + 3|S_b| \sum_{p \in P_b} |R_{b,p}| \right)$$

4.3.3.2 Couplage des variables de décision

Une alternative à la création de nouvelles variables de décision permettant de rendre le problème linéaire réside dans l'absorption de la non-linéarité *via* un couplage des variables X et Y . L'action modélisée est alors la mise en œuvre de couples rénovation thermique - système de chauffage.

Bouquets de rénovations

Un premier couplage considère des variables représentant des *bouquets de rénovations*. Un bouquet de rénovations se définit comme la combinaison, pour un bâtiment, d'une solution technique par paroi et d'un système de chauffage. Nous modélisons le choix de mettre en

place le bouquet de rénovations l sur un bâtiment b par la variable de décision $z_{b,l}^{bouq}$ définie ci-après. Pour chaque bâtiment, un unique bouquet de rénovation peut être activé.

$$\begin{aligned} z_{b,l} &\in \{0, 1\}, & \forall b \in B, l \in L_b = (S_b \times R_{b,Toit} \times R_{b,Sol} \times R_{b,Murs} \times R_{b,Vitrages}) \\ \sum_{l \in L_b} z_{b,l} &= 1, & \forall b \in B \end{aligned}$$

Cette formulation bien qu'intuitive, car correspondant à une réalité tangible, nécessite un grand nombre de variables de décision N_{bouq}^{var} :

$$\begin{aligned} N_{bouq}^{var} &= \sum_{b \in B} \left(|S_b| \times \prod_{p \in P_b} |R_{b,p}| \right) \\ N_{bouq}^{ctr} &= |B| \end{aligned}$$

On peut d'ailleurs remarquer que cette formulation absorbe la non-linéarité du problème, tire bénéfice de la structure additive des différents indicateurs par rapport aux indices des bâtiments, mais ignore l'additivité suivant les indices des parois.

Couplage paroi-chauffage

Pour tirer parti de cette structure additive selon les bâtiments et les parois, mais absorber la non-linéarité du problème due au produit des variables X et Y , l'adoption de variables de décision couplées au niveau parois-système de chauffage est la plus adaptée.

$$z_{b,p,l} \in \{0, 1\}, \quad \forall b \in B, p \in P_b, l \in L_b = (S_b \times R_{b,p}) \quad (4.21)$$

Ces nouvelles variables z peuvent se substituer totalement aux anciennes x et y , y compris dans les termes non couplés, à l'aide des Équations (4.22) et (4.23). La somme sur les parois identifiable dans l'Équation (4.23) sert à rendre l'expression de y indépendante de p .

$$x_{b,p,r} = \sum_{s \in S_b} z_{b,p,(s,r)}, \quad \forall b \in B, p \in P_b, r \in R_{b,p} \quad (4.22)$$

$$y_{b,s} = \frac{1}{|P_b|} \sum_{p \in P_b} \sum_{r \in R_{b,p}} z_{b,p,(s,r)}, \quad \forall b \in B, s \in S_b \quad (4.23)$$

Les contraintes imposant la mise en place d'une seule solution de rénovation par paroi et d'un seul système de chauffage par bâtiment sont alors unifiées en une seule et même contrainte, exprimée en fonction des nouvelles variables z (voir Éq. (4.24)).

$$\sum_{l \in (S_b \times R_{b,p})} z_{b,p,l} = 1, \quad \forall b \in B, p \in P_b \quad (4.24)$$

L'Équation (4.25) formalise une seconde contrainte, laquelle impose que le même système de chauffage soit activé sur l'ensemble des parois d'un bâtiment.

$$\sum_{l=(s,1)}^{(s,|R_{b,p_1}|)} z_{b,p_1,l} = \sum_{l=(s,1)}^{(s,|R_{b,p_2}|)} z_{b,p_2,l}, \quad \forall b \in B, s \in S_b, p_1, p_2 \in P_b, p_1 \neq p_2 \quad (4.25)$$

Le nombre de variables de décisions induit par cette formulation utilisant le couplage des rénovations de l'enveloppe et du système de chauffage peut être calculé :

$$N_{coupl}^{var} = \sum_{b \in B} \left(|S_b| \times \sum_{p \in P_b} |R_{b,p}| \right)$$

$$N_{coupl}^{ctr} = \sum_{b \in B} (|P_b| + |S_b|(|P_b| - 1))$$

Cette dernière formulation est particulièrement adaptée pour la résolution du problème de rénovation du bâtiment à l'échelle du territoire, avec une résolution de l'ordre du bâtiment. En effet, celle-ci se place à un niveau d'agrégation intermédiaire, utilisant un nombre limité de variables de décision et de contraintes tout en absorbant la non-linéarité pour permettre la résolution rapide du problème d'optimisation (voir Tab. 4.2).

	Séparées	Linéarisation	Bouquets	Couplage
Nature	Non-linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire
N^{var}	3,000	23,000	625,000	20,000
N^{ctr}	500	60,500	100	3,400

Tableau 4.2 – Évolution du nombre de variables de décision et de contraintes induites en fonction de la méthode de linéarisation employée. En rouge les points critiques. Cas d'étude : 100 bâtiments, 10 systèmes de chauffage, 5 solutions de rénovation par paroi.

Définition 4.3

On appelle **stratégie de rénovation énergétique** d'une entité l'union de la stratégie de rénovation thermique et de la stratégie de remplacement des systèmes de chauffage de cette même entité. On peut alors définir la stratégie de rénovation énergétique :

- d'un bâtiment b : $Z_b = (z_{b,p,l})_{(p,l)}$
- d'un territoire : $Z = (Z_b)_b$

4.3.4 Problème d'optimisation adapté - sac à dos

Grâce à cette nouvelle formulation des variables de décision, les indicateurs économiques comme techniques peuvent être exprimés comme des fonctions multi-linéaires de l'ensemble des variables de décision Z . Les Équations (4.26) et (4.27) présentent la forme générale des indicateurs. Cette expression simple permet la mise en place du problème d'optimisation de

la rénovation du bâtiment au sein d'une formulation linéaire dont la résolution est possible *via* des solvers identifiés.

$$C(Z) = \sum_{\substack{b \in B \\ p \in P \\ l \in (S \times R_p)}} z_{b,p,l} c_{b,p,l} \quad (4.26)$$

$$K^i(Z) = \sum_{\substack{b \in B \\ p \in P \\ l \in (S \times R_p)}} z_{b,p,l} k_{b,p,l}^i \quad (4.27)$$

Le problème d'optimisation peut alors être formulé comme un problème d'optimisation linéaire, et plus précisément comme une variante du Problème du sac à dos (KP) (de l'anglais *knapsack problem*)[90].

$$\begin{aligned}
 & \underset{Z}{\text{minimiser}} && \sum_{\substack{b \in B \\ p \in P \\ l \in (S \times R_p)}} z_{b,p,l} c_{b,p,l} \\
 & \text{tel que} && \sum_{\substack{b \in B \\ p \in P \\ l \in (S \times R_p)}} z_{b,p,l} k_{b,p,l}^i \leq K_0^i, && i \in I, \\
 \text{(P-3)} &&& \sum_{l \in (S \times R_p)} z_{b,p,l} = 1, && b \in B, p \in P, \\
 &&& \sum_{l=(s,r \in R_p)} z_{b,p_1,l} = \sum_{l=(s,r \in R_p)} z_{b,p_2,l}, && b \in B, s \in S, p_1, p_2 \in P, \\
 &&& z_{b,p,l} \in \{0, 1\}, && b \in B, p \in P, l \in (S \times R_p)
 \end{aligned}$$

Le KP est un problème d'optimisation linéaire combinatoire courant, notamment dans le domaine de l'allocation des ressources. Le problème du sac à dos, dans sa version élémentaire, consiste à charger des items ayant chacun une valeur v et un poids w dans un sac à dos possédant une capacité de charge maximale de W . Le but est alors de sélectionner les items de manière à maximiser la valeur totale chargée dans le sac sans excéder sa capacité de charge (voir Fig. 4.1).

Le problème d'optimisation posé plus haut est une variante de ce problème élémentaire. Les couples de mesures de rénovation énergétique du bâtiment constituent les items. Ils possèdent chacun une valeur, en l'occurrence économique c . Trois caractéristiques principales différencient cependant notre problème du problème élémentaire :

- Plusieurs dimensions contraignent la charge du "sac à dos" : les différents indicateurs i de la transition énergétique jouent ce rôle. À titre d'exemple, les émissions de GES

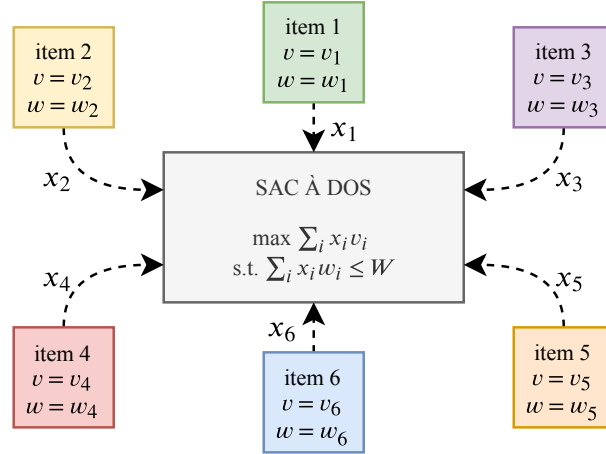


FIGURE 4.1 – Visualisation du problème du sac à dos (KP)

ou la consommation énergétique globale peuvent servir de contrainte *macro*. La participation de chaque mesure, *via* les k^i , représentent le poids des items et les valeurs cibles K^i représentent les capacités de charge maximales. On parle alors de problème du sac à dos multi-dimensionnel (ou *Multidimensionnal Knapsack Problem*, *MKP*).

- Un choix doit être fait au sein de groupements d'items : pour chaque paroi p d'un bâtiment b , un et un seul couple "rénovation thermique - changement de système" peut être sélectionné parmi toutes les options disponibles. On parle dans ce cas de problème du sac à dos à choix multiples (ou *Multiple Choice Knapsack Problem*, *MCKP*).
- Certains choix sont liés les uns aux autres : pour un bâtiment b , il est nécessaire que le système de chauffage s sélectionné soit le même sur l'ensemble des parois. Cette contrainte impose un couplage entre les différentes variables de décision. Si cette variante n'a pas été trouvée dans la littérature, on l'appelle problème du sac à dos à choix couplés (ou *Coupled-Choices Knapsack Problem*, *CKP*)

La combinaison de ces trois caractéristiques nous permet de définir notre problème d'optimisation comme un problème du sac à dos multi-dimensionnel à choix multiples couplés (ou *Multidimensionnal Multiple Coupled-choices Knapsack Problem*, *MMCKP*).

4.4 Implémentation et performances

4.4.1 Détails de l'implémentation

Des *solvers* commerciaux tels que CPLEX, GLPK ou Gurobi, utilisant des algorithmes exacts comme la méthode du Simplexe ou Branch and Bound sont *a priori* capables de traiter ce type de problèmes. D'autres méthodes de résolutions peuvent être employées, qu'il s'agisse d'autres algorithmes exacts [91, 92], d'algorithmes heuristiques (décomposition) [93–95] ou même meta-heuristiques [96–98]. L'optimisation des mesures de transition énergétique doit pouvoir être menée à l'échelle d'un territoire dans des temps raisonnables (quelques

minutes). Cependant, l'efficacité des calculs n'est pas une priorité dans cette thèse. Les solveurs commerciaux comme CPLEX présentent des performances jugées suffisantes pour l'usage visé, et on se satisfait de leur utilisation.

Nous avons implémenté le problème d'optimisation sur un ordinateur possédant une mémoire vive de 16GB et un processeur 8 cœurs de 3.5GHz. Cette implémentation a été réalisée sous le logiciel libre RStudio [99] qui utilise le langage de programmation R [100]. La résolution du problème est menée à l'aide du solveur CPLEX, commercialisé par ILOG IBM [101].

4.4.2 Évaluation du temps de calcul

Les performances du modèle développées sont quantifiées en termes de temps de calcul. La Figure 4.2 représente l'évolution des temps de calcul en fonction de la taille du territoire considéré. Deux étapes de l'évaluation sont représentées : (1) le pré-traitement des données, permettant de générer les entrées du problème d'optimisation à partir du parc de bâtiments et des solutions de rénovation et (2) l'optimisation en elle même, dont la durée varie légèrement selon que le problème est contraint ou non.

L'évolution du temps de pré-traitement est relativement linéaire avec le nombre de bâtiments tandis que le temps d'optimisation suit une courbe davantage quadratique. Surtout, on observe que l'étude d'un parc restreint (~ 300 bâtiments) nécessite une évaluation inférieure à une minute, tandis que ce temps s'élève à environ 3 minutes pour un parc de 1000 bâtiments et atteint près de 30 minutes pour 5000 éléments considérés.

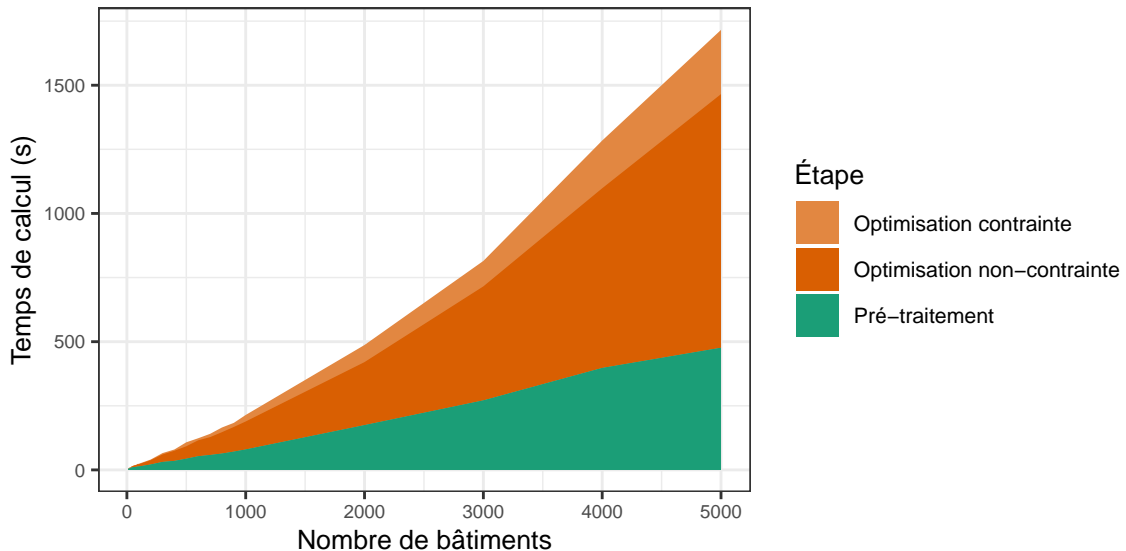


FIGURE 4.2 – Évolution du temps de calcul en fonction du nombre de bâtiments considérés

Note : L'ensemble des méthodes et résultats présentés jusqu'ici dans ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans la revue scientifique à comité de lecture *Applied Energy* le 8

février 2020.

Référence : A. Rogeau, R. Girard, Y. Abdelouadoud, M. Thorel, and G. Kariniotakis.

Joint Optimization of Building-envelope and Heating-system Retrofits at Territory

Scale to Enhance Decision-aiding. *Applied Energy, Volume 264*, April 2020. (10.1016/j.apenergy.2020.114600)

(hal-02491850)

4.4.3 Perspectives d'amélioration des performances

Si nécessaire, ce temps de calcul peut être réduit par plusieurs moyens qui ne sont pas étudiés dans cette thèse :

1. La parallélisation du pré-traitement. L'utilisation de l'ensemble de la puissance de calcul permet des gains de temps pour les problèmes de grande dimension.
2. La réduction du nombre de solutions techniques. Certaines solutions techniques, notamment de rénovation thermique, peuvent être écartées dans le cadre d'une optimisation purement économique telle que présentée ici.
3. Le regroupement des bâtiments au sein de clusters de bâtiments similaires. L'identification et le choix des clusters doivent être dûment justifiés, des travaux dans ce sens sont menés par Lee et al. [102] par exemple.

Enfin, nous avons amorcé une réflexion sur l'utilisation de méthodes de décomposition pour accélérer la résolution du problème d'optimisation. Les méthodes de décomposition cherchent à décomposer un problème de grande dimension en une multitude de sous-problèmes plus simples et qui peuvent être résolus de manière indépendante, afin d'éviter une explosion combinatoire. La décomposition a souvent été appliquée à des problèmes de type "sac à dos" [94, 95].

Dans le cadre de notre formulation (MMCKP), on observe que les contraintes *macro* sur les indicateurs de la transition sont "couplantes". Elles lient entre eux un ensemble de sous-problèmes qui seraient indépendant sinon (l'optimisation de la rénovation sur chaque bâtiment). Pour s'affranchir de ces contraintes, une approche dite par relaxation lagrangienne semble alors particulièrement adaptée. Cette technique de résolution heuristique s'effectue en trois temps : (1) Relaxation de la contrainte, (2) résolution (rapide) du problème relaxé et (3) déduction rapide d'une solution valide du problème.

Nous avons alors initié l'implémentation d'une décomposition de Benders avec relaxation lagrangienne des contraintes. Cependant, les temps de résolution obtenus *via* la méthode heuristique se sont révélés supérieurs à ceux du *solver* CPLEX. Une piste principale pourrait expliquer cette difficulté de résolution. Le couplage entre les systèmes de chauffage et les mesures de rénovation thermique rend la résolution difficile. Une activation par une stratégie de *merit-order* simple n'est pas possible.

Les temps de calculs observés en Figure 4.2 sont raisonnables pour l'usage visé (optimisation ponctuelle de territoires) et la rapidité de l'évaluation n'est pas la priorité ici. Toutefois,

si la résolution de problème de plus grande dimension était envisagée, ou si un besoin d'efficacité devenait prégnant, une étude plus approfondie de ces méthodes de décomposition pourrait s'avérer nécessaire.

4.5 Modélisations supplémentaires et impact sur les performances

Le problème d'optimisation présenté dans cette section permet une modélisation simple des enjeux de la rénovation énergétique. Des modélisations supplémentaires peuvent être ajoutées, sous réserves qu'elles permettent une optimisation rapide à l'échelle territoriale. Cette section présente quatre modélisations plus fines de thèmes en lien avec la rénovation énergétique des bâtiments.

4.5.1 Sur-dimensionnement du chauffage (rénovation et appoint)

La modélisation des performances des chauffages présentée au Chapitre 3 admet comme hypothèse que les systèmes utilisés sont toujours correctement dimensionnés. Cette hypothèse est raisonnable pour les systèmes installés en rénovation et est nécessaire dans le cas du bâti existant. En revanche, dans le cas où une chaudière existante est utilisée en appoint ou qu'une rénovation thermique est entreprise sur un bâtiment existant, le système de chauffage initial devient *de facto* sur-dimensionné.

La modélisation des chaudières présentée en Section 3.4.2 permet d'estimer les performances d'une chaudière existante utilisée en appoint, en recalculant le rapport de charge PLR entre la puissance demandée en appoint et la puissance de dimensionnement du système initial.

La modélisation des performances saisonnières des chaudières et des pompes à chaleur présentée en Section 3.4.2 permet également d'estimer la détérioration de ces performances suite à une rénovation thermique du bâtiment. En effet, isoler un bâtiment revient à changer la sensibilité de son besoin à la température extérieure (voir Fig. 4.3). Un chauffage de puissance P_{dim} correspond à un dimensionnement à T_{dim} dans le bâtiment initial. Dans le bâtiment rénové, le chauffage "sur-dimensionné" à T'_{dim} . La charge du chauffage est alors plus faible tout au long de l'année et les performances peuvent être affectées.

Afin de conserver la structure linéaire du problème, on décrit la détérioration du rendement saisonnier du chauffage par l'Équation (4.28). On considère alors que le sur-dimensionnement du chauffage induit par la rénovation thermique est équivalent, en termes d'énergie finale consommée, à une rénovation thermique qui n'impacterait qu'une portion de la demande initiale.

$$E^1 = \frac{1}{\eta^1} Q^1 = \frac{1}{\eta^0} (a.Q^0 + b.Q^1) \quad (4.28)$$

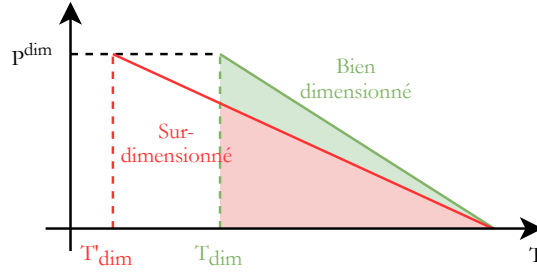


FIGURE 4.3 – Sur-dimensionnement du chauffage suite à une rénovation thermique

Les coefficients a et b doivent être estimés pour chaque technologie. Pour cela, on utilise l'approximation suivante, déjà utilisée pour l'estimation des performances de chauffage (voir Annexe F) :

$$\frac{Q^1}{Q^0} \simeq \frac{U^1}{U^0} \quad (4.29)$$

$$\frac{\eta^0}{\eta^1} = a \cdot \frac{U^0}{U^1} + b \quad (4.30)$$

On veut de plus que lorsque $U^1 = U^0$, le rendement soit non modifié et ($b = 1 - a$). On estime alors la valeur du coefficient a pour chaque technologie *via* une corrélation entre le rapport des efficacités et celui des performances du bâtiment.

Les performances des systèmes sont évaluées en amont, en faisant varier la température extérieure correspondant à la pleine charge afin de représenter une amélioration des performances de l'enveloppe. Les systèmes dont les performances varient sensiblement avec la charge sont très impactés par cette détérioration, à savoir : les pompes à chaleur et les chaudières standards. Les chaudières basse-température et à condensation sont elles peu, voire pas, impactées.

La Figure 4.4 présente trois exemples de droites d'interpolation permettant d'établir les coefficients a et b de différentes technologies. L'ensemble des coefficients est consigné dans le Tableau 4.3. On observe des coefficients b négatifs pour les PACs air-air. Cela signifie qu'une rénovation thermique va, contrairement à l'effet escompté, augmenter la consommation finale d'énergie.

4.5.2 Ventilation des bâtiments rénovés

Nous n'avons pas considéré la question de la ventilation des bâtiments dans un premier temps. Dans le cas des bâtiments anciens, la rénovation thermique peut entraîner un manque de renouvellement d'air amenant des problèmes sanitaires comme des moisissures. Pour assurer la pérennité du bâti, mais aussi la santé des occupants, la question de la ventilation est primordiale. Souvent, des travaux de rénovation thermique sont couplés à une installation de ventilation.

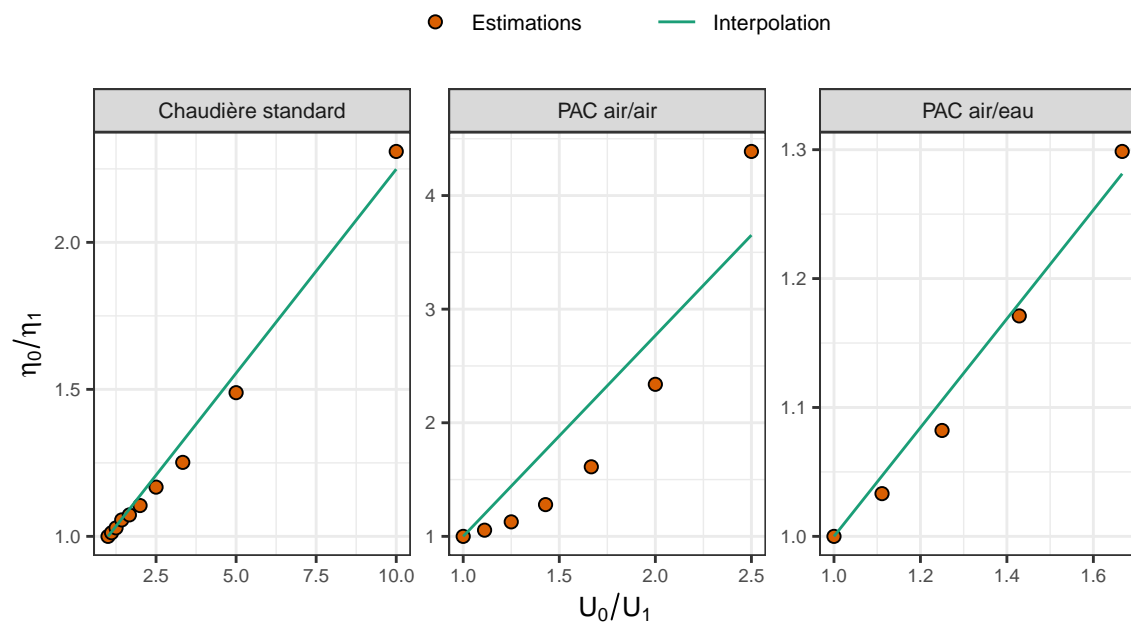


FIGURE 4.4 – Estimation des coefficients du modèle de dégradation par interpolation

Système	Technologie	Émetteurs	a	b	R^2 (%)
Chaudière	Standard ancien	radiateur THT	0.14	0.86	99.2
	Standard récent	radiateur HT	0.14	0.86	99.2
PAC air-air	Mono-compresseur	-	3.08	-2.08	91.8
PAC air-eau	Mono-compresseur	radiateur HT	0.61	0.29	100.0
		radiateur MT	0.86	0.14	100.0
		radiateur BT	1.05	-0.05	99.9

Tableau 4.3 – Coefficients estimés pour les modèles de détérioration des performances des systèmes de chauffage. Conditions climatiques : Lyon

La Figure 4.5 représente les proportions des différents systèmes observées dans la base OPE. De par sa présence majoritaire dans le bâti individuel comme collectif, la ventilation Simple Flux Hygro B est la seule modélisée. Cette modélisation basée sur les systèmes mis en place actuellement induit un biais, empêchant la mise en oeuvre de systèmes très performants comme les ventilations double-flux.

Dans ce travail, le remplacement de la ventilation n'est pas considéré comme générateur d'économies d'énergie mais est modélisé comme une contrainte, un coût fixe supplémentaire par logement rénové. Ce coût est rendu dépendant de l'usage du bâtiment, afin de modéliser les économies d'échelle (voir Tab. 4.4).

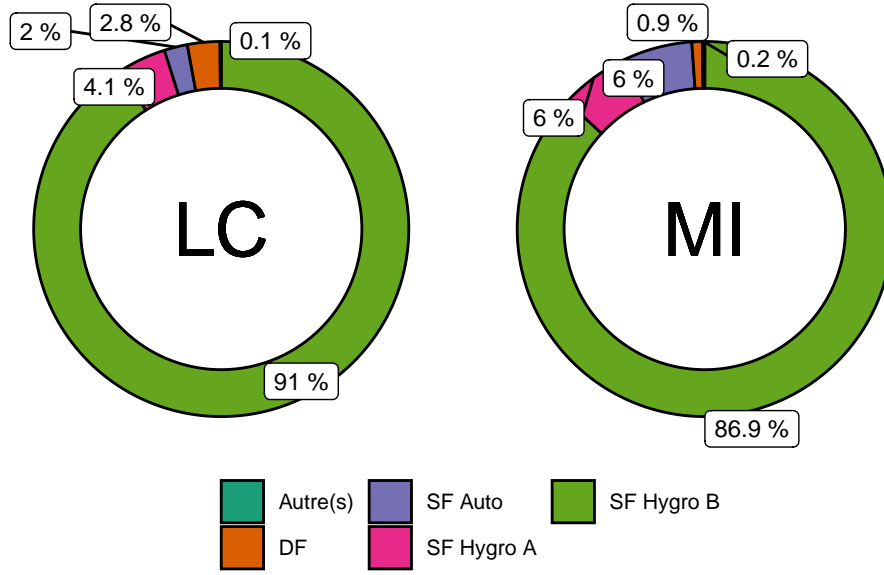


FIGURE 4.5 – Distribution des différents systèmes de ventilation observés dans la construction neuve (RT2012). MI : Maison individuelle ; LC : Logement collectif. Source : Base OPE.

