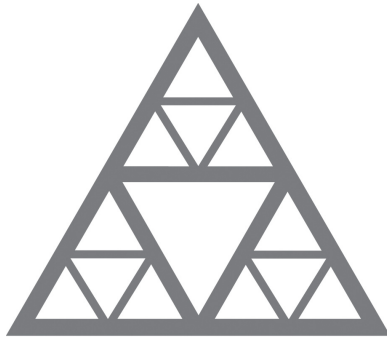


ECOLE DES PONTS PARISTECH

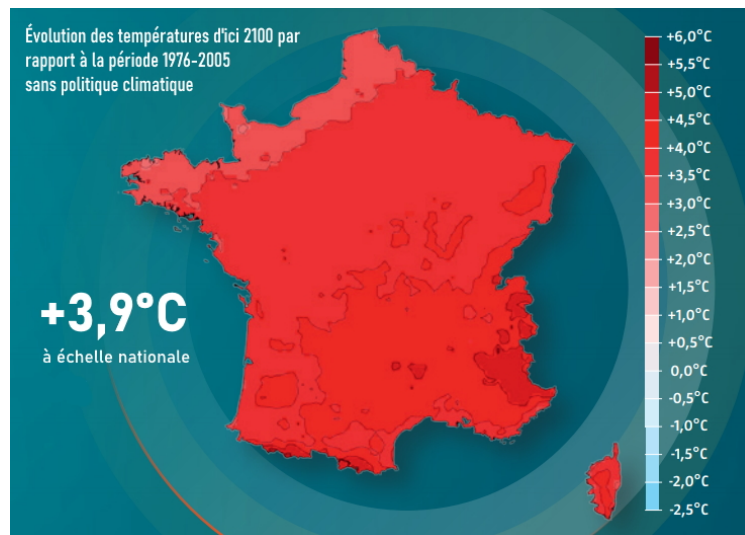


École des Ponts

ParisTech

SEMINAIRE DE DEPARTEMENT (VETSD)

Évolution des besoins en chaud et en froid dans le secteur résidentiel



DAGUENET Clement
GREDIGUI Paul
TEIXEIRA COSTA Fernanda

MAUGENEST Matthieu
PEDRO SAINT MARTIN Damian
SENA FRACAROLI Narciso

10 juin 2021

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l'art	1
2.1	Modèles existants	1
2.2	Points inexplorés dans la littérature	3
2.3	Données existantes sur le territoire français	3
3	Méthodologie	4
3.1	Évolution des besoins de climatisation	4
3.1.1	Effet température	5
3.1.2	Équipement en climatisation	5
3.1.3	Calcul de la consommation de climatisation : lien entre équipement et température	5
3.2	Évolution des besoins de chauffage	6
3.2.1	Effet température	6
3.2.2	Calcul de la consommation initiale de chauffage grâce aux étiquettes DPE	6
3.2.3	Évolution des étiquettes DPE	7
3.2.4	Calcul de la consommation de chauffage : lien entre parc résidentiel et température	8
3.3	Calcul du pic de puissance	8
4	Résultats du modèle	8
4.1	Meilleure connaissance du problème	8
4.1.1	S1 : Sans évolution du parc bâti	9
4.1.2	S2 : Avec évolution du parc bâti	11
4.2	Meilleure identification des leviers de changement	12
4.2.1	Influence de la rénovation du parc	13
4.2.2	Influence des changements comportementaux : évolution des températures de consigne	13
4.2.3	Influence d'un changement des systèmes de refroidissement	13
4.2.3.a	Amélioration de la performance des équipements de climatisation	13
4.2.3.b	Remplacement par des technologies moins énergivores	14
5	Recommandations	14
5.1	Amélioration du parc bâti	14
5.2	Changements comportementaux : évolution des températures de consigne	15
5.3	Changement des systèmes de refroidissement	17
5.3.1	Amélioration de la performance des équipements de climatisation	17
5.3.2	Remplacement par des technologies moins énergivores	17
6	Mise en place des recommandations : situation idéale	18
7	Conclusions et perspectives	19
7.1	Conclusion de l'étude	19
7.2	Pour aller plus loin	19

8 Annexes	21
8.1 État de l'art complet	21
8.1.1 Comparaison des études sur l'impact du réchauffement climatique sur la consommation d'énergie	21
8.1.2 Socle de connaissances existantes nécessaires à l'étude	21
8.1.2.a Évolution de la température	21
8.1.2.b Estimation de la consommation d'énergie de chauffage et de climatisation	22
8.1.2.c État du parc de logements	23
8.1.2.d Les technologies de climatisation et de refroidissement	25
8.1.2.e Changement de comportement des habitants : effet rebond	26
8.2 Méthodologie	28
8.2.1 Complément sur le calcul des besoins de climatisation	28
8.2.2 Complément sur le calcul des besoins de chauffage	31
8.2.2.a Calcul de la consommation à partir des étiquettes DPE	31
8.2.2.b Méthode de prédiction de parc bâti à l'horizon 2050	34
8.2.3 Calcul de la puissance	37
8.3 Résultats	38
8.3.1 Meilleure connaissance du problème	38
8.3.2 Identification des leviers d'action	38
8.3.2.a Remplacement par des technologies moins énergivores	38

Table des figures

1 Evolution des besoins thermiques du secteur résidentiel en France en 2030, 2050 et 2100 dans le scénario RCP 8.5	9
2 Evolution des besoins thermiques du secteur résidentiel en France à l'horizon 2050 selon les trois scénarios de forçage radiatif	9
3 Evolution des besoins thermiques en 2050 dans le cas du scénario RCP 8.5 en kWh par logement	10
4 Évolution des besoins thermiques en 2050 par département dans le cas du scénario RCP 8.5 (kWh/logement)	10
5 Pic de puissance estimé selon l'année et le scénario de forçage radiatif	11
6 Evolution des besoins thermiques en 2050 dans le cas du scénario RCP 8.5 avec changement du parc	12
7 Pic de puissance estimé en 2050 selon le scénario de forçage radiatif	12
8 Découpage de la France métropolitaine en 8 zones climatiques, permettant de définir le "coefficient de rigueur" (SystèmeD 2021)	22
9 Comparaison de la part des étiquettes dans chaque zone climatique (SDES 2020a)	24
10 Évolution du nombre de ménages par région (BIPE 2012)	25
11 Étapes du calcul de la projection. Élaboré par les auteurs.	35
12 Nouveaux logements par an, adapté de ANAH (n.d.)	35
13 Distribution d'étiquettes en 2050 pour les deux scénarios étudiés. Élaboré par les auteurs.	37

Liste des tableaux

1 Résumé des études du changement climatique sur les bâtiments	2
2 Valeur de consommation en $kWh/m^2/an$	7

3	Impact des scénarios à l'horizon 2050 (RCP 8.5)	14
4	Impact des recommandations sur les consommations	19
5	Description des Scénarii Ademe (adapté de ADEME (2013))	24
6	Taux d'équipement par région en 2020	28
7	Évolution des équipements de climatisation jusqu'en 2050	30
8	Taux d'équipement en 2050	31
9	Surface des logements et proportion de la consommation de chauffage par rapport à la consommation finale par région	34
10	Besoins thermiques totaux en TWh (dont besoins de chauffage) du secteur résidentiel pour les différents scénarios de forçage radiatif et années dans le scénario 1 . . .	38
11	Besoins thermiques totaux en TWh (dont besoins de chauffage) du secteur résidentiel pour les différents scénarios de forçage radiatif et années dans le scénario 2 . . .	38
12	Prix des différents équipements (M-Habitat n.d. , Monequerre n.d. , Fygostudio n.d. , Leroy Merlin n.d. , Ecohabitation n.d.)	40

1 Introduction

Le secteur du bâtiment résidentiel-tertiaire en France a un impact environnemental non négligeable. Ce secteur, à l'origine de 20% des émissions de CO_2 en France, est le second poste d'émission derrière les transports ([CITEPA 2019](#)). Il est également à l'origine de près de 1/3 de la consommation d'énergie finale ([CREDOC 2013](#)). Il s'agit donc d'un enjeu majeur des politiques de lutte contre le réchauffement climatique qui est pris en compte dans de nombreux documents stratégiques comme la "Feuille de route pour la transition écologique", la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) ([Legifrance 2015a](#), [Ministère de la Transition écologique 2020b,a](#)).

Néanmoins, il ne faut pas oublier que la France est soumise à un réchauffement climatique qui va influencer les consommations énergétiques des ménages. Des prédictions faites par Météo France montrent que ces hausses de température pourraient atteindre jusqu'à 4°C à l'horizon 2100 si des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne sont pas mises en place ([Météo France 2021](#)). Cette hausse de température risque d'entraîner une hausse de la consommation en climatisation et une baisse de la consommation de chauffage. D'autres effets pourraient être observés comme la massification des techniques des climatisations personnelles ou au contraire un plus grand recours à des technologies passives.

Ces variations des consommations en chaud et en froid ne sont généralement pas prises en compte dans les scénarios de rénovation du parc de logement. L'objectif de cette étude est donc de modéliser, de manière conjointe, le changement du parc résidentiel et l'évolution des températures. Cette étude permettra ainsi de quantifier de manière plus fine les consommations de ce secteur à l'horizon 2050 et ses implications sur le parc de production nécessaire pour subvenir à ces besoins. Différents scénarios seront explorés notamment pour comprendre comment les préférences des personnes ainsi que les modes de climatisation utilisés peuvent influencer les résultats en étant à l'origine d'effets rebonds ([Flipo & Gossart 2009](#)). Cette étude s'inscrit dans le plan de relance de l'économie française réalisé par le Shift Project et a pour objectif de consolider leur modèle sur la prédiction de l'impact environnemental du secteur résidentiel ainsi que sa transformation.

Ce travail cherchera également à montrer la disparité des résultats selon les territoires qui ne sont pas touchés de manière uniforme par le réchauffement climatique. De plus, la qualité des bâtiments et le nombre d'équipements de refroidissement de ces derniers varient de manière substantielle et auront donc une influence sur les résultats.

La présente note décrira, dans un premier temps, l'état des connaissances et les différents éléments bibliographiques ayant servi à la réalisation du modèle dont nous décrirons le fonctionnement dans un second temps. Nous exposerons ensuite les principaux résultats de l'étude et nous nous appuierons sur ces derniers afin d'effectuer des recommandations sur les leviers d'action à mettre en place ainsi que leur réalisation opérationnelle. Enfin, nous présenterons comment une mise en place réaliste des recommandations proposées peut réduire l'empreinte environnementale du secteur résidentielle à l'horizon 2050.

2 État de l'art

Un état de l'art succinct est présenté ici. Une version complète est fournie en annexe [8.1](#)

2.1 Modèles existants

La première étape a été d'identifier les modèles et les études existantes qui cherchent à relier le changement climatique et les besoins thermiques des bâtiments. Le tableau [1](#) présente les dif-

férentes études à l'international qui analysent le lien entre réchauffement climatique et consommation des bâtiments.

TABLE 1 – Résumé des études du changement climatique sur les bâtiments

Auteurs	Pays	Type de bâtiment	Période	Conclusion
(Wan et al. 2012)	Chine	Commercial et Résidentiel	2100	• refroidissement de +11% à +20% • chauffage de -13% à -55%
(Frank 2005)	Suisse	Commercial et Résidentiel	2100	• refroidissement de +223% à +1050% • chauffage de -36% à -58% • consommation totale de -22% à +1%
(Dodoo et al. 2014)	Suède	Résidentiel	2050-2100	• refroidissement de +33% à +49% • chauffage de -13% à -22%
(Jylhä et al. 2015)	Finlande	Résidentiel	2030-2050-2100	• refroidissement de +40% à +80% • chauffage de -20% à -40% • consommation totale de -5.5% à -22,6%
(Dirks et al. 2015)	Etats-Unis	Commercial et Résidentiel	2052-2089	• refroidissement de +25% à +160% • chauffage de -20% à -51% • consommation totale de -31,4% à +15,4%
(Huang & Hwang 2016)	Taiwan	Résidentiel	2020-2050-2080	• refroidissement de +31% à +82%
(Invidiata & Ghisi 2016)	Brésil	Résidentiel	2020-2050-2080	• refroidissement de +65% à +400% • chauffage de -64% à -98% • consommation totale de +19% à +185%
(Radhi 2009)	Emirats Arabes Unis	Résidentiel	2050-2100	• refroidissement de +7.3% à +24% • chauffage de -9,5% à -39,2% • consommation totale de +5,9% à +19%

On constate que les résultats varient de manière significative selon le pays d'étude et que la variabilité des résultats est plus grande pour les estimations des besoins de refroidissement que pour le chauffage. L'analyse plus détaillée des différents modèles nous montre que ces modèles sont toujours séparés en 2 parties : une pour modéliser l'évolution du climat et une autre pour quantifier l'impact de changement climatique sur la consommation des bâtiments. Pour la modélisation du climat on trouve deux types de méthodes de calcul :

- Un modèle de simulation climatique est utilisé pour prédire le réchauffement climatique durant la période considérée. Les modèles diffèrent selon le pays d'étude : CGM1 & HadCM2 aux Etats-Unis (Amato et al. 2005), HadCM3 au Royaume-Uni (Jentsch et al. 2008) et MIROC3-2 en Chine (Wan et al. 2012). Étant donné que nous avons le modèle de météo France nous comptons utiliser une méthode similaire.

- Une hypothèse est faite sur l'augmentation de la température. L'évolution de température est fixée entre une borne maximale et une borne minimale ([Radhi 2009](#), [Frank 2005](#)).

De même pour estimer la consommation des bâtiments, on trouve 2 types de modèles :

- L'utilisation des degrés jours est une méthode utilisée dans plusieurs travaux de recherche pour quantifier l'impact du réchauffement climatique ([Amato et al. 2005](#), [Rosenthal et al. 1995](#), [Scott et al. 1994](#), [Baxter & Calandri 1992](#)). Nous choisirons cette méthode pour notre modélisation.
- La méthode la plus populaire dans les études récentes consiste à modéliser les bâtiments type sur un logiciel de modélisation thermique. Cette méthode est plus précise que les degrés jours car elle permet de prendre en compte l'humidité, les radiations solaires et les propriétés des parois. Néanmoins, cette solution est moins pratique à mettre en place à une échelle géographique plus fine car elle nécessite un grand nombre de simulations. Le logiciel varie selon les études : TRNSYS ([Jentsch et al. 2008](#), [Asimakopoulos et al. 2012](#)), Visual DOE ([Radhi 2009](#), [Wan et al. 2012](#)), HELIOS ([Frank 2005](#)), AccuRate ([Wang et al. 2010](#)).

2.2 Points inexplorés dans la littérature

On peut voir que même si plusieurs modèles ont été réalisés à travers le monde pour étudier le lien entre réchauffement climatique et consommation des bâtiments, certains axes de notre étude restent inexplorés. Effectivement, la majorité des études traitent uniquement de l'impact du changement climatique sur le bâti existant mais ne s'intéressent pas à l'évolution du bâti pendant la période considérée ou à l'évolution des usages. Notre étude au contraire a pour objectif de traiter de ces sujets conjointement et ainsi fournir un scénario prospectif réaliste à l'horizon 2050.

L'échelle spatiale de notre étude diffère également de la majorité des études présentées précédemment. Nous analyserons les évolutions de froid et de chaud à une échelle nationale (la France) alors qu'une majorité des études précédentes se concentraient sur des échelles locales (une ou plusieurs villes). La question du découpage géographique est donc clef et nous détaillerons celle que nous avons retenue dans la partie 3.

Enfin, l'état de l'art illustre un manque d'études de ce type sur le territoire français. Certaines études existent mais le périmètre géographique est bien plus restreint et ne traitent généralement pas du chauffage et du refroidissement simultanément ([Viguié et al. 2020](#)).

2.3 Données existantes sur le territoire français

Même s'il n'existe pas de travaux traitant conjointement des différents axes de notre étude sur le territoire français, plusieurs documents stratégiques permettent d'obtenir les données nécessaires pour sa réalisation :

- pour la quantification du parc existant : une étude du SDES précise la répartition des étiquettes de Diagnostic de Performance Énergétique DPE à l'échelle départementale à partir desquelles on peut estimer les consommations de chauffage des ménages ([SDES 2020a](#)). Pour les besoins en climatisation, une étude d'EDF nous fournit le taux d'équipement par type de moyen de climatisation ainsi que leur consommation respective ([EDF 2020](#)).
- pour l'évolution du parc de logement : la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) ([Legifrance 2015a](#), [Ministère de la Transition écologique 2020b,a](#)) fixent des objectifs en termes de constructions neuves et de rénovation.

- pour l'évolution de la température : Météo France, en partenariat avec la DRIAS, fournit un modèle qui permet de prédire les évolutions de température sur le territoire français métropolitain selon plusieurs scénarios de forçage radiatif qui correspondent à des concentrations différentes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ([Meteo France 2021](#)).

3 Méthodologie

Nous allons, dans cette partie, expliquer de manière succincte la méthode utilisée et les hypothèses faites pour trouver nos résultats. Une description plus détaillée de la méthode ainsi que l'ensemble des données utilisées seront fournies en Annexe 8.2.

Notre étude va se baser les deux scénarios suivants :

- S1 : on étudie simplement l'évolution de la température sans prendre en compte l'évolution de la composition du parc bâti et des équipements de refroidissement. Ce scénario permet de prendre en compte de manière isolée l'effet de la température.
- S2 : on prend en compte à la fois l'évolution de la température, du parc résidentiel et des équipements de climatisation.

Pour ces différents scénarios plusieurs variantes ont été étudiées. Des variantes liées aux différents scénarios de forçage radiatif ont été étudiées :

- RCP 2.6 : monde très sobre en émissions où le réchauffement reste inférieur à 2°C en France à l'horizon 2100.
- RCP 4.5 : voie intermédiaire. Les émissions croissent pendant quelques décennies, se stabilisent puis décroissent avant la fin du XXIème. L'augmentation de température est en moyenne de 2,2°C en France à l'horizon 2100.
- RCP 8.5 : futur sans régulation des émissions. Engendre jusqu'à 5°C de réchauffement et 3,9°C en moyenne en France à l'horizon 2100.

De plus, différents horizons temporels ont pu être étudiés :

- 2030 : étudié pour le scénario S1 et S2.
- 2050 : étudié pour le scénario S1 et S2. Il s'agit de l'objectif de la commande et celui sur lequel nous nous concentrerons dans la présentation des résultats. Les autres résultats seront présentés dans l'annexe 8.3.
- 2100 : étudié seulement pour le scénario S1 car l'horizon temporel est trop lointain pour prédire la composition du parc de logement

Pour notre étude, les échelles géographiques suivantes ont été retenues :

- l'échelle départementale : cela nous permet ainsi de comprendre les disparités entre les territoires.
- l'échelle des zones thermiques : La Réglementation Thermique de 2012 a découpé la France métropolitaines en trois grandes zones climatiques en fonction essentiellement des températures hivernales : H1, H2 et H3. En agglomérant les données départementales on peut obtenir celles à l'échelle des zones climatiques.