Hypothèse :

La ventilation a une influence sur le taux de renouvellement d'air, lequel impacte la consommation énergétique d'un logement. Cependant, de nombreux autres facteurs impactent ce facteur (ouverture des vitrages, infiltrations...), et on choisit de ne pas modéliser l'impact que pourrait avoir le remplacement de la ventilation sur la consommation d'énergie. Cette hypothèse vise également à ne pas encourager le changement de ventilation dans le seul but de réduire la consommation d'énergie.

Système	Usage	Coût (€)
SF Hygro B	MI	1200
	LC	1000

Tableau 4.4 – Base finale de systèmes de ventilation

L'Équation (4.31) permet d'estimer le coût de mise en œuvre de la ventilation dans un bâtiment. La variable de décision v_b code l'installation d'une ventilation dans le bâtiment b et le coût dépend du nombre de logements N_b^{log} dans ce bâtiment.

$$I_b^V = v_b N_b^{log} C F_b^{RV} \quad (4.31)$$

La ventilation est mise en œuvre dès lors qu'une paroi est rénovée et peut être intégrée dans le problème d'optimisation par le biais de produit des variables x_{b,p,r_0} où r_0 représente

l'état initial de la paroi. Ce produit vaut 0 si au moins une des parois n'est pas dans son état initial et 1 sinon.

$$v_b = 1 - \prod_{p \in P} x_{b,p,r_0} \quad (4.32)$$

Ce produit est linéarisé en utilisant la méthode de Buchheim and Klein [89] présentée plus haut, par le biais de contraintes. Le coût résultant est alors calculé à l'aide de cette nouvelle variable binaire.

$$v_b \leq x_{b,p,r_0}, \quad \forall b, p \quad (4.33)$$

$$v_b \geq \sum_{p \in P} x_{b,p,r_0} - |P| + 1, \quad \forall b \quad (4.34)$$

4.5.3 Puissance minimum de dimensionnement du chauffage

Nous avons jusqu'ici défini les coûts des systèmes de chauffage comme des fonctions linéaires en fonction de la puissance (voir Sec. 3.4.3). Cependant, les systèmes ont généralement une puissance minimale disponible, identifiée dans le Tableau 3.12. Lorsque le pic de besoin à fournir par un système est inférieur à cette puissance minimale, le système sera dimensionné à cette puissance minimale identifiée. Les coûts “saturent” : améliorer les performances du bâtiment ne réduira pas l'investissement dans le système de chauffage. Cette saturation du coût du chauffage est illustrée par la Figure 4.6.

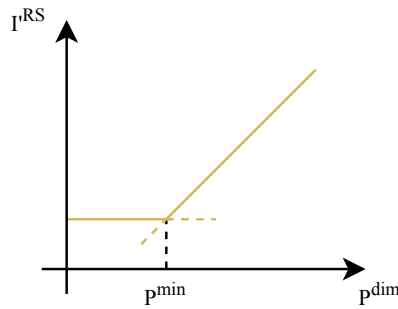


FIGURE 4.6 – Saturation du coût d'investissement du chauffage pour les équipements de puissance faible.

L'investissement effectif final dans le système de chauffage $I^{RS,f}$ est calculé comme le maximum entre l'investissement en fonction du pic de besoin $I^{RS}(P^{dim})$ et l'investissement minimum $I^{RS}(P^{min})$ si le pic est inférieur au dimensionnement minimum disponible. Les deux contraintes linéaires (4.35) et (4.36) transcrivent ce comportement.

$$I_b^{RC,f} \geq \sum_{s \in S_b} y_{b,s} I_s^{RC}(P_s^{min}), \quad \forall b, s \quad (4.35)$$

$$I_b^{RC,f} \geq \sum_{s \in S_b} y_{b,s} I_s^{RC}(P_b^{dim}), \quad \forall b, s \quad (4.36)$$

L'effet de ce sur-dimensionnement se répercute alors directement sur les coûts, en remplaçant la variable P^{dim} par la nouvelle P'^{dim} . Nous choisissons de ne pas modéliser l'altération des performances pour des raisons de complexité et de la faible sensibilité des chauffages modernes au sur-dimensionnement.

4.5.4 Réutilisation des émetteurs de chaleur

La modélisation du remplacement des systèmes de chauffage intègre jusqu'ici un remplacement des émetteurs si le nouveau système fonctionne à température plus faible que l'ancien (voir Sec. 3.4.5). Or, si une rénovation thermique a été entreprise sur le bâtiment, il est possible que les anciens émetteurs suffisent à fournir la nouvelle puissance nécessaire, plus basse que l'ancienne.

La perte de puissance PL des émetteurs initiaux entre deux régimes de température (déjà utilisée en Sec. 3.4.5) est estimée *via* l'Équation (4.37). Nous modélisons à présent les coûts d'investissements des émetteurs par une fonction linéaire par morceaux discontinue (voir Fig. 4.7). Une variable binaire em code le besoin de remplacer les émetteurs si ceux-ci ne sont pas assez puissants pour fournir le pic de chaleur nécessaire avec le nouveau système de chauffage (voir Eqs. (4.38) et (4.39)). Le coût effectif de remplacement des émetteurs I^E est alors obtenu par le biais des contraintes (4.40) et (4.41).

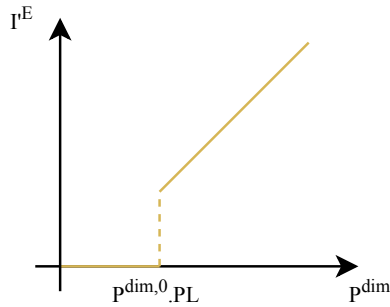


FIGURE 4.7 – Courbe de coûts des émetteurs avec prise en compte de perte de puissance

$$PL = \frac{P(\Delta T_1)}{P(\Delta T_0)} = \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_0} \right)^{1.3} \quad (4.37)$$

$$P_b^{dim}(X_b) \leq P_b^{dim,0} \left(\sum_{s \in S_b} y_{b,s} PL_{b,s} + em_b \right), \quad \forall b \quad (4.38)$$

$$P_b^{dim}(X_b) \geq P_b^{dim,0} \left(\sum_{s \in S_b} y_{b,s} PL_{b,s} + em_b - 1 \right), \quad \forall b \quad (4.39)$$

$$I_b^E \geq I_b^E(Z_b) - M \cdot (1 - em_b), \quad \forall b \quad (4.40)$$

$$I_b^E \leq I_b^E(Z_b) + M \cdot em_b, \quad \forall b \quad (4.41)$$

où M est grand (une borne supérieure de I_b^E).

4.5.5 Performances des modèles affinés

Les modèles affinés présentés dans cette section permettent de représenter plus fidèlement la réalité, notamment les coûts induits. Le modèle de dégradation de l'efficacité des systèmes n'impacte pas les temps de calcul, l'évaluation étant effectuée en amont de l'optimisation. En revanche, les modèles affinés complexifient le problème d'optimisation par le biais de nouvelles variables et contraintes.

La Figure 4.8 représente l'évolution du temps nécessaire à la résolution du problème d'optimisation pour chacun des modèles, et pour leurs combinaisons. On observe que la prise en compte de l'installation d'une ventilation dès qu'une rénovation thermique est entreprise n'impacte que très peu le temps de calcul. La modélisation de la saturation des coûts des systèmes n'augmente elle aussi que très raisonnablement ce temps. En revanche, la modélisation du remplacement des émetteurs est plus problématique. Le temps d'optimisation s'envole dès qu'on dépasse quelques centaines de bâtiments. Cette dernière peut être considérée comme peu impactante : les systèmes de chauffages disponibles en rénovation peuvent presque tous s'adapter à différents régimes d'eau. Ne pas prendre en compte cette possibilité de réutiliser les émetteurs à coûts réduits empêche un fonctionnement à un régime d'eau légèrement plus avantageux, mais ne freine sans doute pas l'usage d'une technologie entière.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons intégré les modèles technico-économiques de la rénovation énergétique des bâtiments dans un formalisme d'optimisation.

Pour cela, nous définissons des variables de décision binaires et un couplage entre la rénovation des parois et le remplacement des systèmes permet de linéariser le problème d'optimisation. Les fonctions permettant d'évaluer les indicateurs technico-économiques de la transition énergétique peuvent alors être calculées par le biais de sommes pondérées. Cette formulation réalise un compromis entre le nombre de contraintes et de variables, permettant

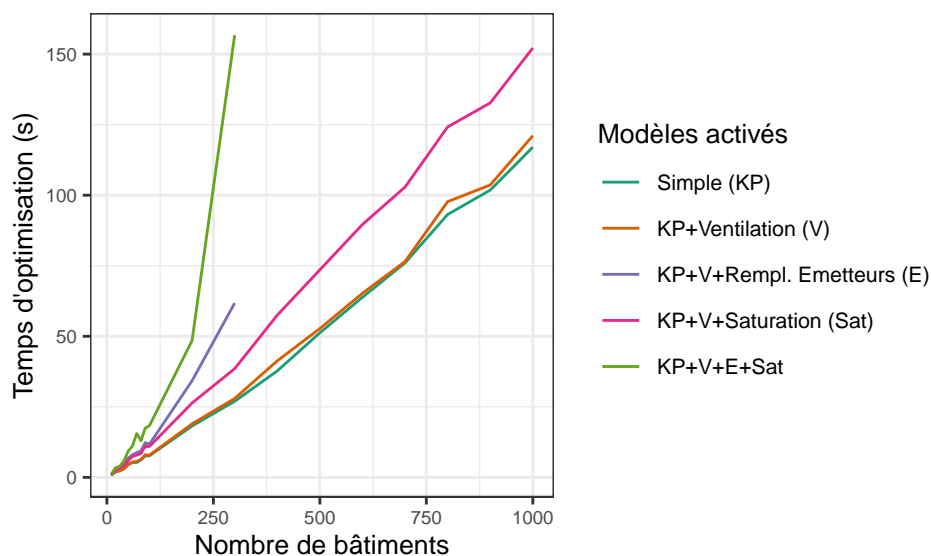


FIGURE 4.8 – Évolution du temps de calcul pour les différents modèles affinés.

ainsi de traiter simultanément un grand nombre de bâtiments.

Le problème est alors implémenté sur un ordinateur aux performances “classiques” et avec un solveur commercial (CPLEX). Cette implémentation a permis de traiter des territoires de plusieurs milliers de bâtiments en quelques dizaines de minutes (environ 2500 bâtiments traités en 10 minutes).

Enfin, l’élaboration de quatre nouveaux modèles permet de modéliser plus finement certains enjeux techniques de la rénovation. Trois d’entre eux peuvent être intégrés à l’outil d’optimisation sans en impacter outre mesure les performances.

La méthode globale de modélisation énergétique et d’optimisation de la rénovation peut maintenant être confrontée à différents cas d’étude. Le Chapitre 5 présente un certain nombre d’études menées sur des territoires réels et des cas d’application.

Chapitre 5

Rénovation énergétique : Résultats et cas d'études

Contenu du chapitre

Résumé du chapitre	122
5.1 Introduction	123
5.2 Premier cas d'étude : territoire urbain	123
5.2.1 Description du territoire	123
5.2.2 Comparaison des stratégies de rénovation	124
5.2.3 Bouquets de rénovation et gisement de réduction de la consommation	126
5.2.4 Sensibilité aux conditions climatiques	127
5.3 Second cas d'étude : Parc hétérogène	129
5.3.1 Stratégie Nationale Bas Carbone : rénovation vs émissions	129
5.3.2 Contenu carbone de l'électricité et politique énergétique	132
5.4 Troisième cas d'étude : territoires variés	135
5.4.1 Prise en compte du dimensionnement du réseau électrique	135
5.5 Intégration dans un outil web pour les collectivités territoriales	138
5.6 Conclusion	139

Résumé du chapitre

Ce chapitre présente plusieurs cas d'application de la méthode de modélisation et d'optimisation de la rénovation énergétique des bâtiments. La variété des cas d'étude est rendue possible par la structure flexible du problème d'optimisation.

Dans un premier temps, la méthode est appliquée dans son ensemble à un territoire d'étude de près de 500 bâtiments pour lequel des plans d'action optimaux sont établis. Différentes variantes du problème d'optimisation sont considérées. Notamment, l'influence de l'horizon d'évaluation sur la nature des solutions activées est analysée : si l'installation de chauffages au bois permet d'atteindre un objectif de réduction d'émissions à un moindre investissement, la prise en compte de la réduction de la facture énergétique à divers horizons résulte dans l'activation d'autres leviers comme la rénovation ou l'installation de pompes à chaleur. L'évaluation à long terme permet ainsi d'atteindre une réduction des émissions de GES de plus de 50% en monopolisant uniquement des rénovations rentables à moyen terme (20 ans). Le potentiel d'aide à la décision au travers d'une visualisation sous forme de cartographie est également mis en avant. Enfin, l'influence des conditions climatiques sur la rentabilité des investissements est analysée.

Trois études sont menées en utilisant la méthode d'optimisation développée afin de modéliser le comportement des territoires face à des problèmes de politique énergétique. Une première étude permet d'analyser le coût des rénovations nécessaires pour atteindre une cible *macro* en termes de consommation globale, en accord avec la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). On observe des coûts de rénovation relativement faible. Par exemple, les bâtiments les moins performants (classe DPE G) présentent un coût moyen de rénovation d'environ 250€/m² et ne dépasse pas les 500€/m². La plupart de ces bâtiments performants sont amenés à un niveau C ou D. L'influence du contenu carbone de l'électricité sur les solutions activées est analysée. Les principales valeurs considérées sont intégrées dans la modélisation. La prédominance des solutions électriques dans les plans d'action basés sur un contenu carbone de l'électricité faible est alors observée. Pour finir, la méthode d'optimisation est adaptée afin de prendre en compte la problématique du dimensionnement du réseau de distribution d'électricité. On observe que la limitation de la pointe de consommation hivernale amène une réintégration des chauffages au bois et une plus forte rénovation thermique dans les territoires à faible taux de chauffage électrique initial.

La dernière partie de ce chapitre présente l'intégration de la méthode au sein d'une plateforme web à destination des collectivités et autres acteurs de la transition énergétique locale.

5.1 Introduction

Nous avons introduit différentes modélisations au long de cette thèse. Celles-ci, intégrées dans un formalisme d’optimisation adapté, permettent de générer un plan d’action des mesures de rénovation énergétique des bâtiments à l’échelle territoriale.

Une telle méthode peut avoir plusieurs applications. Sa finalité première est l’intégration dans un outil d’aide à la planification territoriale. Cette utilisation représente d’ailleurs un objectif majeur de la présente thèse.

Dans un contexte plus académique, la méthode développée peut servir de support d’études. Il est en effet possible de l’utiliser pour analyser l’impact de différents paramètres sur les sorties du modèle comme les leviers activés ou l’efficacité des mesures vis-à-vis des indicateurs de la transition énergétique par exemple.

Dans cette optique, le présent chapitre s’articule autour de trois sections. Dans un premier temps, l’optimisation des mesures de rénovation énergétique est menée sur un territoire d’étude, et déclinée suivant différentes approches. Une seconde section présente des études qui peuvent être menées à l’aide de la méthode établie. Ces études analysent des problématiques connexes, en lien avec les politiques publiques de transition énergétique. Enfin, la dernière section de ce chapitre présente une intégration de la méthode d’optimisation dans une plateforme web ayant vocation à être utilisée par les acteurs locaux, au sein des territoires.

Pour chacune des études menées dans ce chapitre, la déclinaison du problème d’optimisation utilisée sera résumée en début de section afin de présenter l’objectif considéré, les contraintes activées, ainsi que certains paramètres pertinents.

5.2 Premier cas d’étude : territoire urbain

La méthode développée est appliquée dans son intégralité (modélisation du territoire et optimisation) sur un territoire d’étude réel.

5.2.1 Description du territoire

Le territoire considéré comme cas d’étude est un centre-bourg situé dans la Seine-et-Marne (77). Il est constitué de 429 bâtiments, dont 192 maisons individuelles et 237 logements collectifs, représentés sur la Figure 5.5. Une inférence des caractéristiques thermiques et énergétiques (voir Sec. 2.3.3) permet de caractériser l’état initial du territoire, notamment en termes de besoin, de consommation et d’émissions de GES (voir Tab. 5.1). La Figure 5.1 synthétise cet état initial *via* les distributions des classes DPE, en termes de consommation d’énergie de chauffage et d’émissions de GES.

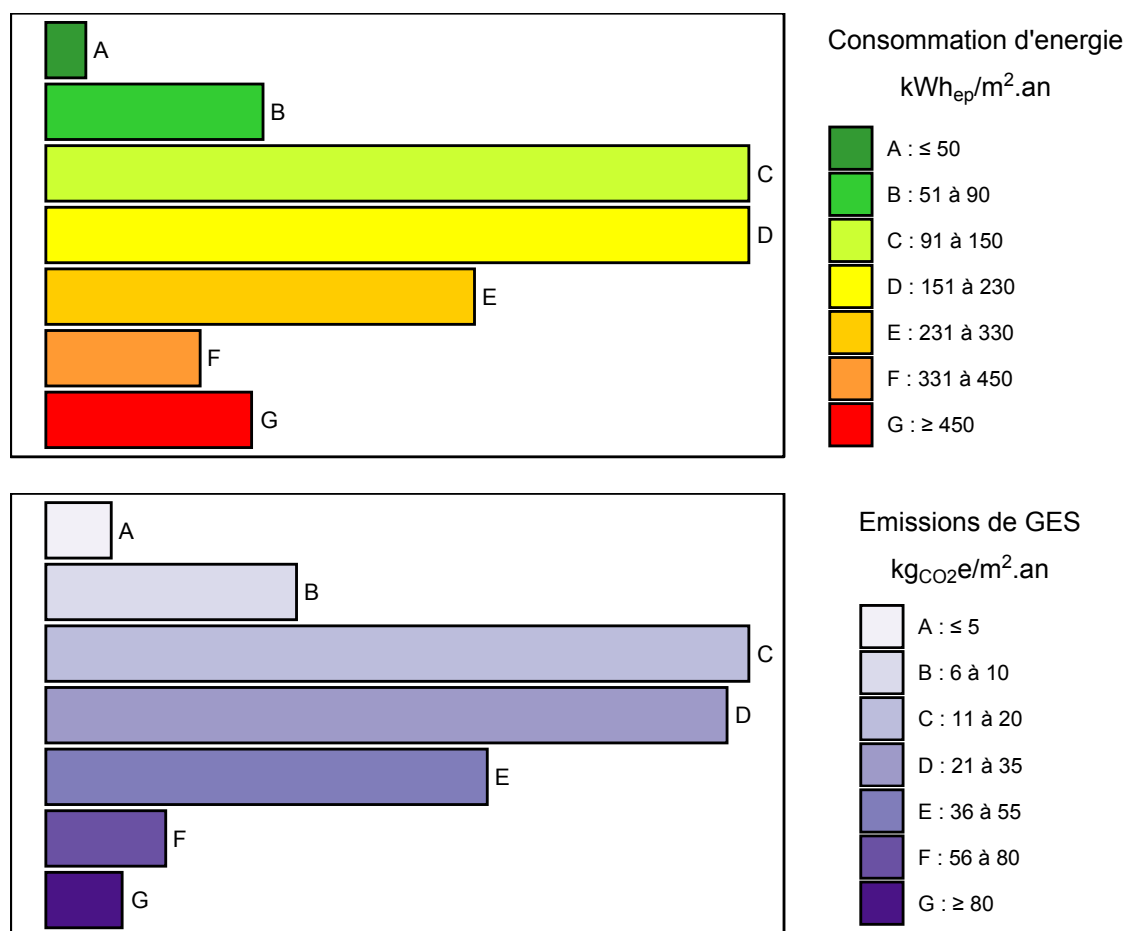


FIGURE 5.1 – Synthèse de l'état initial du territoire d'étude - DPE de consommation d'énergie et émissions de GES dus au chauffage.

5.2.2 Comparaison des stratégies de rénovation

Déclinaison du problème d'optimisation

Objectif : Minimiser une fonction économique (Investissements ou coûts totaux)

Contraintes : Réduction des émissions de GES : 50%

Paramètres : Taux d'actualisation : 5%

Horizon : 0, 10, 20 et 50 ans

Diverses approches peuvent être considérées dans le cadre d'une aide à la planification énergétique, notamment en fonction du point de vue adopté (Voir Sec. 1.3). Ainsi, la considération des investissements ou des coûts totaux à différents horizons dans le problème d'optimisation aboutit à la mise en œuvre de solutions diverses. Les Figures 5.2 à 5.4 représentent les investissements à réaliser pour réduire les émissions du territoire de 50%, en considérant les 4 stratégies suivantes :

- Investissements initiaux : on cherche à dépenser le moins aujourd'hui pour attendre l'objectif à niveau territorial.

- Coût total actualisé sur 10 ans : on considère l'effet sur la facture énergétique comme pourrait le faire un propriétaire occupant cherchant une rentabilité court terme.
- Coût total actualisé sur 20 ans : l'horizon considéré est allongé pour chercher une rentabilité moyen terme.
- Coût total actualisé sur 50 ans : l'horizon d'évaluation est aligné sur la durée de vie la plus longue, à savoir celle de la rénovation thermique, afin de considérer chaque mesure à son plein potentiel.

Le taux d'actualisation considéré pour le calcul du coût total actualisé est de 5%.

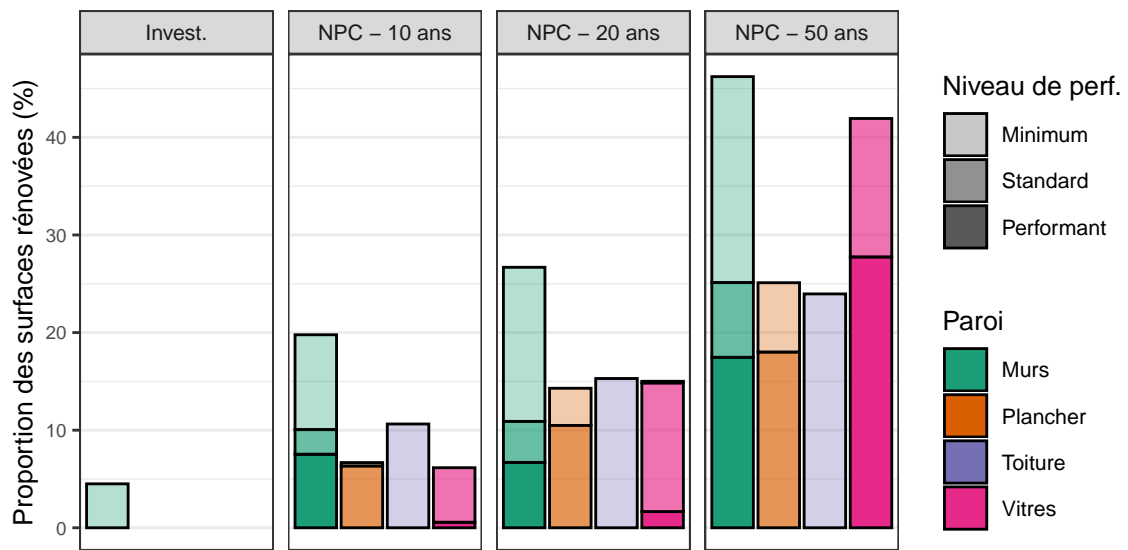


FIGURE 5.2 – Proportion de surfaces rénovées par type de paroi et profondeur de rénovation selon la stratégie d'optimisation

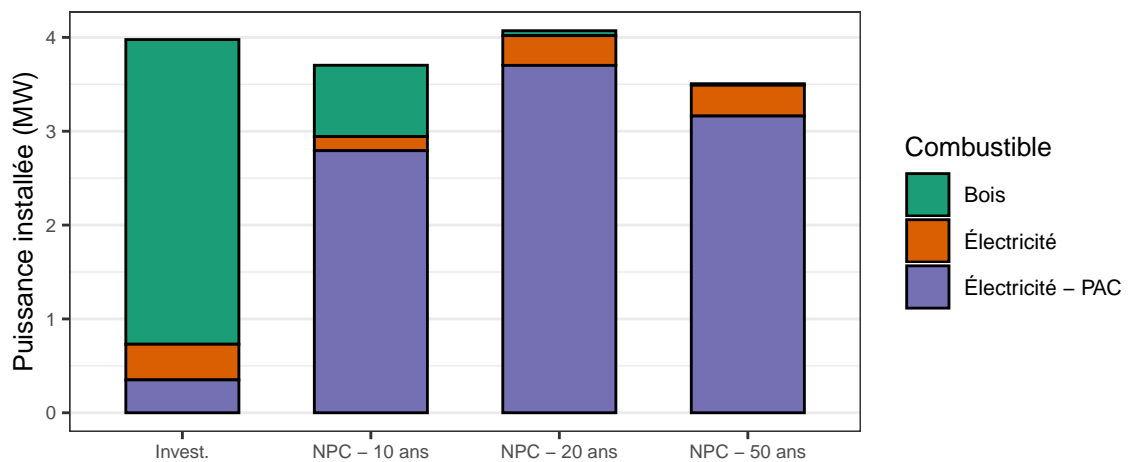


FIGURE 5.3 – Puissances cumulées des chauffages installés par combustible selon la stratégie d'optimisation

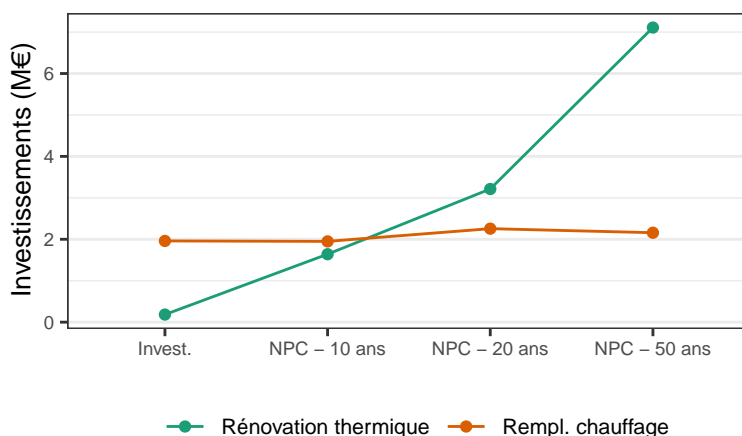


FIGURE 5.4 – Investissements dans la rénovation énergétique par type d'actions selon la stratégie d'optimisation

On observe que le remplacement des systèmes de chauffage permet d'atteindre l'objectif de réduction de 50% des émissions de GES à moindre coût d'investissement. En revanche, la rénovation thermique est peu mise en œuvre du fait de son coût d'investissement élevé en comparaison. La biomasse est par ailleurs majoritairement mobilisée, étant donné le faible contenu carbone de son combustible.