3.1 Évolution des besoins de climatisation

Pour le calcul des besoins de climatisation trois paramètres ont été importants :

- la taux d'équipement des différents équipements : climatisation, pompe à chaleur (PAC) air/air, pompe à chaleur air/eau
- la consommation des différents équipements
- une variable liée à la température appelée degré jour froid *DJF*

3.1.1 Effet température

Le DJF représente la différence entre la température extérieure et une température de référence et est calculé de la manière suivante :

$$DJF_{année} = \sum_{i=1}^{365} \max(0, T_{jour_i} - T_{référence}) \quad (1)$$

Où :

- $DJF_{année}$: la valeur des DJF à de l'horizon temporel étudié. L'année que nous appellerons $année_{ref}$ dans notre étude est l'année 2005. Nous avons choisi cette année car il s'agit de l'année la plus récente pour laquelle on a les valeurs réelles de température.
- T_{jour_i} température moyenne de la journée i
- $T_{référence}$ température de consigne qui est de 26°C pour le froid (l'article R241-30 code de l'énergie ([Légifrance 2021](#))).

Ces valeurs sont calculés à l'échelle départementales et ensuite agrégées à l'échelle des zones thermiques en fonction du nombre de logements.

3.1.2 Équipement en climatisation

Pour quantifier la situation en 2020, nous avons fait les hypothèses suivantes :

- le taux d'équipement total est de 22% en France, dont 13% de PAC air/air, 6% de climatisation mobile et 3% de climatisation air/eau ([EDF 2020](#)). La répartition par département a été trouvée à partir d'une étude réalisée par le site Libiku ([Libiku 2019](#)). Les résultats détaillés sont fournis en annexe 8.2.1.
- les PAC air/air et air/eau consomment 460 kWh/an et les climatisations mobiles 850 kWh/an ([EDF 2020](#)).

La situation en 2050 a été calculée suivant la méthodologie décrite en annexe 8.2.1 :

- le taux d'équipement total est de 37% en France, dont 19% de PAC air/air, 14% de climatisation mobile et 4% de climatisation air/eau ([EDF 2020](#)).
- les consommations des PAC air/air et air/eau et des climatisations mobiles sont les mêmes qu'en 2020 ([EDF 2020](#)). L'amélioration des performances sera analysée dans les recommandations en partie 5.3.1.

Grâce à ces différentes valeurs on peut donc en déduire la consommation liée à la climatisation par département et zones thermiques en multipliant le nombre de foyer par le taux d'équipement et la consommation moyenne de chaque équipement.

3.1.3 Calcul de la consommation de climatisation : lien entre équipement et température

Il faut maintenant prendre en compte de manière simultanée l'effet de l'équipement et celui de la température. Pour le scénario S1, la consommation par département a été calculée de la manière suivante :

$$Conso_{clim_{année}} = \underbrace{conso_{clim_{2020}}}_{\text{équipement}} \times \underbrace{\frac{DJF_{année}}{DJF_{année_{ref}}}}_{\text{effet température}} \quad (2)$$

Le terme $année$ correspond à l'horizon temporel étudié (2030, 2050 ou 2100) et $année_{ref}$ est l'année de référence pour le climat (2005). Comme expliqué précédemment on a un terme lié à

l'équipement $Conso_{clim2020}$ calculé avec les hypothèses décrites dans la section 3.1.2. Enfin on a un terme lié à la température qui correspond au rapport des DJF entre la situation initiale et l'année étudiée. La consommation est donc corrigée de manière proportionnelle au DJF.

Pour le scénario S2 on a la formule suivante :

$$Conso_{climannée} = \underbrace{conso_{clim2050}}_{\text{équipement}} \times \underbrace{\frac{DJF_{année}}{DJF_{année_{ref}}}}_{\text{effet température}} \quad (3)$$

La formule est quasiment la même que celle pour le scénario S1 la seule différence est sur le terme lié à l'équipement. On considère dans ce scénario l'évolution des équipements et on calcule la consommation initiale selon les hypothèses de 2050 décrites dans la section 3.1.2. Pour les deux scénarios les consommations sont d'abord calculées à l'échelle départementale puis sommées à l'échelle des zones thermiques.

3.2 Évolution des besoins de chauffage

Pour le calcul des besoins de chauffage, trois éléments ont été importants :

- le calcul de la consommation du parc à partir des étiquettes DPE.
- l'évolution des étiquettes DPE entre 2020 et 2050
- une variable liée à la température appelée degré jour de chauffage DJC

3.2.1 Effet température

Le DJC représente la différence entre la température extérieure et une température de référence et est calculé de la manière suivante :

$$DJC_{année} = \sum_{i=1}^{365} \max(0, T_{référence} - T_{jour_i}) \quad (4)$$

Où :

- $DJC_{année}$: la valeur des DJC à l'horizon temporel étudié. L'année que nous appellerons $année_{ref}$ dans notre étude est l'année 2005. Nous avons choisi cette année car il s'agit de l'année la plus récente pour laquelle on a les valeurs réelles de température dans le format souhaité.
- T_{jour_i} température de la journée i
- $T_{référence}$ température de consigne de 19°C pour le chauffage (article R241-30 code de l'énergie ([Légifrance 2021](#))).

3.2.2 Calcul de la consommation initiale de chauffage grâce aux étiquettes DPE

Pour calculer la consommation du parc de logements, avant de prendre en compte l'effet de la température on se base sur les étiquettes DPE. Dans un premier temps, les calculs seront faits pour l'année 2020 à partir des données du [SDES \(2020a\)](#), puis à partir des projections des années 2030 et 2050 calculés comme expliqué dans la section 3.2.3.

Les variables dont nous avons besoin pour le calcul sont :

- La quantité de logements par département pour chacune des étiquettes DPE issue du ([SDES 2020b](#)) et de nos projections.
- La surface moyenne des logements dans chaque région issue de ([INSEE 2020](#))

- Le pourcentage de consommation énergétique pour le chauffage par rapport à la consommation totale pour chaque région. Les valeurs sont fournies en annexe 8.2.2.a.

Pour les données où nous avons les informations uniquement à l'échelle régionale, nous considérons que les valeurs sont les mêmes dans tous les départements de la région. L'ensemble des données est rappelé en annexe 8.2.2.a. De plus, on prend les valeurs suivantes pour la consommation des étiquettes :

TABLE 2 – Valeur de consommation en $kWh/m^2/an$

A	B	C	D	E	F	G	
40	70	120	190	280	390	470	$kWh/(m^2.an)$

Connaissant la quantité de logements de chaque étiquette, une estimation de la consommation énergétique par département est calculée de la manière suivante :

$$\sum_{i:A \rightarrow G} \text{consommation moyenne}_i \times \text{quantité de logements}_i \times \text{surface moyenne logement} \quad (5)$$

On peut ensuite en déduire la consommation due au chauffage en appliquant le ratio entre consommation de chauffage et consommation totale de la région dans laquelle se trouve le département (cf section 8.2.2.a).

Les résultats obtenus à l'échelle départementale peuvent aussi être utilisés pour calculer les résultats à l'échelle nationale et celle des zones climatiques.

Pour vérifier la qualité de nos estimations on a comparé l'estimation de la consommation totale d'énergie du secteur résidentiel en France en 2020 avec l'estimation du CEREN (CEREN 2018). On trouve 513 TWh contre 471 TWh soit un écart de 8%. Cette différence s'explique notamment par le choix de la valeur de la consommation moyenne par étiquette et le transfert des données de l'échelle régionale à départementale.

3.2.3 Évolution des étiquettes DPE

Pour le scénario S1, le parc de logement n'évolue pas ; donc on réutilise les données fournies par la SDES (SDES 2020a).

En revanche pour le scénario S2 on est obligé de prédire l'évolution du parc de logements et donc l'évolution des étiquettes DPE. Pour ce faire, on suit la méthode suivante. La méthodologie détaillée est fournie en annexe 8.2.2.b.

La projection du parc actuel de logements est basée sur les données historiques et actuelles. En outre, plusieurs hypothèses ont été adoptées pour la création du modèle, dont les principales sont :

- tous les bâtiments peuvent être rénovés.
- les rénovations et démolitions s'appliquent aux bâtiments les moins performants.
- tous les nouveaux bâtiments ont une étiquette A. Les bâtiments rénovés peuvent avoir des étiquettes A, B et C.

L'ensemble des hypothèses se trouve en annexe 8.2.2.b. Par ailleurs, deux scénarios ont été proposés :

- scénario principal ("stratégique") : la répartition des rénovations est proportionnelle à la présence des passoires thermiques de chaque zone thermique (étiquettes F/G).

- scénario comparatif ("bâtiment") : la répartition des rénovations est proportionnelle aux bâtiments nouveaux de chaque zone.

Ces hypothèses et scénarios ont fait l'origine d'une simulation à l'aide d'un outil Excel dont les résultats seront présentés en annexe 8.2.2.b. Pour les calculs finaux, le scénario stratégique sera retenu car il permet d'obtenir un parc plus performant.

3.2.4 Calcul de la consommation de chauffage : lien entre parc résidentiel et température

Il faut maintenant prendre en compte de manière simultanée l'effet du parc résidentiel et celui de la température. Pour le scénario S1, la consommation par département a été calculée de la manière suivante :

$$Conso_{chauffage_{année}} = \underbrace{conso_{chauffage_{2020}}}_{parc} \times \underbrace{\frac{DJC_{année}}{DJC_{année_{ref}}}}_{\text{effet température}} \quad (6)$$

Le terme *année* correspond à l'horizon temporel étudié (2030, 2050 ou 2100) et *année_{ref}* est l'année de référence pour le climat (2005). Comme expliqué précédemment on a un terme lié à au parc résidentiel $Conso_{chauffage_{2020}}$ calculé avec les hypothèses décrites dans la section 3.1.2. Enfin on a un terme lié à la température qui correspond au rapport des DJC entre la situation initiale et l'année étudiée. La consommation est donc corrigée de manière proportionnelle aux DJC.

Pour le scénario S2 on a la formule suivante :

$$Conso_{chauffage_{année}} = \underbrace{conso_{chauffage_{2020}}}_{parc} \times \underbrace{\frac{DJC_{année}}{DJC_{année_{ref}}}}_{\text{effet température}} \quad (7)$$

La formule est quasiment la même que celle pour le scénario S1 la seule différence est sur le terme lié au parc résidentiel. On considère dans ce scénario l'évolution des étiquettes et on calcule la consommation initiale selon les hypothèses de 2050 décrites dans les sections 3.2.2 et 3.2.3. Pour les deux scénarios les consommations sont d'abord calculées à l'échelle départementale puis sommées à l'échelle des zones thermiques.

3.3 Calcul du pic de puissance

Étant donné l'importance du chauffage en terme de consommation par rapport à la climatisation on a considéré que le froid serait le facteur dimensionnant pour le pic de puissance. On a donc pu identifier ce jour et ensuite calculer la puissance associée. Le détail du calcul est fourni dans l'annexe 8.2.3.

4 Résultats du modèle

4.1 Meilleure connaissance du problème

Comme expliqué précédemment à travers le benchmark, aucune étude, jusqu'alors, n'estimait l'évolution des besoins thermiques du secteur résidentiel en France en fonction de l'évolution du climat.

A partir des projections de température à l'horizon 2100 fournies par le projet DRIAS, nous avons estimé l'évolution des besoins de chauffage et de refroidissement en 2030, 2050 et 2100 pour trois scénarios de forçage radiatif définis par le GIEC.

4.1.1 S1 : Sans évolution du parc bâti

Considérons dans un premier temps que le parc de logements n'évolue pas sur la période d'étude. Seul l'effet de la température est alors pris en compte. Les effets sur la consommation sont visibles en figure 1.

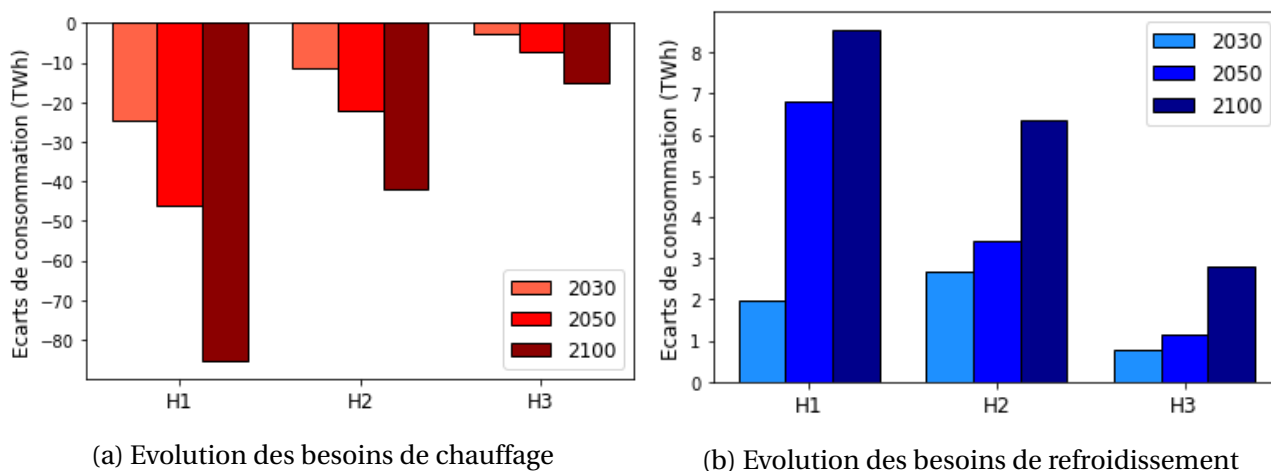


FIGURE 1 – Evolution des besoins thermiques du secteur résidentiel en France en 2030, 2050 et 2100 dans le scénario RCP 8.5

A scénario de forçage radiatif fixé (en l'occurrence ici le scénario RCP 8.5), nous observons dans chaque zone climatique une réduction des besoins de chauffage par rapport à la période actuelle. Cette diminution avec le temps est cohérente avec le réchauffement climatique. Nous avons évalué la consommation actuelle de chauffage à 305 TWh. D'après nos estimations, la consommation annuelle de chauffage en France devrait, si l'on suit la trajectoire du scénario RCP 8.5, diminuer de 40 TWh d'ici 2030, de 80 TWh à l'horizon 2050 et de 140 TWh à l'horizon 2100. Au contraire, les besoins de refroidissement vont augmenter drastiquement avec le temps; ce qui se comprend aisément dans un contexte de réchauffement climatique. Nous avons évalué la consommation actuelle de climatisation à 4 TWh. Elle devrait augmenter de 6 TWh d'ici 2030, de 12 TWh à l'horizon 2050 et de 18 TWh à l'horizon 2100.

Nous nous concentrerons à partir de maintenant sur l'évolution des besoins à l'horizon 2050, objectif principal de notre étude. La figure 2 montre les évolutions des consommations pour différents scénarios du GIEC.

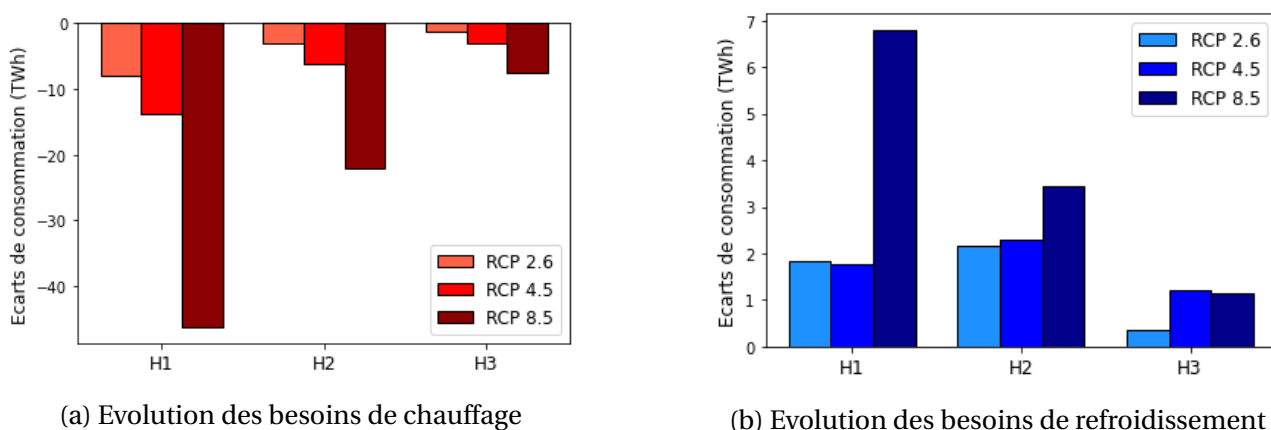


FIGURE 2 – Evolution des besoins thermiques du secteur résidentiel en France à l'horizon 2050 selon les trois scénarios de forçage radiatif

Nous pouvons remarquer, pour chaque zone climatique, des disparités très importantes en fonction du scénario de forçage radiatif considéré, c'est-à-dire de l'efficacité de la politique climatique mise en oeuvre. Plus les émissions de gaz à effet de serre sont importantes, plus les températures augmentent. La consommation d'énergie liée au chauffage diminue et la consommation liée au refroidissement augmente globalement en conséquence. La réduction des besoins de chauffage à l'horizon 2050 varie de 10 TWh dans le cas du scénario RCP 2.6 à 80 TWh dans le cas du scénario RCP 8.5. Au contraire, l'augmentation des besoins de refroidissement varie de 4,5 TWh dans le cas du scénario RCP 2.6 à 11 TWh dans le cas du scénario RCP 8.5.

Comparons l'évolution des besoins de chauffage et de refroidissement à l'horizon 2050 dans le cas du scénario de forçage radiatif RCP 8.5 en figure 3.

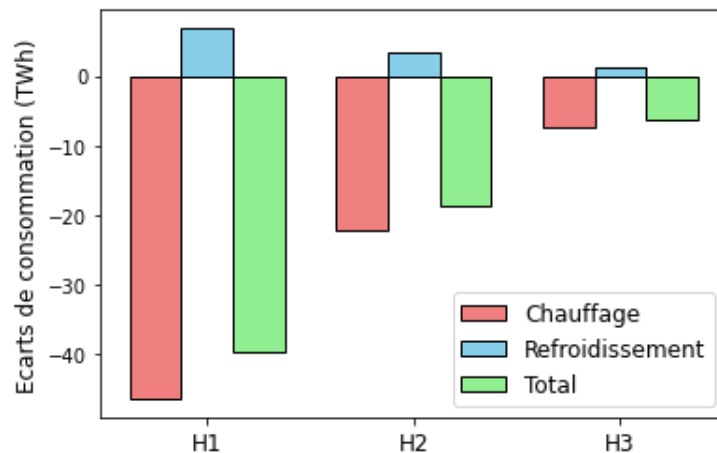


FIGURE 3 – Evolution des besoins thermiques en 2050 dans le cas du scénario RCP 8.5 en kWh par logement

Nous observons que l'augmentation des besoins de refroidissement, si l'on ne considère que l'effet de la température, est significative par rapport à la réduction des besoins de chauffage, mais reste très inférieure. La boucle de rétroaction du climat sur les besoins thermiques des bâtiments est donc clairement négative : le réchauffement climatique réduit les besoins thermiques.