La prise en compte de la réduction de la facture énergétique, à travers le coût total actualisé, amène à une installation massive de pompes à chaleur pour réduire la consommation et par conséquent les émissions de GES. On observe également une augmentation de la rentabilité de la rénovation thermique du bâtiment, matérialisée par une augmentation des investissements à mesure que l'horizon considéré croît. Notamment, près de 20% des murs font l'objet d'une rénovation performante à long terme, tout comme près de 30% des vitrages.

Dès lors que l'on considère un horizon temporel d'au moins 20 ans, l'objectif de réduction des émissions de GES est atteint en monopolisant uniquement des rénovations rentables (pour lesquelles on observe $NPC \leq 0$). Le détail des indicateurs économiques, énergétiques et environnementaux est présenté dans le Tableau 5.1.

5.2.3 Bouquets de rénovation et gisement de réduction de la consommation

Déclinaison du problème d'optimisation

Objectif : Minimiser la consommation d'énergie

Contraintes : Rentabilité par bâtiment (en coût total)

Paramètres : Taux d'actualisation : 5%

Horizon : 20 ans

		Stratégie				
		Initial	Inv.	NPC 10a	NPC 20a	NPC 50a
Besoin de chauffage	(GWh)	14.07	13.57	11.56	10.51	8.56
<i>Reduction</i>	(%)	-	3.5	17.8	25.3	39.1
Consommation énergétique	(GWh)	17.66	15.60	10.18	8.79	7.24
<i>Réduction</i>	(%)	-	11.7	42.4	50.2	59.0
Émissions de GES	(ktCO ₂ e)	3.48	1.74	1.74	1.63	1.37
<i>Réduction</i>	(%)	-	50.0	50.0	53.2	60.7

Tableau 5.1 – Évolution des indicateurs de la transition énergétique en fonction de la stratégie d'optimisation adoptée.

Dans le cadre de la rénovation énergétique des bâtiments, les acteurs promouvant une rénovation performante évoquent souvent l'importance de “ne pas tuer le gisement d'économies d'énergie”. En effet, la rénovation partielle d'un bâtiment lors d'un premier investissement (murs uniquement par exemple, car c'est l'investissement le plus rentable) peut compromettre la rentabilité de futurs travaux de rénovation sur le même bâtiment. Il est généralement conseillé de réaliser un maximum de travaux en même temps, dans le cadre d'une rénovation rentable globalement plutôt que de diviser les investissements.

Afin de modéliser l'activation de bouquets de rénovation *globalement* rentables plutôt que de considérer les actions rentables individuellement, nous pouvons reformuler le problème d'optimisation comme présenté par le problème d'optimisation (P-4).

$$\begin{aligned}
 & \underset{Z}{\text{minimiser}} && \sum_{b \in B} E(Z_b) \\
 \text{(P-4)} \quad & \text{tel que} && NPC_b(Z_b) - NPC_b^0 \leq 0, \quad \forall b
 \end{aligned}$$

Ce problème cherche à minimiser la consommation d'énergie à l'échelle territoriale en s'assurant de la rentabilité à moyen terme (20 ans) des actions au niveau désagrégué du bâtiment. À l'échelle du territoire d'étude, l'activation des bouquets de rénovations rentables permet d'avoisiner les 65% de réduction de la consommation (pour 68% des émissions).

La Figure 5.5 représente ce gisement de réduction d'énergie accessible avec une rentabilité moyen terme de manière désagrégée (bâtiment par bâtiment) sur tout le territoire. La visualisation de données, à travers des cartographies détaillées par exemple, est particulièrement prisée des acteurs territoriaux dans le cadre d'une aide à la décision.

5.2.4 Sensibilité aux conditions climatiques

Déclinaison du problème d'optimisation

Objectif : Minimiser le coût total

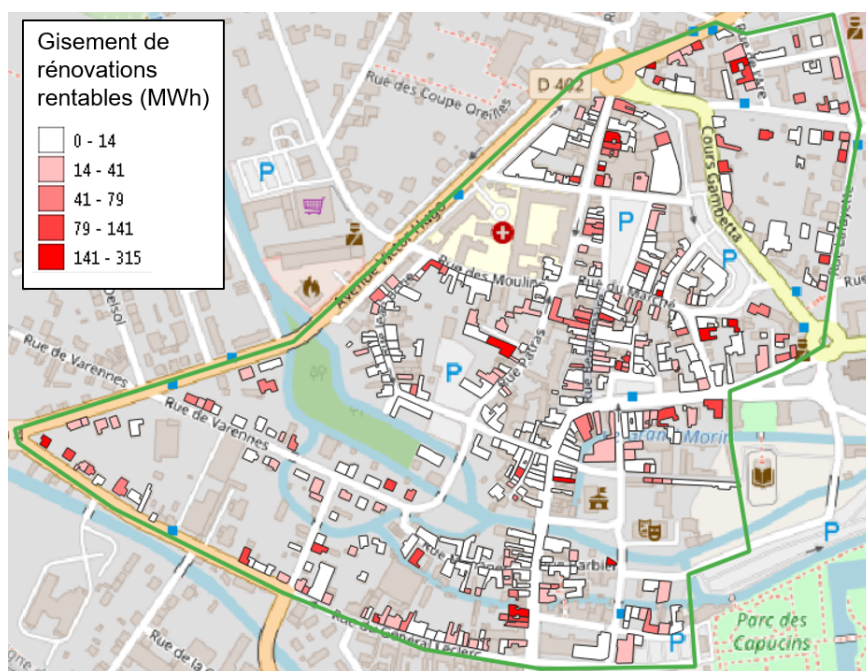


FIGURE 5.5 – Visualisation du gisement de réduction de consommation *via* des actions rentables.

Contraintes : Emissions de GES : 50%

Paramètres : Taux d'actualisation : 5%

Horizon : 20 ans

Le besoin de chauffage ainsi que les performances des systèmes dépendent des conditions climatiques. Pour un même territoire (en termes de performances thermiques et de systèmes énergétiques), les rénovations à mettre en œuvre pour atteindre un objectif *macro* de réduction des émissions de GES vont varier selon les conditions climatiques locales. Les Figures 5.6 et 5.7 représentent les stratégies mises en œuvre pour réduire les émissions de GES de 50% à l'échelle du territoire, en considérant 4 climats différents : méditerranéen (Nice), océanique (Bordeaux), océanique dégradé (Paris) et semi-continentale (Strasbourg).

On observe l'augmentation de la rentabilité de la rénovation thermique avec la rigueur du climat du fait de la plus importante facture énergétique initiale et donc le potentiel d'économies accrues. Cette observation est particulièrement vraie pour les vitrages, qui ne sont quasiment jamais installés dans un climat méditerranéen, mais font l'objet de rénovations massives (et performantes) pour un climat semi-continentale. Les investissements dans les systèmes de chauffage varient quant à eux relativement peu. Le plus faible investissement observé à Nice s'explique par le plus faible dimensionnement des équipements de chauffage, alors que la baisse pour les climats plus froids provient de la plus grande rentabilité de la rénovation thermique. Les PACs restent néanmoins prédominantes du fait de leur grande efficacité, même par climat froid. La légère baisse des investissements dans les systèmes de chauffage peut être imputée à la baisse des performances de ces systèmes ou à une moins

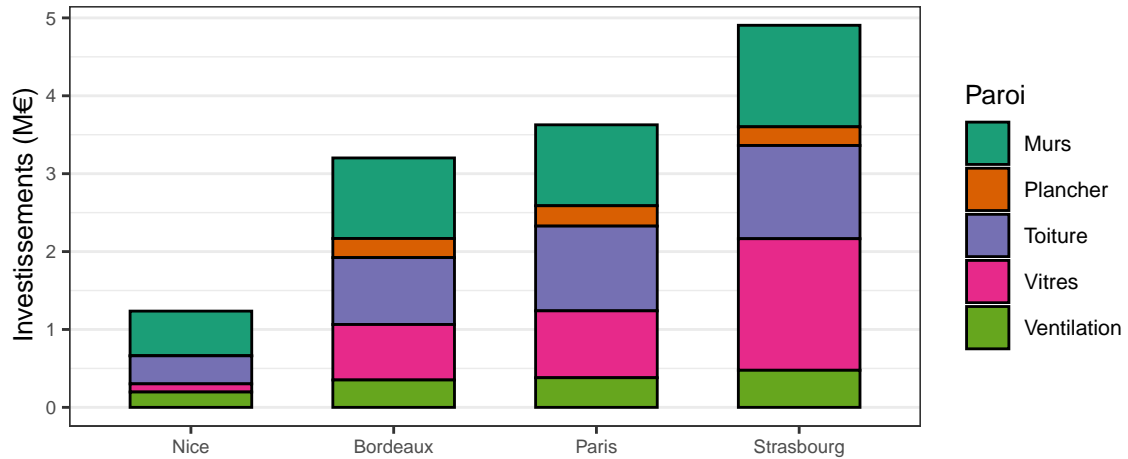


FIGURE 5.6 – Évolution des investissements dans la rénovation thermique en fonction du climat considéré

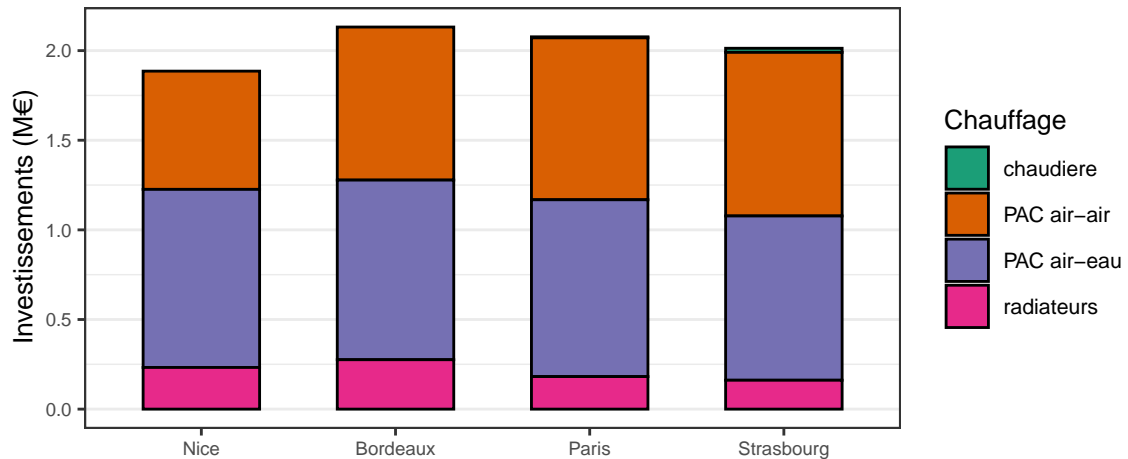


FIGURE 5.7 – Évolution des investissements dans les systèmes de chauffage en fonction du climat considéré

grande rentabilité par rapport à la rénovation thermique.

5.3 Second cas d'étude : Parc hétérogène

L'outil développé peut également servir à analyser des problématiques connexes en lien avec la planification énergétique, et notamment les politiques énergétiques nationales.

Cette section présente deux études appliquées à un parc de nombreux bâtiments hétérogènes. La première analyse les rénovations nécessaires pour atteindre un objectif type SNBC mais également l'impact du contenu carbone de l'électricité retenu sur les mesures activées.

5.3.1 Stratégie Nationale Bas Carbone : rénovation vs émissions

Déclinaison du problème d'optimisation

Objectif : Minimiser le coût total

Contraintes : Consommation surfacique de chauffage maximale : 60 kWh/m²

Paramètres : Taux d'actualisation : 5%

Horizon : 20 ans

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) se décline en de nombreuses orientations. L'une d'elles (B2) prévoit une rénovation profonde du parc bâti français, visant à lui faire atteindre **en moyenne** le niveau de performance dit BBC (Bâtiment Basse Consommation). Le niveau BBC dans la rénovation est fixé à environ 80kWh/m²/an, ajusté en fonction de la géographie et l'altitude du lieu [103].

Cette section cherche à quantifier les coûts d'investissements engagés pour atteindre un tel niveau de performance finale. Tous les bâtiments utilisés pour la calibration du méta-modèle de consommation (voir Fig. 2.8) sont intégrés dans cette étude, soit environ 3000 bâtiments.

L'objectif de l'optimisation reste une minimisation des coûts totaux sur un horizon de 20 ans. Étant donné que nous n'avons pas modélisé la consommation d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) dans cette thèse, on considère une consommation fixe de 20 kWh/m² pour tous les bâtiments, et la cible à atteindre en termes de consommation de chauffage est alors de 60kWh/m²/an. Une contrainte sur le niveau de performance global est intégrée :

$$\frac{\sum_{b \in B} E_b(Z_b)}{\sum_{b \in B} S_b^H} \leq 60 \text{kWh/m}^2 \quad (5.1)$$

La Figure 5.8 représente la distribution des coûts d'investissements nécessaires pour atteindre l'objectif *macro*, en différenciant les bâtiments selon leur classe DPE initiale. Les bâtiments les moins performants font, sans surprises, l'objet de plus gros investissements. Un montant moyen de 209€/m² est investi dans les bâtiments de classe G contre seulement 57€/m² pour ceux de classe C par exemple.

Ces chiffres sont propres au parc de bâtiment modélisé et sont donc difficilement transposables à une échelle plus large en l'état. La possibilité de réaliser ce type d'étude au niveau national est discuté en perspectives (voir Sec. 6.2).

On peut noter que tous les bâtiments ne sont pas forcément rénovés à un niveau de performance très élevé. En effet, les DPE classés F et G sont majoritairement rénovés en classe C ou D. Il semble donc que les rénovations très profondes soient trop coûteuses, et qu'il soit plus rentable économiquement de rénover légèrement des bâtiments de performance correcte (B, C et D). En revanche, la Figure 5.9 permet d'observer que les bâtiments présentant de bonnes performances initiales font généralement l'objet d'un remplacement du chauffage initial. En revanche, à mesure que l'on s'attaque à des bâtiments peu performants, la mise en place de rénovations plus complètes est observée (rénovation thermique et remplacement

du chauffage. La Figure 5.10 représente la distribution finale des énergies consommées.

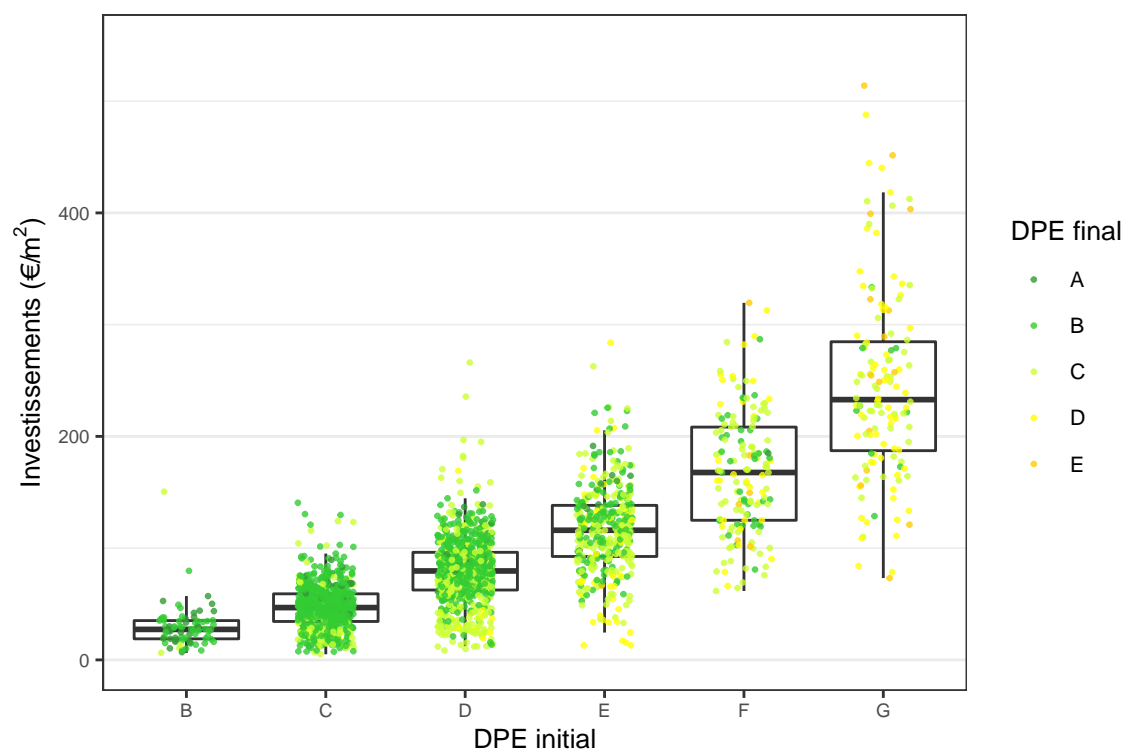


FIGURE 5.8 – Scénario SNBC : Distribution des coûts de rénovation énergétique en fonction des classes DPE

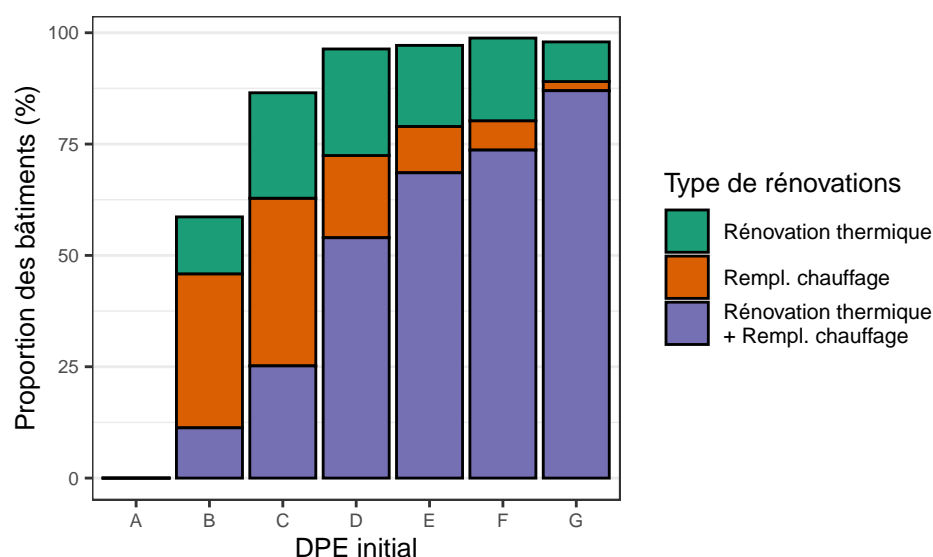


FIGURE 5.9 – Scénario SNBC : Types de rénovations activées selon les DPE initiaux

Pour aller plus loin, une étude similaire menée sur un ensemble de bâtiments représentatif parc bâti national tant au niveau thermique que système pourrait permettre l'analyse des

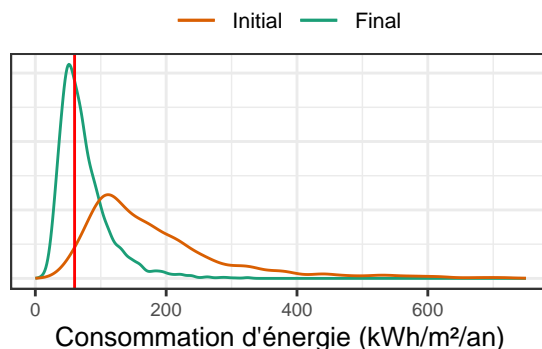


FIGURE 5.10 – Scénario SNBC : Distribution des énergies de chauffage avant et après scénario SNBC

coûts de rénovation nécessaires au niveau national pour atteindre une cible de type SNBC. Aussi, cela rendrait possible l'identification de solutions de rénovation à mettre en œuvre pour différentes typologies de logements.

5.3.2 Contenu carbone de l'électricité et politique énergétique

Déclinaison du problème d'optimisation

Objectif : Minimiser une fonction économique (investissements et coût total)

Contraintes : Réduction des émissions de GES : 70%

Paramètres : Taux d'actualisation : 5%

Horizon : 0 et 20 ans

Contenu carbone de l'électricité : 79, 147, 180 et 210 gCO₂e/kWh

Le chauffage électrique occupe une place à part dans le paysage énergétique. En effet, les modes de chauffage électrique n'utilisent pas un combustible, mais un vecteur énergétique. L'électricité est générée de manière majoritairement centralisée, sur le réseau électrique français, à partir d'un mix de combustibles varié. L'électricité permet de transporter l'énergie qui est convertie en chaleur dans le bâtiment. À l'inverse, les autres modes de chauffage comme les chaudières gaz et fioul ou chauffages au bois exploitent directement le combustible par des équipements décentralisés (au sens de la distribution).

Dès lors, la valeur du contenu carbone caractérisant le chauffage électrique vis-à-vis des autres combustibles est sujette à débat. Celle-ci dépend grandement d'hypothèses de calcul et les valeurs adoptées tiennent souvent autant d'une volonté politique que d'une réalité physique. On observe notamment parmi les méthodes de calcul le plus couramment utilisées :

Moyenne : La méthode de calcul par moyenne estime la quantité moyenne de gaz à effet de serre émise par un kilowattheure d'énergie produit par le mix électrique. Pour obtenir cette valeur, on divise les émissions totales annuelles par l'énergie produite

sur la même année. Cette métrique, très simple, est utile pour visualiser l'évolution d'un parc de production. Cependant, elle est peu représentative du fonctionnement du réseau électrique : chaque kilowattheure produit n'émet pas la même quantité de GES. Surtout, elle ne distingue pas les différents usages de l'électricité et leur saisonnalité.

Saisonnalisée par usage : Cette méthode distingue la production annuelle en deux blocs, l'un appelé bloc "base", monopolisé toute l'année, et l'autre bloc "saisonnier", appelé en hiver. Un contenu carbone est calculé pour chacun de ces blocs afin de représenter la variation des moyens de production appelés. La consommation électrique est ensuite divisée en usages (chauffage, eau chaude sanitaire, tertiaire, etc.) lesquels se voient attribué un facteur de saisonnalité. Le chauffage est 100% saisonnier par exemple, au contraire d'usages comme l'ECS qui le sont moins. Ainsi, on peut calculer un contenu carbone pour chaque usage, selon sa part saisonnière et sa part de base. Cette méthode est notamment critiquée pour sa faible représentativité du système électrique.

Mensualisée par usage : Cette fois-ci, un contenu carbone moyen est associé à chaque mois de l'année. La consommation de chaque usage est également décomptée pour chaque mois de l'année, permettant d'établir un facteur d'émission annuel pour chaque usage par somme pondérée des émissions mensuelles. Cette vision est plus représentative du système électrique mais offre une vision figée de celui-ci (en cas d'évolution des usages).

Marginale : Cette méthode considère l'impact d'actions à la marge de l'ensemble du système électrique. On estime l'augmentation ou la réduction à la marge de la consommation entraîne un évitement (ou un ajout) des émissions de GES des derniers moyens appelés, souvent très carbonés. Ce calcul n'est par définition valable qu'à la marge d'un système donné. Il permet d'évaluer l'influence de l'usage sur l'évolution du mix et non l'inverse.

Leurs valeurs suivantes, admises dans différents textes, sont considérées :

- La RT2012 : C'est la dernière réglementation thermique en vigueur, qui encadre la construction neuve et en rénovation depuis 2012. Le contenu carbone de l'électricité a été fixé à **180 gCO₂e/kWh** en utilisant une méthode de calcul saisonnalisée.
- La Base carbone de l'ADEME : Les valeurs de contenu carbone sont régulièrement réajustées. En 2018, le contenu carbone de l'électricité a été estimé à **147 gCO₂e/kWh** par la même méthode saisonnalisée, mais en prenant compte l'évolution du parc de production.
- La proposition E+C- : Cette proposition devait augurer de la future réglementation thermique à venir en 2020. Dans cette proposition, le contenu carbone de l'électricité était fixé à **210 gCO₂e/kWh**.
- La RE2020 : La réglementation énergétique qui sera mise en œuvre courant 2020 prévoit de baisser le contenu carbone de l'électricité à **79 gCO₂e/kWh**, valeur estimée par la méthode mensualisée.

L'objectif de cette section n'est pas de discuter la pertinence de certaines valeurs par rapport aux autres, mais d'observer l'effet que les valeurs adoptées peuvent avoir sur les solutions à mettre en œuvre.

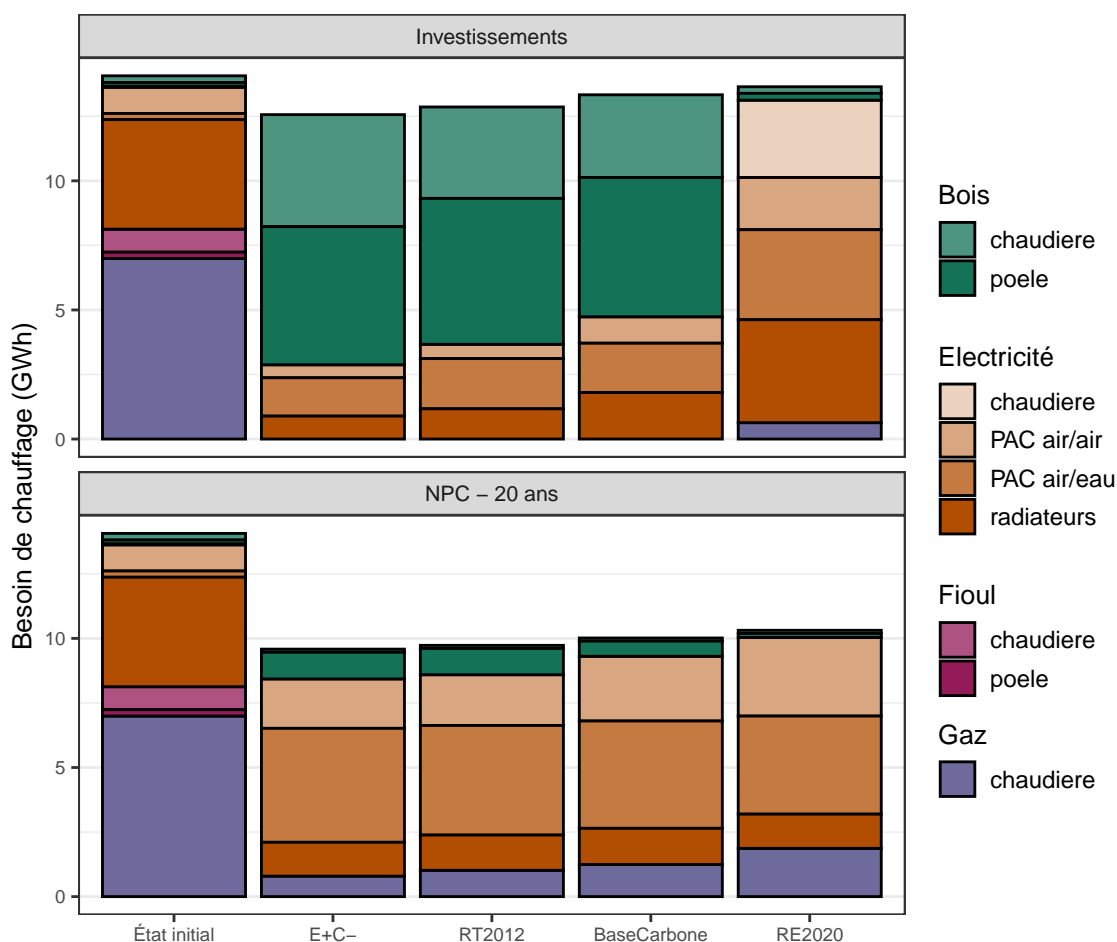


FIGURE 5.11 – Évolution du besoin et de la fourniture de chauffage en fonction du contenu carbone de l'électricité

La Figure 5.11 représente l'évolution du besoin énergétique et des systèmes de chauffage mis en œuvre pour satisfaire ce besoin en fonction des contenus carbone employés. Ceux-ci sont désignés par le texte dans lequel ils sont définis. La cible de réduction des émissions de GES est fixée à 70%. Deux stratégies de rénovation sont comparées : l'une cherchant à minimiser les investissements et l'autre considérant le coût total sur 20 ans.