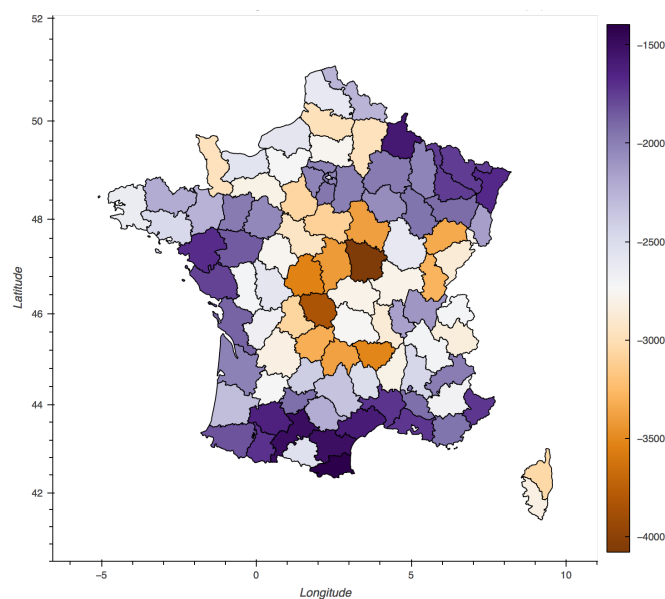


FIGURE 4 – Évolution des besoins thermiques en 2050 par département dans le cas du scénario RCP 8.5 (kWh/logement)

Nous constatons pour l'évolution des besoins thermiques par logement des disparités spatiales importantes à l'échelle départementale en figure 4. Par exemple, la Nièvre verra sa consommation fortement diminuer, ce qui est dû à un parc bâti mal isolé.

En 2013, 34% des besoins de chauffage étaient assurés par un chauffage électrique (derrière le gaz (44%) mais devant le fioul (14%) et le bois (4%); [ADEME \(2014\)](#)). Cette proportion tend à croître fortement durant les prochaines décennies pour décarboner le secteur. Cela passe par une électrification du parc, afin de réduire les recours aux énergies fossiles. Afin de dimensionner au mieux le parc électrique nécessaire, il est impératif de pouvoir estimer le pic de puissance lié aux besoins thermiques du secteur résidentiel. Les pics de puissances sont représentés en figure 5.

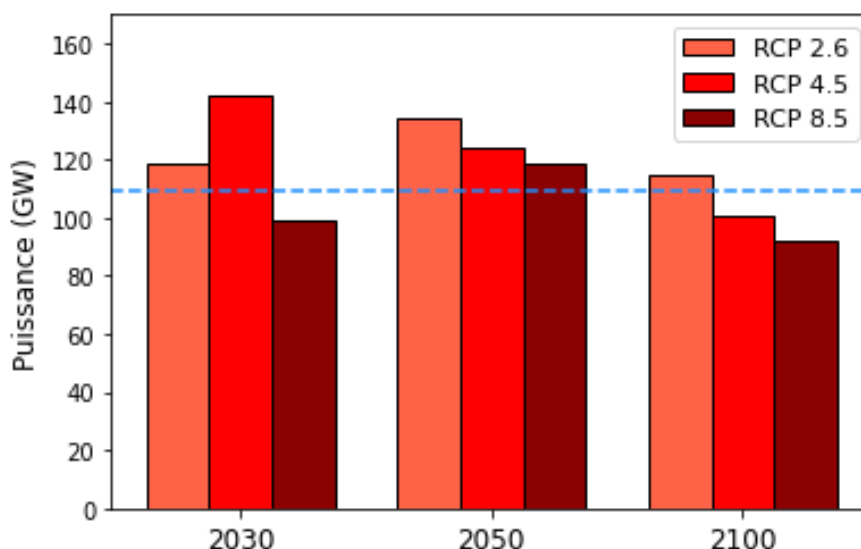


FIGURE 5 – Pic de puissance estimé selon l'année et le scénario de forçage radiatif

Ce pic de puissance devrait continuer à être atteint l'hiver. Globalement, la puissance maximale demandée au cours de l'année décroît avec le temps et l'intensité des émissions de gaz à effet de serre (représentée par les scénarios de forçage radiatif du GIEC). Nous observons néanmoins certains écarts dus à la modélisation des événements exceptionnels (comme les vagues de froid), qui comportent une part aléatoire importante.

Il est intéressant de comparer les pics de puissance estimés à la capacité de production électrique pilotable actuellement disponible en France, qui s'élève à 110 GW; ce qui est de l'ordre de grandeur du pic de puissance lié aux besoins thermiques du secteur résidentiel. A titre de comparaison, un réacteur nucléaire EPR (réacteur à eau pressurisée de 3^{ème} génération) est capable de fournir une puissance nette de 1,7 GWc, tandis que le parc éolien offshore de Dunkerque (dont la mise en service complète est prévue pour 2027) devrait être capable de fournir une puissance de 600 MWc (pour environ 45 éoliennes).

4.1.2 S2 : Avec évolution du parc bâti

Prenons à présent en compte l'évolution de l'état du parc, telle qu'envisagée précédemment (voir partie 3.2.3).

Globalement, les mêmes tendances sont observées. Elles sont néanmoins amplifiées par la rénovation du parc de logements d'une part, qui va diminuer les besoins thermiques, et l'augmentation du taux d'équipements en systèmes de refroidissement d'autre part, qui va augmenter la consommation d'énergie liée au refroidissement comme on peut le voir en figure 6.

Tandis que l'augmentation de la consommation d'énergie pour le refroidissement sera approximativement doublée en raison des nouveaux équipements, la consommation de chauffage

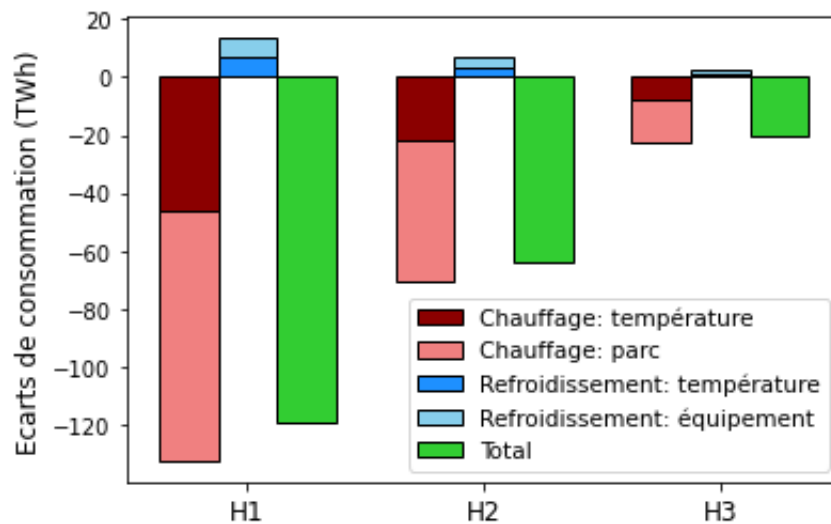


FIGURE 6 – Evolution des besoins thermiques en 2050 dans le cas du scénario RCP 8.5 avec changement du parc

devrait chuter grâce au renouvellement du parc de logements. Bien que les besoins de chauffage sont voués à décroître "naturellement" avec le réchauffement climatique, nous observons que l'impact des rénovations thermiques est plus que significatif.

Nous observons une réduction similaire du pic de puissance estimé par rapport à la situation sans évolution du parc en figure 7. Une puissance installée pilotable de 50 GW permettrait de subvenir aux besoins thermiques maximaux.

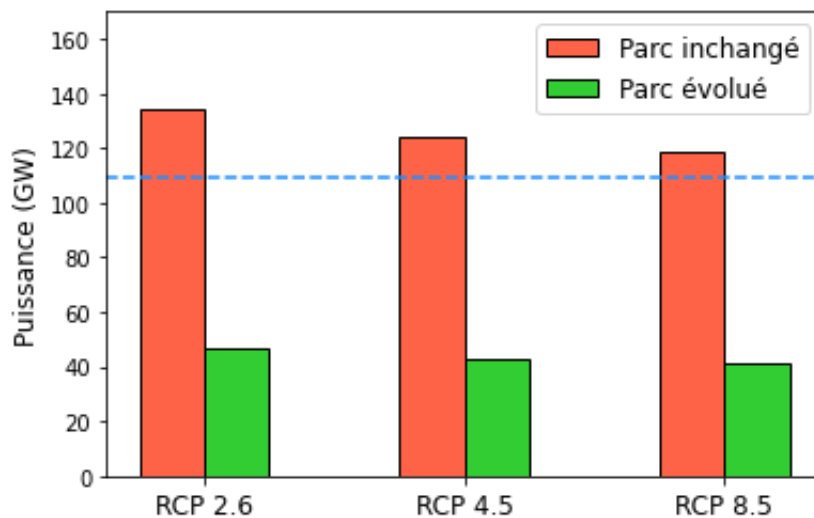


FIGURE 7 – Pic de puissance estimé en 2050 selon le scénario de forçage radiatif

Les consommations pour l'ensemble des scénarios et les différentes années étudiées sont à retrouver dans l'annexe 8.3.

4.2 Meilleure identification des leviers de changement

Nous avons identifié plusieurs leviers d'action : l'amélioration du parc bâti, le changement des températures de déclenchement (à la fois pour le chauffage et le refroidissement) et l'évolution de l'équipement en systèmes de refroidissement (remplacement par des technologies moins énergivores et progrès techniques).

4.2.1 Influence de la rénovation du parc

Comme nous l'avons constaté dans la section 4.1.2, la rénovation du parc constitue un élément majeur pour réduire efficacement la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050. La trajectoire de rénovation étant déjà bien documentée, nous ne reviendrons pas dessus dans cette partie.

4.2.2 Influence des changements comportementaux : évolution des températures de consigne

La température de consigne correspond à la température extérieure à laquelle un déclenchement du système de chauffage ou de refroidissement est souhaité. L'objectif est de conserver une température confortable à l'intérieur de l'habitable. Nous avons considéré pour l'étude une température de consigne de chauffage de 19°C et une température de consigne de rafraîchissement de 26°C. Il s'agit des températures généralement employées dans les études similaires.

Faire changer les température de consigne, et donc les comportements de la population, pourrait permettre de réduire davantage les besoins thermiques du secteur résidentiel. Pour ce faire, deux leviers sont accessibles : diminuer la température de consigne du chauffage et/ou augmenter la température de consigne du refroidissement.

Quel serait l'impact de ces deux leviers? Pour le quantifier, nous étudions la sensibilité des besoins énergétiques à une variation d'un degré Celsius des températures de consigne.

A l'horizon 2050, diminuer la température de consigne de chauffage d'un degré Celsius permettrait de réduire les besoins de chauffage de 11 à 12%, soit 9 à 12% pour les besoins thermiques totaux (en fonction du scénario choisi).

De même, augmenter la température de consigne de refroidissement d'un degré Celsius permettrait de réduire les besoins de refroidissement de 25 à 28% en fonction du scénario, soit une réduction de 1 à 6% des besoins thermiques totaux. La réduction de 6% est atteinte dans le cas du scénario RCP 8.5, avec changement du parc et évolution de l'équipement en systèmes de refroidissement. Les besoins de chauffage sont alors très réduits et les besoins de refroidissement augmentés.

Une réduction de la consommation induite par un changement des températures de consigne peut néanmoins s'apparenter à une perte de liberté et de confort. La question de l'acceptabilité sociale est donc centrale.

4.2.3 Influence d'un changement des systèmes de refroidissement

4.2.3.a Amélioration de la performance des équipements de climatisation

Plus généralement, nous pouvons compter sur un progrès technologique pour chaque type de système de refroidissement. La performance des systèmes est caractérisée par un "coefficient d'efficacité énergétique saisonnier" (SEER). Nous avons fait l'hypothèse d'un doublement des performances SEER; ce qui est cohérent avec la réglementation européenne qui souhaite remplacer l'ensemble des équipements avec une performance inférieure à un SEER de 3,87 ([Commission européenne 2012](#)). Les équipements les plus performants à l'heure actuelle ont un SEER de 8,5. Etant donné que les équipements neufs ont actuellement un SEER compris entre ces deux bornes et qu'une amélioration technologique des performances est attendue le doublement des performances est une hypothèse qui semble cohérente. Les besoins de refroidissement pourraient donc être réduits de moitié, soit une diminution de 6 à 13% des besoins totaux (en fonction du scénario de forçage radiatif).

4.2.3.b Remplacement par des technologies moins énergivores

Nous avons pu remarquer qu'une part majeure de la consommation d'énergie destinée au refroidissement est liée à des climatiseurs mobiles (dits "sauvages"), souvent très énergivores et mal adaptés à l'habitat. Nous avons donc étudié des scénarios de remplacement des climatiseurs mobiles par des pompes à chaleur (air/air ou air/eau) ou des technologies de rafraîchissement passif (voir les différentes technologies de climatisation et refroidissement dans l'annexe 8.1.2.d).

Nous avons défini trois scénarios de remplacement pour voir leur influence respective et estimer le coût des mesures. Les hypothèses détaillées pour les différents scénarios sont présentées en annexe 8.3.2.a :

- scénario A (PAC) : remplacement de l'ensemble des climatisations mobiles par des PAC (air/air air/eau ou géothermie).
- scénario B (passif) : remplacement d'un maximum de climatisations mobiles par des technologies de refroidissement passif. 50% des climatisations mobiles sont remplacées par des technologies passives.
- scénario C (mixte) : remplacement des climatisations mobiles par des PAC ou des méthodes de refroidissement passif. 33 % des climatisations mobiles sont remplacées par des PAC et 27% par des technologies passives.

Le tableau 3 présente l'impact des différents scénarios de rénovation pour le scénario du GIEC 8.5.

TABLE 3 – Impact des scénarios à l'horizon 2050 (RCP 8.5)

Paramètres \ Scénarios	A (PAC)	B (passif)	C (mixte)
Coût de la mesure (Mrd€/an)	1.56	1.27	1.16
Coût matériel évité (Mrd€/an)	0.14	0.07	0.08
Diminution de la consommation d'énergie en froid (%)	-24%	-26.1%	-16%
Diminution de la consommation d'énergie totale (%)	-6%	-6.5%	-4%

Ces résultats nous montrent que le choix des équipements de climatisation influe de manière significative sur les consommations du secteur résidentiel. Ici on a présenté les résultats uniquement pour le scénario du GIEC 8.5. Mais selon les scénarios climatiques et les scénarios de remplacement on obtient des diminutions de la consommation totale variant entre -2% et -6.5%. Il faut également noter que le potentiel des PAC est sous évalué car on ne considère que leur influence sur le froid mais pas sur le chaud alors que maintenant l'ensemble des systèmes sont réversibles et peuvent donc contribuer à la diminution des besoins de chauffage.

5 Recommandations

L'objectif de cette partie est de proposer des solutions qui permettraient la mise en place de manière opérationnelle des leviers d'actions identifiés grâce à notre modèle dans la section 4.2.

5.1 Amélioration du parc bâti

Les analyses menées pour la projection du secteur du bâtiment à l'horizon 2030 et 2050 nous permettent d'effectuer des recommandations pour la rénovation du parc résidentiel.

Premièrement, la comparaison des deux scénarios proposés pour la rénovation met en évidence l'importance d'une action stratégique contre les passoires thermiques, comme proposée

par le gouvernement. Dans ce contexte, le résultat plus efficace du scénario "stratégique" montre l'importance de la bonne distribution des ressources vers le renouvellement des étiquettes F/G, malgré des possibles besoins additionnels de rénovation liés, par exemple, à des taux de déménagement plus élevés dans les zones avec plus de besoin en résidences (scénario "bâtiment").

Cela peut être rendu possible par des investissements spécifiques à la rénovation des passoires thermiques, comme proposé par l'Etat. Néanmoins, la répartition de ces investissements entre les zones climatiques, les régions ou les départements doit prendre en compte la présence des étiquettes F et G par rapport au nombre total de logements. Les investissements se doivent également de prendre en compte les différentes techniques de rénovation pour chaque type de bâtiment, variable selon la zone.

En outre, notre modèle nous permet aussi de faire des recommandations à l'échelle nationale. Ce modèle considère que toutes les rénovations s'appliqueront en priorité aux passoires thermiques, ce qui n'est pas toujours vrai, et présente donc un résultat "optimiste". Ce résultat, néanmoins, est encore distant de l'objectif proposé par la loi LTECV qui dans son article 5 dispose que en 2025, on doit avoir supprimé l'intégralité des bâtiments ayant une consommation supérieure à $330\text{kWhEP/m}^2/\text{an}$ ([Legifrance 2015b](#)). Cela montre donc qu'il est nécessaire d'aller au delà de la limite de 500 000 rénovations par an.

Pour conclure, deux recommandations ressortent de notre modèle de rénovation du parc de logements.

1. À l'échelle nationale, il ne faut pas se limiter au seuil proposé de 500 000 rénovations par an, mais aller au delà si on souhaite atteindre les objectifs fixés par l'article 5 de la LTECV ([Legifrance 2015b](#)).
2. la répartition de ces rénovations sur le territoire est de grande importance et doit se focaliser sur l'élimination des passoires thermiques.

5.2 Changements comportementaux : évolution des températures de consigne

Comme nous avons pu le voir, les changements comportementaux ont un fort impact sur les consommations. Il convient donc de regarder quelles solutions peuvent être mises en place pour inciter les ménages à réduire leur température de chauffage ou augmenter la température de refroidissement et ainsi limiter les effets rebonds. Il y a 3 manières traditionnelles d'influer sur les préférences des personnes ([CREDOC 2013](#)) : les normes et les réglementations, le signal-prix (incitations fiscales, taxes) et les campagnes de sensibilisation. Cependant, de nouveaux outils se développent et notamment les "nudges", qui sont des incitations ayant pour but de faire rentrer les pratiques d'économie d'énergie dans les normes sociales ([Centre d'analyse stratégique 2011](#)).

Concernant la réglementation, des limites de température sont fixées dans le code de l'énergie. L'article R241-26 dispose que la température est de 19°C pour le chauffage pour les : "locaux à usage d'habitation, d'enseignement, de bureaux ou recevant du public" et l'article R241-30 du même code dispose que la température de consigne est de 26°C pour la climatisation ([Légifrance 2021](#)). Néanmoins même si la réglementation est un levier intéressant son champ d'application est limité car ces articles ne s'appliquent qu'aux bâtiments collectifs. De plus, il est difficile de vérifier si la réglementation est bien appliquée par les particuliers ce qui est un des freins principaux. Des moyens de vérification pourraient être mis en place notamment avec les compteurs linky ou gazpard mais ce type de surveillance pourrait être perçu comme trop intrusif, ce qui pose la question de l'acceptabilité sociale d'une telle mesure. Certains groupes de travail vont même plus loin et proposent un couvre-feu thermique entre 22h et 6h pour les chauffages non décarbonés ayant pour objectif d'atteindre 17°C dans les logements ([BL évolution 2019](#)).

Le signal-prix est un élément essentiel car près de 80% des ménages surveillent leur consommation énergétique pour éviter le gaspillage et contrebalancer l'augmentation des prix du chauffage. Néanmoins, les français ont une faible propension à investir dans les services permettant

d'économiser de l'énergie, propension qui est encore plus faible pour les ménages à faible revenu ([CREDOC 2010](#)). Seuls 18% des ménages sont disposés à souscrire à des offres plus qualitatives qui comprennent des outils de gestion de la consommation ([CREDOC 2013](#)). Des aides pourraient donc être distribuées pour les personnes souscrivant à ces aides ou pour les foyers jugés 'économes' ce qui permettrait de réduire les consommations. Une autre possibilité est d'ajouter une taxe. Si on veut jouer sur les comportements des personnes à propos des températures de consignes une taxe sur la consommation d'énergie finale semble plus adaptée qu'une taxe carbone car sinon les logements équipés de pompe à chaleur pourraient continuer de chauffer à des températures élevées. Néanmoins, la mise en place d'une telle taxe pose encore une fois la question de l'acceptabilité sociale.

Comme nous pouvons le voir, la question de l'acceptabilité sociale des mesures est clef. Il est donc important de comprendre comment des outils tels que les campagnes de sensibilisation et les nudges peuvent permettre de changer les usages. Contrairement aux mesures précédentes, portées majoritairement par l'Etat, la mise en place de nudges va impliquer de manière forte les collectivités lors de la mise en place d'expérimentations. Différentes solutions peuvent être retenues ([CREDOC 2013](#)) :

- la mise en place, en partenariat avec les collectivités locales, de concours récompensant les immeubles, les quartiers, les communes, les familles... réalisant les "meilleures" économies d'énergie. Des initiatives de ce type on déjà été mise en place comme le projet "Ma ville est au courant" (Saint-Laurent du Var dans le PACA) ([ECO-CO2 2016](#)). Sept équipes de quartier avaient été formées et celles qui réussissaient les plus grandes économies d'énergie recevaient des récompenses symboliques.
- la diffusion, sur les factures énergétiques des propriétaires de logements anciens ayant réalisés des travaux rénovation énergétique, des économies théoriques attendues après travaux et celles moins importantes réalisées si leurs habitudes de consommation se dégradent : cette mesure est particulièrement importante car une étude wallonne montre que près de 4 foyers sur 10 après avoir faits des travaux rénovation, ont fait plus attention à leur consommation et près de 3/4 d'entre ont développé une forme de considération environnementale ([Wallenborn 2019](#)). Les personnes sont donc réceptives et il convient de leur fournir l'information nécessaire pour les accompagner.
- la diffusion aux habitants d'informations sur la consommation moyenne d'un ménage économe de taille identique et avec des propriétés thermiques similaires : cette information pourrait être ajouté de manière systématique sur les factures. De plus, des collectivités peuvent aller plus loin pour accompagner les ménages. Divers projets ont déjà vu le jour : L'expérimentation Affichéco (région Centre) où des moyens de visualisation en temps réel de la consommation avaient été mis en place, projet Ticelec (village de Biot, PACA) ou des capteurs permettaient de suivre la consommation des ménages sur internet, l'expérience GridTeams (Cannes) où des retours personnalisés étaient donnés au citoyens en fonction de leur consommation ([etics 2013](#), [Webtime 2011](#), [Gridpocket 2011](#)).
- la diffusion aux particuliers de l'impact environnemental de leur changement de comportement (SMS, mails) : ce type d'incitation peut être mis en place par les fournisseurs d'électricité. On peut aussi penser que des applications comme We Act for Good qui mettent en avant des éco-gestes pourront contribuer à la mise en place de ce type d'incitation ([WWF 2021](#)).

5.3 Changement des systèmes de refroidissement

5.3.1 Amélioration de la performance des équipements de climatisation

Pour permettre l'amélioration de la performance énergétique des équipements de climatisation, il y a premièrement des enjeux à l'échelle européenne. L'enjeu principal est réglementaire car la réglementation européenne interdit depuis le 1er janvier 2014 la vente d'équipements de climatisation qui ont un "coefficient d'efficacité énergétique saisonnier" (SEER) de moins de 3.87 ([Commission européenne 2012](#)). On peut ainsi imaginer que l'augmentation progressive des standards européens va entraîner une amélioration des performances du parc en matière de climatisation.

Concernant le territoire français, plusieurs moyens sont à disposition pour permettre l'amélioration des performances de manière opérationnelle. Un point clef est le développement d'une filière industrielle pour les pompes à chaleur. Ce marché est en pleine extension et pourrait croître jusqu'à 10% par an jusqu'en 2030 ([AFPAC 2020a](#)). De plus, de nombreuses entreprises fabriquent des pompes à chaleur sur le territoire français : Sofath, Amzair, Atlantic, SDEEC, Nextherm, Boos-theat, Amzair, Frisquet et CIAT ([GreenTech Journal 2021](#)).

L'Etat dispose de plusieurs outils pour permettre l'accélération du développement de la filière. Le premier est réglementaire. En effet, avec la RE2020 l'impact carbone des bâtiments est pris en compte et pas simplement l'énergie primaire comme la RT2012. Une autre avancée pourrait également être de recalculer le coefficient de conversion entre énergie finale et primaire afin de mieux prendre en compte l'augmentation de la part d'EnR dans le mix énergétique ([AFPAC 2020a](#)).

Un autre outil que peut utiliser l'Etat pour le développement de la filière des pompes à chaleur est l'incitation financière. De nombreux aides sont déjà mises en place ([NEXTHERM 2019](#)) : Crédit d'Impôt Transition énergétique (CITE), aides ANAH, primes énergie, TVA réduite, éco-prêt à taux zéro, primes énergies et "coup de pouce chauffage" ([Ministère de la transition écologique 2018](#)). Une avancée qui permettrait l'amélioration encore plus rapide des performances des pompes à chaleur serait d'indexer les aides sur les SEER des équipements. Par exemple, des bonus pourraient être donnés aux équipements qui ont des performances supérieures au reste du marché. Cela dynamiserait l'innovation dans le secteur.

Enfin, il y a des enjeux techniques avec le développement de capteurs intégrés et l'optimisation des algorithmes : algorithmes d'auto-apprentissage, algorithmes d'auto-adaptation de la loi d'eau (température limite pour éviter la condensation sur certains émetteurs). La numérisation de ces équipements est un enjeu majeur et la puissance publique peut donc investir dans la recherche et développement (R&D) dans ce domaine pour accélérer l'évolution technique des équipements ([AFPAC 2020b](#)).

5.3.2 Remplacement par des technologies moins énergivores

Nous avons dans les leviers d'action identifié deux scénarios de remplacement : un dans lequel on remplacerait une majorité des climatisations mobiles par des pompes à chaleur et un autre dans lequel on remplacerait une partie de ces climatisations mobiles par des technologies passives (voir les différentes technologies de climatisation et refroidissement dans l'annexe [8.1.2.d](#)).

Pour le remplacement des climatisations mobiles par des PAC, le point essentiel comme pour la section [5.3.1](#) est le développement d'une filière industrielle. Les recommandations sont donc similaires à ce qui sera traité dans la partie suivante. On peut cependant observer certains éléments qui contribueront au développement de la filière et qui ne sont pas directement liés à l'amélioration intrinsèque des performances des PAC. Il faut en effet faire de cette filière un pilier de l'économie circulaire notamment en mettant en place les solutions suivantes ([AFPAC 2020a](#)) :

- renforcer la formation et notamment dans les métiers techniques qui ont perdu en visibilité et en réputation au cours des dernières années. Le Synasav a par exemple produit des vidéos

à destinations des jeunes pour présenter la filière. Il faut donc contribuer à la diffusion de ce type de contenu sur les réseaux sociaux mais aussi dans les écoles ([SYNASAV 2021](#)).

- meilleure intégration des acteurs de la filière : il faut permettre un meilleur dialogue entre les professionnels de terrain et les concepteurs. Le numérique est donc un bon outil notamment pour le suivi à distance des performances des équipements et la planification des maintenances
- améliorer les outils d'incitation : les conditions d'octroi des CEE (Certificats d'Économie d'Énergie) sont uniquement comptés par apport à l'unité kWh Cumac qui se base sur la quantité d'énergie finale économisée. Des points supplémentaires pourraient être attribués pour les équipements reconditionnés; ce qui permettrait de valoriser le réemploi dans le secteur.

Concernant la mise en place de technologies passives, plusieurs recommandations semblent nécessaires pour permettre un déploiement plus large de ces dernières sur le territoire :

- amélioration des outils d'incitation : certains des outils d'incitation ne prennent pas en compte de manière suffisante les technologies passives. Par exemple, ma Ma Prime Rénov' ne subventionne pas une grande partie des technologies de refroidissement passif. Seule la protection contre le rayonnement solaire est subventionnée mais des solutions du type puit canadien ou refroidissement adiabatique ne le sont pas ([ECOinfos 2021](#)).
- mettre en valeur les certifications pour les logements dits passifs. Certaines certifications ont déjà vu le jour comme la certification BASE (bâtiment sobre en énergie) ou Propassif ([PROPASSIF 2021](#), [Passive House institute 2016](#)).
- prendre en compte la question du refroidissement à l'échelle de la ville via la gestion de l'espace urbain pour limiter les îlots de chaleur. Les plans locaux d'urbanisme (PLU / PLUi) et les schémas de cohérence territoriale (SCoT), sont des outils adaptés pour répondre à cette problématique ([Cercle Promodul - INEF4 2020](#)).
- former les utilisateurs aux bonnes pratiques. En effet un grand nombre d'utilisateurs n'utilisent pas suffisamment les technologies passives déjà installées. Près de 50% des utilisateurs de protections solaires (stores ..) ne s'en servent jamais; ce qui montre l'importance de la sensibilisation pour certaines des technologies passives qui nécessitent l'interaction avec l'utilisateur ([Cercle Promodul - INEF4 2020](#)).

6 Mise en place des recommandations : situation idéale

Pour terminer nous avons décidé de comparer une situation "idéale" où l'ensemble des recommandations effectuées seraient mises en place avec une situation dans laquelle aucun changement ne serait effectué "inaction". Les hypothèses pour la situation "inaction" sont les suivantes :

- pas de renouvellement du parc bâti
- pas de changement dans les température de consigne (chauffage : 20°C et froid : 26°C)
- pas d'amélioration technique des équipements de climatisation ou de remplacement des technologies moins énergivores

Pour la situation "idéale" les hypothèses de calcul suivantes sont faites :

- renouvellement du parc bâti selon le scénario stratégique décrit en section [3.2.3](#) et en annexes [8.2.2.b](#).
- changement des températures de consignes (chauffage : 19°C, froid : 27°C)
- les performances des équipements de climatisation sont doublées

- on remplace les climatisations mobiles selon le scénario mixte décrit dans la section 4.2.3.b et en annexes 8.3.2.a

On se place dans un scénario de changement climatique optimiste (RCP 2.6) car l'on veut voir l'impact de la situation idéale dans un contexte de lutte forte contre le réchauffement climatique. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4

TABLE 4 – Impact des recommandations sur les consommations

Paramètres \ Scénarios	Inaction	Situation idéale
Consommation en froid en (TWh)	14	4.2
Consommation en Chauffage en (TWh)	290.3	90.5
Consommation totale en (TWh)	304.3	94.7

On peut ainsi ainsi l'impact que peut avoir l'ensemble des recommandations si elles sont mises en place conjointement et leur potentiel de réduction de la consommation du secteur résidentiel.

7 Conclusions et perspectives

7.1 Conclusion de l'étude

Notre étude montre premièrement que l'évolution du climat a un impact substantiel sur la consommation énergétique des ménages. Comme on pouvait s'y attendre, nous connaissons une diminution des besoins de chauffage et une augmentation des besoins de climatisation. Même si l'augmentation relative des besoins de climatisation est plus importante que celle des besoins de chauffage, on peut s'apercevoir qu'au total l'augmentation de température a tendance à diminuer la consommation totale du secteur du bâtiment. Néanmoins, l'augmentation de température ne permet pas de diminuer la consommation d'énergie de manière suffisante. Cela prouve l'intérêt de continuer à mener une politique de renouvellement du parc ambitieuse.

Cette étude prouve le caractère essentiel de la prise en compte de l'évolution du climat. En effet, si on souhaite atteindre un niveau de performance énergétique moyen sur l'ensemble du parc (ex : BBC : 80 kWhEP/m^2) et que l'on prend en compte la rétroaction du climat le nombre de logements à rénover est alors moindre que si on néglige cet effet. L'argent ainsi économisé dans le secteur du bâtiment pourra servir à financer la transition d'autres secteurs fortement émetteurs en CO_2 comme le transport.

Notre étude nous a aussi permis d'identifier et de quantifier l'impact de certains leviers d'action pour la réduction de la consommation du secteur résidentiel. Ils sont classés ci-dessous, du plus important au moins important :

1. amélioration du parc bâti
2. changement du comportement : augmentation de la température de consigne de climatisation et augmentation de celle de chauffage
3. amélioration de la performance des équipements de climatisation
4. remplacement des climatisation mobiles par des équipements moins énergivores

7.2 Pour aller plus loin

Même si notre modèle a fourni des résultats satisfaisants, des améliorations peuvent encore être faites :

- modéliser les différents modes de chauffage et leur évolution dans le temps : notre modèle prend en effet de manière indirecte les modes de chauffage car on se base sur les étiquettes DPE mais on ne peut pas différencier les effets d'enveloppe et ceux dus aux modes de chauffage. Inclure cette répartition des modes de chauffage permettrait de traduire les économies d'énergie en économie de CO_2 mais aussi de calculer le pic de puissance pour les différentes sources d'énergie.
- compléter les données manquantes à l'échelle départementale : certaines données n'étaient disponibles qu'à l'échelle nationale, régionale ou des zones thermiques et nous avons dû faire des hypothèses pour les extrapoler aux échelles souhaitées (zone thermique et départemental). Continuer à enrichir les données d'entrée permettrait donc d'améliorer le modèle.
- moyenner les données de température pour obtenir un modèle plus robuste, en effaçant la part aléatoire du modèle. Il peut s'agir d'une moyenne de plusieurs modèles climatiques (comme le permet le projet DRIAS) ou d'une moyenne des valeurs de plusieurs années consécutives. Néanmoins, nous nous sommes heurtés à la difficulté du traitement des données des années bissextiles. De plus, les vagues de chaud et de froid étant des épisodes extrêmes, une mauvaise moyenne lisserait ces épisodes et la consommation serait fortement réduite en raison du caractère non linéaire des degrés-jours.

Concernant la mise en oeuvre des leviers d'action identifiés dans l'étude, il faudrait :

- quantifier le coût économique et l'acceptabilité sociale de chacune des mesures proposées pour ainsi mieux les hiérarchiser.
- regrouper les différents acteurs susceptibles de mettre en place des recommandations afin de mieux mettre en exergue les limites et les freins aux mesures proposées et d'échanger sur les conditions nécessaires à leur réalisation.

8 Annexes

8.1 État de l'art complet

8.1.1 Comparaison des études sur l'impact du réchauffement climatique sur la consommation d'énergie

Le changement climatique va avoir des répercussions sur la consommation énergétique. D'après une étude publiée dans Nature ([van Ruijven et al. 2019](#)), le changement climatique devrait entraîner une diminution de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel entre -10 et -30%. L'augmentation de température a tendance à diminuer les besoins de chauffage et augmenter les besoins de froid. Cela amène à des résultats différents selon les pays comme l'illustre le tableau 1 qui s'expliquent par la variabilité des climats ainsi que des caractéristiques thermiques différentes pour les bâtiments selon le pays.

On peut donc voir qu'il existe des disparités assez fortes selon les pays, et ce, même dans le secteur résidentiel.

Au sein d'un même pays, il existe aussi des disparités. Par exemple, [Invidiata & Ghisi \(2016\)](#) montrent qu'à l'horizon 2080 la consommation d'énergie totale d'un bâtiment résidentiel peut varier entre les villes. A Belém et à Curitiba, la consommation d'énergie totale varie de +111% et +182% respectivement. De même aux États-Unis, on observe des différences importantes selon les États. Par exemple pour le secteur résidentiel, on observe une augmentation de 12,5% de la consommation d'énergie en Floride et de -15,8% à New-York ([Dirks et al. 2015](#)).

Ces différentes études illustrent donc qu'il est nécessaire de créer un modèle à l'échelle du territoire français pour comprendre les disparités selon les territoires en termes de besoins énergétiques dans le secteur résidentiel car aucune étude ne traite spécifiquement de ce sujet.

8.1.2 Socle de connaissances existantes nécessaires à l'étude

Il n'existe pas d'étude qui traite spécifiquement du lien entre réchauffement climatique et besoin des bâtiments sur le territoire français. Néanmoins, plusieurs études existent pour traiter des différents points essentiels à la réalisation de notre travail : évolution de la température, évolution du parc de logement.

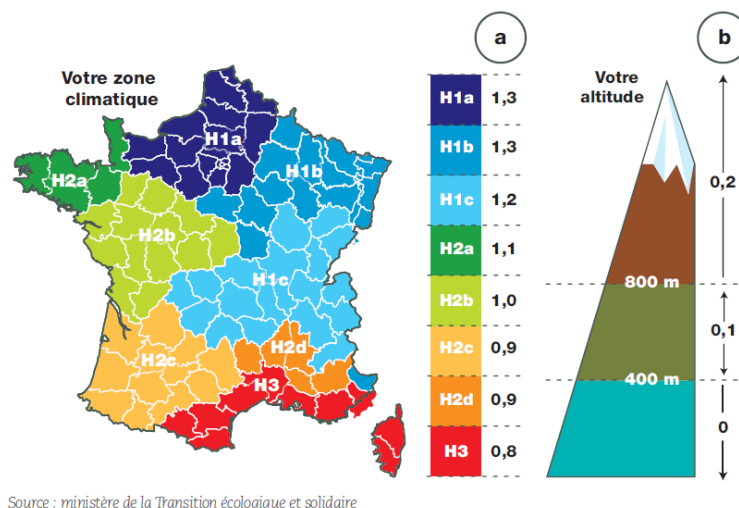
8.1.2.a Évolution de la température

Météo-France a élaboré, conjointement avec l'IPSL et le Cerfacs, des modèles régionaux, permis par l'amélioration récente des méthodes de « descente d'échelle » (dynamique ou statistique). Ces modèles prennent donc en compte non seulement le climat de grande échelle mais aussi des caractéristiques locales telles que la topographie, le type de surface, la couverture du sol... Ce projet Drias (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) détermine des projections, notamment pour l'estimation de la température, selon les trois scénarii de forçage radiatif RCP 2.6, 4.5 et 8.5 pour la métropole (et notamment les régions montagneuses) ainsi que l'Outre-Mer ([Meteo France 2021](#)) :

- RCP 2.6 : monde très sobre en émission où le réchauffement reste inférieur à 2°C en France
- RCP 4.5 : voie intermédiaire. Les émissions croissent pendant quelques décennies, se stabilisent puis décroissent avant la fin du XXIème. L'augmentation de température est en moyenne de 2,2°C en France
- RCP 8.5 : futur sans régulation des émissions. Engendre jusqu'à 5°C de réchauffement et 3,9°C en moyenne en France.