On observe, dans un cas comme dans l'autre, que la réduction du contenu carbone désengage des investissements dans la réduction du besoin pour les réorienter vers des moyens de chauffage électriques. C'est d'autant plus visible dans le cas où l'on cherche à réduire les émissions à investissements minimums : les modes de chauffage électriques, notamment peu performants comme les chaudières et les radiateurs, sont préférés au chauffage bois et à la rénovation thermique. Cet effet est lissé par la prise en compte de la réduction de la facture énergétique, mais reste visible dans le second cas, où la part des chaudières électriques aug-

mente sensiblement.

Pour aller plus loin, une étude similaire pourrait être menée sur l'impact du facteur d'énergie primaire sur les solutions activées pour atteindre des objectifs de consommation. Selon que ces objectifs soient définis en énergie finale ou primaire, et en considérant différentes valeurs du facteur d'énergie primaire, l'évolution des investissements mobilisés pourrait être analysé.

5.4 Troisième cas d'étude : territoires variés

Cette dernière section présente une étude menée sur des territoires de typologie variées, présentant des moyens de chauffages et des performances thermiques initiales variées. Une étude prenant en compte le dimensionnement du réseau électrique permet de mettre en valeur l'importance de la prise en compte de ce contexte local mais aussi les implications de contraintes réseau sur les mesures à mettre en oeuvre.

5.4.1 Prise en compte du dimensionnement du réseau électrique

Déclinaison du problème d'optimisation

Objectif : Minimiser le coût total

Contraintes : Réduction des émissions de GES : 50%

Pointe de puissance électrique au jour le plus froid \leq Pointe initiale

Paramètres : Taux d'actualisation : 5%

Horizon : 20 ans

Les sections précédentes ont permis d'observer que, lorsque les réductions de la facture énergétique sont considérées dans la fonction de coûts à minimiser, les pompes à chaleur sont très largement mises en oeuvre dans les territoires. En effet, leur grande efficacité permet *de facto* de réduire les émissions de GES dues au chauffage. L'installation massive de systèmes de chauffage électrique peut en contrepartie poser des problèmes sur le réseau électrique. En effet, le réseau de distribution est un ouvrage fixe et ne peut transmettre plus de puissance que celle pour laquelle il a été dimensionné. La mise en place de nouveaux équipements électriques peut causer une augmentation de la pointe de consommation mettant en danger l'intégrité du réseau de distribution. Celui-ci devra alors faire l'objet de travaux de renforcement, coûteux et complexes.

Cette section présente un cas d'étude simplifié visant à quantifier l'impact de telles contraintes réseau sur les stratégies de rénovation à mettre en oeuvre. Les deux hypothèses suivantes sont considérées :

- Tous les bâtiments sont sous le même départ HTA (moyenne tension) du réseau de distribution.

- Ce départ était parfaitement dimensionné dans le cas initial, c'est-à-dire qu'il ne peut accueillir de nouvelle puissance.

Une nouvelle contrainte est intégrée au problème d'optimisation des rénovations. Celle-ci impose que la puissance électrique observée à la température de base après rénovation ne dépasse pas celle observée dans la situation initiale (non rénovée). L'Équation (5.2) représente cette nouvelle contrainte.

$$P^{elec}(Z) \leq P_0^{elec} \quad (5.2)$$

La pointe de consommation électrique est définie comme la somme des pointes électriques de chaque bâtiment. Cette puissance maximum est égale à 1 si le chauffage fonctionne à l'électricité et 0 sinon (noté $\mathbb{1}^{elec}$). La puissance consommée à la température de base dépend de $\eta^{T_{base}}$, l'efficacité du système à cette température.

$$P^{elec}(Z) = \sum_{b \in B} P_b^{elec}(Z_b) \quad (5.3)$$

$$P_b^{elec}(Z_b) = \sum_{s \in S_b} \frac{\mathbb{1}^{elec}}{\eta^{T_{base}}} (Y_b) P_b^{dim}(X_b) \quad (5.4)$$

La Figure 5.12 présente, pour 4 des territoires utilisés dans la Section 2.6.3, les résultats d'optimisations avec et sans la contrainte liée au dimensionnement du réseau électrique. Ces territoires d'études présentent des typologies et des caractéristiques énergétiques différentes, mais surtout un taux de chauffage électrique initial variant d'un cas à l'autre. Ces optimisations visent encore une fois la minimisation du NPC à un horizon de 20 ans, avec un objectif de réduction des émissions de GES de 50%.

On observe des comportements distincts pour chacun des territoires :

- Le territoire "Maisons mitoyennes" : L'électricité est très présente initialement au sein des modes de chauffage : 53.8% des surfaces sont chauffées *via* des systèmes électriques. Le réseau peut donc accueillir une grande puissance lors de la pointe. De ce fait, aucune évolution n'est observée entre la simulation contrainte par la pointe électrique et celle non contrainte. La rénovation thermique (qui réduit la pointe) et le remplacement de radiateurs électriques par des PACs, permet à la solution optimale non contrainte de ne pas poser de problème réseau.
- Le territoire "Mixte" : seule une faible proportion des surfaces sont initialement chauffées à l'électricité (6.8%). Les systèmes de chauffage au gaz sont majoritaires avec plus de 60% des surfaces chauffées. En conséquence, le réseau n'est pas dimensionné pour supporter une forte charge électrique. Si le scénario non contraint intègre de nombreuses PACs, celles-ci entraînent un dépassement de la capacité d'accueil. Le scénario contraint emploie moins de PAC. En revanche, une réduction supplémentaire de la demande *via* la rénovation thermique est nécessaire pour atteindre l'objectif *macro* de réduction des émissions de GES.

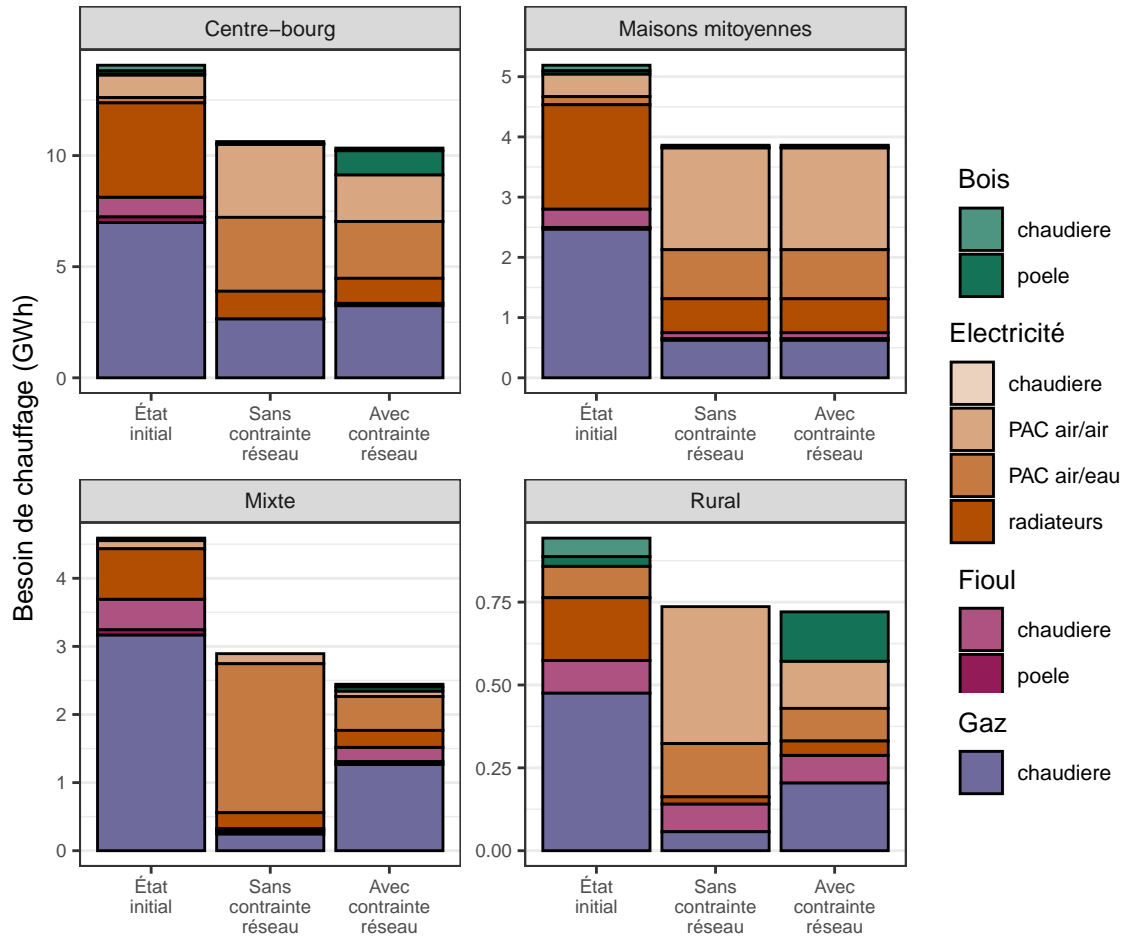


FIGURE 5.12 – Contraintes sur le réseau électrique : Évolution du besoin et modes de chauffages utilisés

- Les territoires "Rural" et "Centre-bourg" : Ces deux territoires sont dans des situations intermédiaires. Le chauffage électrique est bien présent initialement (40.8% et 56.1% respectivement). La contrainte sur la pointe électrique a peu d'influence sur les mesures de rénovation thermique activées. En revanche, on observe une réduction du besoin couvert par les PACs et une (ré)apparition des chaudières au bois. Celles-ci bénéficient du faible contenu carbone de leur combustible, ce qui les rend compétitives pour atteindre l'objectif *macro*.

Cette étude admet des hypothèses simplificatrices et modélise la contrainte en puissance uniquement de manière à conserver la structure linéaire du problème. Cependant, elle permet de tirer deux conclusions principales :

- On observe un comportement très différent d'un territoire à un autre, en fonction notamment du contexte local (systèmes de chauffage, performances thermiques, etc.). Cette observation appuie l'importance d'une modélisation fine et détaillée du territoire afin de prendre en compte ce type de subtilités.
- L'installation massive de pompes à chaleur, observées dans les précédentes études de

ce chapitre, semble logique aux vues de leur grande efficacité. Néanmoins, nous avons montré que leur intégration sur le réseau peut poser problème. L'augmentation de la puissance appelée les jours les plus froids de l'année peut amener à un besoin de renforcement du réseau électrique. Pour éviter ces coûts, et une trop forte augmentation de la thermo-sensibilité électrique à l'échelle nationale, le développement de systèmes hybrides semble particulièrement intéressant. L'utilisation d'une chaudière d'appoint pour les jours les plus froids de l'année permet d'éviter de tels problèmes.

Cette étude ouvre la voie à une planification énergétique prenant en compte les problématiques réseau. Pour aller plus loin, il pourrait être intéressant de coupler l'optimisation des mesures de rénovation énergétique avec une modélisation détaillée du réseau électrique de type *Optimal Power Flow (OPF)*, qui ont notamment fait l'objet de précédentes thèses au sein du centre PERSEE [104, 105]. Les approches OPF cherchent à minimiser des coûts réseau totaux en prenant en compte les contraintes de tension et d'intensité sur le réseau.

Dans cette optique, une collectivité pourrait collaborer avec le gestionnaire de réseau (par exemple Enedis) afin d'intégrer le tracé et le dimensionnement du réseau électrique dans l'optimisation des rénovations énergétiques des bâtiments. La collectivité s'assurerait alors d'activer les leviers nécessaires pour amener son territoire dans la direction souhaitée, tout en prenant en compte des contraintes techniques.

5.5 Intégration dans un outil web pour les collectivités territoriales

Nous avons intégré la méthode de modélisation et d'optimisation développée dans cette thèse au sein d'un outil web. Celui-ci a vocation à être utilisé par les collectivités territoriales. Initialement implémentés sous R, les scripts développés ont été transcrits en langage Python pour une intégration plus facile à la plateforme web.

Une version bêta de l'interface a été construite et sera mise en ligne prochainement. Sur cette plateforme, une collectivité territoriale peut lancer des simulations en spécifiant l'emprise de son territoire ainsi que les objectifs qu'elle souhaite atteindre au niveau *macro*, mais également le ou les indicateurs qu'elle souhaite utiliser comme objectif de l'optimisation. Les variables économiques comme l'horizon temporel et le taux d'actualisation peuvent aussi être ajustés (voir Fig. 5.13).

Une fois l'optimisation effectuée sur les serveurs mis à disposition, les résultats sont accessibles à la collectivité sur cette même plateforme, par le biais d'une visualisation des indicateurs à une échelle agrégée (Fig. 5.14) ou désagrégée (Fig. 5.15). L'utilisateur peut alors définir l'emprise ainsi que les indicateurs à visualiser.

Cet outil est développé dans le cadre du projet SHAPE, co-financé par l'ADEME, et nous espérons que son utilisation par des acteurs territoriaux volontaires aura lieu d'ici la

Simulation submission

Enter the simulation data file and the runtime parameters in the form, and click on the **Submit** button.

A computation job will be created and enqueued for execution. Its unique id will be provided to let you request the work progress and retrieve the results when complete.

Csv file *

Parcourir...

Aucun fichier sélectionné.

Weather Conditions *

Paris

Desired Scenario Constraints

Reduction in GHG Emissions (in %) *

75

Reduction in Energy Demand (in %) *

50

Reduction in Energy Consumption (in %) *

50

Reduction in Billings (in %) *

20

Maximal Investment allowed (in €) *

1000000

Objective weights

GHG Emissions *

0

Energy Demand *

0

Energy Consumption *

0

Billings *

0

Investment *

0

Net Present Value *

1

Economic Parameters

Actualization Rate (in %) *

4

Present Value Period *

30

Submit

FIGURE 5.13 – Plateforme web SHAPE : Formulaire de saisie des paramètres de l'optimisation.

fin du projet (novembre 2020).

5.6 Conclusion

Ce chapitre met en avant la capacité de la méthode développée à modéliser et analyser des problématiques en lien avec la transition énergétique. Pour cela, différentes utilisations de la méthode sont présentées :

- Nous avons modélisé un territoire d'étude d'environ 500 bâtiments. L'optimisation des mesures de rénovation énergétique permet de tirer des enseignements quant à l'influence de différents paramètres clés tels l'horizon d'évaluation ou le choix de la fonction objectif. Aussi, la pertinence pour l'aide à la décision est mise en valeur par

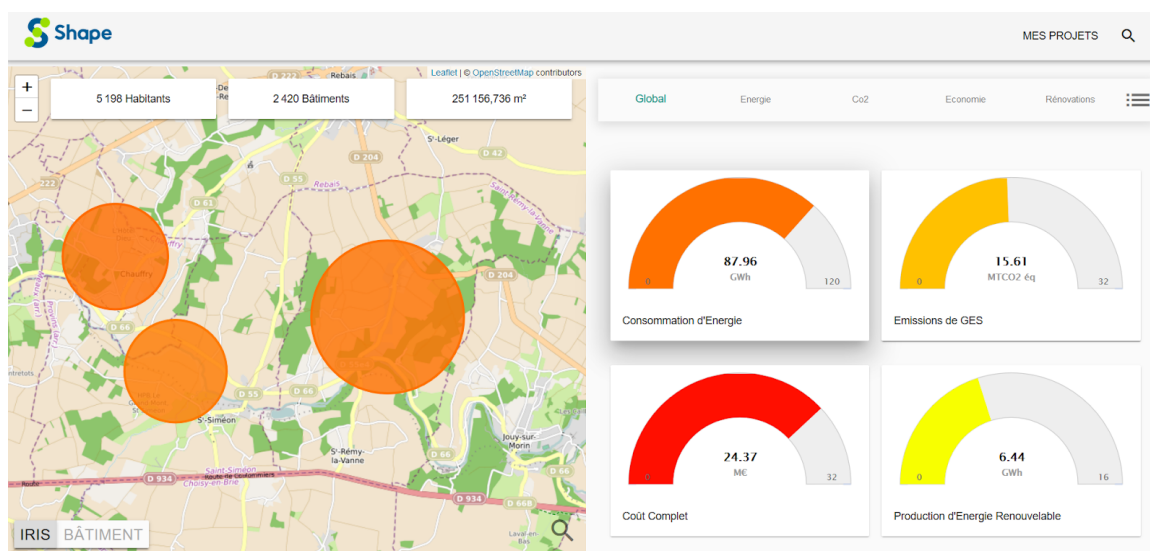


FIGURE 5.14 – Plateforme web SHAPE : Visualisation des indicateurs de la transition énergétique à un niveau agrégé suite à une optimisation des mesures de rénovation énergétique des bâtiments.

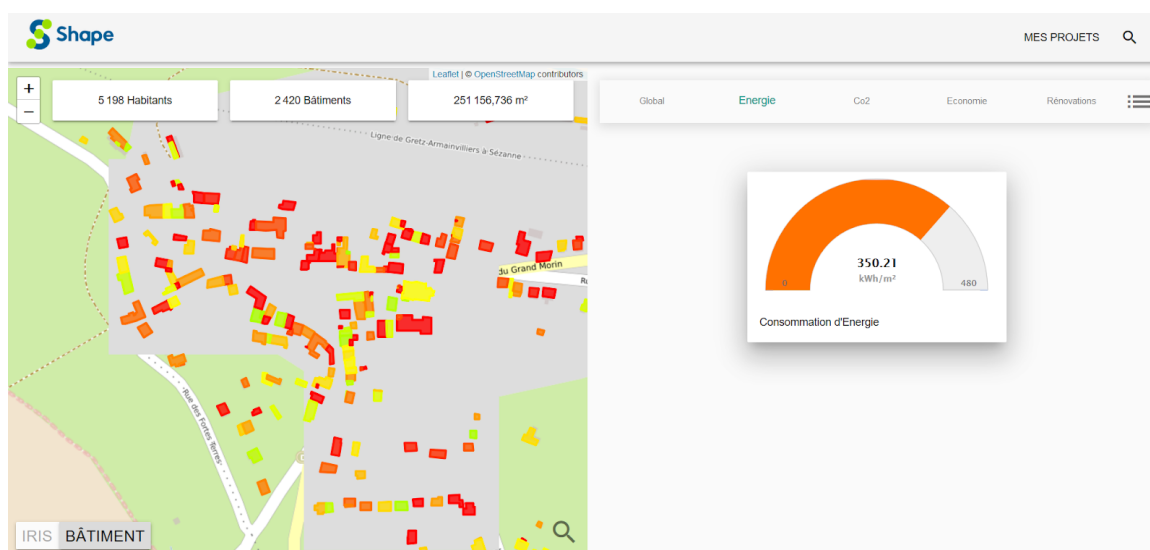


FIGURE 5.15 – Plateforme web SHAPE : Visualisation des indicateurs de la transition énergétique à un niveau désagrégé (bâtiment par bâtiment) suite à une optimisation des mesures de rénovation énergétique des bâtiments.

la représentation cartographique des résultats.

- Trois études permettent d'observer la réponse de territoires d'étude variés à diverses politiques énergétiques. Ces simulations n'ont pas pour vocation de justifier l'une ou l'autre des politiques pouvant être mises en place, mais mettent en valeur la diversité des utilisations possibles pour la méthode développée dans cette thèse.
- La méthode est intégrée à un outil opérationnel d'aide à la planification territoriale. Si cet outil est encore en phase de développement, il devrait être testé courant 2020

auprès d'acteurs territoriaux afin de valider sa pertinence et sa robustesse face à des cas réels.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

6.1 Conclusions et contributions

L’objectif de cette thèse résidait dans le développement d’un outil d’aide à la décision pour la mise en œuvre des mesures de transition énergétique en lien avec le chauffage dans les secteurs résidentiels et tertiaires. Dans cette optique, nous avons identifié l’approche par optimisation comme étant la plus adaptée à l’aide à la planification territoriale : elle permet à des acteurs territoriaux ayant peu de connaissances techniques dans le domaine énergétique de générer des plans d’action adaptés au contexte propre à leur espace administré. Ce genre d’approche n’ayant pas été observé dans les outils opérationnels actuellement à disposition des territoires, le développement d’un nouvel outil s’en trouve alors justifié.

Le **Chapitre 2** est consacré à la modélisation énergétique à l’échelle territoriale. Cette modélisation se décline en deux thématiques principales : (1) la modélisation du territoire par la description des éléments le composant et (2) la modélisation de la consommation énergétique, qui s’appuie sur la description des territoires retenue.

Nous avons alors établi une procédure générique de construction d’un modèle de territoire. Celle-ci repose sur une base de données socle, décrivant la géométrie des bâtiments, laquelle est enrichie d’informations structurelles (âge, matériaux...) et énergétiques (caractéristiques thermiques, systèmes...) par des techniques d’appariement et d’inférence. La disponibilité des données ainsi la capacité démontrée à combiner les différentes informations rendent crédible la perspective d’une représentation fiable d’un territoire dans sa diversité. Toutefois, la validation du modèle de territoire par confrontation à des observations demeure un enjeu important qui permettra de clôturer la démarche. De ce fait, nous avons construit l’ensemble des modélisations de cette thèse au niveau de détail du bâtiment et de ses sous-éléments (parois et système de chauffage). Cette contribution a donné lieu à une présentation orale à la conférence internationale CISBAT 2019 [106].

La seconde partie de ce chapitre développe alors la construction d’un modèle d’estimation de la consommation énergétique d’un bâtiment adapté à un usage territorial. La simplicité

du modèle est indispensable pour garantir son intégration dans une optimisation à grande échelle, mais cette simplicité ne peut se faire au détriment de la précision. L'estimation du besoin annuel de chauffage représente le cœur de l'estimation de la consommation et, dans cette optique, nous avons développé un méta-modèle du besoin.

Une modélisation des transferts thermiques en régime permanent, utilisée par exemple dans le cadre des diagnostics de performances énergétiques, constitue l'ossature du méta-modèle. Le besoin y est décrit à partir des caractéristiques structurelles et thermiques des parois. Afin d'améliorer ses performances, nous avons entraîné ce modèle sur un modèle dynamique éprouvé développé au CSTB, DIMOSIM. Cette calibration garantit une meilleure représentativité de phénomènes complexes comme l'inertie ou les ombrages. Le modèle final du besoin est intégré dans un modèle d'estimation de la consommation de chauffage simple (linéaire suivant les caractéristiques thermiques des parois et suivant l'efficacité des systèmes) et précis (une erreur absolue moyenne de 3.3% est observée sur un territoire test).

Après avoir développé cet environnement de modélisation qui permet d'estimer la consommation d'un bâtiment pour une configuration thermique-système donnée, le **Chapitre 3** présente les différentes solutions techniques de rénovation considérées. Pour ce faire, nous avons identifié puis modélisé de nombreuses solutions, d'un point de vue économique comme technique.

Un premier apport de ce chapitre consiste en la modélisation technique des systèmes de chauffage, et notamment des chaudières et des pompes à chaleur. Les performances saisonnières sont estimées à partir de séries temporelles de températures. D'anciennes technologies de chaudières et de pompes à chaleur (mono et bi-compresseur) sont également modélisées afin de caractériser l'existant. La prise en compte de régimes de charge partielle permet, plus loin dans le manuscrit, de modéliser la détérioration des performances des systèmes par la rénovation thermique, laquelle induit un sur-dimensionnement du chauffage. Cette modélisation permet aussi de quantifier les différences de performances des PACs dans les différents climats présents sur le territoire français.

Ensuite, nous avons fait le choix de décliner les techniques de rénovation thermique selon trois niveaux de performance. Le premier vise à respecter la réglementation en vigueur alors que les deux niveaux suivants cherchent à amener les bâtiments rénovés à des niveaux de performances observés dans le neuf. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une analyse statistique des performances de la construction neuve.

La dernière contribution de ce chapitre est la modélisation des coûts des systèmes de chauffage. En se basant sur des données de catalogues constructeurs, nous avons construit une modélisation simple des coûts d'investissement, considérant des gammes de produits au sein de chaque type de système. Les systèmes sélectionnés pour constituer la base de solutions techniques disponibles pour la rénovation sont issus de la gamme moyenne inférieure. Les coûts de la rénovation thermique sont quant à eux issus d'une base du CSTB, provenant de

travaux antérieurs.

Ce chapitre aboutit à une base de solutions techniques dont la modélisation technico-économique est compatible avec l’optimisation à grande échelle visée.

Le **Chapitre 4** présente la structure du problème d’optimisation à proprement parler. La nature des variables ainsi que leur intégration aux modèles technico-économiques définis précédemment sont établies.

Les fonctions bi-linéaires telles que la consommation énergétique ou les coûts des systèmes de chauffage impliquent une multiplication de variables binaires identifiée comme problématique pour une résolution rapide du problème d’optimisation. Un couplage a donc été réalisé entre les variables de rénovation thermique et de remplacement du chauffage. Si plusieurs alternatives existent, le niveau de couplage est à nouveau déterminé dans l’optique d’aboutir à une résolution facilitée à grande échelle. Finalement, le problème obtenu se présente comme une variante du problème “sac à dos”, dont la forme simple est courante en optimisation combinatoire. L’optimisation des mesures de rénovation énergétique a alors été réalisée sur des territoires virtuels afin de valider la capacité de la méthode établie à être utilisée sur des parcs bâtis de grande dimension. Un temps de calcul total de moins de 5 minutes est nécessaire pour optimiser la rénovation de 1000 bâtiments, tandis que ce temps s’élève à près de 30 minutes pour un parc comprenant 5000 éléments. À noter que les performances sont dépendantes du nombre de variables de décision, et donc du nombre de solutions techniques considérées. Les simulations effectuées considèrent près de 30 systèmes de chauffage par bâtiments et 30 techniques de rénovation déclinées en 3 niveaux de performances, soit 90 alternatives de rénovation. Une restriction du nombre de solutions techniques peut être judicieuse pour accélérer l’optimisation. Cette contribution a été valorisée au travers d’un article publié dans le journal *Applied Energy* [107].

Nous avons développé des modèles supplémentaires, pouvant être intégrés de manière modulaire à cette formulation générique du problème d’optimisation de la rénovation énergétique. Ils permettent de représenter des phénomènes plus fins en lien avec la rénovation énergétique. Le premier modélise la dégradation des performances des systèmes de chauffage suite à une rénovation thermique. Certains systèmes sont plus sensibles à cette dégradation, notamment les pompes à chaleur air-air dont la surconsommation induite dépasse les gains d’énergie dus à la rénovation thermique. Les trois autres modèles permettent de modéliser plus finement les coûts de la rénovation, que ce soit pour la ventilation le chauffage ou les émetteurs de chaleur. Cette finesse accrue se fait parfois au détriment des performances : pour l’un des modèles, les coûts de calculs induits sont considérés comme trop importants en comparaison au gain de modélisation, et ne sont pas pris en compte pour la suite du manuscrit.

Enfin, le **Chapitre 5** présente différentes utilisations possibles de la méthode développée,

qu'elles soient opérationnelles ou académiques. L'usage principal de la méthode demeurant l'aide à la planification territoriale, nous avons encapsulé l'algorithme au sein d'une plateforme web qui sera mise à disposition des acteurs de la transition énergétique locale. D'autres usages sont ensuite proposés.

La procédure complète de modélisation du territoire ainsi que l'optimisation des mesures de rénovation énergétique sont mises en œuvre sur un territoire d'étude. Différentes stratégies sont comparées sur ce territoire, et l'importance de la prise en compte de la réduction de la facture énergétique dans la nature des solutions activées est mise en valeur. On observe par exemple que la rénovation thermique n'atteint sa pleine rentabilité que lorsque l'on considère des horizons longs, de plus de 20 ans environ. À l'inverse, le remplacement des systèmes de chauffage semble la solution la plus rentable à court terme pour réduire les émissions de gaz à effet de serre : le chauffage au bois représente une solution économique pour réduire les émissions de GES. L'impact du contexte climatique est également visualisé sur le territoire d'étude.

La dernière contribution de ce chapitre consiste en l'utilisation de la méthode pour observer l'impact de certaines politiques énergétiques. Une première étude permet présente la distribution des coûts des investissements activés pour atteindre un objectif *macro* du type de celui présent dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). On observe par exemple que les bâtiments les moins performants (classes G) sont généralement rénovés à une classe de performance moyenne (classe C ou D). Toutes les classes de bâtiments à partir de la classe C sont massivement rénovées (plus de 80% y sont modifiés). Une seconde étude présente l'importance de la valeur choisie pour le contenu carbone de l'électricité vis-à-vis des solutions activées. Dans un raisonnement basé sur une minimisation des investissements, considérer une valeur faible va fortement encourager la mise en œuvre de moyens de chauffage électrique, et décourager la rénovation thermique. Ces effets sont moins visibles lorsqu'on prend également en compte la réduction de la facture énergétique à long terme. Enfin, la dernière étude introduit une nouvelle dimension au problème de la rénovation énergétique : le réseau électrique. Afin de modéliser le dimensionnement du réseau, une limite de la pointe de puissance électrique est considérée à un niveau agrégé. Les répercussions sont observées sur quatre territoires présentant des taux de chauffage électrique initial différents. Dans les territoires possédant peu de chauffage électrique, cette contrainte modifie fortement la nature des solutions activées : pour atteindre un même niveau de réduction de GES, il faudra parfois investir plus dans la rénovation thermique, activer des moyens de chauffage au bois et réduire la mise en œuvre des pompes à chaleur.

En résumé, cette thèse a permis les 4 contributions suivantes :

- La description fine d'un parc de bâtiments à partir de données accessibles aux territoires. Cette description, obtenue par des procédés d'enrichissement, notamment par inférence statistique, permet de travailler à une maille opérationnelle. Ainsi, il est pos-

sible d'intégrer des problématiques fines à l'optimisation des mesures de rénovation, telles que des contraintes locales d'urbanisme ou des spécificités de chaque bâtiment (combles aménagés ou non, raccordement au réseau de gaz, etc.).

- La formalisation d'un problème d'optimisation adapté à la grande dimensionnalité du problème induit par la description fine des parcs de bâtiments. Cette formulation, et notamment le couplage des variables de décision, permet une résolution exacte du problème de rénovation énergétique du bâtiment (sans perte d'information) et autorise une montée en échelle sur des territoires de grande dimension (plusieurs milliers de bâtiments).
- La modélisation technico-économique de la rénovation énergétique. Cette modélisation repose sur la construction d'une base de solutions techniques de rénovation énergétique, comprenant les volets thermiques et systèmes, représentatives du contexte actuel (2019). Les modèles développés quantifient les impacts des différentes solutions techniques sur les indicateurs économique, énergétiques et environnementaux de la transition., tout en conservant une simplicité permettant leur intégration dans le problème d'optimisation. Des modèles spécifiques permettent de représenter certains couplages existants entre les différents leviers (détérioration des performances des chauffages lors d'une rénovation thermique par exemple).
- L'utilisation de la méthode développée à des fins opérationnelles et académiques, laissant augurer des perspectives intéressantes que ce soit pour l'aide à la planification territoriale ou l'étude théorique de la rénovation énergétique. En particulier, les divers cas d'études démontrent la capacité de la méthode à proposer des stratégies de rénovation alternatives aux territoires grâce à la modularité de la formulation. L'extraction d'information synthétique à partir des optimisations détaillées en fait également un outil puissant d'analyse de thématiques plus globale et académiques.

6.2 Limites et perspectives

Le travail de modélisation développé tout au long de cette thèse constitue une première approche, pour laquelle il est possible d'identifier un certain nombre de limites, et des pistes permettant d'y remédier.

- Le travail de modélisation des territoires mené dans cette thèse rend crédible la description désagrégée d'un parc de bâtiment à partir des bases de données à disposition des acteurs locaux. Néanmoins, la procédure doit faire l'objet d'une validation afin de s'assurer de la bonne représentativité du modèle de territoire final. Dans le cadre de cette thèse, nous avons modélisé uniquement les besoins de chauffage, ne prenant pas en comptes les autres usages de l'énergie comme l'eau chaude sanitaire, l'éclairage ou les usages spécifiques de l'électricité. Nous avons également fait le choix de ne pas modéliser le comportement des occupants (on raisonne à occupant neutre). Une com-

paraison en l'état des consommations estimées avec des observations n'auraient pas de sens.

Pour cela, des modèles plus complexes peuvent être utilisés, intégrant tous les usages de l'énergie et les composantes comportementales. L'utilisation des données de consommation agrégées, fournies par les gestionnaires de réseau, est par exemple une piste intéressante. C'est d'autant plus vrai que la résolution des données fournies est amenée à s'affiner dans les années à venir, permettant une validation à une échelle fine. Le laboratoire PERSEE travaille sur ces thématiques : le projet MOSAIC, en collaboration avec Enedis, explore la question de l'utilisation des grandes bases de données pour la modélisation [57]. D'autre part, une thèse en cours au centre CES des Mines ParisTech porte sur la validation de la simulation territoriale, et notamment de l'inférence des données d'entrée pour DIMOSIM.

- La procédure d'inférence des caractéristiques thermiques présentée dans la Section 2.3.3 et l'Annexe D est fortement contrainte par la taille réduite de l'échantillon servant à l'inférence, issu de l'enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie (PHEBUS). En effet, cette enquête contient quelques milliers de bâtiments, dont la réelle représentativité du parc français pose question, notamment sur les différences de procédés de construction propres aux différentes régions, climats, etc. Il semble également compromis que la diversité du parc puisse être représentée par un échantillon si faible. Aussi, cette enquête datant de 2013, les caractéristiques des bâtiments les plus récents ne sont pas connues.

Plusieurs alternatives à l'utilisation de cette enquête ponctuelle peuvent être imaginées.

- Enquête(s) ponctuelle(s) : La réalisation d'une nouvelle enquête ponctuelle du même type, menée sur un nombre plus important de bâtiments, pour apporter une meilleure connaissance de l'état du parc français, car plus fournie et plus actuelle. Dans un cadre plus local, des enquêtes équivalents menées sur une zone précise peuvent favoriser la représentation d'un contexte particulier.
- Base DPE : L'ensemble des DPEs réalisés en France est désormais accessible à tous (sous une forme anonymisée et non-localisés). Ces diagnostics précis (s'ils ne sont pas établis sur factures) constituent une source intéressante pour étudier l'état du parc dans le détail. Ils sont obligatoires lors de la vente d'un bien et pourraient être généralisés dans le futur, ce qui laisse augurer une croissance du nombre de données et *de facto* de leur représentativité du parc national.
- *Crowdsourcing* : Dans le cadre d'une plateforme mise en place par des acteurs territoriaux (du type de la plateforme SHAPE), une approche participative peut permettre de collecter des données utiles à la modélisation. Les administrés du territoire pourraient fournir des informations sur les performances énergétiques de leurs logements, sur la base du volontariat, et permettre d'améliorer la fiabilité

du modèle de territoire.

- Le modèle de consommation énergétique du territoire peut être approfondi et amélioré. On peut notamment penser à une intégration des pertes par ponts thermiques qui seraient impactés différemment par une rénovation thermique par l'intérieur ou l'extérieur. L'ajout d'une modélisation des usages de climatisation semble également être une piste de travail intéressante. En effet, la thématique du confort d'été est au coeur de la problématique de réhabilitation du bâtiment, et penser la rénovation uniquement par rapport aux besoins de chauffage fait l'impasse sur un pan crucial de la rénovation.
- Dans le cadre de ce travail de recherche, seule la phase d'usage est considérée lors de l'optimisation, faisant ainsi l'impasse sur l'énergie et les émissions lors de la construction et la fin de vie. La prise en compte du cycle de vie complet des solutions techniques mises en œuvre est un point fondamental à approfondir. À titre d'exemple, si l'isolant PSE, bien que plus économique, présente un bilan carbone potentiellement moins favorable que celui de la laine de bois, plus onéreuse. Ainsi, il nous semble nécessaire d'intégrer une analyse de cycle de vie des mesures de rénovation énergétique dans l'outil.
- Nous avons fait le choix de concentrer les travaux de thèse sur la thématique du bâtiment résidentiel, et plus particulièrement d'étudier les consommations de chauffage. Quatre perspectives peuvent être identifiées :
 - Autres secteurs : Il est important de considérer d'autres secteurs également consommateurs de chauffage, comme le secteur tertiaire. La modélisation de la consommation de ce secteur représente un vrai challenge, notamment du fait de la grande variété des acteurs et de la faible disponibilité des données concernant leurs usages [108]. Une modélisation dédiée pourrait être développée et intégrée dans l'outil.
 - Autres usages de l'énergie : D'autres usages sont consommateurs d'énergie. L'eau chaude sanitaire représente une part non négligeable des consommations (environ 15%). Si le potentiel de réduction du besoin d'ECS est plus limité que celui de chauffage, l'usage de systèmes performants permet de réelles économies. Aussi, l'utilisation de systèmes combinant le chauffage et la production d'ECS permet de réduire les coûts.
 - Réseaux de chaleur : La thématique de réseaux de chaleur est très complexe, que ce soit concernant la création d'un nouveau réseau ou le raccordement à un réseau existant. Dans le cadre de cette thèse, les réseaux de chaleur ne sont pas proposés parmi les systèmes disponibles pour la rénovation. Cependant, ces réseaux permettent de mutualiser les coûts et utilisent souvent des combustibles peu émetteurs de GES. De plus, la réflexion sur la mise en place d'un réseau de chaleur doit être faite à la construction d'un quartier ou conjointement à la

rénovation thermique des bâtiments. L'intégration de ce levier comme option de rénovation constitue donc une piste de recherche intéressante.

- PAC géothermiques : Nous avons fait le choix de modéliser uniquement les pompes à chaleur aérothermiques, notamment du fait des chiffres de vente actuels. Les PACs géothermiques sont plus coûteuses mais également plus performantes que leurs homologues aérothermiques. Le potentiel de production dépend fortement de la nature du sol et la publication récente des cartes vectorisées de nature du sol par le BRGM ouvre la voie à des estimations de potentiel à grande échelle. Néanmoins, la modélisation pour une mise en œuvre massive représente un problème complexe, avec des problématiques de compétitions entre puits voisins [109, 110].
- Plus globalement, la transition énergétique s'articule autour de nombreux axes et la rénovation énergétique des bâtiments n'en constitue qu'un volet. Dans l'optique d'une approche intégrée, les territoires ne peuvent faire l'impasse sur les nombreuses autres thématiques en lien avec la transition énergétique. Il est important d'étoffer l'outil initié dans cette thèse avec des modélisations dédiées des autres leviers techniques. On observe notamment que la démarche que nous avons développée dans cette thèse est relativement générique. L'approche peut se résumer en trois temps : (1) modélisation du territoire, (2) modélisation des leviers et (3) optimisation. On peut donc imaginer étendre la méthode développée à de nouveaux axes en vue d'une approche intégrée d'aide à la planification énergétique. Parmi les axes, on peut identifier :
 - Production renouvelable : Les territoires intègrent souvent la production renouvelable parmi leurs objectifs en lien avec la transition énergétique. L'intégration d'une modélisation des moyens de production décentralisés dans la méthode établie semble alors une perspective majeure. Cette production peut prendre la forme d'électricité renouvelable, de biogaz ou de chaleur. L'analyse des arbitrages entre les différents leviers sera alors encore plus pertinente.
 - Réseaux électriques : Comme entrevu dans les analyses esquissées dans le Chapitre 5, la thématique des réseaux électriques pourrait alors occuper une place majeure dans de futurs travaux. Des modèles d'impact des leviers suivants sur le dimensionnement du réseau de distribution pourront être intégrés : l'installation de moyens de production [111] ; le remplacement des systèmes de chauffage ; l'utilisation de stockage de l'énergie électrique par le biais de systèmes de batteries voire de moyens de stockage hydraulique au sein des territoires (des micro-STEP [112]) ; la pénétration des véhicules électriques.
 - Transport : Le secteur du transport est celui qui émet le plus de CO₂, justifiant le développement d'une modélisation de la consommation et des émissions liées au transport intégrée à l'outil. La prise en compte des contraintes réseau induites par la mobilité électrique pourra alors faire l'objet d'une attention particulière.

- Autres vecteurs énergétiques : De nouveaux vecteurs énergétiques émergent au sein de la communauté scientifique et civile afin de répondre au défi climatique, comme par exemple la filière hydrogène. Leur intégration dans un outil d'optimisation permettra a terme d'identifier le rôle que peuvent jouer chaque technologie, chaque vecteur, dans une transition énergétique complexe.
- Autres secteurs d'activités : Les secteurs industriels ou agricole peuvent eux aussi faire l'objet d'une modélisation dédiée.
- La rapidité des calculs n'a pas été une priorité lors du développement de la thèse. Ainsi, si nous avons cherché à établir une méthode fonctionnelle en grandes dimensions, il semble possible d'améliorer sensiblement les performances de l'outil. Pour cela, une parallélisation des calculs ou l'utilisation d'algorithmes heuristiques sont des pistes qu'il semble opportun de considérer (certaines ont d'ailleurs été amorcées en Sec. 4.4). Si, comme suggérés dans le point précédent, de nouveaux axes de la transition venaient à être intégrés, une amélioration des performances de calcul pourrait s'avérer doute nécessaire.
- D'un point de vue méthodologique, le Chapitre 1 avait permis d'identifier la proposition de plusieurs solutions, sous forme d'alternatives, à un même problème de politique publique comme une option intéressante. Si la comparaison de plusieurs stratégies pour répondre à un même problème global présenté dans le Chapitre 5 constitue une première approche, l'approfondissement de méthodes de générations d'alternatives semble pertinent. Si elle est limitée lorsque l'on considère uniquement deux leviers (rénovation thermique et remplacement des systèmes), cette analyse prendrait tout son sens pour réaliser différents arbitrages entre la production renouvelable et la rénovation par exemple.
- Le Chapitre 5 présente plusieurs cas d'études reposant sur la méthode développée dans la thèse, et des pistes ont déjà été apportées pour pousser plus loin chacune de ces analyses. Néanmoins, quelques pistes supplémentaires peuvent être mentionnées.
 - Étude paramétrique : La sensibilité de l'activation des différents leviers aux différentes typologies de territoire, aux contextes climatiques et d'urbanisme, à leur état énergétique initial ou au niveau d'exigence des contraintes *macro* permettrait de mieux comprendre les déterminants d'une politique énergétique adaptée. De telles analyses pourraient permettre d'identifier des rénovations à privilégier *a priori* pour certains types de bâtiments, ou certains types de territoires.
 - Analyse à l'échelle France : Une analyse des mesures de rénovation énergétique pourrait être menée au niveau national. Une telle étude permettrait d'estimer le coût des travaux nécessaires pour atteindre des objectifs nationaux, mais aussi d'identifier les leviers les plus rentables à activer. Pour cela, la modélisation d'un ensemble de bâtiments restreint représentatif de la diversité du parc français

s'avère nécessaire. La base PHEBUS pourrait alors en constituer une première représentation.

- Les modèles de coûts d'investissements présentés dans le Chapitre 3 ne prennent pas en compte les éventuelles aides et subventions qui peuvent être obtenues auprès des différents organismes publics (état, régions, etc.). Dès lors, une perspective intéressante réside dans la modélisation des schémas de subvention et dans l'analyse de l'impact de différents schémas sur les leviers activés et sur les économies d'énergie et d'émissions de GES.
- Les durées de vies choisies pour les solutions techniques, rénovation thermique comme systèmes de chauffage, sont relativement optimistes. Une analyse de l'évolution des solutions activées en fonction de la durée de vie de chacun des systèmes peut permettre d'estimer l'impact de ce paramètre.

En résumé, si cette thèse a posé les bases d'une méthode d'optimisation adaptée à l'optimisation de mesures de transition énergétique territoriale, de nombreuses améliorations peuvent encore y être apportées, afin d'offrir aux preneurs de décision des outils pertinents, complets et neutres leur permettant de réaliser les choix appropriés.

Bibliographie

- [1] R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ, J. A. Church, L. Clarke, Q. Dahe, P. Dasgupta, N. K. Dubash, O. Edenhofer, I. Elgizouli, C. B. Field, P. Forster, P. Friedlingstein, J. Fuglestvedt, L. Gomez-Echeverri, S. Hallegatte, G. Hegerl, M. Howden, K. Jiang, B. Jimenez Cisneroz, V. Kattsov, H. Lee, K. J. Mach, J. Marotzke, M. D. Mastrandrea, L. Meyer, J. Minx, Y. Mulugetta, K. O'Brien, M. Oppenheimer, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, G.-K. Plattner, Hans-Otto Pörtner, S. B. Power, B. Preston, N. H. Ravindranath, A. Reisinger, K. Riahi, M. Rusticucci, R. Scholes, K. Seyboth, Y. Sokona, R. Stavins, T. F. Stocker, P. Tschakert, D. van Vuuren, and J.-P. van Ypserle. *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
- [2] Conseil de l'Union européenne Parlement européen. Directive 2009/28/ce du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/ce et 2003/30/ce (texte présentant de l'intérêt pour l'eee). Technical report, Bruxelles, 2009.
- [3] Conseil de l'Union européenne Parlement européen. Décision 406/2009/ce du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative à l'effort à fournir par les États membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la communauté en matière de réduction de ces émissions jusqu'en 2020. Technical report, Bruxelles, 2009.
- [4] Conseil de l'Union européenne Parlement européen. Directive 2012/27/ue du parlement européen et du conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/ce et 2010/30/ue et abrogeant les directives 2004/8/ce et 2006/32/ce (texte présentant de l'intérêt pour l'eee). Technical report, Bruxelles, 2012.
- [5] Secrétariat général du conseil. Conclusions du conseil européen euco 169/14. Technical report, Conseil Européen, Bruxelles, 2014.
- [6] M. Richard. Quelle gouvernance territoriale pour la transition énergétique ? Technical report, Réseau action climat France, 2013. URL <https://docplayer.fr/731093-Quelle-gouvernance-territoriale-pour-la-transition-energetique>.

- html.
- [7] Marie Boyette. Transition énergétique et réforme territoriale en france. quel lien, quelles opportunités ? Technical report, Office franco-allemand pour la transition énergétique, March 2016.
 - [8] S. Cajot, M. Peter, J.-M. Bahu, F. Guignet, A. Koch, and F. Maréchal. Obstacles in energy planning at the urban scale. *Sustainable Cities and Society*, 30 :223–236, April 2017. , 10.1016/j.scs.2017.02.003.
 - [9] Atom Mirakyan and Roland De Guio. Integrated energy planning in cities and territories : A review of methods and tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22 :289–297, 2013. , 10.1016/j.rser.2013.01.033.
 - [10] Tarja Hakkinen, Samo Gostik, and Nursat Jung. Barriers for energy-efficient refurbishment at district level. In *World Sustainable Built Environment Conference 2017 Hong Kong*. Hong Kong.
 - [11] Citepa. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en france – format secten. Technical report, Juillet 2019.
 - [12] Conseil de l’Union européenne Parlement européen. Directive 2007/2/ce du parlement européen et du conseil du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d’information géographique dans la communauté européenne (inspire). Technical report, Bruxelles, 2007.
 - [13] STEP : Synergies pour la transition énergétique par la Planification. Les données énergétiques territoriales pour la planification et l’action énergie climat. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/donnees_energetiques_territoriales_pour_planification_et_action_energie_climat.pdf, 2017.
 - [14] La france de nouveau sur le podium de l’open data en 2019. <https://www.etalab.gouv.fr/la-france-de-nouveau-sur-le-podium-de-lopen-data-en-2019>. Accessed : 2020-03-30.
 - [15] Alex Nutkiewicz, Zheng Yang, and Rishee K. Jain. Data-driven Urban Energy Simulation (DUE-S) : A framework for integrating engineering simulation and machine learning methods in a multi-scale urban energy modeling workflow. *Applied Energy*, 225(May) :1176–1189, 2018. , 10.1016/j.apenergy.2018.05.023.
 - [16] J. Terrados, G. Almonacid, and P. Pérez-Higueras. Proposal for a combined methodology for renewable energy planning. Application to a Spanish region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8) :2022–2030, 2009. , 10.1016/j.rser.2009.01.025.
 - [17] Vangelis Marinakis, Haris Doukas, Panos Xidonas, and Constantin Zopounidis. Multicriteria decision support in local energy planning : An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan. *Omega (United Kingdom)*, 69 :1–16, 2017. , 10.1016/j.omega.2016.07.005.
 - [18] Ana Rita Neves, Vítor Leal, and João Carlos Lourenço. A methodology for sustainable

- and inclusive local energy planning. *Sustainable Cities and Society*, 17 :110–121, 2015. , 10.1016/j.scs.2015.04.005.
- [19] J. Rager, D. Rebeix, F. Maréchal, G. Cherix, and M. Capezzali. Meu : An urban energy management tool for communities and multi-energy utilities. In *CISBAT*, 2013.
- [20] C. Heaps. *Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system*. Domerville, MA, USA : Stockholm Environment Institute, 2016.
- [21] *EnergyPlus : Energy Simulation Software*. USA Department of Energy, 2012.
- [22] *EnergyPLAN. Advanced energy systems analysis computer model*. Aalborg : Sustainable Energy Planning Research group., n.d.
- [23] N. M. J. P van Beeck. Classification of Energy Models. *FEW Research Memorandum*, 777(May) :25, 1999.
- [24] Ravita D. Prasad, R. C. Bansal, and Atul Raturi. Multi-faceted energy planning : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 :686–699, 2014. , 10.1016/j.rser.2014.07.021.
- [25] Ana Rita Neves. *Decision Support Methodology for Local Sustainable Energy Planning*. PhD thesis, University of Porto, 2012.
- [26] Pengfei Jie, Fenghe Zhang, Zhou Fang, Hongbo Wang, and Yunfeng Zhao. Optimizing the insulation thickness of walls and roofs of existing buildings based on primary energy consumption, global cost and pollutant emissions. *Energy*, 159 :1132–1147, 2018. , 10.1016/j.energy.2018.06.179.
- [27] Amirhosein Jafari and Vanessa Valentin. An optimization framework for building energy retrofits decision-making. *Building and Environment*, 115 :118–129, 2017. , 10.1016/j.buildenv.2017.01.020.
- [28] Yong He, Nuo Liao, Jiajing Bi, and Liwei Guo. Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint. *Journal of Cleaner Production*, 215 :1078–1094, 2019. , 10.1016/j.jclepro.2019.01.119.
- [29] Hyojoo Son and Changwan Kim. Evolutionary many-objective optimization for retrofit planning in public buildings : A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 190 :403–410, 2018. , 10.1016/j.jclepro.2018.04.102.
- [30] Patricia Edith Camporeale, María del Pilar Mercader Moyano, and Jorge Daniel Czajkowski. Multi-objective optimisation model : A housing block retrofit in Seville. *Energy and Buildings*, 153(2017) :476–484, 2017. , 10.1016/j.enbuild.2017.08.023.
- [31] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Claudio De Stasio, Gerardo Maria Mauro, and Giuseppe Peter Vanoli. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. *Energy and Buildings*, 88 :78–90, 2015. , 10.1016/j.enbuild.2014.11.058.
- [32] Ehsan Asadi, Manuel Gameiro da Silva, Carlos Henggeler Antunes, and Luís Dias.