L'échelle spatiale est très fine : le territoire français est ainsi découpé en mailles carrées de 8 km de côté.

L'échelle de météo France est bien plus fine que celle définie par la réglementation thermique de 2012, visible en figure 8 qui est souvent utilisée pour estimer la consommation du parc énergétique du secteur résidentiel.



Source : ministère de la Transition écologique et solidaire

FIGURE 8 – Découpage de la France métropolitaine en 8 zones climatiques, permettant de définir le "coefficient de rigueur" (SystemeD 2021)

Cette réglementation découpe la France métropolitaine en trois grandes zones climatiques en fonction essentiellement des températures hivernales : H1, H2 et H3. Les températures estivales divisent ensuite chaque zone en plusieurs sous-zones. La France compte ainsi huit zones climatiques montrées en figure 8 : H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d et H3.

La division en zones relativement homogènes permet de définir pour chaque logement un coefficient de rigueur correspondant à l'exigence de consommation énergétique. Ainsi, il est possible d'optimiser les normes de construction de logements sur le plan énergétique en tenant compte des spécificités de chaque zone.

L'échelle spatiale très fine employée par le modèle de Météo-France permet d'agréger les données simulées à l'échelle des zones climatiques, qui s'avère être l'échelle de référence pour la politique énergétique du secteur résidentiel en France.

8.1.2.b Estimation de la consommation d'énergie de chauffage et de climatisation

Une fois que la variation de température est mesurée, il faut comprendre comment cette dernière affecte la consommation des foyers

La consommation d'énergie liée au confort thermique dépend directement des conditions de température extérieure. Le Degré Jour Unifié est un indicateur intéressant pour quantifier les besoins en chaud car il permet de calculer la consommation d'énergie à partir de la comparaison de la température moyenne extérieure et une température de référence. De manière simple, on définit le DJU comme une valeur qui représente l'écart entre la température moyenne d'une journée et un seuil de température préétabli qui représente la température extérieure de référence dans laquelle on commence à utiliser les équipements de chauffage ou de climatisation dans une période. Ainsi, le calcul d'un Degré Jour (DJ) sera donné par :

$$DJ = \max \left(\text{référence} - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}; 0 \right) \quad (8)$$

On peut réaliser la somme des degrés jours sur la période d'un mois, d'une année, etc., ce qui donne la valeur de DJU (SDES 2021). L'une des plus importantes questions quand on calcule les DJU est la température de référence utilisée. Le Service des données et études statistiques (SDES) définit cette température de référence comme 17 °C pour les besoins de chauffage. D'autre part, la méthode de Météo France suggère l'utilisation d'une température de 18 °C pour le chauffage.

Lorsqu'on calcule la consommation d'énergie pour la climatisation, il faut connaître les particularités des paramètres du confort thermique d'été et prendre en compte des paramètres comme : l'orientation du bâtiment, son inertie, la bonne gestion des apports internes et le comportement des usagers, qui peut s'adapter de manière à réduire considérablement les besoins d'énergie [Association des professionnels pour le chauffage durable \(2016\)](#). Un premier indicateur possible pour estimer les besoins en froid est la température opérative. Cet indicateur est basé sur le principe que la température de l'air n'est pas suffisante pour juger le confort thermique. En effet, la température des parois en proximité a une influence importante dans la perception de la température. Du fait de l'importance des phénomènes radiatifs dans les changements thermiques et donc dans la perception du confort. La température opérative est calculée par :

$$T_{op} = \frac{T_{air} + T_{parois}}{2} \quad (9)$$

Cela est un critère qui permet d'estimer l'inconfort d'été, qui est souvent calculé à partir de la somme des heures de dépassement par rapport à une limite. En général, la limite considérée varie entre 26 °C et 28 °C. Le deuxième indicateur est la température intérieure conventionnelle (Tic), qui est actuellement le critère de confort thermique réglementaire. Selon ce critère, la condition de confort est vérifiée par :

$$Tic < Tic_{ref} \quad (10)$$

Où Tic_{ref} est la température intérieure conventionnelle calculée sur un bâtiment de référence. Le calcul de la Tic prend en compte diverses caractéristiques thermiques d'un bâtiment, telles que son inertie, isolation, etc. Cet indicateur est souvent critiqué dans la RT2012 pour son incapacité à faire ressortir le risque d'inconfort.

8.1.2.c État du parc de logements

Connaître seulement la température n'est pas suffisant pour en déduire le lien entre réchauffement climatique et consommation du secteur résidentiel. Il faut également connaître la composition du parc de bâtiment maintenant et à l'horizon 2050.

Composition actuelle du parc : étiquette DPE

L'étiquette énergie nous permet de connaître la performance énergétique d'un bâtiment ; ce qui va ainsi jouer sur sa sensibilité aux changements de température. La distribution des étiquettes dans les différentes zones climatiques, présentée en figure 9 est liée à deux faits : l'âge de construction de logements qui a un lien direct avec les techniques et méthodes constructives utilisées et le climat de la zone considérée.

Pour les 3 zones climatiques l'étiquette "D" est prédominante. Pour les zones H1 et H2, l'étiquette "E" est la seconde étiquette la plus représentée, tandis que pour la zone H3 il s'agit de l'étiquette "C". Lorsqu'on analyse les extrêmes, c'est-à-dire, les étiquettes A et G, on s'aperçoit que dans la zone H1, le nombre d'étiquettes "A" est très inférieur aux autres (0.9% du total). L'étiquette "G", quant à elle représente pour la zone H1 22% du total du parc.

Pour les zones climatiques H2 et H3, les proportions d'étiquettes "A" sont plus importantes, avec un 2.8% et 3.3% du parc total, respectivement.

La zone H1 possède le plus de logements construits avant 1975 ; ce qui explique en partie pourquoi la proportion de mauvaises étiquettes DPE y est plus grande (la part d'étiquettes "E", "F"

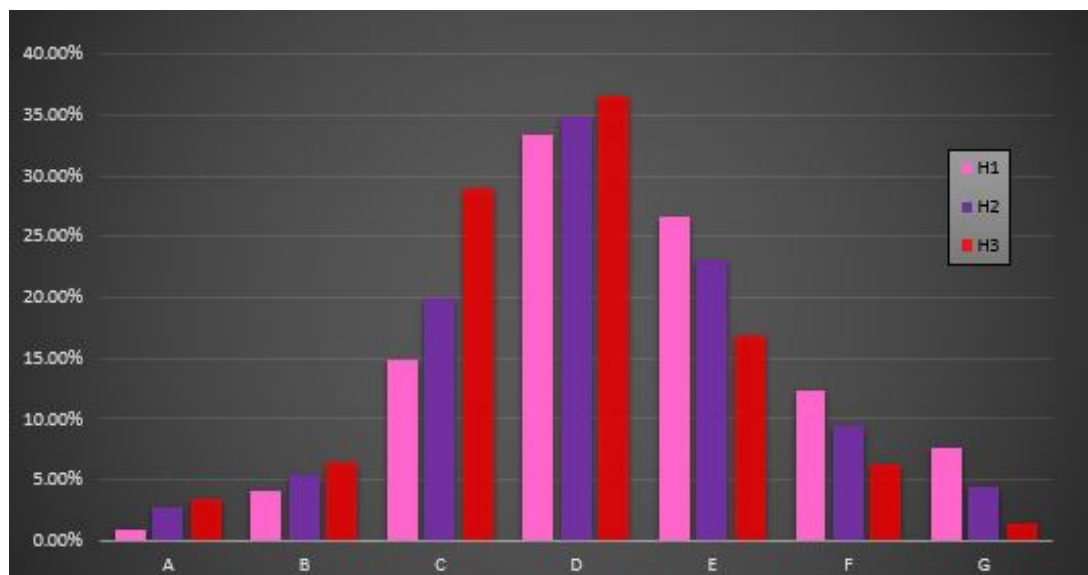


FIGURE 9 – Comparaison de la part des étiquettes dans chaque zone climatique (SDES 2020a)

et "G" représente le 47% du parc, tandis que cela représente pour les autres zones 37% et 25%). De plus, ayant une plus grande proportion de constructions neuves et des contraintes climatiques moins fortes, la zone climatique H3 est caractérisée par une part d'étiquettes "A", "B" et "C" de 38%, contre 20% pour la zone H1 et 28% pour la zone H2. Les conditions climatiques dans chaque zone jouent un rôle central sur l'étiquette DPE : la zone H1 est caractérisée par des besoins de chauffage plus élevés que les autres zones dus à des périodes de besoin de chauffage plus étalées pendant l'année ce qui entraîne des consommations plus importantes et donc des plus mauvaises étiquettes DPE.

Évolution du parc

Les perspectives d'évolution du parc de logement peuvent être analysées dans trois cadres différents : les nouvelles constructions produites dans l'horizon d'étude, les effets et taux de rénovation imposés aux résidences déjà existantes et l'évolution des technologies utilisées par le secteur.

Plusieurs scénarios prospectifs ont été réalisés pour quantifier les futurs logements neufs. L'ADEME, par exemple, a étudié cette évolution à deux horizons différents : 2030 et 2050. Le tableau suivant comporte les principaux concepts adoptés pour chaque scénario.

TABLE 5 – Description des Scénarii Ademe (adapté de ADEME (2013))

An	2030	2050
Constructions/an	350 000	300 000
Rénovations	500 000	Ensemble du parc rénové : (Etiquette DPE C à minima)
Rapport $\frac{Maison_{indi}}{Logement_{collec}}$	50/50	40/60

La deuxième étude, est une prospective socio-économique et démographique réalisée par le BIPE en 2012, pour l'horizon 2070, à l'échelle nationale et régionale. Pour ce calcul, le nombre de constructions nouvelles a été guidé par les projections des ménages par région, incrémentées d'un taux de vacances, et par les choix entre logement individuel et collectif. La figure 10, extraite de ce document, indique l'augmentation des ménages par régions. De plus, seront utilisés des chiffres annuels du nombre de nouveaux logements ANAH (n.d.) et rénovations Insee (n.d.), ainsi que des références de simulation qui ont donné des estimations pour les démolitions annuelles Laurent et al. (2006).

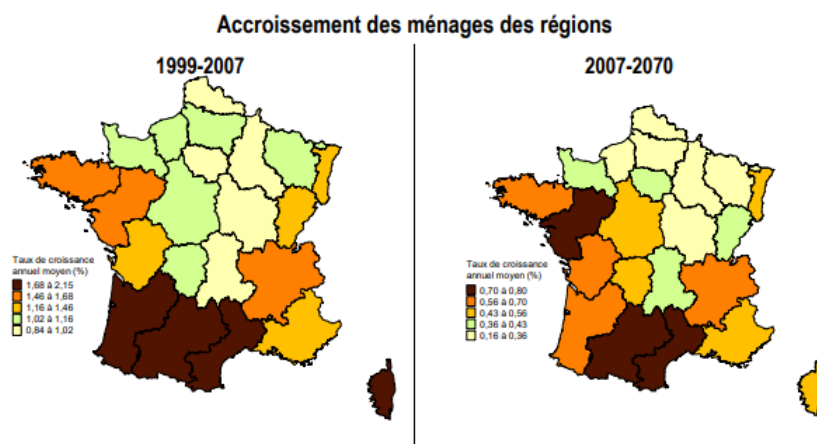


FIGURE 10 – Évolution du nombre de ménages par région (BIPE 2012)

La rénovation du parc est un autre axe majeur pour améliorer les performances du parc de logement. Le Plan de Rénovation Énergétique des Bâtiments lancé en 2017 définit comme objectif la rénovation de 500 000 logements en condition de passoires thermiques par an, dont la moitié se compose par les ménages occupés par des personnes de revenu modeste, qui recevront des aides. Parmi ces 250 000 logements par an, le Plan envisage une partie de 100 000 des logements sociaux, et 150 000 occupés par les propriétaires. L'objectif est d'atteindre le niveau BBC-rénovation (consommation maximale à $80 \text{ kWh}_{\text{ep}} / (\text{m}^2 \cdot \text{an})$) dans les bâtiments concernés.

8.1.2.d Les technologies de climatisation et de refroidissement

Le changement climatique devrait engendrer des pics de chaleur de plus en plus intenses et de plus en plus fréquents. Les périodes de canicule seront ainsi plus nombreuses et plus longues à l'avenir. Au-delà de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, des mesures d'adaptation au changement climatique seront nécessaires pour garantir des conditions de vie convenables. La question du confort d'été est notamment centrale. En effet, l'homme passe en moyenne 90% de son temps à l'intérieur. La température intérieure impacte donc de façon très significative la santé humaine et la productivité.

Pour s'adapter au réchauffement climatique, il convient donc de comprendre les différents modes de climatisation que nous allons lister dans les paragraphes suivants.

Les modes de climatisation actifs

Nous allons, dans un premier temps, nous intéresser aux différents modes de refroidissement qualifiés d'actifs. Ces différentes solutions reposent sur un même principe : un apport en électricité met en fonctionnement un moteur qui va permettre de produire un échange de chaleur entre un milieu et un autre milieu. La chaleur est généralement transmise à un fluide frigorigène qui permet de refroidir l'air intérieur. Il existe cependant plusieurs types de technologies :

- les pompes à chaleur air/air correspondent à ce que l'on appelle souvent un climatiseur. Une unité à l'extérieur du logement permet de capter le froid de l'air extérieur qui est ensuite transmis via un fluide frigorigène à l'intérieur du logement (Effy 2021). En France près de 75% de ces équipements sont réversibles c'est à dire qu'ils peuvent servir de chauffage en hiver et près de 30% d'entre eux sont utilisés quotidiennement à cet effet (EDF 2020).
- les climatiseurs mobiles fonctionnent selon le même principe que les pompes à chaleur air/air. Ils sont cependant bien moins performants car généralement la source chaude et la source froide sont dans la même pièce ce qui limite la capacité de l'appareil à capter le froid de l'extérieur (Effy 2021). Ils sont généralement utilisés pour les usages ponctuels et

de manière prépondérante dans les logements collectifs ou l'installation d'une PAC est plus complexe (EDF 2020).

- les PAC air/eau ou géothermie fonctionnent selon le même principe que la PAC air/air à la différence près que le milieu de l'unité extérieure est modifié. Il ne s'agit plus de l'air comme pour la PAC air/air mais soit de l'eau pour la PAC air/eau ou du sol pour la PAC géothermie.

Les modes de refroidissement passifs

Il existe ensuite un grand nombre de technologies passives qui peuvent contribuer au confort d'été. Les principales solutions sont les suivantes (Cercle Promodul - INEF4 2020).

- végétaliser l'environnement du bâtiment permet d'atténuer les îlots de chaleur et d'absorber certains des rayons UV. Ce type de solution est particulièrement adaptée pour les bâtiments en milieu urbain.
- Limiter les effets du rayonnement direct et la montée en température des parois opaques : plusieurs solutions techniques existent pour atteindre cet objectif. On peut notamment utiliser des isolants biosourcés ou utiliser des revêtements réfléchissants pour éviter la montée en chauffe des parois (par exemple revêtement blanc)
- Limiter les effets du rayonnement et la montée en température de l'habitat via les parois vitrées : encore une fois diverses solutions existent déjà sur le marché.
 - brise soleil
 - système de lanterneaux et de voûtes
 - automatisation de l'ouverture et de la fermeture des protections solaires et des occultants
- rafraîchir le milieu ambiant. Encore une fois plusieurs technologies sont disponibles :
 - système de ventilation mécanique couplé au tirage thermique naturel : la gestion de l'ouverture des fenêtres permet à l'air de circuler et maintenir une température acceptable dans la maison
 - installation de puits canadiens et de puits provençaux : permet de refroidir l'air en le faisant circuler dans le sol
 - le rafraîchissement adiabatique : généralement utilisé dans le tertiaire et se base sur le principe physique suivant. Si on évapore l'humidité contenue dans l'air, l'énergie nécessaire à l'évaporation est prélevée dans l'air chaud, qui en conséquence se refroidit. Ce système reproduit donc ce principe. L'air chaud passe dans un échangeur humide grâce à un ventilateur et se refroidit. Cette technologie consomme 10 fois moins qu'un climatiseur classique.

8.1.2.e Changement de comportement des habitants : effet rebond

Un effet rebond peut avoir lieu lorsqu'un changement technologique ou réglementaire permet aux usagers d'un bien ou service d'avoir le même niveau de service pour un moindre coût énergétique. Dès lors, on parle d'effet rebond si au lieu de maintenir leur niveau de service, les usagers décident de l'augmenter. Ceci implique une consommation effective plus importante que celle qu'on aurait eu avec le maintien du niveau de service.

On calcule l'effet rebond en pourcentage, qui quantifie la part d'énergie économisée théorique finalement consommée par un changement de comportement.

Effet rebond à court terme et effet rebond à long terme

Comme l'effet rebond est dépendant d'un changement de comportement des usagers, il dépend du temps. Ainsi, il est d'autant plus important que le temps est long, et on estime à 10 ans

l'atteinte de l'effet rebond maximal. Ceci s'explique par l'inertie des changements de comportement après acquisition d'un bien moins énergivore, mais aussi par un effet de stock, lié à la durée de vie des équipements actuels, qui décale l'apparition de l'effet rebond puisqu'il décale le changement de bien ([Cayla 2011](#)).

Quantification pour le chauffage

En ce qui concerne l'utilisation du chauffage, les chiffres de l'effet rebond à long terme varient entre 10 et 30% ([Cayla 2011](#)).

Limites

Les calculs d'effet rebond présentés ici ne prennent en compte que des considérations économiques. En effet, on estime dans quelle mesure les comportements changent si le coût énergétique de la consommation quotidienne est plus ou moins réduit. Cette approche ne s'attarde pas sur des effets sociaux et culturels, qui peuvent eux aussi venir modifier les comportements des individus. Pour le chauffage, une prise de conscience écologique globale peut inciter les usagers à moins l'utiliser, sans forcément se reposer sur une avancée technologique qui aurait permis la réduction de la facture.

On ne prend pas non plus en compte la complexité des processus de changement d'attitude vis-à-vis de la consommation, en se focalisant sur les profils "moyens".

8.2 Méthodologie

8.2.1 Complément sur le calcul des besoins de climatisation

Comme nous avons pu l'expliquer nous nous sommes basées sur les taux d'équipement pour calculer les besoins en climatisation. Le taux à l'échelle de la France est de 22% dont 13% de PAC air/air 6% de climatisation mobile et 3% de PAC air/eau. La répartition en 2020 par région est fournie dans le tableau suivant 6.

TABLE 6 – Taux d'équipement par région en 2020

Région	taux équipement	PAC air/air	PAC air/eau	Climatisation mobile
Auvergne-Rhône-Alpes	21,0%	12,4%	2,9%	5,7%
Bourgogne-Franche-Comté	17,0%	10,0%	2,3%	4,6%
Bretagne	13,0%	7,7%	1,8%	3,5%
Centre-Val de Loire	20,0%	11,8%	2,7%	5,5%
Corse	64,0%	37,8%	8,7%	17,5%
Grand Est	17,0%	10,0%	2,3%	4,6%
Hauts-de-France	13,0%	7,7%	1,8%	3,5%
Ile-de-France	22,0%	13,0%	3,0%	6,0%
Normandie	14,0%	8,3%	1,9%	3,8%
Nouvelle-Aquitaine	21,0%	12,4%	2,9%	5,7%
Occitanie	27,0%	16,0%	3,7%	7,4%
Pays de la Loire	15,0%	8,9%	2,0%	4,1%
Provence-Alpes-Côte d'Azur.	49,0%	29,0%	6,7%	13,4%

On a ensuite considéré que le taux d'équipement était le même dans tous les département de la région considérée. On utilise la formule suivante pour calculer la consommation par département :

$$C_{feq_{dept}} = nb_{log} \left(C_{PAC_{air/air}} \times \%PAC_{air/air_{dept}} T + C_{PAC_{air/eau}} \times \%PAC_{air/eau_{dept}} + C_{clim_{mobile}} \times \%clim_{mob_{dept}} \right) \quad (11)$$

Où :

- nb_{log} : est le nombre de logement
- $C_{fequip_{dept}}$: est la consommation du département en climatisation en kWh/an
- $C_{PAC_{air/air}}$: est la consommation moyenne d'une PAC air/air soit de 460 kWh/an (EDF 2020)
- $C_{PAC_{air/eau}}$: est la consommation moyenne d'une PAC air/eau soit de 460 kWh/an (EDF 2020)
- $C_{clim_{mobile}}$: est la consommation moyenne d'une climatisation mobile soit de 850 kWh/an (EDF 2020)
- $\%PAC_{air/air_{dept}}$: est le taux d'équipement en PAC air/air dans le département en %. On trouve ce taux à partir du tableau 6
- $\%PAC_{air/eau_{dept}}$: est le taux d'équipement en PAC air/eau dans le département en %. On trouve ce taux à partir du tableau 6

- $\%_{\text{clim mob}_{\text{dept}}}$: est le taux d'équipement en climatisation mobile dans le département en %.
On trouve ce taux à partir du tableau 6

On va maintenant expliqué comment on a pu calculer l'évolution du nombre d'équipement total à l'horizon 2050. Pour ce faire on s'est appuyé sur les ventes des différents équipements dans les dernières années. On a retenu les chiffres suivants :

- pour les PAC air/air : 300 000 nouveaux équipement par an ; $a_{PAC_{\text{air/air}}} = 300000/an$
- pour les PAC air/eau : 56 000 nouveaux équipement par an ; $a_{PAC_{\text{air/eau}}} = 56000/an$
- pour les climatisations mobiles : 400 000 nouveaux équipement par an ; $a_{\text{clim}_{\text{mob}}} = 400000/an$

On a ensuite considéré la durée de vie des différents équipements :

- pour les PAC air/air : 20 ans de durée de vie ; $\tau_{PAC_{\text{air/air}}} = 20ans$
- pour les PAC air/eau : 20 ans de durée de vie ; $\tau_{PAC_{\text{air/eau}}} = 10ans$
- pour les climatisations mobiles : 10 ans de durée de vie ; $\tau_{\text{clim}_{\text{mob}}} = 10ans$

On peut ensuite en déduire l'évolution de des différents équipements sur le territoire par année en utilisant la formule suivante :

$$nb_{\text{equip } i_{\text{année } n+1}} = nb_{\text{equip } i_{\text{année } n}} + a_{\text{equip } i} - \frac{nb_{\text{equip } i_{\text{année } n}}}{\tau_{\text{equip } i}} \quad (12)$$

Où :

- $nb_{\text{equip } i_{\text{année } n+1}}$: le nombre d'équipement lors de l'année n+1
- $nb_{\text{equip } i_{\text{année } n}}$: le nombre d'équipement lors de l'année n
- $a_{\text{equip } i}$: la nombre de nouveaux équipements achetés chaque année rappelé précédemment pour chacun des types d'équipement
- $\tau_{\text{equip } i}$: la durée de vie des équipements pour chacun des équipements appelée précédemment pour chacun des types d'équipement

Donc on peut voir que cette formule prend à la fois le nombre de nouveaux équipement qui arrive sur le marché chaque année mais aussi le taux de renouvellement des anciens équipements. L'évolution du nombre total des différents équipements jusqu'à l'horizon 2050 est présenté dans le tableau suivant 7.

TABLE 7 – Évolution des équipements de climatisation jusqu'en 2050

Année	total équipement	PAC air/air	PAC air/eau	Climatisation mobile
2020	6,26E+06	3,70E+06	8,53E+05	1,71E+06
2021	6,62E+06	3,81E+06	8,67E+05	1,94E+06
2022	6,94E+06	3,92E+06	8,79E+05	2,14E+06
2023	7,25E+06	4,03E+06	8,91E+05	2,33E+06
2024	7,52E+06	4,12E+06	9,03E+05	2,50E+06
2025	7,78E+06	4,22E+06	9,14E+05	2,65E+06
2026	8,01E+06	4,31E+06	9,24E+05	2,78E+06
2027	8,23E+06	4,39E+06	9,34E+05	2,90E+06
2028	8,43E+06	4,47E+06	9,43E+05	3,01E+06
2029	8,61E+06	4,55E+06	9,52E+05	3,11E+06
2030	8,78E+06	4,62E+06	9,60E+05	3,20E+06
2031	8,94E+06	4,69E+06	9,68E+05	3,28E+06
2032	9,08E+06	4,76E+06	9,76E+05	3,35E+06
2033	9,22E+06	4,82E+06	9,83E+05	3,42E+06
2034	9,34E+06	4,88E+06	9,90E+05	3,48E+06
2035	9,46E+06	4,93E+06	9,97E+05	3,53E+06
2036	9,56E+06	4,99E+06	1,00E+06	3,57E+06
2037	9,66E+06	5,04E+06	1,01E+06	3,62E+06
2038	9,76E+06	5,09E+06	1,01E+06	3,66E+06
2039	9,84E+06	5,13E+06	1,02E+06	3,69E+06
2040	9,92E+06	5,17E+06	1,02E+06	3,72E+06
2041	9,99E+06	5,22E+06	1,03E+06	3,75E+06
2042	1,01E+07	5,26E+06	1,03E+06	3,77E+06
2043	1,01E+07	5,29E+06	1,04E+06	3,80E+06
2044	1,02E+07	5,33E+06	1,04E+06	3,82E+06
2045	1,02E+07	5,36E+06	1,05E+06	3,84E+06
2046	1,03E+07	5,39E+06	1,05E+06	3,85E+06
2047	1,03E+07	5,42E+06	1,05E+06	3,87E+06
2048	1,04E+07	5,45E+06	1,06E+06	3,88E+06
2049	1,04E+07	5,48E+06	1,06E+06	3,89E+06
2050	1,05E+07	5,51E+06	1,06E+06	3,90E+06

On peut ensuite en déduire si on fait l'hypothèse d'une population constance que le taux d'équipement sur l'ensemble du territoire vaut 37% dont 19% de PAC air/air 14% de climatisation mobile et 4% de climatisation air/eau. On peut ensuite en déduire la répartition par région présentée dans le tableau 8 en supposant une augmentation uniforme dans les territoires. Cette hypothèse pourrait être améliorée et affinée selon les territoires mais nous avons trouvé peu d'information dans la littérature pour affiner ce point de la modélisation.

TABLE 8 – Taux d'équipement en 2050

Région	Taux équipement	PAC air/air	PAC air/eau	Climatisation mobile
Auvergne-Rhône-Alpes	35,0%	20,7%	4,8%	9,5%
Bourgogne-Franche-Comté	31,0%	18,3%	4,2%	8,5%
Bretagne	27,0%	16,0%	3,7%	7,4%
Centre-Val de Loire	34,0%	20,1%	4,6%	9,3%
Corse	78,0%	46,1%	10,6%	21,3%
Grand Est	31,0%	18,3%	4,2%	8,5%
Hauts-de-France	27,0%	16,0%	3,7%	7,4%
Ile-de-France	36,0%	21,3%	4,9%	9,8%
Normandie	28,0%	16,5%	3,8%	7,6%
Nouvelle-Aquitaine	35,0%	20,7%	4,8%	9,5%
Occitanie	41,0%	24,2%	5,6%	11,2%
Pays de la Loire	29,0%	17,1%	4,0%	7,9%
Provence-Alpes-Côte d'Azur.	63,0%	37,2%	8,6%	17,2%

Le calcul est ensuite le même que celui de l'équation (11) mais il faut simplement remplacer les taux par les nouveaux taux d'équipement correspondant à l'horizon 2050. Dans les calculs présentés ici la température n'est pas encore prise en compte elle est prise en compte dans un second temps comme expliqué dans la section 3. Cela permet ainsi de comprendre l'impact individuel de l'évolution du parc et de la température.

8.2.2 Complément sur le calcul des besoins de chauffage

8.2.2.a Calcul de la consommation à partir des étiquettes DPE

Les valeurs utilisées pour le calcul de la consommation en 2020 sont présentés dans le tableau visible dans les deux pages suivantes :

Données Géographiques			Moyenne Surface[m2]	Nombre de logements par Etiquette							Total Logements	Zone climatique	Consommation énergétique (A partir des DPE) [kWh/an]	Consommation chauffage
Région	Zone climatique	Département		A	B	C	D	E	F	G				
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	1	92	4.045	14.948	50.399	79.358	62.638	27.244	19.851	258.483	H1	4.114.859.160,00	3.003.847.186,80
Hauts-de-France	H1	2	102	1.358	5.344	16.897	57.253	69.186	38.252	22.656	210.946	H1	4.495.858.080,00	2.935.795.326,24
Corse-du-Sud	H3	2A	125	2.497	6.920	35.516	44.921	18.410	6.689	2.263	117.216	H3	2.022.446.596,75	1.516.834.947,56
Haute Corse	H3	2B	125	2.822	7.819	40.133	50.760	20.803	7.559	2.557	132.452	H3	2.285.334.172,75	1.714.000.629,56
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	3	92	1.077	2.858	21.099	47.520	45.895	23.573	17.494	159.516	H1	2.923.642.240,00	2.134.258.835,20
Provence-Alpes-Côte d'Azur	H2	4	83	1.922	1.639	6.723	21.873	20.020	11.402	10.093	73.672	H2	1.262.402.195,00	946.801.646,25
Provence-Alpes-Côte d'Azur	H1	5	83	529	1.314	6.833	14.894	17.721	8.803	6.889	58.783	H1	1.027.593.120,00	770.694.840,00
Provence-Alpes-Côte d'Azur	H3	6	83	11.815	32.742	168.053	212.556	87.111	31.652	10.706	554.635	H3	6.354.275.820,00	4.765.706.865,00
Auvergne-Rhône-Alpes	H2	7	92	3.450	4.614	20.072	35.530	36.785	18.058	17.657	136.166	H2	2.463.247.560,00	1.798.170.718,80
Grand Est	H1	8	95	358	3.441	13.073	36.850	37.741	17.003	10.990	119.456	H1	2.227.743.825,00	1.292.091.418,50
Occitanie	H2	9	90	730	1.878	11.711	18.671	16.824	8.738	5.996	64.548	H2	1.085.454.900,00	716.400.234,00
Grand Est	H1	10	95	598	4.301	20.865	40.958	37.944	18.652	11.393	134.711	H1	2.412.944.425,00	1.399.507.766,50
Occitanie	H3	11	90	5.376	8.763	41.749	65.600	36.902	13.850	3.279	175.519	H3	2.341.274.850,00	1.545.241.401,00
Occitanie	H2	12	90	2.325	2.750	12.803	35.716	33.790	19.619	13.102	120.105	H2	2.171.698.200,00	1.433.320.812,00
Provence-Alpes-Côte d'Azur	H3	13	83	29.856	57.365	270.903	343.842	153.373	58.797	11.280	925.416	H3	10.514.985.725,00	7.886.239.293,75
Normandie	H1	14	100	4.028	12.671	47.072	100.016	90.093	37.934	21.234	313.048	H1	5.647.814.500,00	3.727.557.570,00
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	15	92	447	1.436	3.249	11.751	14.638	12.220	15.380	59.121	H1	1.356.360.600,00	990.143.238,00
Nouvelle Aquitaine	H2	16	99	2.605	5.063	27.250	58.922	41.191	15.563	4.211	154.805	H2	2.512.342.305,00	1.758.639.613,50
Nouvelle Aquitaine	H2	17	99	9.080	15.969	74.020	100.991	62.310	29.883	8.310	300.563	H2	4.550.231.565,00	3.185.162.095,50
Centre-Val de Loire	H2	18	99	1.857	1.587	15.901	43.767	44.740	22.879	11.290	142.021	H2	2.759.145.345,00	2.041.767.555,30
Nouvelle Aquitaine	H1	19	99	578	2.558	9.755	29.512	27.313	19.854	13.701	103.271	H1	2.174.961.690,00	1.522.473.183,00
Bourgogne Franche Comté	H1	21	108	1.805	8.384	39.787	69.289	64.930	32.507	21.228	237.930	H1	4.819.822.920,00	3.277.479.585,60
Bretagne	H2	22	101	5.565	11.822	38.787	89.938	63.181	27.498	16.222	253.013	H2	4.432.469.840,00	2.969.754.792,80
Nouvelle Aquitaine	H1	23	99	205	599	4.345	11.964	11.718	8.959	13.280	51.070	H1	1.228.090.545,00	859.663.381,50
Nouvelle Aquitaine	H2	24	99	2.982	6.495	28.276	58.243	49.965	24.326	8.452	178.739	H2	3.121.904.115,00	2.185.332.880,50
Bourgogne Franche Comté	H1	25	108	2.002	9.776	38.306	67.032	60.575	29.465	21.388	228.544	H1	4.596.091.200,00	3.125.342.016,00
Auvergne-Rhône-Alpes	H2	26	92	7.954	9.680	42.272	71.290	51.706	21.466	16.036	220.404	H2	3.434.247.760,00	2.507.000.864,80
Normandie	H1	27	100	3.493	7.735	28.545	80.469	79.461	30.923	15.341	245.967	H1	4.538.497.500,00	2.995.408.350,00
Centre-Val de Loire	H1	28	99	2.028	4.866	20.569	54.982	60.403	29.394	16.148	188.390	H1	3.665.917.530,00	2.712.778.972,20
Bretagne	H2	29	101	6.502	19.865	69.053	144.031	112.185	44.974	24.927	421.537	H2	7.360.497.715,00	4.931.533.469,00
Occitanie	H3	30	90	11.894	22.150	101.984	128.520	56.154	20.666	3.816	345.184	H3	4.201.523.100,00	2.773.005.246,00
Occitanie	H2	31	90	26.995	41.680	149.791	262.192	130.573	39.547	11.758	662.536	H2	8.502.687.900,00	5.611.774.014,00
Occitanie	H2	32	90	1.969	2.114	14.412	32.447	17.317	9.653	2.021	79.933	H2	1.173.472.200,00	774.491.652,00
Nouvelle Aquitaine	H2	33	99	32.411	62.309	225.653	283.837	115.281	41.128	7.193	767.812	H2	9.945.593.955,00	6.961.915.768,50
Occitanie	H3	34	90	26.424	37.537	155.875	197.208	96.820	37.843	8.309	560.016	H3	6.927.918.750,00	4.572.426.375,00
Bretagne	H2	35	101	12.688	37.871	106.305	151.391	96.748	34.830	19.848	459.681	H2	7.059.948.985,00	4.730.165.819,95
Centre-Val de Loire	H2	36	99	1.129	1.290	9.423	29.210	31.569	17.140	8.602	98.363	H2	1.964.621.340,00	1.453.819.791,60
Centre-Val de Loire	H2	37	99	5.738	12.015	49.508	98.796	76.577	29.826	14.225	286.685	H2	4.809.246.255,00	3.558.842.228,70
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	38	92	5.150	28.747	95.698	168.697	129.032	53.970	45.131	526.425	H1	8.561.410.060,00	6.249.829.343,80
Bourgogne Franche Comté	H1	39	108	586	3.065	12.772	30.844	31.379	17.151	12.120	107.917	H1	2.353.878.900,00	1.600.637.652,00
Nouvelle Aquitaine	H2	40	99	7.564	11.816	39.858	73.039	36.990	9.840	1.125	180.232	H2	2.483.999.100,00	1.738.799.370,00
Centre-Val de Loire	H2	41	99	2.073	4.434	22.427	45.312	42.139	18.492	11.499	146.376	H2	2.674.871.100,00	1.979.404.614,00
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	42	92	2.835	16.986	63.229	107.330	82.341	33.601	27.103	333.425	H1	5.381.402.000,00	3.928.423.460,00
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	43	92	872	3.242	11.060	20.829	21.796	16.471	18.034	92.304	H1	1.887.787.560,00	1.378.084.918,80
Pays de la Loire	H2	44	98	22.284	52.583	149.934	225.879	123.491	41.753	17.064	632.988	H2	8.940.350.370,00	4.917.192.703,50
Centre-Val de Loire	H1	45	99	1.094	14.212	36.496	109.741	90.398	40.610	19.066	311.617	H1	5.641.703.100,00	4.174.860.294,00
Occitanie	H2	46	90	1.294	2.657	9.267	21.218	20.787	11.397	4.809	71.429	H2	1.205.724.150,00	795.777.939,00
Nouvelle Aquitaine	H2	47	99	3.602	5.346	24.213	51.480	35.999	17.829	7.916	146.385	H2	2.500.861.770,00	1.750.603.239,00
Occitanie	H2	48	90	710	692	3.320	8.661	7.836	4.621	5.187	31.027	H2	590.922.000,00	390.008.520,00
Pays de la Loire	H2	49	98	8.661	15.879	62.914	121.014	83.403	32.639	15.548	340.058	H2	5.468.375.990,00	3.007.606.794,50
Normandie	H2	50	100	4.071	6.900	25.888	61.411	60.995	33.138	23.086	215.489	H2	4.254.501.000,00	2.807.970.660,00
Grand Est	H1	51	95	878	12.184	33.704	78.210	71.959	36.999	22.109	256.043	H1	4.624.341.600,00	2.682.118.128,00
Grand Est	H1	52	95	214	1.944	8.436	24.771	20.078	12.071	8.176	75.690	H1	1.440.528.700,00	835.506.646,00
Pays de la Loire	H2	53	98	2.270	3.950	20.658	36.391	33.749	16.459	10.146	123.623	H2	2.232.305.740,00	1.227.768.157,00
Grand Est	H1	54	95	1.341	13.237	55.772	92.384	101.332	49.283	31.005	344.354	H1	6.233.623.075,00	3.615.501.383,50
Grand Est	H1	55	95	92	1.533	7.494	20.745	21.099	13.092	8.715	72.770	H1	1.446.308.025,00	838.858.654,50
Bretagne	H2	56	101	8.949	21.535	67.516	123.172	84.334	30.509	12.984	348.999	H2	5.586.446.855,00	3.742.919.392,85
Grand Est	H1	57	95	1.876	23.285	81.686	151.647	127.668	58.725	28.191	473.078	H1	7.935.341.925,00	4.602.498.316,50
Bourgogne Franche Comté	H1	58	108	123	2.493	6.025	21.503	25.024	20.230	18.349	93.747	H1	2.381.035.500,00	1.619.104.140,00
Hauts-de-France	H1	59	102	15.998	58.690	220.407	443.891	301.893	108.626	4.950	1.154.455	H1	18.200.022.180,00	11.884.614.483,54
Hauts-de-France	H1	60	102	3.320	11.098	44.131	100.719	99.493	43.987	26.923	329.671	H1	6.344.913.060,00	4.143.228.228,18
Normandie	H1	61	100	832	1.922	12.568	30.321	35.244	19.371	12.898	113.156	H1	2.340.035.000,00	1.544.423.100,00
Hauts-de-France	H1	62	102	6.461	25.392	101.855	221.841	182.560	70.322	30.177	638.608	H1	11.268.544.860,00	7.358.359.793,58
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	63	92	3.078	15.864	53.710	85.723	72.429	35.531	30.854	297.189	H1	5.036.961.360,00	3.676.981.792,80
Nouvelle Aquitaine	H2	64	99	12.613	37.351	100.298	115.650	48.521	15.795	4.380	334.608	H2	4.241.381.265,00	2.968.966.885,50
Occitanie	H2	65	90	1.895	4.168	18.255	32.134	24.820	13.901	7.114	102.287	H2	1.640.263.500,00	1.082.573.910,00
Occitanie	H3	66	90	9.027	13.974	73.684	77.039	34.695	13.922	4.684	227.025	H3	2.763.788.400,00	1.824.100.344,00
Grand Est	H1	67	95	2.421	29.979	83.890	150.854	121.745	56.821	35.412	481.122	H1	8.085.671.825,00	4.689.689.658,50
Grand Est	H1	68	95	1.503	16.378	62.503	101.300	83.477	44.811	28.895	338.867	H1	5.873.357.900,00	3.406.547.582,00
Auvergne-Rhône-Alpes	H1	69	92	8.391	58.617	185.997	295.403	175.367	78.546	48.516	850.837	H1	12.673.500.940,00	9.251.655.686,20

Le tableau 9 présente les surfaces des logements ainsi que la proportion de chauffage par rapport à la consommation totale par région.