- Multi-objective optimization for building retrofit strategies : A model and an application. *Energy and Buildings*, 44 :81–87, jan 2012. , 10.1016/j.enbuild.2011.10.016.
- [33] Yuling Fan and Xiaohua Xia. A multi-objective optimization model for energy-efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance. *Applied Energy*, 189 :327–335, mar 2017. , 10.1016/j.apenergy.2016.12.077.
- [34] Jon C. Liebman. Some Simple-Minded Observations on the Role of Optimization in Public Systems Decision-Making. *Interfaces*, 6(4) :102–108, aug 1976. , 10.1287/inte.6.4.102.
- [35] E. Downey Brill, Shouu-Yuh -Y Chang, and Lewis D. Hopkins. Use of mathematical models to generate alternative solutions to water resources planning problems. *Water Resources Research*, 18(1) :58–64, 1982. , 10.1029/WR018i001p00058.
- [36] Evelina Trutnevyte. Does cost optimization approximate the real-world energy transition? *Energy*, 106 :182–193, 2016. , 10.1016/j.energy.2016.03.038.
- [37] Philip Voll, Mark Jennings, Maike Hennen, Nilay Shah, and André Bardow. The optimum is not enough : A near-optimal solution paradigm for energy systems synthesis. *Energy*, 82 :446–456, 2015. , 10.1016/j.energy.2015.01.055.
- [38] Fabian Levihn. On the problem of optimizing through least cost per unit, when costs are negative : Implications for cost curves and the definition of economic efficiency. *Energy*, 114 :1155–1163, 2016. , 10.1016/j.energy.2016.08.089.
- [39] Alain Haurie. MARKAL-LITE An Energy / Environment Model to Assess Urban Sustainable. *Structure*, pages 1–35, 2001.
- [40] Uwe Remme, Gary A. Goldstein, Ulrich Schellmann, Christoph, and Schlenzig1. Mesap/times - advanced decision support for energy and environmental planning, 1984.
- [41] Operations Research, editor. *Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models*, number support, 2001.
- [42] F. Pietrapertosa, C. Cosmi, M. Macchiato, G. Marmo, and M. Salvia. Comprehensive modelling for approaching the Kyoto targets on a local scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(3) :249–270, 2003. , 10.1016/S1364-0321(03)00041-8.
- [43] G. Comodi, L. Cioccolanti, and M. Gargiulo. Municipal scale scenario : Analysis of an Italian seaside town with MarkAL-TIMES. *Energy Policy*, 41 :303–315, 2012. , 10.1016/j.enpol.2011.10.049.
- [44] Stanislav E. Shmelev and Jeroen C.J.M. Van Den Bergh. Optimal diversity of renewable energy alternatives under multiple criteria : An application to the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60 :679–691, 2016. , 10.1016/j.rser.2016.01.100.
- [45] Zhou Wu, Xiaohua Xia, and Bo Wang. Improving building energy efficiency by multiobjective neighborhood field optimization. *Energy and Buildings*, 87 :45–56, 2015. , 10.1016/j.enbuild.2014.10.079.
- [46] M. Kavgic, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, and

- M. Djurovic-Petrovic. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7) :1683–1697, jul 2010. , 10.1016/j.buildenv.2010.01.021.
- [47] Zishuo Huang, Hang Yu, Zhenwei Peng, and Mei Zhao. Methods and tools for community energy planning : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 : 1335–1348, feb 2015. , 10.1016/j.rser.2014.11.042.
- [48] Loïc Frayssinet, Lucie Merlier, Frédéric Kuznik, Jean Luc Hubert, Maya Milliez, and Jean Jacques Roux. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale, 2018.
- [49] Peter Riederer, Vincent Partenay, Nicolas Perez, Christophe Nocito, Romain Trigance, and Thierry Guiot. Development of a simulation platform for the evaluation of district energy system performances. In *Proceedings of BS2015 : Fifteenth International IBPSA Conference*, Hyderabad, India, 2015.
- [50] Lucie Lefort. Validation d’outils de simulation énergétique urbaine. Master thesis, 2019.
- [51] Morten Brøgger and Kim Bjarne Wittchen. Estimating the energy-saving potential in national building stocks – a methodology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :1489–1496, feb 2018. , 10.1016/j.rser.2017.05.239.
- [52] Tianzhen Hong, Yixing Chen, Sang Hoon Lee, and Mary Ann Piette. Citybes : A web-based platform to support city-scale building energy efficiency. In *5th International Urban Computing Workshop, San Francisco, USA*, 2016.
- [53] Jimeno A. Fonseca, Thuy An Nguyen, Arno Schlueter, and Francois Marechal. City Energy Analyst (CEA) : Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 2016. , 10.1016/j.enbuild.2015.11.055.
- [54] Jérôme Henri Kämpf. *On the modelling and optimisation of urban energy fluxes*. PhD thesis, Lausanne, 2009.
- [55] Luc Girardin, François Marechal, Matthias Dubuis, Nicole Calame-Darbellay, and Daniel Favrat. EnerGis : A geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas. *Energy*, 35(2) :830–840, feb 2010. , 10.1016/j.energy.2009.08.018.
- [56] Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, Damien Casetta, and Dominique Marchio. Smart-e : a tool for energy demand simulation and optimization at the city scale. In *14th International Conference of IBPSA, Hyderabad, India*, 2015.
- [57] Thibaut Barbier. *Electricity demand modeling using large scale databases to simulate different prospective scenarios*. Theses, PSL Research University, December 2017.
- [58] Christoph Reinhart, Timur Dogan, J Alstan Jakubiec, Tarek Rakha, and Andrew Sang. Umi-an urban simulation environment for building energy use, daylighting and

- walkability. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France*, 2013.
- [59] Eui-Jong Kim, Xi He, Jean-Jacques Roux, Kévin Johannes, and Frédéric Kuznik. Fast and accurate district heating and cooling energy demand and load calculations using reduced-order modelling. *Applied Energy*, 238 :963 – 971, 2019. ISSN 0306-2619. , 10.1016/j.apenergy.2019.01.183. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919301771>.
- [60] Loic Frayssinet, Lucie Merlier, Damien David, Jean-Jacques Roux, and Frédéric Kuznik. Simulating the energy loads at the district scale : Introduction to a dedicated platform. In *16th IBPSA Conference*, pages 1467–1474, 09 2019. , 10.26868/25222708.2019.210819.
- [61] Nicolas Perez. *Contribution à la conception énergétique de quartiers : simulation, optimisation et aide à la décision*. PhD thesis, Université de La Rochelle, 2018.
- [62] Enora Garreau. *Développement d’une méthodologie d’analyse de modèles parcimonieux pour la simulation énergétique bottom-up à échelle de territoires*. PhD thesis, MINES ParisTech, Université PSL, 2020. <http://www.theses.fr/s193373>.
- [63] Légifrance. *Méthode 3CL-DPE v1.3*. 2012.
- [64] Chang Su, Hatem Madani, and Bjørn Palm. Building heating solutions in china : A spatial techno-economic and environmental analysis. *Energy Conversion and Management*, 179 :201–218, jan 2019. , 10.1016/j.enconman.2018.10.062.
- [65] ASHRAE. International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM, 2001.
- [66] T. Kusuda and P. R. Achenbach. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the united states. Technical report, NBS Reports, 1965.
- [67] Georgios Florides and Soteris Kalogirou. Annual ground temperature measurements at various depths. In *CLIMA 2005*, Lausanne, Switzerland, 2005.
- [68] Enora Garreau, Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Vincent Partenay, and Dominique Marchio. Urban-scale energy simulation : A development of a novel method for parsimonious modelling-The example of solar shading model calculation Urban-scale energy simulation : A development of a novel method for parsimonious modelling-The example of solar shading. In *BS2019*, Rome, Italy, 2019.
- [69] Bryan Eisenhower, Zheng O’Neill, Satish Narayanan, Vladimir A. Fonoberov, and Igor Mezić. A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, 2012. , 10.1016/j.enbuild.2011.12.001.
- [70] Weili Xu, Adrian Chong, Omer T. Karaguzel, and Khee Poh Lam. Improving evolutionary algorithm performance for integer type multi-objective building system design optimization. *Energy and Buildings*, 2016. , 10.1016/j.enbuild.2016.06.043.
- [71] Torben Østergård, Rasmus Lund Jensen, and Steffen Enersen Maagaard. A compa-

- risson of six metamodeling techniques applied to building performance simulations. *Applied Energy*, 2018. , 10.1016/j.apenergy.2017.10.102.
- [72] Vasileios Bonaros, John Gelegenis, Douglas Harris, George Giannakidis, and Kostas Zervas. Analysis of the Energy and Cost Savings Caused By Using Condensing Boilers for Heating Dwellings in Greece. *International Conference on Applied Energy ICAE 2013*, (July), 2013. , 10.13140/RG.2.1.2731.4406.
- [73] Floriane Mermoud, Anthony Haroutunian, Jérôme Faessler, and Bernard Lachal. Impact of load variations on wood boiler efficiency and emissions : in-situ monitoring of two boilers (2 mw and 0.65 mw) supplying a district heating system. *Archives des sciences*, 68 :27–38, 2015.
- [74] Baijia Huang, Peter Martin Skov Hansen, Jan Viegand, Philippe Riviere, Hassane Asloune, and Florian Dittmann. Air conditioners and comfort fans, Review of Regulation 206/2012 and 626/2011 Final report. Research report, European Commission, DG Energy, May 2018. URL <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01796759>.
- [75] Marek Miara, Danny Günther, Robert Langner, and Sebastian Helmling. Efficiency of heat pumps in real operating conditions – results of three monitoring campaigns in germany. *REHVA Journal*, 2014. URL https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2014/RJ_issue_5/P.07/07-12_RJ1405_WEB.pdf.
- [76] Marek Miara, Danny Günther, Robert Langner, Sebastian Helmling, and Jeannette Wapler. 10 years of heat pumps monitoring in Germany. Outcomes of several monitoring campaigns. From low-energy houses to un-retrofitted single-family dwellings. In *12th IEA Heat Pump Conference*, 2017.
- [77] Oliver Ruhnau, Lion Hirth, and Aaron Praktijnjo. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. *Nature Scientific data*, 6, 2019. , 10.1038/s41597-019-0199-y.
- [78] Emily Barrett, Conrad Eustis, and Robert B. Bass. A Dual-Heat-Pump Residential Heating System for Shaping Electric Utility Load. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 5(2) :56–64, 2018. , 10.1109/jpets.2018.2810783.
- [79] Bruno Filliard, Alain Guiavarch, and Bruno Peuportier. Performance evaluation of an air-to-air heat pump coupled with temperate air-sources integrated into a dwelling. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, pages 2266–2273, 2009.
- [80] Francesco Madonna and Francesca Bazzocchi. Annual performances of reversible air-to-water heat pumps in small residential buildings. *Energy and Buildings*, 2013. , 10.1016/j.enbuild.2013.06.016.
- [81] Claudia Naldi, Matteo Dongellini, and Gian Luca Morini. Climate influence on seasonal performances of air-to-water heat pumps for heating. 2015. , 10.1016/j.egypro.2015.12.064.

- [82] Ernesto Bettanini, Alessio Gastaldello, and Luigi Schibuola. Simplified models to simulate part load performances of air conditioning equipments. *Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands August 11-14, 2003*, pages 107–114, 2003.
- [83] Raphael Wu, Georgios Mavromatidis, Kristina Orehounig, and Jan Carmeliet. Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community. *Applied Energy*, 190 :634–649, 2017. , 10.1016/j.apenergy.2016.12.161.
- [84] Gerardo Maria Mauro, Mohamed Hamdy, Giuseppe Peter Vanoli, Nicola Bianco, and Jan L.M. Hensen. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. *Energy and Buildings*, 107 :456–478, 2015. , 10.1016/j.enbuild.2015.08.044.
- [85] ADEME. Base carbone, 2019. Données provenant du site dédié <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil>.
- [86] Walter Murray and Kien-Ming Ng. An algorithm for nonlinear optimization problems with binary variables. *Computational Optimization and Applications*, 47(2) :257–288, Oct 2010. , 10.1007/s10589-008-9218-1.
- [87] Pietro Belotti, Christian Kirches, Sven Leyffer, Jeff Linderoth, James Luedtke, and Ashutosh Mahajan. Mixed-integer nonlinear optimization. *Acta Numerica*, 22 :1–131, 2013. , 10.1017/S0962492913000032.
- [88] Raymond Hemmecke, Matthias Köppe, Jon Lee, and Robert Weismantel. *Nonlinear Integer Programming*, pages 561–618. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. , 10.1007/978-3-540-68279-0_15.
- [89] Christoph Buchheim and Laura Klein. Combinatorial optimization with one quadratic term : Spanning trees and forests. *Discrete Applied Mathematics*, 177 :34 – 52, 2014. , 10.1016/j.dam.2014.05.031.
- [90] Michael R Garey and David S Johnson. *Computers and intractability*, volume 174. freeman San Francisco, 1979.
- [91] Bing Han, Jimmy Leblet, and Gwendal Simon. Hard multidimensional multiple choice knapsack problems, an empirical study. 37(1) :172–181, 2009. , 10.1016/j.cor.2009.04.006i.
- [92] Henrique Becker and Luciana S Buriol. An empirical analysis of exact algorithms for the unbounded knapsack problem. 2019. , 10.1016/j.ejor.2019.02.011.
- [93] Matthew Galati. *Decomposition Methods for Integer Programming : Dissertation*. 2010.
- [94] Isma Dahmani, Mhand Hifi, and Lei Wu. An exact decomposition algorithm for the generalized knapsack sharing problem. *European Journal of Operational Research*, 2016. , 10.1016/j.ejor.2016.02.009.
- [95] Mauro Dell’Amico, Maxence Delorme, Manuel Iori, and Silvano Martello. Mathematical models and decomposition methods for the multiple knapsack problem. *European Journal of Operational Research*, 2019. , 10.1016/j.ejor.2018.10.043.

- [96] J.E. Chu, P.C. Beasley. A Genetic Algorithm for the Multidimensional Knapsack Problem. *Journal of Heuristics*, 4 :63–86, 1998. , 10.1023/A:1009642405419.
- [97] Shubhashis K Shil, A B M Sarowar Sattar, and A B M Nasiruzzaman. Solving Multidimensional Multiple Choice Knapsack Problem By Genetic Algorithm & Measuring Its Performance. (Icecc) :484–486, 2008.
- [98] Qian Zhou and Wenjian Luo. A novel multi-population genetic algorithm for multiple-choice multidimensional knapsack problems. In *Advances in Computation and Intelligence*, volume 6382 LNCS, pages 148–157. Springer, Berlin, Heidelberg, oct 2010. , 10.1007/978-3-642-16493-4_16.
- [99] RStudio Team. *RStudio : Integrated Development Environment for R*. RStudio, Inc., Boston, MA, 2015. URL <http://www.rstudio.com/>.
- [100] R Core Team. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013. URL <http://www.R-project.org/>. ISBN 3-900051-07-0.
- [101] IBM. Ibm ilog cplex optimizer, 2010. URL <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.
- [102] Yunseok Lee, Pierre Boisson, Mathieu Rivallain, and Olivier Baverel. Segmentation d’un parc virtuel de bâtiments par clustering pour la rénovation énergétique. Technical report, 2018.
- [103] Effinergie : Le référentiel pour la rénovation. <https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/effinergie-renovation>. Consulté le 10/04/2020.
- [104] Seddik Yassine Abdelouadoud. *Integration of renewable energies in the electricity distribution system*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, December 2014.
- [105] Etta Grover silva. *Optimization of the planning and operations of electric distribution grids in the context of high renewable energy penetration*. PhD thesis, PSL Research University, December 2017. URL <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01899752>.
- [106] Antoine Rogeau, Robin Girard, Yassine Abdelouadoud, and Georges Kariniotakis. Retrofitting a building stock : Modeling and optimization for decision aiding at territory scale. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1343, 2019. , 10.1088/1742-6596/1343/1/012029.
- [107] Antoine Rogeau, Robin Girard, Y Abdelouadoud, Mathieu Thorel, and Georges Kariniotakis. Joint optimization of building-envelope and heating-system retrofits at territory scale to enhance decision-aiding. *Applied Energy*, 264 :114639, 2020. , 10.1016/j.apenergy.2020.114639.
- [108] Huu Tam Nguyen, Fabrice Decellas, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, and Dominique Marchio. Tertiary building stock modeling : Area determination by fusion of different datasets Tertiary building stock modeling : Area determination

- by fusion of different datasets. *Journal of Physics : Conference Series*, 1343, 2019. , 10.1088/1742-6596/1343/1/012017. URL <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-02371957>.
- [109] Ioan David, Camelia Stefanescu, and Ioan Vlad. Efficiency assessment of ground-source heat pumps in comparison with classical heating system. In *SGEM 2015 - Renewable energy resources and Clean Technologies*, 06 2015. ISBN 978-649-7105-38-4.
- [110] Maria Letizia Fasci, Alberto Lazzarotto, José Acuna, and Joachim Claesson. Analysis of the thermal interference between ground source heat pump systems in dense neighborhoods. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(8) :1069–1080, 2019. , 10.1080/23744731.2019.1648130.
- [111] Antoine Rogeau, Thibault Barbier, Robin Girard, and Nicolas Kong. Evolution of electrical distribution grid sizing considering self-consumption of local renewable production. In *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, volume 2017, 2017. , 10.1049/oap-cired.2017.1248.
- [112] Antoine Rogeau, Robin Girard, and Georges Kariniotakis. A generic GIS-based method for small Pumped Hydro Energy Storage (PHES) potential evaluation at large scale. *Applied Energy*, 197 :241–253, 2017. , 10.1016/j.apenergy.2017.03.103.

Annexe A

Textes encadrant la planification énergétique locale

Nom du plan	Acronyme	Domaine	Echelle territoriale	Description
Contrat de Plan Etat-Région	CPER	Global	Région	Il définit en chiffres le budget alloué par l'état d'une part et la région de l'autre aux grands projets en lien avec de grandes thématiques : Enseignement-recherche, Transition énergétique, Numérique, Emploi
Plan Climat (Air) Energie Territorial	PC(A)ET	Environnement	Territoire quelconque (intercommunal)	Document contenant : Un bilan des Émissions de Gaz à effet de Serre du territoire, des objectifs stratégiques et opérationnels et des mesures pour atteindre les objectifs, appelées Plan d'Action.
Schéma Régional Climat Air Energie	SRCAE	Environnement	Région	C'est le pendant du PCAET à l'échelle régionale, qui définit les objectifs et les mesures à prendre dans le cadre de la transition énergétique. Des chiffres sont avancés en termes de puissance installées d'EnR notamment, et de nombre de bâtiments à rénover.

Convention des Maires	CoM	Environnement	Territoire	Rassemble des milliers d'autorités locales et régionales, volontairement engagées dans la mise en œuvre des objectifs européens en termes de climat et d'énergie sur leur territoire. Les nouveaux signataires s'engagent désormais à réduire les émissions de CO2 de 40 % au minimum d'ici 2030 et à adopter une approche intégrée visant à atténuer le changement climatique et à s'y adapter.
Territoires à énergie positive pour la croissance verte	TEP-CV	Environnement	Territoire	Territoires ayant signé une convention avec le ministère de l'environnement d'engageant à respecter un certain nombre d'engagements, en termes de réduction de la consommation ou de production ENR. En échange, les territoires perçoivent une aide.
Territoires à énergie positive	TEPOS	Environnement	Territoire	Objectif de couvrir 100% de la consommation par des EnR. Dépend du CLER.
Plan de Protection de l'Atmosphère	PPA	Environnement	Territoire	Définit les objectifs et les mesures permettant de ramener les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur aux valeurs limites réglementaires.
Plans locaux d'urbanisme	PLU	Urbanisme	Communal	Principal document d'urbanisme de planification de l'urbanisme au niveau communal ou intercommunal.
Schéma de Cohérence Territoriale	SCoT	Urbanisme	Territoire intercommunal	Document de planification et d'urbanisme qui définit les grandes orientations d'aménagement pour un territoire donné. Pas d'objectifs clairs sur l'intégration d'EnR, sur la construction des bâtiments, mais des tendances. Contient un « rapport de présentation », un « Projet d'Aménagement et de Développement Durable » (PADD) et un « Document d'Orientation et d'Objectifs » (DOO).

Schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables	S3REnR	Réseau électrique	Région	Définition des mesures à prendre pour adapter le réseau électrique aux objectifs définis dans le SCRAE. Prise en compte de la localisation du potentiel, des investissements à réaliser etc.
Schéma régional de cohérence écologique	SRCE	Environnement	Région	Schéma d'aménagement du territoire et de protection de certaines ressources naturelles (biodiversité, réseau écologique, habitats naturels).
Schéma Régional Eolien	SRE	Eolien	Région	Définition des objectifs en termes de puissance installée et des lieux où installer les centrales.
Plans de déplacement urbains	PDU	Transports	Périmètre de transport urbain	Détermine l'organisation du transport des personnes et des marchandises, la circulation et le stationnement. Tous les modes de transports sont concernés, ce qui se traduit par la mise en place d'actions en faveur des modes de transports alternatifs à la voiture particulière (VP).
Plans départementaux et locaux de l'habitat	PDH et PLH	Logement	Département ou territoire	Document stratégique de programmation qui inclut l'ensemble de la politique locale de l'habitat : parc public et privé, gestion du parc existant et des constructions nouvelles, populations spécifiques.

Annexe B

Inventaire des données utiles à la modélisation territoriale

	Orga- nisme	Base de donnée	Format	Résolu- tion	Couverture	Description	Accès
Energie	ENEDIS / RTE	Caparéseau	CSV Excel		France	Capacités réservées aux EnR par poste source, en accord avec le S3REN	Libre
	ENEDIS	Consommation annuelle	CSV Shapefile	Région Département EPCI Commune IRIS	France	Consommation électriques annuelles agrégées à différentes échelles géographiques	Libre
		Lignes aériennes HTA/BT	Shapefile		France	Représentation des lignes aériennes du réseau HTA/BT de Enedis	Libre
		Postes de transformation	Shapefile		France	Localisation des postes sources et HTA/BT	Libre
	GRDF	Consommation annuelle	CSV Shapefile	IRIS	Territoires couverts par GRDF	Consommation de gaz annuelles agrégées à différentes échelles géographiques	Libre

Energie	Observa- toires régionaux	Consommation production émissions	CSVs	Variable selon l'ob- servatoire	Territoires administrés	Description énergétique des territoires. En particulier, simulation et répartition territoriale des consommations, productions d'électricité et émissions de gaz à effet de serre	Libre
	Habitat						Sur demande
	INSEE	Enquête PHEBUS	CSVs		Représentati- vité France	Photographie des performances énergétiques des résidences principales	
		Enquête logement	SAS7BDAT		Enquête nationale	Complète le recensement en apportant des informations sur les conditions de logement et les dépenses liées à celles-ci	Sur demande
	DGFIP / CEREMA	Fichiers fonciers / MAJIC	ASCIIs	Local fical	France	Fichiers des propriétés bâties, décrivant les locaux de manière précise (année de construction, superficie, nombre de pièces etc.)	Réservé aux collectivités
	ADEME	Enquête TREMI	Excel		Enquête nationale	Informations concernant les opérations de rénovation du bâtiment menées entre 2014 et 2016, notamment en termes de coûts et d'efficacité	Sur demande
	IGN	BD TOPO	Shapefile		France	Modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures, notamment des bâtiments, réseaux routiers et hydrographiques	Restreint aux EPCI, mission de service public...

Socio-économie	INSEE	Recensement	Excel		Couverture France	Description des foyers Français, tant concernant le parc bâti, la composition des foyers ou encore les niveaux d'éducation et/ou les qualifications	Libre
		Enquête emploi du temps	Excel Beyond		France	Cette enquête apporte des informations valorisables sur le comportement des usagers (travail, déplacements, occupations etc.)	Libre
		FiLoSoFi	Excel		France	Ces informations décrivent les revenus au sein d'une maille IRIS, notamment en termes de distribution.	Libre
	WPDA	WPDA	Shapefile		Monde	Informations correspondant aux espaces protégés, ainsi que leur emprise géographique	Libre
Environnement	EEA	CORINE Land Cover	Shapefile	25ha	Europe	Description de l'utilisation des sols sur tout le territoire : zones urbanisées, boisées, agricoles...	Libre
	SoDa (Mines ParisTech)	HelioClim-3	Hdf	~5km	±60° Meteosat	Informations comme l'irradiation sur différents plans et à différents horizons temporels, l'irradiation clear-sky et la nébulosité	Payant (accès privilégié via Mines ParisTech)
	BRGM	Atlas géothermique	PDF	500m	Régions étudiées (15/22)	Décrit le potentiel géothermique des régions, et permet d'identifier si la géothermie est une source de chaleur envisageable	Consultable uniquement

Envir.	NASA	MERRA-2	Hdf	~50km	Monde	Description du vent à 10 et 50m de hauteur, mais aussi de la température. Données de réanalyse	Libre
Autres	IGN / ETALAB	Cadastre	Shapefile		France	Division géographique du territoire en parcelles cadastrales	Libre
	IGN	RGE Alti	ASCII	5m ;1m	France	un Modèle Numérique de Terrain (MNT)	Restreint aux EPCL, mission de service public...

Annexe C

MedPower 2018 : Caractérisation de la consommation électrique

Abstract—This paper participates in the challenging data science opportunity offered by the growing number of databases made available to public institutions. It presents an innovative method to match household-scale databases using address information. The developed algorithm authorizes different matching qualities, depending on the reliability of the link between the paired elements. This work was carried out in collaboration with the French DSO Enedis, which provided valuable customer information that was matched with a national database describing dwellings. The matching algorithm performances are analyzed, and adjustments are proposed to improve the matching quality in urban, suburban and rural contexts. Lastly, two basic characterization analyses were made to highlight the potential of these consolidated databases.

Index Terms—database matching, address matching, building, electricity consumption, characterization, disaggregation

I. INTRODUCTION

In response to growing environmental concerns, public organizations are developing action plans to tackle current trends and initiate a global energy transition. The latter covers several fields, including renewable energy integration, migration from thermal to cleaner transportation systems, power systems operation optimization using smart-grid technologies, and reduction of energy consumption by improving energy efficiency. In order to encourage and facilitate initiatives fostering a cleaner and more sustainable future, a number of organizations, encouraged by legislation, have built energy-related databases, made available to different actors. These databases contain valuable information of interest for carrying out studies and broadening collective knowledge of the energy field.

In addition, combining these databases can often lead to deeper and more complex analyses. To emphasize this point, this paper considers one of the main fields involved in energy transition, namely energy efficiency, through a reduction in energy demand.

With the aim of broadening knowledge of the factors affecting energy consumption, governments and academics carry out characterization studies to understand end-user behavior. Jones et al. [1] reviews studies on this topic, and identifies factors recognized as having an impact on electricity consumption. Huebner et al. [2] quantifies the correlations between

household characteristics and annual electricity demand. The majority of existing works use data harvested from surveys, and so are carried out using a restricted amount of data (less than 1,000 households). This kind of data source, while highly reliable, is difficult to obtain due to the cumbersome collection procedure. To work on larger samples requires taking advantage of the existence of large energy-related databases.

Consequently, this paper introduces the basics of an electricity consumption characterization method based on an individual annual consumption database provided by the French DSO Enedis and a building database covering the whole country. One of the main challenges is to identify the most appropriate way to combine heterogeneous sources of data to obtain a reliable and unified database for characterizing consumption as finely as possible, i.e. at household scale.

The first part of this paper describes the matching algorithm developed to combine two dwelling-scale databases containing address information. Then, the second part presents the results achieved by the matching algorithm on different test datasets. Finally, the third part of this article illustrates the work that can be carried out using data obtained from the matching algorithm, presenting two electricity demand characterization analyses.

II. DESCRIPTION OF THE MATCHING ALGORITHM

Combining information from heterogeneous sources has been a major technical concern for decades. To do so, equivalent information must be identified from both sources, so that the best combination can be found. This task is called the field matching problem and basic approaches are presented by Monge and Elkan [3]. These authors use different matching algorithms relying on basic strings correspondence ratios, i.e. a proportion of the words matched in the two compared strings, or total string distances. Distances between entire address labels have also been used by Dengyue Li [4] while some approaches have split address labels into relevant components (number, street, etc.) to establish a matching ranking, such as presented by Brummet [5]. The three methods mentioned above aim at matching a database to a unique reference field set, e.g. for geocoding purposes, and do not handle multiple matches. To work with consumption and dwelling data at

a disaggregated level, as intended in this paper, specifically requires matching the correct items, even when they share a common address. The developed algorithm considers this issue.

The matching algorithm presented in this paper comprises two steps: the preliminary preparation of the data, and the so-called matching.

A. Preliminary preparation

As expressed in several articles, to achieve reliable address matching, street names must first be cleaned and standardized [3, 4, 5, 6]. Stop words, extra spaces and symbols are removed [3]. Also, recurrent words with different possible orthography are replaced by a standardized equivalent in both data sets using a dictionary (e.g. "AVENUE", "AVE", etc. to "AV").

This matching should be carried out on large data sets (several thousands of elements). For efficient and fast operation, a loop structure for an iterative process should be avoided; the present method proposes to pre-process addresses to generate factor matrices. Address information is split into three categories, corresponding to the city code (CITY), street number (NUMBER) and street name. The latter is sub-split in two, namely the last word of the street name (LAST), and the rest of the street name (STREET). An example of a split is presented in Table I.