TABLE 9 – Surface des logements et proportion de la consommation de chauffage par rapport à la consommation finale par région

Région	Surface moyenne des logements [m2]	Ratio consommation pour chauffage et consommation totale
ILE DE FRANCE	76	0,7
CENTRE VAL DE LOIRE	99	0,74
BOURGOGNE FRANCHE COMTE	108	0,68
NORMANDIE	100	0,66
HAUTS DE FRANCE	102	0,65
GRAND EST	95	0,58
PAYS DE LA LOIRE	98	0,55
CORSE	125	0,75
BRETAGNE	101	0,67
NOUVELLE AQUITAINE	99	0,7
OCCITANIE	90	0,66
AUVERGNE RHONE ALPES	92	0,73
PROVENCE ALPES COTE D AZUR	83	0,75

8.2.2.b Méthode de prédiction de parc bâti à l'horizon 2050

Description de la méthode

La projection du parc résidentiel entre 2021 et 2050 suit les actions prévues par les lois et articles analysés dans l'État de l'Art, en suivant la structure indiquée par la figure 11 : un calcul global initial est formulé pour tout le pays, qui sera en suite divisé entre les trois zones climatiques selon les hypothèses adoptées. Finalement, les résultats acquis sont sommés pour donner le résultat global définitif. De plus, les résultats sont aussi calculés par département pour pouvoir faciliter les calculs liés à l'impact de la température.

Pour cette analyse, les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- Tous les bâtiments peuvent être rénovés ;
- Le taux de rénovation ne dépassera pas 500 000 rénovations/an, valeur établie par [Ministère de la Transition Écologique et Solidaire](#) (n.d.) ;
- Le calcul commence à l'année des données de DPE par département et applique des valeurs trouvées pour les années suivantes ;
- Les constructions neuves sont distribuées entre les trois zones selon les proportions estimées à partir du rapport de [BIPE \(2012\)](#). Une autre possibilité pour cette approximation serait, par exemple, de profiter des résultats de [Insee" \(2017\)](#) pour les populations en 2050 ;
- le nombre de démolitions par an sera fixe et égal à 16 000 /an [Laurent et al. \(2006\)](#) ;
- la distribution des rénovations entre les étiquettes A, B et C change à chaque début de décennie ;

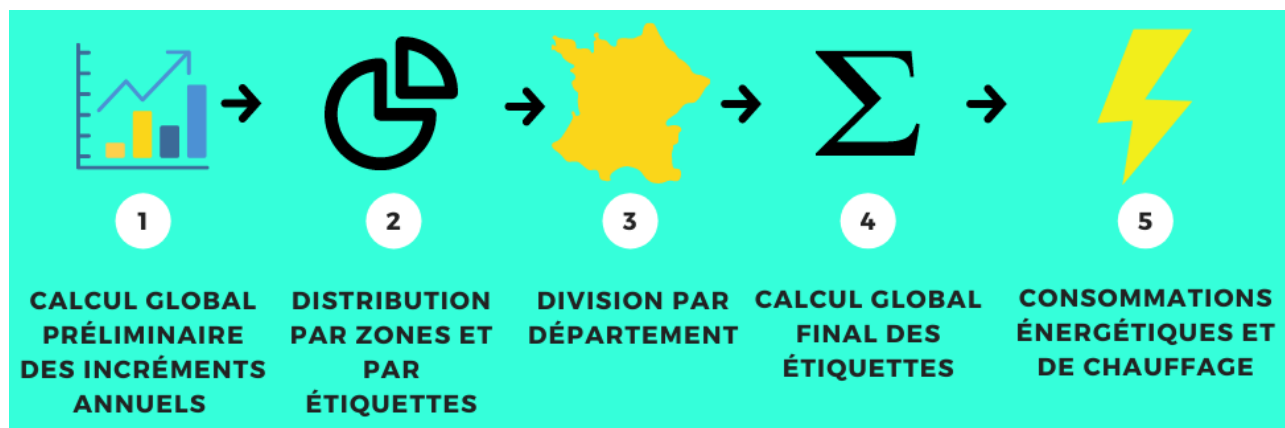
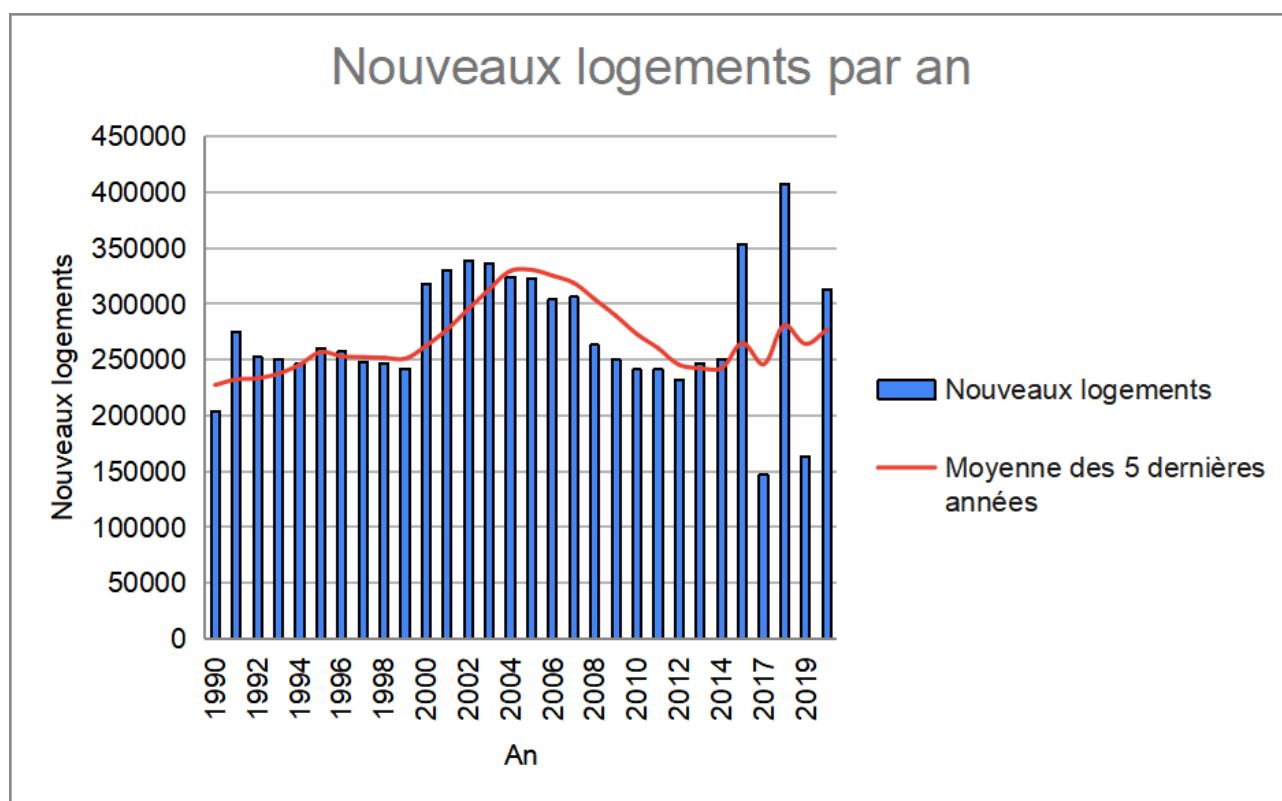


FIGURE 11 – Étapes du calcul de la projection. Élaboré par les auteurs.

- les rénovations et les démolitions seront toujours appliquées aux bâtiments les moins performants ;
- les bâtiments nouveaux auront étiquette A [Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement \(2011\)](#) [Ministère de la Transition Écologique \(2021\)](#) ;
- les bâtiments nouveaux seront construits à un taux fixe de 257 000 / an, équivalent à la moyenne des cinq dernières années des données de [ANAH \(n.d.\)](#). Ce choix est motivé par le fait que les taux annuels ont beaucoup varié, ce qui est beaucoup plus présent pour les moyennes de cinq ans (figure 12) ;
- les rénovations augmentent à un taux égal à celui entre 2019 et 2020 (1,35%) [Insee \(n.d.\)](#) jusqu'au seuil de 500 000 / an ;

FIGURE 12 – Nouveaux logements par an, adapté de [ANAH \(n.d.\)](#)

De plus, deux scénarios de rénovation ont été proposés :

- scénario “stratégique” : la partition des rénovations entre les trois zones climatiques suit leurs rapports d’étiquettes F et G en relation au total. Cette hypothèse illustre idéalement une action stratégique du pouvoir public au regard de ces résidences moins performantes.
- scénario “bâtiment” : la partition des rénovations entre les trois zones climatiques suit leurs besoins de ménages et la création des nouvelles résidences. Cela s’appuie sur une conception des rénovations liées aux déménagements et ventes conséquents des besoins plus élevés en ménages.

Une conséquence du deuxième scénario a été le besoin d’une dernière hypothèse sur la distribution des rénovations entre les étiquettes : il a fallu considérer qu’il n’y aura plus de rénovations dirigées vers l’étiquette C, vu qu’elle était la pire pour une des zones. Finalement, ces données ont été comparées au résultat obtenu par [ADEME \(2013\)](#) en ce qui concerne le nombre total de logements en 2050.

À partir de ces hypothèses, un outil Excel a été construit pour mener la simulation. Au-delà de la simulation comme décrit précédemment, cet outil permet aussi le test des nouveaux variables, comme les distributions des rénovations par étiquettes et entre zones, ainsi que des constructions neuves et les évolutions globales de ces variables. Tout ce calcul est réalisé, comme indiqué par les hypothèses, en fonction du nombre de bâtiments par étiquette, étant cette distribution le premier résultat de la projection à l’horizon 2050.

La nature changeable de cet outil le fait un élément de facile intégration aux projets développés par des autres groupes. L’intégration de la projection détaillée menée peut être facilement réalisée, ainsi que le changement des hypothèses selon les avis des utilisateurs. Il reste, donc, la conversion de ces valeurs en énergie totale et, finalement, en consommation de chauffage.

Résultats de la projection

Le résultat des deux scénarios proposés, à partir des hypothèses décrites, sont illustrés par la figure 13 en termes de bâtiments par étiquette.

La projection du parc résidentiel à l’horizon 2050 par étiquettes thermiques n’est pas le but principal de ce projet, mais quand même la réalisation de quelques conclusions. Premièrement, elle renforce l’importance d’une action stratégique pour les rénovations, au-delà d’un simple regard sur les totaux nationaux. Il est évident que l’approche dite “stratégique” a présenté un effet plus important sur les bâtiments moins performants nationaux, pendant que l’approche “bâtiment” a présenté un résultat très efficient pour une zone, mais pas pour le global. D’après les analyses, ces différentes stratégies ont produit des consommations globales 5% plus faibles pour le scénario “stratégique”.

De plus, une analyse de l’outil Excel pour chaque année permet des conclusions sur les propositions gouvernementales pour les rénovations. Comme décrit dans l’État d’art, des attentes ont été lancées pour le renouvellement complet des passoires énergétiques (étiquettes F et G) du parc privé à l’horizon 2025 . Avec la projection proposée, il est évident que ces résultats n’arrivent qu’à 2029, avec un décalage important par rapport à l’objectif initial. Cela permet de conclure, donc, qu’il ne faut pas se contenter avec le seuil de 500 000 rénovations par an, mais garder l’augmentation de ces chiffres. En plus, ce seuil prévu pour l’année 2020 serait touché qu’en 2023, ce qui montre l’intérêt pour augmenter le taux d’incrément annuel des rénovations.

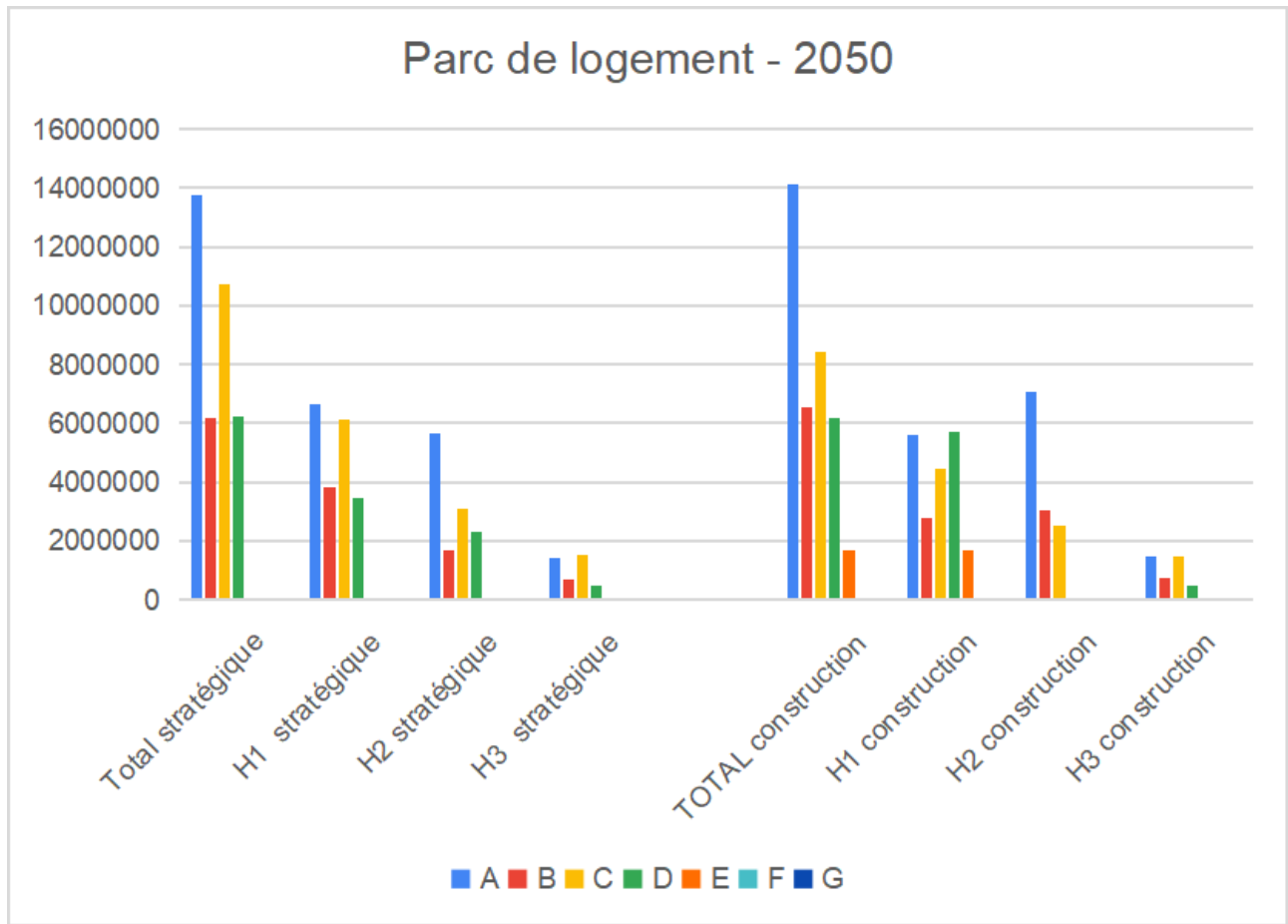


FIGURE 13 – Distribution d'étiquettes en 2050 pour les deux scénarios étudiés. Élaboré par les auteurs.

8.2.3 Calcul de la puissance

La première étape a été de calculer la puissance associée à chaque jour. Pour ce faire nous avons utilisé la formule suivante :

$$P_{jour_i} = \sum_{j=1}^{nb_{dept}} \frac{DJC_{jour_i dept_j}}{DJC_{année_{dept_j}}} \times \frac{Conso_{année_{dept_j}}}{24} \quad (13)$$

Où :

- P_{jour_i} : est la puissance sur l'ensemble du territoire en kW le jour i
- nb_{dept} : le nombre de département
- $DJC_{jour_i dept_j}$: les degrés jours de chauffage pour le jour i dans le département j.
- $DJC_{année_{dept_j}}$: les degrés jours de chauffage sommés sur l'ensemble de l'année pour le département j
- $Conso_{année_{dept_j}}$: la consommation pour le département j en kWh/an.

Dans cette formule en divisant les degrés jour à l'année par les degrés jour sur une journée on se ramène à une consommation en kWh/jour. Ensuite en divisant par le nombre d'heure dans la journée soit 24 on se ramène à une puissance en kW. On précise que pour ce calcul on a pris la température min pour le $DJC_{jour_i dept_j}$ ce qui nous permet de nous mettre dans une situation la plus extrême. En réalité on aurait pu obtenir des résultats plus précis si on avait les données heure

par heure et par jour par jour. En effet prendre la température min sur la journée revient à dire l'ensemble des départements atteignent leur température minimale en même temps dans la journée et que cette température est maintenue suffisamment longtemps pour que malgré l'inertie thermique des bâtiments le système de chauffage soit obligé de fournir une puissance proportionnelle à l'écart entre cette température minimale et la température de consigne. Ces hypothèses font que l'on a tendance à surestimer le pic de puissance.

On fait ensuite ce calcul pour tous les jours de l'année et ensuite on garde celui pour laquelle la valeur de la puissance est la plus élevée. On fait donc le calcul suivant pour obtenir le pic de puissance :

$$Pic_{puissance} = \max_{i=1}^{365} (P_{jour_i}) \quad (14)$$

Où :

— $Pic_{puissance}$: est le pic de puissance en kW

8.3 Résultats

8.3.1 Meilleure connaissance du problème

TABLE 10 – Besoins thermiques totaux en TWh (dont besoins de chauffage) du secteur résidentiel pour les différents scénarios de forçage radiatif et années dans le scénario 1

Scénario 1 : Pas de changement du bâti			
Année	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Actuel	309 (305)	309 (305)	309 (305)
2030	285 (277)	288 (279)	275 (266)
2050	301 (293)	291 (282)	244 (229)
2100	295 (285)	255 (237)	184 (162)

TABLE 11 – Besoins thermiques totaux en TWh (dont besoins de chauffage) du secteur résidentiel pour les différents scénarios de forçage radiatif et années dans le scénario 2

Scénario 2 : Evolution du parc bâti			
Année	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Actuel	309 (305)	309 (305)	309 (305)
2050	116 (101)	113 (98)	106 (79)

8.3.2 Identification des leviers d'action

8.3.2.a Remplacement par des technologies moins énergivores

Le hypothèses pour le calcul des scénarios sont rappelées ici :

— **Scénario A : Utilisation exclusive de pompes à chaleur**

On suppose dans ce scénario que l'ensemble des climatisations sauvages sont remplacées par des pompes à chaleur. Coût : 1 560 000 000€.

— Scénario B : Utilisation exclusive de technologies passives

On cherche dans ce scénario à connaître l'efficacité des technologies passives seules. On enlève donc toute utilisation de technologies actives, notamment les pompes à chaleur. Le scénario est le suivant :

- **20% du parc ne sera pas modifié** du à des problèmes de transmission des informations de sensibilisation ou d'aides de l'état. Coût : 0 €
- 40% des habitations individuelles sont équipées en puits provençaux. **20% du parc de climatisations sauvages est transformé en puits provençaux.** Coût : 960 000 000 €.
- Une partie des usagers ne change rien à son logement mais applique efficacement les conseils de refroidissement passif sans équipement, comme la ventilation nocturne. **15% des climatisations mobiles voient leur consommation réduite de 25%.** On suppose ici que les usagers utilisent au mieux leur climatisation car ils font bien attention à la gestion de leurs volets et de la ventilation, et qu'ils veulent réduire leur consommation. Coût : 31 500 000€.
- Pour la moitié des logements restants, on investit dans une ventilation mécanique qui permet de réduire de 20% la consommation de climatisation. **22,5% des climatisations sauvages voient donc leur consommation baisser de 20%.** Coût : 135 000 000€.
- Enfin, pour les logements restants on modifie les volets afin de stopper totalement l'utilisation de climatisation. **22,5% des climatisations ne sont plus utilisées.** Coût : 144 000 000€.

Pour résumer, dans ce scénario on se retrouve avec 49,25% de climatisations mobiles non modifiées, et donc 28,25% de climatisations abandonnées pour des technologies passives. Les 22,5% restant correspondent aux climatisations non utilisées et non remplacées.

— Scénario C : scénario mixte plus réaliste

Ce dernier scénario cherche à prendre en compte la complexité des choix des Français mais aussi du parc de logements. On suppose que certains choisiront des pompes à chaleurs alors que d'autres se rabattront sur des technologies passives, voire même ne changeront pas du tout leurs habitudes. On établit les modifications comme suit :

- **20% du parc ne sera pas modifié** du à des problèmes de transmission des informations de sensibilisation ou d'aides de l'état. Coût : 0 €
- 20% des habitations individuelles sont équipées en puits provençaux (ou autres technologies passives). **10% du parc de climatisations sauvages est transformé en puits provençaux.** Coût : 480 000 000 €.
- 75% des maisons restantes, et 25% des appartements sont équipés de pompes à chaleur. Donc **32,5% des climatisations mobiles sont transformées en pompes à chaleur.** Coût : 507 000 000€
- Une partie des usagers ne change rien à son logement mais applique efficacement les conseils de refroidissement passif sans équipement, comme la ventilation nocturne. **15% des climatisations mobiles voient leur consommation réduite de 25%.** On suppose ici que les usagers utilisent au mieux leur climatisation car ils font bien attention à la gestion de leurs volets et de la ventilation, et qu'ils veulent réduire leur consommation. Coût : 31 500 000€.
- Pour la moitié des logements restants, on investit dans une ventilation mécanique qui permet de réduire de 20% la consommation de climatisation. **11,25% des climatisations sauvages voient donc leur consommation baisser de 20%.** Coût : 67 500 000€.
- Enfin, pour les logements restants on modifie les volets afin de stopper totalement l'utilisation de climatisation. **11,25% des climatisations ne sont plus utilisées.** Coût : 72 000 000€.

Pour résumer, dans ce scénario on se retrouve avec 40,25% de climatisation conservées, 11,25% non remplacées, 32,5% remplacées en pompes à chaleur, et 10% remplacées en puits canadiens.

Pour les trois scénarios, les coûts prennent en compte le prix des équipements, la main d'oeuvre et l'entretien. Ce sont des coûts annuels. Le prix de la sensibilisation est celui de la diffusion de 6 spots publicitaires par jours sur 6 chaînes différentes pendant 6 mois. Les prix utilisés sont résumés dans le tableau 12

TABLE 12 – Prix des différents équipements ([M-Habitat n.d.](#), [Monequerre n.d.](#), [Fygostudio n.d.](#), [Leroy Merlin n.d.](#), [Ecohabitation n.d.](#))

Prix par équipement	
Pompe à chaleur air/air	2 000 €
Autres pompes à chaleur	11 500 €
Puits canadien	12 000 €
30s de publicité	5 000 €
Ventilation mécanique	1 500 €
Volets (4 fenêtres)	1 600 €

Notons aussi que nous faisons pas mention ici de refroidissement adiabatique dans la mesure où cette technologie est principalement utilisée dans les bâtiments tertiaires.

Références

ADEME (2013), 'L'exercice de prospective de l'ademe « vision 2030-2050 »'.

URL: <https://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

ADEME (2014), 'Modes de chauffage dans l'habitat individuel', Les avis de l'ADEME.

AFPAC (2020a), 'La pompe à chaleur : Au prisme de l'économie circulaire'.

URL: https://www.afpac.org/La-Pompe-a-Chaleur-Au-prisme-de-l-economie-circulaire_a540.html

AFPAC (2020b), 'La pompe à chaleur du futur : Intelligence et connectivité'.

URL: <file:///C:/Users/UserPC1/Downloads/AFPAC%20Dossier%2011%20-%20La%20PAC%20du%20futur.pdf>

Amato, A. D., Ruth, M., Kirshen, P. & Horwitz, J. (2005), 'Regional energy demand responses to climate change : methodology and application to the commonwealth of massachusetts', Climatic Change **71**(1), 175–201.

ANAH (n.d.), 'Chiffres clés annuelles'.

URL: <https://www.anah.fr>

Asimakopoulos, D., Santamouris, M., Farrou, I., Laskari, M., Saliari, M., Zanis, G., Giannakidis, G., Tigas, K., Kapsomenakis, J., Douvis, C. et al. (2012), 'Modelling the energy demand projection of the building sector in greece in the 21st century', Energy and Buildings **49**, 488–498.

Association des professionnels pour le chauffage durable (2016), 'Bâtiments performants : confort ou inconfort pour les occupants?'.

URL: <http://www.uecf.fr/flippingbook/eaconforthabitant/files/assets/common/downloads/publication.pdf>

Baxter, L. W. & Calandri, K. (1992), 'Global warming and electricity demand : A study of california', Energy Policy **20**(3), 233–244.

BIPE (2012), 'Prospective socio-économique et démographique'.

URL: https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/RE_Explore2070_Prospective_Etude.pdf

BL évolution (2019), 'Comment s'aligner sur une trajectoire compatible avec les 1,5°C?'.

URL: https://www.bl-evolution.com/Docs/190226_BLEvolution_Etude-Trajectoire-rapport-special-GIEC-V2.pdf

Cayla, J.-M. (2011), Les ménages sous la contrainte carbone : exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES, PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Centre d'analyse stratégique (2011), 'Note d'analyse 216 - nudges verts : de nouvelles incitations pour des comportements écologiques'.

URL: <http://archives.strategie.gouv.fr/cas/content/note-d%E2%80%99analyse-216-nudges-verts-de-nouvelles-incitations-pour-des-comportements-ecologiques-.html>

Cercle Promodul - INEF4 (2020), Rafrâichissement passif et confort d'été : panorama de solutions pour l'adaptation du bâtiment au changement climatique.

CEREN (2018), 'Les publications du ceren'.

URL: <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>

CITEPA (2019), 'Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques bilan des émissions en france de 1990 à 2017'.

URL: https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa_Secten-2019_Rapport_Completv3.pdf

Commission européenne (2012), 'Règlement (ue) no 206/2012 de la commission : portant application de la directive 2009/125/ce du parlement européen et du conseil en ce qui concerne les exigences d'écoconception applicables aux climatiseurs et aux ventilateurs de confort'.

URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:072:0007:0027:FR:PDF#:~:text=Le%20pr%C3%A9sent%20r%C3%A8glement%20%C3%A9tablit%20des,%C3%A0%2012%20kW%20et%2C%20d>

CREDOC (2010), 'Conditions de vie et aspirations des françaises'.

CREDOC (2013), 'Comment limiter l'effet rebond des politiques d'efficacité énergétique dans le logement? l'importance des incitations comportementales'.

URL: <https://www.credoc.fr/publications/comment-limiter-leffet-rebond-des-politiques-defficacite-energetique-dans-le-logement-limportance-des-incitations-comportementales>

Dirks, J. A., Gorrisen, W. J., Hathaway, J. H., Skorski, D. C., Scott, M. J., Pulsipher, T. C., Huang, M., Liu, Y. & Rice, J. S. (2015), 'Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings : A detailed regional approach', *Energy* **79**, 20–32.

Dodoo, A., Gustavsson, L. & Bonakdar, F. (2014), 'Effects of future climate change scenarios on overheating risk and primary energy use for swedish residential buildings', *Energy Procedia* **61**, 1179–1182.

ECO-CO2 (2016), 'Clôture de l'Éco-concours « ma ville est au courant! » sur saint-laurent-du-var'.

URL: <https://www.ecoco2.com/blog/cloture-de-leco-concours-ma-ville-est-au-courant/#:~:text=Rappelez%2Dvous%2C%20il%20y%20a,Ma%20Ville%20est%20au%20courant%20!>

Ecohabitation (n.d.), 'Habillage des fenêtres'.

URL: <https://www.ecohabitation.com/guides/2807/habillage-des-fenetres-pour-diminuer-les-variations-de-temperature/>

ECOinfos (2021), 'MaprimerÉnov' 2021'.

URL: <https://www.les-energies-renouvelables.eu/financement-aides/credit-impot-financement-energies-renouvelables/>

EDF (2020), 'La climatisation des logements résidentiels : laisser faire ou encadrer intelligemment?'.

URL: <https://www.equilibredesenergies.org/30-07-2020-la-climatisation-des-logements-residentiels-laisser-faire-ou-encadrer-intelligemment/>

Effy (2021), 'Ce qu'il faut savoir sur les climatiseurs mobiles'.

URL: <https://www.quelleenergie.fr/magazine/climatisation/climatiseurs-mobiles-choses-a-savoir-42741/>

- etics (2013), 'Afficheco : Impact de l'affichage des consommations d'énergie sur le comportement des ménages'.
URL: <https://etics.univ-tours.fr/version-francaise/nos-thematiques/acceptabilite-des-innovations/afficheco>
- Flipo, F. & Gossart, C. (2009), 'Infrastructure numérique et environnement. l'impossible domestication de l'effet rebond', Terminal. Technologie de l'information, culture & société (103-104).
- Frank, T. (2005), 'Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in switzerland', Energy and buildings **37**(11), 1175–1185.
- Fygostudio (n.d.), 'Coût d'une publicité tv'.
URL: <https://fygostudio.com/prix-publicite-tv/>
- GreenTech Journal (2021), 'Liste des pompes à chaleur fabriquées en france'.
URL: <https://www.greentechjournal.fr/pompes-chaleur-fabriquees-france/>
- Gridpocket (2011), 'Maîtrise de l'énergie : le projet grid-teams lancé à cannes'.
URL: <https://www.webtimemedias.com/article/maitrise-de-lenergie-le-projet-grid-teams-lance-cannes>
- Huang, K.-T. & Hwang, R.-L. (2016), 'Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change : The case of taiwan', Applied Energy **184**, 1230–1240.
- Insee" (2017), 'Projections de population 2013-2050 pour les départements et les régions | Insee'.
URL: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2859843>
- INSEE (2020), 'Statistiques et études'.
URL: <https://www.insee.fr/fr/statistiques>
- Insee (n.d.), 'Données du parc de logement le 1er janvier'.
URL: <https://www.insee.fr>
- Invidiata, A. & Ghisi, E. (2016), 'Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in brazil', Energy and Buildings **130**, 20–32.
- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S. & James, P. A. (2008), 'Climate change future proofing of buildings—generation and assessment of building simulation weather files', Energy and Buildings **40**(12), 2148–2168.
- Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H. M., Hyvönen, R., Laapas, M. & Drebs, A. (2015), 'Energy demand for the heating and cooling of residential houses in finland in a changing climate', Energy and Buildings **99**, 104–116.
- Laurent, M.-H., Osso, D., Mandrou, P. & Bouia, H. (2006), 'Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en france dans un contexte "mde"', Consommation **50**(60), 70.
- Legifrance (2015a), 'Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1)'.
URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031044385/>
- Legifrance (2015b), 'Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1)'.
URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031044385/>

Leroy Merlin (n.d.), 'Ventilation double flux'.

URL: <https://www.leroymerlin.fr/produits/chauffage-plomberie/vmc-aerateur-et-deshumidificateur/vmc-ventilation-mecanique-controlee/kit-vmc-double-flux-haut-rendement-sauter-gorner-80130154.html>

Libiku (2019), 'Canicule : Où trouver une location avec climatisation?'.

Légifrance (2021), 'Code de l'énergie'.

URL: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000023983208/LEGISCTA000031748101/#LEGISCTA000031748101

M-Habitat (n.d.), 'Pompe à chaleur'.

URL: https://www.m-habitat.fr/pac/prix-pompe-a-chaaleur/prix-d-une-pompe-a-chaaleur-air-air-4780_A

Meteo France (2021), 'Météo-france éclaire le climat en france jusqu'en 2100'.

URL: <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/meteo-france-eclaire-le-climat-en-france-jusqu'en-2100>

Ministère de la Transition Écologique (2021), 'Re2020'.

URL: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2021.02.18_DP_RE2020_EcoConstruire_0.pdf

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (n.d.), 'Plan rénovation énergétique des bâtiments'.

URL: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan%20de%20r%C3%A9novation%20%C3%A9nerg%C3%A9tique_0.pdf

Ministère de la transition écologique (2018), 'Pompes à chaleur'.

URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/pompes-chaaleur>

Ministère de la Transition écologique (2020a), 'Programmations pluriannuelles de l'énergie (ppe)'.

URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

Ministère de la Transition écologique (2020b), 'Stratégie nationale bas-carbone (snbc)'.

URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2011), 'Réglementation thermique 2012'.

URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/RT%202012%20-%20un%20saut%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20pour%20les%20b%C3%A2timents%20neufs%20-%20Avril%202011.pdf>

Monequerre (n.d.), 'Puits canadien'.

URL: <https://www.monequerre.fr/puits-canadien-prix/>

NEXTHERM (2019), 'Aides et primes pour les pac en 2019'.

URL: <http://nextherm.fr/uploads/pdf/aides-et-primes-pour-les-pac-en-2019.pdf>

Passive House institute (2016), 'Qu'est-ce que le label bâtiment passif (certification passivhaus)'.

URL: <http://www.lamaisonpassive.fr/wp-content/uploads/2016/12/CriteresDeCertification.pdf>

- PROPASSIF (2021), 'Qu'est-ce que le label bâtiment passif (certification passivhaus)?'.
URL: <https://www.propassif.fr/labellisation/les-projets/>
- Radhi, H. (2009), 'Evaluating the potential impact of global warming on the uae residential buildings—a contribution to reduce the co2 emissions', *Building and Environment* **44**(12), 2451–2462.
- Rosenthal, D. H., Gruenspecht, H. K. & Moran, E. A. (1995), 'Effects of global warming on energy use for space heating and cooling in the united states', *The Energy Journal* **16**(2).
- Scott, M. J., Wrench, L. E. & Hadley, D. L. (1994), 'Effects of climate change on commercial building energy demand', *Energy sources* **16**(3), 317–332.
- SDES (2020a), 'Le parc de logements par classe de consommation énergétique'.
URL: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/document_travail_49_parc_logements_consommation_energie_septembre2020_0.pdf
- SDES (2020b), 'Le parc de logements par classe de consommation énergétique'.
URL: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/le-parc-de-logements-par-classe-de-consommation-energetique>
- SDES (2021), 'Évaluation des degrés-jours unifiés au niveau régional et départemental notice méthodologique'.
URL: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-01/dju-note-accompagnement-janvier2021.pdf>
- SYNASAV (2021), 'Actualités synasav'.
URL: <https://www.synasav.fr/>
- SystemeD (2021), 'Évaluer les caractéristiques thermiques de sa maison'.
URL: <https://www.systemed.fr/isolation-interieure/evaluer-point-par-point-potentiel-sa-maison,5290.html>
- van Ruijven, B. J., De Cian, E. & Wing, I. S. (2019), 'Amplification of future energy demand growth due to climate change', *Nature communications* **10**(1), 1–12.
- Viguié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beuland, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G. & Salagnac, J.-L. (2020), 'Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in paris', *Environmental Research Letters* **15**(7), 075006.
- Wallenborn (2019), 'Evaluation des impacts des récentes réformes de l'octroi des primes et des prêts « energie logement » en wallonie'.
URL: https://www.iweps.be/wp-content/uploads/2019/05/RAPPORT_FINAL_2019_Primes-et-prets.pdf
- Wan, K. K., Li, D. H., Pan, W. & Lam, J. C. (2012), 'Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications', *Applied Energy* **97**, 274–282.
- Wang, X., Chen, D. & Ren, Z. (2010), 'Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in australia', *Building and environment* **45**(7), 1663–1682.

Webtime (2011), 'Maîtrise énergétique : Biot lance le projet ticelec'.

URL: <https://www.webtimemedias.com/article/maitrise-energetique-biot-lance-le-projet-ticelec>

WWF (2021), 'We act for good!'.

URL: <https://www.wwf.fr/agir-au-quotidien/we-act-for-good>