TABLE I
EXAMPLE OF SPLIT FOR THE ADDRESS: "1 RUE CLAUDE DAUNESSE, 06152 SOPHIA ANTIPOLIS".

Description	Name	Value
Code of the city	CITY	06152
Formatted first part of the street name	STREET	R CLAUDE
Last word of the street name	LAST	DAUNESSE
Street number	NUMBER	1

This approach, and particularly the split of the street name into two parts, was inspired by the availability of the FANTOIR database in France¹. This file describes all street names per city using a key called FANTOIR, which corresponds to the first eight letters of the last word of the street names. Unlike standard matching methods, where one threshold defining the matching quality has to be set for the whole process, this structure allows to work at different quality levels of matching within the same procedure, from high quality (all factors matched) to low quality (e.g. only CITY and LAST) and with no deterioration from one to the other. Indeed, splitting information and working with factors allows to rapidly build a tree structure (see Fig. 1), achieving different levels of appropriate matching depending on the factors selected. If no database such as FANTOIR is available or can be built, it is also possible to work on whole street names.

The distance between LAST words is calculated using the Optimal String Alignment (OSA), also known as the Damerau-Levenshtein distance. A high similarity is needed between LAST words, allowing a maximum distance of 1 character.

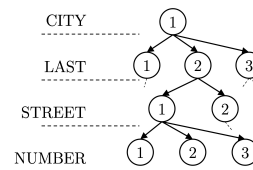


Fig. 1. Tree structure of the data used for the matching - selecting all factors

This is one of the advantages of working with the last word instead of the entire street label. To validate the STREET matching criteria, one common word has to be found in the rest of the street label (if there is only one word in the label, then this criteria is validated). NUMBER and CITY have to match perfectly.

B. Matching of addresses

After this preliminary preparation is performed, the next step is the application of the proposed matching algorithm. The structure of the algorithm is presented in Fig. 2.

- ① Perfect Matching (PM): the first step is to attribute the uniqueness of the CITY, LAST, STREET and NUMBER match, before processing data in which uniqueness or number match are not achieved
- ② Multiple matching at the same NUMBER (NM): a sampling allows to perform pairings; any remaining elements are kept for the next step. The same factors are considered as for the previous step, but uniqueness is no longer required.
- ③ Matching the same STREET (SM): use of the same sampling process.
- ④ Matching the same LAST word (LM): use of the same sampling process.
- ⑤ Some data cannot be matched (NoM).

Both SM and LM present a strong deterioration of the information: the numbers do not correspond between the two paired elements, and the only certainty is that the elements pertain to the same geographical element (street, avenue etc.). Consequently, these matches are only valuable for working at an aggregated level.

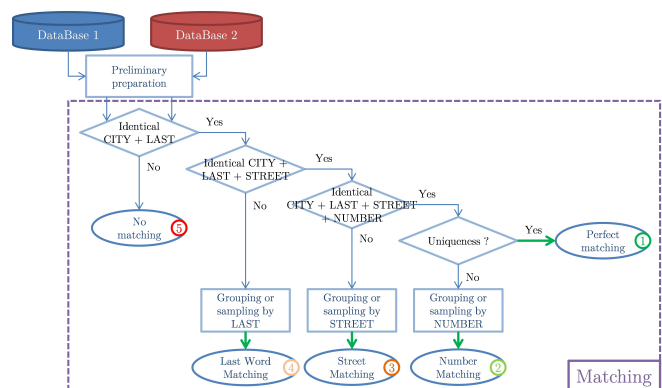


Fig. 2. Structure of the matching algorithm

¹<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/fichier-fantoir-des-voies-et-lieux-dits/>

III. PERFORMANCES OF THE MATCHING ALGORITHM AND IMPROVEMENTS

The above algorithm was employed to match two databases: On the one hand, customer information, containing mainly the contract power, yearly consumption and geographical address, was provided by the main French DSO, Enedis. On the other hand, structural information such as the dwelling area, year of construction, number of rooms and building material, was gathered from national dwelling descriptions, provided by the French Public Finances Directorate. Areas of different sizes were tested to validate the matching algorithm, but also in perspective to the electricity consumption characterization.

A. Performance in an urban area. Study of a city: Brest

The matching algorithm was run first for the city of Brest, France, considering 96,691 clients for a process time of about 400 seconds. Results are presented in Table II.

TABLE II
OCCURRENCES OF QUALITY OF MATCHING, APPLICATION TO BREST.

Step	Quality	Occurrences
1	PM	17,770
2	NM	59,733
3	SM	4,924
4	LM	2,222
5	NoM	12,142

Note that only about 20% of the data match perfectly. Although this figure may seem low at first sight, it is perfectly understandable when considering the structure of Brest, an urban area in which many dwellings are part of collective buildings. Consequently, several elements share the same NUMBER label and cannot be uniquely matched. This observation motivated a deeper analysis of the influence of the study area structure on the quality of matching. For this reason, the next section presents the results of the matching algorithm when applied to a whole county.

B. Performances on different city types. Study of a region: Rhone

The matching process was carried out on the entire French region of Rhone, which represents more than one million French DSO Enedis clients. The results of the matching are presented in Table III.

TABLE III
OCCURRENCES OF MATCHING QUALITY, APPLICATION TO RHONE REGION.

Step	Precision	Occurrences
1	PM	110,723
2	NM	555,663
3	SM	134,487
4	LM	57,799
5	NoM	204,994

While the PM proportion now drops to about 10%, an observation of matching type distributions in the different cities within this region (291 in total) reveals some of the limits of the developed algorithm. Fig. 3 compares the proportions

of MP, NM and SM depending on the number of dwellings in the city.



Fig. 3. Evolution of matching proportions depending on the number of dwellings in the city

One first observation is that very small cities present a majority of SMs. This can be explained by the fact that in very rural areas, addresses have no number but only a place name (called *lieu-dit* in France), and several dwellings often share the same address. Fig. 4 considers this *lieu-dit* specificity. Cities with a significant proportion of each type of matching ($> 30\%$ of the maximum observed proportion) are plotted against the proportion of *lieu-dit* on the x-axis and the proportion Houses vs. Apartment on the y-axis.

Three clear groups appear, from which the following archetypes can be drawn:

- **Urban context:** few houses and *lieu-dit*, present a high proportion of NMs.
- **Suburban context:** majority of houses and few *lieu-dit*, present the highest proportion of PMs.
- **Rural context:** majority of houses and *lieu-dit*, the SMs predominate.

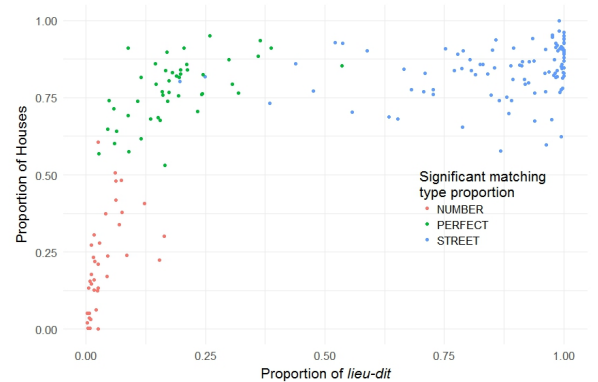


Fig. 4. Representation of the most significant matching type, i.e. proportion in city of over 30% of the maximum observed proportion, depending on the house proportion and the *lieu-dit* proportion in each city

To carry out an individual energy consumption analysis requires PMs, whereby the correspondence between the building

characteristics and the customer information is certain. The matching algorithm thus has to be improved for both rural and urban contexts. The problems confronted are radically different for both contexts and require a specific solution:

- **Urban context:** For areas where apartments are dominant and thus NMs are common, a grouping of dwellings can be applied at building level. This approach is specifically relevant when working on energy consumption characterization, as building characteristics are the same for all dwellings in a building. This leads to an equivalent client with a new equivalent dwelling corresponding to the sum of all dwellings (i.e. in terms of area, number of rooms, etc.).
- **Rural context:** For areas where several dwellings are attached to the same address, an aggregation is insufficient to carry out a reliable energy analysis, as the building characteristics of each dwelling may differ. Using geographic information such as coordinates could help to identify the right match, by running a least-distance geographic matching within each group.

The results of the aggregation at building level for the city of Brest are presented in Table IV. Since no elements are rejected by a sampling during the aggregation, the number of low-quality matches occurrences decreases.

TABLE IV
OCCURRENCES OF QUALITY OF MATCHING WITH BUILDING
AGGREGATION, APPLICATION TO BREST.

Step	Quality	Aggregation	Occurrences
1	PM	No	17,770
2	NM	Yes	67,953 (8,265 buildings)
2	NM	No	343
3	SM	No	2,288
4	LM	No	2,071
5	NoM	No	6,266

IV. STUDY CASE: USAGE OF MATCHED DATA TO CHARACTERIZE ENERGY DEMAND

This section presents the studies that can be carried out thanks to database consolidation. Over recent decades, the academic field has developed a growing interest in understanding residential energy demand with the aim of reducing end-use demand. Indeed, energy efficiency is a key to tackle global warming and the environmental crisis. Bottom-up approaches are particularly well-suited to identify the factors impacting residential consumption, and two main categories of models are developed: (1) Engineering models use appliance and building physics-based models to describe the consumer's behaviour and predict the consumption while (2) statistical models rely on the analysis of observation data using Machine Learning methods to describe consumer's energy demand [7, 8]. Two main approaches can be observed: first, qualitative approaches attempt to identify the most impacting factors on energy consumption, without trying to identify the actual link between cause and effect [9, 10]. On the other hand, quantitative approaches do try to measure this link using linear

regression models [11] or even by training Machine Learning algorithms (Neural Network, Random Forest) [12].

In this article, both basic quantitative and qualitative approaches are drawn, showing how database matching can be used to extract relevant information, which is not visible when the databases are split. An Odds-Ratio analysis is presented to identify the factors impacting electricity demand, then carry out a linear regression fit to quantify the impact of the dwelling area on energy consumption.

A. Odds-ratio analysis

This analysis is based on the work presented by Jones and Lomas [9]. It consists in splitting the consolidated consumer-dwelling database into two subsets depending on energy consumption. The first one is constituted by low-energy consumers, while high-energy consumers are stored in another subset. In this electricity consumption context, the Odds-Ratio approach estimates the odds that a client will be a high consumer (resp. a low consumer) given a certain characteristic of his dwelling, compared to the odds of being a high consumer (resp. a low consumer) if his dwelling features the reference characteristics. Reference refers to the most frequent characteristic in the sample. This analysis was applied to the city of Brest: Among the 17,779 PMs, the work was led on the 5,476 clients with annual energy consumption information provided. The resulting table is presented in Table V. Each line represents a category for a given parameter (e.g. floor area), the number of elements falling into this category, and the number of elements pertaining to the high and low energy consumer subsets. The Odds-Ratio is calculated as follows:

$$OR = \frac{S_H^{100+}/S_L^{100+}}{S_H^{REF}/S_L^{REF}} = \frac{976/1553}{858/2089} = 1.53 \quad (1)$$

where: OR = odds ratio; S_H^{100+} = number of dwellings with area greater than $100m^2$ and high electricity consumption; S_L^{100+} = number of dwellings with area greater than $100m^2$ and low electricity consumption; S_H^{REF} = number of dwellings with reference area and high electricity consumption; S_L^{REF} = number of dwellings with reference area and low electricity consumption.

As expected, the probability of being a high-energy consumer appears to grow with the size of the dwelling, but also with the number of bedrooms and rooms. It also emerges that owners tend to consume more than tenants. One last observation concerns the building material, whereby stone and gritstone seem to give a better energy performance than brick or concrete for example. Nevertheless, it has to be considered that construction methods have evolved over the years, along with heating systems. Consequently, heating fuels and thermal standards are strongly correlated, and no major conclusion can be made on the latter category.

B. Characterization of individual electricity demand

The objective of the characterization of individual electricity demand is to establish a link between dwelling characteristics

TABLE V
TABLE OF ODDS-RATIOS FOR PMS IN THE CITY OF BREST, FRANCE

	Category	Occurences	Number of dwellings		Odds Ratio
			High consumers	Low consumers	
Floor Area	>100m ²	2529	976	1553	1.53
	>50m ²	2947	858	2089	REF
	<50m ²	58	12	46	0.64
Insulation Standard	None	3065	674	2391	REF
	1974	1179	657	522	4.46
	1988	617	241	376	2.27
	2000	352	100	252	1.41
	2005	321	174	147	4.20
Number of Bedrooms	5+	709	288	421	1.31
	4	2287	784	1503	REF
	3	1938	614	1324	0.89
	2	498	134	364	0.71
	1	88	24	64	0.72
	0	11	1	10	0.19
Number of Rooms	5+	5463	1826	3637	REF
	4	54	16	38	0.84
	3	10	2	8	0.50
	2	3	1	2	1.00
Occupation	Owner	4739	1636	3103	REF
	Tenant	654	142	512	0.53
Walls Materials	Stone	742	199	543	0.84
	Gritstone	1656	379	1277	0.68
	Concrete	852	404	448	2.07
	Brick	948	359	589	1.40
	Chilboard	2502	760	1742	REF
	Wood	64	32	32	2.29
	Other	117	51	66	1.77

and electricity consumption through simple models (e.g. linear regressions).

PMs and NMs aggregated at building level can be considered as highly reliable and be used for single building consumption characterization. Nevertheless, this work focuses on PMs with consumption information provided, for the city of Brest. In order to guarantee robust interpretability, linear regression models are used to quantify the impact of dwelling characteristics on electricity consumption.

A reference cross-validated regression model, applied to match the consumption of a household with its dwelling surface, shows a very low r-squared ($R^2 = 0.055$) and cannot be considered as relevant. Data is then clustered into Data Groups (DGs), built according to the presence of electric Domestic Hot Water (DHW), Electric Heating (EH), age of building, etc.

Information on the presence of electric appliances is not available in the databases and so an algorithm has been implemented to infer their presence in dwellings, based on the households floor area and the energy contract. Table VI transcripts this simple algorithm. DHW and EH are dummy variables, where 1 represents the presence of DHW and EH, and 0 that the fuel is inferred to be non-electric (gas, thermal, etc.), depending on the dwelling type, floor area, energy contract and type of contract.

TABLE VI
REPRESENTATION OF THE DHW AND EH ATTRIBUTION ALGORITHM.

	Floor area	Contract power	Domestic Hot Water		Electric Heating
			Contract type		
			Peak/Off-Peak	Base	
House	<70m ²	3kVA	1	0	0
		>3kVA	1	1	1
	>70m ²	6kVA	1	0	0
		>6kVA	1	1	1
Apartment	<100m ²	6kVA	1	0	0
		>6kVA	1	1	1
	>100m ²	9kVA	1	0	0
		>9kVA	1	1	1

The resulting model, when considering two parameters DG_1 and DG_2 , is described by Equation 2.

$$C_p(Surf|DG_1 \times DG_2) = \sum_i \sum_j^{DG_1 \times DG_2} (\alpha_{ij} \times A_{ij,p} + \beta_{ij}) \quad (2)$$

where C_p is the consumption of the customer p , i (resp. j) is the group index built on the parameter DG_1 (resp. DG_2), $A_{ij,p}$ is the area of the dwelling matched to the client p for i and j corresponding to this dwelling, and zero otherwise.

Building DGs from the presence or absence of DHW and EH, the r-squared is higher ($R^2 = 0.478$) and the accuracy of the consumption estimates increases by 44.56% compared to the reference. Equations (3) to (5) describe the link detected between electricity consumption C and dwelling Area A by regression models, which are plotted on Fig. 5.

$$C_{EH,DHW} = 173,62 \times A_{EH,DHW} + 8.553,23 \quad (3)$$

$$C_{\overline{EH},DHW} = 133,49 \times A_{\overline{EH},DHW} + 5.354,86 \quad (4)$$

$$C_{\overline{EH},\overline{DHW}} = 49,89 \times A_{\overline{EH},\overline{DHW}} + 3.820,47 \quad (5)$$

In France, regulations define the insulation standards to be respected when constructing a new building. This legislation dates from 1974 and standards were upgraded in 1988, 2000, 2005 and 2012. When constructing smaller DGs depending upon both the insulation standard and installed fuel, it is possible to improve the electricity consumption estimation, reaching an r-squared slightly higher than 0.5 (0.525). In the knowledge that the presence of Electric Heating and electric Domestic Hot Water has a strong impact on electricity consumption, note that the attribution of such devices was made using a very basic algorithm which prevents from making any definitive conclusions. It is also possible to observe a strong variability around the linear fit, which can probably be explained by other factors, e.g. structural or socio-economic. The lack of reliable data and other relevant databases in this domain makes it impossible to take this analysis further.

V. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

This work presents an innovative method aiming to take advantage of new trends in energy, i.e. Open Data and Big

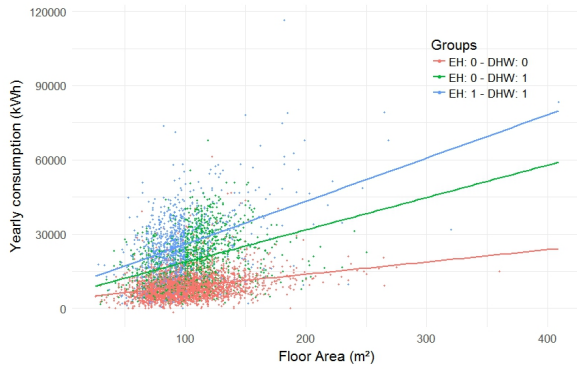


Fig. 5. Fitting of electricity consumption when Electric Heating and Sanitary Hot Water are used for groups

Data. A generic algorithm is presented for matching databases comprising address information, with the aim of working at dwelling, building or higher aggregation levels. The results of two algorithm runs were presented and allowed to identify shortcomings depending on the area. Improvements were thus implemented to permit a better matching in urban and suburban areas.

Two studies were carried out regarding the best quality matches obtained for the city of Brest to characterize end-users electricity demand. A first approach used the Odds-Ratio analysis to identify the key factor affecting electricity consumption, while a second study presented a linear regression model to estimate the impact of the dwelling area on annual energy consumption via simple linear regressions with groups. Both studies show the potential of such matching techniques in the energy domain. In addition, they highlight the fact that the reliability of data is another crucial issue to deal with.

Matching with other energetic vectors (i.e. gas) is easily achievable, and some, such as district heating, could facilitate understanding given the absence of other usages to perturb the analysis. This work can also be extended to aggregated levels, as LV or MV feeders where load curves are available, to characterize peak demand and thermo-sensitivity. At such level, structural information could also be combined with non-address based matching algorithms, e.g. optimization algorithm for adding socio-economic information [13].

This approach is expected to be a useful tool for territorial authorities and actors developing policies and actions to facilitate the energy transition at the level of a territory, as it will enable them to estimate the consumption of their territory, identify the most energy-consuming dwellings and households, and encourage them to take action to reduce their energy consumption (i.e. through thermal renovation).

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the French DSO Enedis for providing some very valuable customer data that allowed them to develop an efficient matching algorithm and undertake the characterization work presented in this paper.

REFERENCES

- [1] R. V. Jones, A. Fuertes, and K. J. Lomas, "The socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 901–917, mar 2015.
- [2] G. Huebner, D. Shipworth, I. Hamilton, Z. Chalabi, and T. Oreszczyn, "Understanding electricity consumption: A comparative contribution of building factors, socio-demographics, appliances, behaviours and attitudes," *Applied Energy*, vol. 177, pp. 692–702, sep 2016.
- [3] A. E. Monge and C. P. Elkan, "The field matching problem: Algorithms and applications," in *Second International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 1996.
- [4] Z. M. Dengyue Li, Shengrui Wang, "Approximate address matching," in *International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, 2010.
- [5] Q. Brummet, "Matching addresses between household surveys and commercial data," *CARRA Working Paper Series*, 2015.
- [6] A. V. S. Bianca Salas and E. Shuster, "Fun with address matching: Use of the compged function and the sql procedure," in *SAS Global Forum 2018*, 2018.
- [7] N. Fumo, "A review on the basics of building energy estimation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 53–60, mar 2014.
- [8] M. Brøgger and K. B. Wittchen, "Estimating the energy-saving potential in national building stocks – a methodology review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1489–1496, feb 2018.
- [9] R. V. Jones and K. J. Lomas, "Determinants of high electrical energy demand in UK homes: Socio-economic and dwelling characteristics," *Energy and Buildings*, vol. 101, pp. 24–34, aug 2015.
- [10] C. Bartusch, M. Odlare, F. Wallin, and L. Wester, "Exploring variance in residential electricity consumption: Household features and building properties," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 637–643, apr 2012.
- [11] I. G. Hamilton, P. J. Steadman, H. Bruhns, A. J. Summerfield, and R. Lowe, "Energy efficiency in the british housing stock: Energy demand and the homes energy efficiency database," *Energy Policy*, vol. 60, pp. 462 – 480, 2013.
- [12] D. Brounen, N. Kok, and J. M. Quigley, "Residential energy use and conservation: Economics and demographics," *European Economic Review*, vol. 56, no. 5, pp. 931 – 945, 2012, green Building, the Economy, and Public Policy.
- [13] T. Barbier, R. Girard, N. Kong, F.-P. Neirac, G. Kariniotakis, and E. Magliaro, "An optimisation algorithm for matching large scale databases on customers for improved characterisation of electricity consumption," *IET Conference Proceedings*, January 2016.

Annexe D

Procédure d'inférences des données énergétiques

Cette annexe présente une procédure d'inférence simplifiée des caractéristiques énergétiques (thermiques et systèmes) pouvant être utilisée pour caractériser la composition d'un parc de bâtiments. Cette inférence exploite l'enquête PHEBUS ainsi que les données issues du recensement, tous deux administrés par l'INSEE.

La procédure développée s'appuie sur une première description du territoire. Celle-ci doit *a minima* comporter, pour chacun des bâtiments, une information sur l'année de construction et sur la surface habitable. De telles informations peuvent être fournies par la BDTOPO v3 de l'IGN.

D.1 Attribution des systèmes de chauffage

D.1.1 Proportions de modes de chauffages

La base logement de l'INSEE est issue du recensement. Cette base est localisée à l'IRIS et décrit les caractéristiques des logements et des ménages qui les occupent. La base logement est disponible pour chaque année de recensement et fournit des informations socio-économiques (e.g. nombre de personnes par tranche d'âge, diplôme le plus élevé obtenu, activité), sur le local (e.g. superficie, année de construction, nombre de pièces, type de logement) et sur les systèmes (i.e. type de chauffage). D'autres informations moins en lien avec la consommation électrique sont aussi disponibles (e.g. année d'aménagement, mode d'évacuation des eaux usées, situation quand à l'immigration).

Parmi les informations disponibles, les variables suivantes sont utilisées dans le cadre de l'inférence des données énergétiques :

- Le type de logement (TYPL)
- La surface des logements, estimée à partir de la catégorie de surface (SURF)
- L'année de construction du logement, divisée en classes (ACHL)

- Le combustible utilisé pour le chauffage (CMBL)
- Le type de chauffage (CHFL)

Un mode de chauffage est caractérisé par son type (centralisé-collectif, centralisé-individuel ou décentralisé) et son combustible. Les proportions surfaciques des différents modes de chauffages utilisés peuvent être calculées pour chaque IRIS, et calculés par type de logement de par groupes d'années de construction. La sortie de cette analyse des données de recensement prend la forme d'un tableau. Le Tableau D.1 représente un extrait de ces données pour le territoire d'étude présenté dans la thèse (centre-bourg, voir Figure 2.8).

TYPL	ACHL	CHFL	CMBL	(%)
LC	1919-1945	Centralisé - collectif	gaz	6.0
		Centralisé - individuel	gaz	27.4
			électricité	3.5
	1946-1970	Décentralisé	électricité	63.1
		Centralisé - individuel	gaz	29.8
			électricité	0.5
		Décentralisé	électricité	69.7
...

Tableau D.1 – Extrait des proportions de modes de chauffages issues du volet logement du recensement INSEE

D.1.2 Attribution des combustibles

À partir des proportions issues du recensement INSEE, les modes de chauffages sont attribués aux bâtiments modélisés. Les indicateurs sont les variables connues pour chaque bâtiment, à savoir : le type de logement et l'année de construction. Le couple type et combustible de chauffage représente la variable inconnue, à attribuer aux bâtiments.

L'attribution se fait de manière unitaire (bâtiment par bâtiment) alors que les proportions sont surfaciques. Pour ce faire, une méthode d'attribution en trois temps est réalisée :

1. Pour chaque couple type de chauffage - combustible, ne sont conservés que les bâtiments dont la surface habitable représente une proportion inférieure à la proportion totale que représente le dit couple. Si le chauffage est de type collectif, ne sont conservés que les logements collectifs.
2. On réalise un arrangement aléatoire des logements compatibles avec le mode de chauffage à attribuer.
3. On attribue le mode de chauffage (couple type - combustible) aux bâtiments les uns après les autres jusqu'à atteindre la proportion surfacique cumulée. Ces bâtiments sont retirés du processus d'attribution des modes de chauffage et les bâtiments restant sont conservés pour les attributions suivantes.

L'ensemble des surfaces représente un espace discontinu, et les proportions de surfaces ne peuvent être respectées exactement par cette méthode. Afin de trouver une attribution correcte des modes de chauffage, cette procédure d'attribution est réalisée un grand nombre de fois (100 par exemple). L'erreur de chaque attribution est quantifiée par le biais du RMSE et l'attribution présentant l'erreur la plus faible est finalement conservée.

D.1.3 Attribution des systèmes

Pour chaque mode de chauffage (couple type - combustible), plusieurs systèmes existent. L'INSEE ne donne pas de détails plus précis sur les systèmes utilisés par les ménages et ceux-ci doivent donc eux aussi être attribués. L'objectif de cette section est de donc de décrire une procédure d'attribution de systèmes de chauffages à partir des données connues ; type et âge du bâtiment ainsi que mode de chauffage.

Pour ce faire, nous nous basons sur l'enquête PHEBUS réalisée par l'INSEE, qui décrit les caractéristiques énergétiques d'un panel de logements représentatifs statistiquement des foyers français. Parmi les caractéristiques décrites, les équipements de chauffage de logements sont détaillés. Une analyse statistique permet d'établir les proportions des différents systèmes de chauffages, en fonction des indicateurs utilisés pour l'attribution. Aucune distinction n'est réalisée entre les logements collectifs et les logements individuels et collectifs afin de ne pas trop réduire la taille des échantillons. Les systèmes considérés sont définis afin de correspondre aux systèmes modélisés dans le Chapitre 3.

Le Tableau D.2 présente un extrait de cette étude des proportions sur la base PHEBUS. Il est important de noter que l'enquête PHEBUS date de 2013 et représente donc assez mal les bâtiments performants. De plus, en basant les proportions de systèmes sur les données de l'enquête ponctuelle PHEBUS, on considère que les proportions de systèmes **au sein des modes de chauffage** sont les mêmes sur tout le territoire français.

Ces proportions sont exprimées en termes unitaires et on s'assure uniquement d'attribuer les systèmes correctement grâce à un tirage pondéré. Dans le cas où aucune information n'existe sur la technologie (pour les PACs par exemple), les technologies sont considérées équiprobables.

D.2 Attribution des caractéristiques thermiques des parois

Une fois de plus, l'enquête PHEBUS est utilisée comme source pour décrire les caractéristiques thermiques des bâtiments.

Chaque bâtiment présent dans l'enquête PHEBUS est rattaché à un groupe d'années de constructions. Ces groupes sont choisis en cohérence avec l'évolution des rénovations thermiques en France, à savoir : Pré-RT1974, RT1974, RT1982, RT1988, RT2000, RT2005 et RT2012. L'échantillon est également séparé en fonction du combustible utilisé pour le chauffage, en considérant que les performances de l'enveloppe peuvent éventuellement être

ACHL	CHFL	CMBL	Système	Technologie	(%)
1919-1945	Centralisé	gaz	chaudière	standard - ancien	8.1
				standard - récent	55.4
				basse-température	10.8
				condensation	25.7
		électricité	chaudière	standard	20.0
			PAC air/eau	-	80.0
	
	Décentralisé	électricité	PAC air/air	-	13.0
			radiateurs	convecteur	56.5
				radiants	30.4
	
...

Tableau D.2 – Extrait des proportions de systèmes de chauffages issues de l'enquête PHEBUS menée par l'INSEE

conditionnées au combustible utilisé par le système de chauffage (notamment l'électricité du fait du facteur d'énergie primaire).

Pour chaque bâtiment du territoire modélisé, un bâtiment semblable est tiré aléatoirement parmi les bâtiments analogues de l'enquête PHEBUS. L'ensemble des caractéristiques thermiques de ce bâtiment issu de l'échantillon (coefficients thermiques des parois opaques et caractéristiques des vitrages) sont attribuées au bâtiment modélisé.

Annexe E

Analyse statistique de la base OPE

Les tableaux présentés dans cette annexe présentent les résultats détaillés de l'analyse statistique de la base OPE. Les niveaux de performance thermique sont observés en fonction de la zone climatique, de l'usage du bâtiment et de la technique de rénovation considérée.

Zone	Usage	Technique	Observ.	Quantile					Moy.	Dev.
				20%	40%	50%	60%	80%		
H1	LC	ITE	2588	0.19	0.21	0.23	0.24	0.29	0.25	0.11
		ITI	9237	0.22	0.25	0.27	0.29	0.35	0.37	0.37
		ITI+ITE	738	0.16	0.19	0.19	0.20	0.24	0.21	0.08
	MI	ITE	3206	0.16	0.18	0.19	0.20	0.23	0.21	0.15
		ITI	128896	0.22	0.25	0.26	0.27	0.30	0.31	0.25
		ITI+ITE	703	0.14	0.17	0.17	0.18	0.22	0.22	0.22
H2	LC	ITE	688	0.19	0.22	0.24	0.26	0.31	0.26	0.16
		ITI	5190	0.22	0.25	0.26	0.28	0.31	0.31	0.23
		ITI+ITE	77	0.16	0.19	0.20	0.21	0.23	0.22	0.19
	MI	ITE	1468	0.16	0.19	0.20	0.21	0.24	0.21	0.12
		ITI	152677	0.23	0.25	0.26	0.27	0.29	0.29	0.20
		ITI+ITE	323	0.14	0.16	0.17	0.18	0.21	0.22	0.29
H31	LC	ITE	387	0.22	0.26	0.28	0.29	0.33	0.30	0.19
		ITI	2253	0.25	0.27	0.29	0.30	0.34	0.32	0.21
		ITI+ITE	32	0.17	0.20	0.20	0.20	0.24	0.21	0.05
	MI	ITE	390	0.20	0.22	0.23	0.24	0.28	0.26	0.14
		ITI	33539	0.24	0.26	0.26	0.28	0.30	0.30	0.20
		ITI+ITE	95	0.14	0.17	0.18	0.20	0.22	0.22	0.24

Tableau E.1 – Analyse statistique (par quantiles) de la base de données OPE - performances thermiques des murs

Zone	Usage	Technique	Observ.	Quantile					Moy.	Dev.
				20%	40%	50%	60%	80%		
H1	LC	Combles perdus	750	0.11	0.13	0.14	0.15	0.18	0.16	0.13
		Rampants	1532	0.12	0.13	0.14	0.15	0.18	0.16	0.15
		Terrasse	6831	0.13	0.15	0.16	0.17	0.20	0.18	0.12
		Toiture métal	153	0.12	0.13	0.14	0.15	0.18	0.15	0.04
	MI	Combles perdus	19736	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.25
		Rampants	24069	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.22	0.61
		Terrasse	16189	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.16	0.24
		Toiture métal	424	0.10	0.12	0.12	0.13	0.15	0.17	0.37
H2	LC	Combles perdus	453	0.13	0.14	0.14	0.15	0.17	0.16	0.08
		Rampants	809	0.11	0.13	0.14	0.15	0.17	0.16	0.15
		Terrasse	2613	0.13	0.15	0.16	0.18	0.20	0.18	0.12
		Toiture métal	206	0.12	0.15	0.16	0.16	0.21	0.16	0.04
	MI	Combles perdus	30868	0.11	0.12	0.13	0.13	0.15	0.14	0.21
		Rampants	20940	0.12	0.13	0.14	0.14	0.17	0.28	0.79
		Terrasse	19721	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.17
		Toiture métal	1427	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.14	0.19
H3	LC	Combles perdus	155	0.13	0.14	0.14	0.15	0.17	0.16	0.18
		Rampants	213	0.13	0.15	0.16	0.17	0.20	0.17	0.09
		Terrasse	1729	0.14	0.17	0.18	0.19	0.21	0.19	0.09
		Toiture métal	2	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.13	0.01
	MI	Combles perdus	6050	0.12	0.13	0.13	0.13	0.15	0.17	0.35
		Rampants	2628	0.12	0.13	0.13	0.14	0.18	0.58	1.32
		Terrasse	8011	0.12	0.13	0.13	0.14	0.17	0.25	0.73
		Toiture métal	41	0.14	0.14	0.14	0.14	0.18	0.15	0.02

Tableau E.2 – Analyse statistique (par quantiles) de la base de données OPE - performances thermiques de la toiture

Zone	Usage	Technique	Observ.	Quantile					Moy.	Dev.
				20%	40%	50%	60%	80%		
H1	LC	Sous chape	2997	0.17	0.19	0.20	0.21	0.24	0.21	0.08
		Sous face	6675	0.19	0.22	0.24	0.25	0.30	0.25	0.09
	MI	Sous chape	35129	0.16	0.19	0.19	0.20	0.22	0.20	0.08
		Sous face	94622	0.17	0.19	0.20	0.21	0.24	0.22	0.14
H2	LC	Sous chape	2173	0.17	0.19	0.20	0.21	0.25	0.21	0.05
		Sous face	2940	0.18	0.21	0.23	0.25	0.30	0.24	0.09
	MI	Sous chape	56864	0.17	0.19	0.20	0.20	0.23	0.20	0.06
		Sous face	93661	0.16	0.18	0.19	0.21	0.23	0.20	0.08
H3	LC	Sous chape	301	0.19	0.21	0.22	0.23	0.26	0.23	0.07
		Sous face	1938	0.20	0.23	0.24	0.26	0.31	0.26	0.08
	MI	Sous chape	1277	0.18	0.20	0.22	0.23	0.27	0.27	0.35
		Sous face	31352	0.18	0.20	0.21	0.22	0.24	0.22	0.10

Tableau E.3 – Analyse statistique (par quantiles) de la base de données OPE - performances thermiques du plancher

Usage	Menuiseries	Vitrages	Observ.	Quantile					Moy.	Dev.
				20%	40%	50%	60%	80%		
LC	Alu RPT	2	5222	1.16	1.24	1.30	1.36	1.61	1.47	0.61
		3	311	2.50	2.50	2.50	2.50	4.92	3.67	2.40
	Bois	2	2846	1.10	1.18	1.23	1.30	1.50	1.33	0.36
		3	85	0.80	0.84	0.89	0.95	1.07	1.12	0.91
	Mixte	2	279	1.11	1.18	1.21	1.24	1.40	1.32	0.38
		3	24	0.83	0.98	0.98	1.11	2.50	1.58	1.13
	PVC	2	12962	1.05	1.11	1.11	1.14	1.21	1.14	0.13
		3	114	0.79	0.86	0.89	0.96	1.10	1.27	1.17
MI	Alu RPT	2	175220	1.17	1.23	1.26	1.31	1.40	1.29	0.16
		3	769	0.82	0.96	1.01	1.09	1.25	1.10	0.52
	Bois	2	42617	1.15	1.20	1.26	1.30	1.45	1.31	0.24
		3	681	0.78	0.87	0.91	0.95	1.09	0.99	0.48
	Mixte	2	2845	1.09	1.18	1.20	1.25	1.38	1.24	0.19
		3	301	0.71	0.78	0.80	0.83	0.94	0.84	0.25
	PVC	2	219466	1.05	1.11	1.13	1.16	1.23	1.15	0.12
		3	1377	0.77	0.82	0.86	0.90	1.00	0.91	0.29

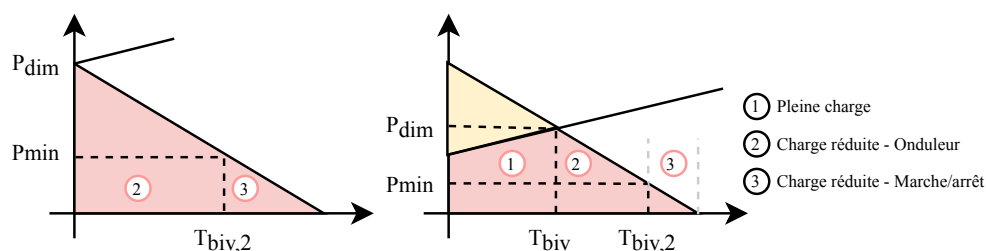
Tableau E.4 – Analyse statistique (par quantiles) de la base de données OPE - performances thermiques des vitrages

Annexe F

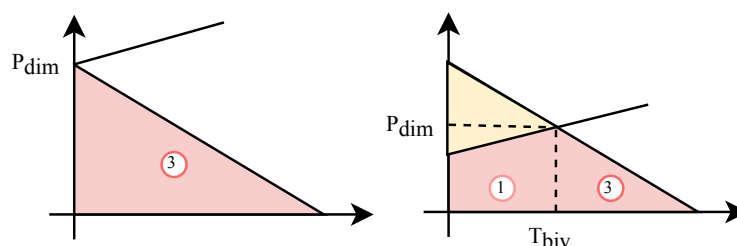
Pompes à chaleur : Estimation détaillée du COP saisonnier

F.1 Rappel : Régimes de fonctionnement et COP associés

Les 3 modes de fonctionnement identifiés sont représentés sur les schémas ci-dessous :



(a) PAC onduleur - monovalent et bivalent



(b) PAC mono-compresseur - monovalent et bivalent

FIGURE F.1 – Représentation des différents régimes de fonctionnement des pompes à chaleur en fonction de la technologie.

FIGURE F.2 – Représentation des différents régimes de fonctionnement des pompes à chaleur en fonction de la technologie.

Le fonctionnement de chaque régime est rappelé brièvement ci-après :

Pleine charge (PC) et COP nominal : À pleine charge (PC), la PAC fonctionne à son

régime nominal. Une PAC fonctionnant à son régime nominal à une température extérieure T^{ext} consomme une puissance constante P_{nom}^{elec} . La puissance calorifique (P_{cal}^{PC}) fournie dépend alors de la puissance consommée par la PAC et de son COP. $\Delta T^{PAC} = T^f - T$ représente la différence entre la température de la source froide et de la source chaude (l'air extérieur pour une PAC aérothermique).

$$P_{PC}^{cal}(T) = P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \quad (F.1)$$

Le point de passage du régime de pleine charge au régime de charge partielle s'appelle le point de bivalence. La température à ce point est la température de bivalence T_{biv} .

Charge réduite (CR) et COP ajusté : La PAC fonctionne à charge réduite à l'aide d'un onduleur (*inverter*). La réduction de la fréquence de fonctionnement par l'onduleur entraîne une amélioration des performances de la PAC, modélisée par le facteur PLF [1]. Ce facteur dépend du ratio de charge PLR , qui représente le rapport entre la charge nominale de la PAC à cette température et la charge à assurer.

$$P_{CR}^{cal}(T) = Q(T) = P_{CR}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T) \quad (F.2)$$

$$PLF(T) = a \cdot PLR_{CR}(T) + b \quad (F.3)$$

$$PLR_{CR}(T) = \frac{Q(T)}{P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC})} \quad (F.4)$$

Marche/arrêt (m/a) et COP dégradé : Lorsque le compresseur ne peut pas moduler sa puissance à la baisse, la puissance calorifique est fournie par l'intermédiaire de cycles courts marche/arrêt (*start/stop*). La puissance consommée pour fournir cette chaleur est notée $P_{m/a}^{elec}$. Du fait de la forte consommation au démarrage d'une PAC, ses performances sont affectées. Les performances en mode marche arrêt sont modélisées via un facteur de dégradation des performances D_p , comme présenté par Naldi et al. [2] ou Bettanini et al. [3]. Ce facteur dépend d'un coefficient de dégradation C_e dont la valeur est fixée à 0.7 conformément aux recommandations de [4].

$$P_{m/a}^{cal}(T) = Q(T) = P_{m/a}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T) \cdot D_p(T) \quad (F.5)$$

$$D_p(T) = \frac{PLR_{m/a}(T)}{1 + C_e(PLR_{m/a}(T) - 1)} \quad (F.6)$$

$$PLR_{m/a}(T) = \frac{Q(T)}{P_{min}^{elec} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T)} \quad (F.7)$$

F.2 Identification des points de fonctionnement

Afin de pouvoir mener le calcul du COP *a priori*, il est nécessaire d'identifier les différents points de fonctionnement : le point de bivalence, défini par la température T_{biv} , et le point de début des cycles marche/arrêt, défini par la température $T_{biv,2}$. Le COP se calcule ensuite différemment sur chaque plage de fonctionnement.

Dans le cas d'un fonctionnement monovalent, la température de bivalence est égale à la température de base de la région considérée. Dans le cas d'un fonctionnement bivalent, on considère que la PAC doit assurer 50% du pic de puissance annuel.

$$P_{nom}^{elec} COP(\Delta T_{base}^{PAC}) = 0.5Q(T^{cons}) \quad (F.8)$$

Afin de pouvoir mener le calcul du COP *a priori*, il est nécessaire d'identifier les différents points de fonctionnement : le point de bivalence, défini par la température T_{biv} , et le point de début des cycles marche/arrêt, défini par la température $T_{biv,2}$. Le COP se calcule ensuite différemment sur chaque plage de fonctionnement.

Pour tous les calculs de COP *a priori* (c'est à dire sans savoir les performances thermiques du bâtiment), on considère un besoin de chauffage défini uniquement par les pertes thermiques et sans apports solaires. Cette simplification, raisonnable pour des bâtiments dont les performances ne sont pas trop bonnes, permet d'extraire les caractéristiques thermiques du calcul afin de rendre les calculs indépendant du bâtiment estimé.

$$Q(T) = U \Delta T^{cons} \quad (F.9)$$

$$\text{où } U = \sum u.S + c_{air} \tau^{vent} V / 3.6 \quad (F.10)$$

$\Delta T^{cons} = T^{cons} - T$ décrit la différence de température entre l'air ambiant d'un bâtiment et l'air extérieur.

F.2.1 Point de bivalence PC - CR

À la température de bivalence, la PAC fonctionne à pleine charge. On peut alors établir l'équation suivante :

$$Q(T_{biv}) = U \Delta T_{biv}^{cons} = P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T_{biv}^{PAC}) \quad (F.11)$$

L'Équation (F.8) permet de substituer U par des caractéristiques invariantes, propres à la PAC et son utilisation :

$$U = \frac{P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T_{base}^{PAC})}{0.5 \Delta T_{base}^{cons}} \quad (F.12)$$

La température de bivalence peut alors être identifiée comme la solution de l'Équation (F.13), obtenue grâce aux Équation (F.8) et (F.11).

$$\Delta T_{biv}^{cons} = 0.5 \Delta T_{base}^{cons} \frac{COP(\Delta T_{biv}^{PAC})}{COP(\Delta T_{base}^{PAC})} \quad (F.13)$$

F.2.2 Point de bivalence CR - marche/arrêt

Pour les PAC à onduleur, on considère un rapport fixe entre la puissance nominale et minimale égal à 3.

$$\frac{P_{nom}}{P_{min}} = 3 \quad (F.14)$$

Aussi, on considère qu'au moment où la PAC fonctionne à sa puissance minimale, c'est à dire juste avant de basculer en mode marche/arrêt, le facteur de charge réduite PLF est égale à 1.4. Le COP est alors augmenté de 40% par rapport au fonctionnement à pleine charge. Cette valeur est issue de la littérature [1, 3].

$$PLF(T_{biv,2}) = 1.4 \quad (F.15)$$

Au point de début des cycles marche/arrêt, on peut écrire l'équation suivante :

$$\begin{aligned} Q(T_{biv,2}) &= U\Delta T_{biv,2}^{cons} = P_{min}^{elec} \cdot COP(\Delta T_{biv,2}^{PAC}) \cdot PLF(T_{biv,2}) \\ &= 1.4P_{min}^{elec} \cdot COP(\Delta T_{biv,2}^{PAC}) \end{aligned} \quad (F.16)$$

On en déduit :

$$\frac{P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T_{biv}^{PAC})}{\Delta T_{biv}^{cons}} \cdot \Delta T_{biv,2}^{cons} = 1.4P_{min}^{elec} \cdot COP(\Delta T_{biv,2}^{PAC}) \quad (F.17)$$

F.2.3 Résolution

L'équation du COP étant divisée en deux morceaux selon que la PAC fonctionne avec ou sans dégivrage, les Équations (F.13) et (F.17) permettant d'identifier les points de bivalence aboutissent à deux équations du second degré fonction de la température. Une solution est identifiée pour chaque équation, et trois cas peuvent se présenter :

- Cas 1 : La solution sur la portion sans dégivrage est supérieure à 6°C. C'est le point de bivalence.
- Cas 2 : La solution sur la portion avec dégivrage est inférieure à 6°C. C'est le point de bivalence.
- Cas 3 : La solution avec dégivrage est supérieure à 6°C et celle sans dégivrage est inférieure à 6°C. Le passage du mode dégivrage au mode sans dégivrage rend la PAC trop puissante pour fonctionner dans le nouveau régime réduit. Le point à $T = 6^\circ\text{C}$ est le point de bivalence.

Les deux points de fonctionnement sont ainsi identifiés, et on peut calculer les coefficients de performance durant les différentes phases.

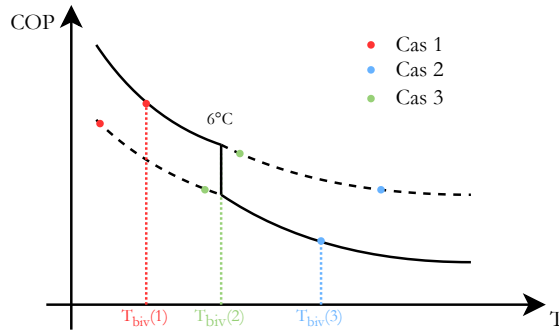


FIGURE F.3 – Représentation des solutions permettant l'identification du point de bivalence PC-CR ou CR-m/a

F.3 Calcul du COP saisonnier

Le coefficient de performance saisonnier (SCOP), se définit comme le rapport entre l'ensemble des apports calorifiques et l'ensemble des consommations de la PAC sur une saison de chauffe. Pour calculer le SCOP en prenant en compte l'ensemble des régimes de fonctionnement de la PAC, il est nécessaire d'exprimer ces puissances dans un référentiel commun. Le Tableau F.1 présente les différentes valeurs de puissance calorifique fournie, de puissance électrique consommée et de COP pour les différents régimes.

Régime	Puissance calorifique	Puissance consommée	COP
Pleine charge	$P_{nom}.COP(\Delta T^{PAC})$	P_{nom}	$COP(\Delta T^{PAC})$
Charge réduite	$Q(T)$	$P^{CR}(T)$	$COP(\Delta T^{PAC}).PLF(T)$
Cycles marche/arrêt	$Q(T)$	$P^{m/a}(T)$	$COP(\Delta T^{PAC}).PLF(T).D_p(T)$

Tableau F.1 – Formulation des puissances fournies et consommées des PAC ainsi que du COP en fonction du régime de fonctionnement

L'enjeu est d'exprimer les différentes grandeurs de manière indépendante de toute grandeur de dimensionnement (que ce soit P_{nom}^{elec} , P_{min}^{elec} ou U). Ainsi, on pourra exprimer le COP indépendamment de ces caractéristiques propres à chaque bâtiment et calculer un COP *a priori*. L'Équation (F.11) nous permet d'exprimer la puissance nominale en fonction de U :

$$P_{nom}^{elec} = \frac{U \cdot \Delta T_{biv}^{cons}}{COP(\Delta T_{biv}^{HP})} \quad (F.18)$$

D'après les équations présentées dans le Tableau F.1, on peut exprimer simplement P_{elec}^{CR} et $P_{elec}^{m/a}$ en fonction du besoin de chauffage $Q(T)$:

$$\begin{aligned} P_{elec}^{CR} &= \frac{Q(T)}{COP(\Delta T).PLF} \\ P_{elec}^{m/a} &= \frac{Q(T)}{COP(\Delta T).PLF.D_p} \end{aligned} \quad (F.19)$$

Or PLF et D_f sont toutes deux dépendantes de $Q(T)$ et donc de U , par le biais des ratios de charge PLR_{CR} et $PLR_{m/a}$. Ces deux ratios peuvent s'exprimer indépendamment de U :

$$\begin{aligned} PLR_{CR} &= \frac{Q(T)}{P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T)} \\ &= \frac{U \Delta T^{cons}}{P_{nom}^{elec} \cdot COP(\Delta T)} \\ &= \frac{COP(\Delta T_{biv}^{PAC}) \Delta T^{cons}}{\Delta T_{biv}^{cons} \cdot COP(\Delta T^{PAC})} \end{aligned} \quad (F.20)$$

De la même manière, $PLR_{m/a}$ peut s'exprimer en fonction du ratio des puissances (fixe) et du facteur PLF , rendu indépendant de U et P_{nom}^{elec} .

$$\begin{aligned} PLR_{m/a} &= \frac{P_{nom}^{elec}}{P_{min}^{elec}} \frac{COP(\Delta T_{biv}^{PAC}) \Delta T^{cons}}{\Delta T_{biv}^{cons} \cdot COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF} \\ &= \frac{P_{nom}^{elec}}{P_{min}^{elec}} \frac{PLR_{CR}}{PLF} \end{aligned} \quad (F.21)$$

Ces expressions nous permettent d'exprimer à la fois les puissances calorifiques et les puissances consommées comme des fonctions linéaires de U . Le COP saisonnier $SCOP$ s'écrit alors :

$$SCOP = \frac{\sum \text{Puissances calorifiques}}{\sum \text{Puissances consommées}} \quad (F.22)$$

$$SCOP = \frac{\sum_{PC} P_{PC}^{calo} + \sum_{CR} P_{CR}^{calo} + \sum_{m/a} P_{m/a}^{calo}}{\sum_{PC} P_{PC}^{elec} + \sum_{CR} P_{CR}^{elec} + \sum_{m/a} P_{m/a}^{elec}}$$

où :

$$\begin{aligned} P_{PC}^{calo} &= U \frac{\Delta T_{biv}^{cons} \cdot COP(\Delta T^{PAC})}{COP(\Delta T_{biv}^{PAC})} \\ P_{CR}^{calo} &= U \Delta T^{cons} \\ P_{m/a}^{calo} &= U \Delta T^{cons} \\ P_{PC}^{elec} &= U \frac{\Delta T_{biv}^{cons}}{COP(\Delta T_{biv}^{PAC})} \\ P_{CR}^{elec} &= U \frac{\Delta T^{cons}}{COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T)} \\ P_{m/a}^{elec} &= U \frac{\Delta T^{cons}}{COP(\Delta T^{PAC}) \cdot PLF(T) \cdot D_p(T)} \end{aligned} \quad (F.23)$$

Il est donc possible d'extraire U et d'estimer le $SCOP$ d'une PAC, pour une technologie donnée, à partir d'une série temporelle de températures uniquement.

Bibliographie

- [1] Bruno Filliard, Alain Guiavarch, and Bruno Peuportier. Performance evaluation of an air-to-air heat pump coupled with temperate air-sources integrated into a dwelling. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, pages 2266–2273, 2009.
- [2] Claudia Naldi, Matteo Dongellini, and Gian Luca Morini. Climate influence on seasonal performances of air-to-water heat pumps for heating. 2015. , 10.1016/j.egypro.2015.12.064.
- [3] Ernesto Bettanini, Alessio Gastaldello, and Luigi Schibuola. Simplified models to simulate part load performances of air conditioning equipments. *Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands August 11-14, 2003*, pages 107–114, 2003.
- [4] Francesco Madonna and Francesca Bazzocchi. Annual performances of reversible air-to-water heat pumps in small residential buildings. *Energy and Buildings*, 2013. , 10.1016/j.enbuild.2013.06.016.

RÉSUMÉ

Les secteurs résidentiel et tertiaire français représentent environ 45% de la consommation d'énergie et 20% des émissions de gaz à effet de serre, constituant un gisement d'économies important et relativement facilement mobilisable en comparaison à d'autres secteurs comme le transport ou l'industrie. Cette thèse développe une méthode d'aide à la décision territoriale pour la mise en oeuvre opérationnelle de la rénovation énergétique des bâtiments. Cette méthode repose sur une caractérisation des territoires basée sur l'enrichissement de bases de données hétérogènes et disponibles aux acteurs locaux. Un problème d'optimisation des mesures de rénovation énergétique permet d'actionner des leviers au niveau de chaque bâtiment du territoire, mettant la question de la dimensionnalité au cœur de ce travail. Un méta-modèle de la consommation énergétique de chauffage des bâtiments, adapté à ce contexte, est construit à partir d'un modèle dynamique urbain. Les solutions techniques de rénovation modélisées reposent sur une observation du contexte actuel français, et font d'objet d'une caractérisation technico-économique dédiée. Les méthodes de modélisation et d'optimisation sont enfin appliquées à différents territoires, et exploitées pour mener des études en lien avec le contexte de la transition énergétique.

MOTS CLÉS

Rénovation énergétique, Territoires, Optimisation, Aide à la décision, Modélisation, Bâtiments, Pompes à chaleur, Transition énergétique

ABSTRACT

The French residential and tertiary sectors account for about 45% of energy consumption and 20% of greenhouse gas emissions, constituting a great saving potential which is relatively easy to mobilize in comparison with other sectors such as transport or industry. This thesis develops a decision-aiding method for territory stakeholders willing to implement building energy retrofit measures. This method relies on a building stock modeling based on the enrichment of heterogeneous databases available to local decision-makers. An optimization problem of energy renovation measures activates levers at the building-level over the territory, turning dimensionality into a key issue this work. A meta-model of building heating energy consumption, adapted to this context, is constructed from a dynamic urban model. A dedicated characterization of both thermal retrofits and energy systems is conducted, basing solutions on observations of the current French building context. Both modeling and optimization methods are finally applied to real territories, and used to conduct studies related to the energy transition context.

KEYWORDS

Energy retrofits, Territory-scale, Optimisation, Decision-aiding, Energy modeling, Buildings, Heat pumps, Energy transition