

# UNIVERSITÉ FRANÇOIS – RABELAIS DE TOURS

*ÉCOLE DOCTORALE « Sciences de l'Homme et de la Société »*

CITERES UMR 7324, équipe IPA-PE

**THÈSE** présentée par :

**Athmane OUAHAB**

soutenue le : **06 juillet 2015**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université François – Rabelais de Tours**

Discipline/ Spécialité : Aménagement de l'espace, urbanisme

**Modélisation des consommations d'énergie  
et des émissions de CO<sub>2</sub> à long terme  
appliquée au secteur résidentiel algérien**

**THÈSE dirigée par :**

**M<sup>r</sup> MAIZIA Mindjid**

Professeur, Département aménagement Polytech'Tours

**RAPPORTEURS :**

**Mme MAIZI Nadia**

Professeur, Centre de Mathématiques Appliquées, Mines ParisTech

**M<sup>r</sup> SOUAMI Taoufik**

Professeur, LATTs, Université Paris-Est Marne-la-Vallée

**JURY :**

**M<sup>r</sup> AMJAHDI Mohamed**

Directeur Régional Adjoint, ADEME Centre

**M<sup>r</sup> BENYOUSSEF Elhadi**

Professeur, DGC, École Nationale Polytechnique d'Alger

**Mme MAIZI Nadia**

Professeur, Centre de Mathématiques Appliquées, Mines ParisTech

**M<sup>r</sup> MAIZIA Mindjid**

Professeur, Département aménagement Polytech'Tours

**M<sup>r</sup> SOUAMI Taoufik**

Professeur, LATTs, Université Paris-Est Marne-la-Vallée

**M<sup>r</sup> THIBault Serge**

Professeur, Département aménagement Polytech'Tours



# Remerciements

Ce travail de recherche a été mené au sein de l'équipe Ingénierie du projet d'aménagement–Paysage et environnement (IPA-PE) du département Aménagement et Environnement de l'école polytechnique de l'université de Tours.

Je tiens tout d'abord à remercier Nadia Maïzi et Taoufik Souami pour avoir accepté de participer au jury et de prendre de leur temps pour rapporter ce travail de thèse. Un grand merci à Serge Thibault, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour m'avoir fait confiance à plusieurs reprises dans le cadre d'activités d'enseignement. J'ai beaucoup appris en travaillant avec lui et ses conseils m'ont infiniment apporté.

Je tiens également à remercier les examinateurs de ma thèse. En particulier, je suis très honoré qu'El-Hadi Benyoussef ait effectué le déplacement jusqu'en France afin d'être présent dans le jury. Je remercie vivement Mohamed Amjahdi, directeur régional adjoint à l'Ademe Centre, qui a montré un intérêt pour mon travail et accepté d'assister à ma soutenance.

Je remercie bien entendu Mindjid Maïzia, mon directeur de thèse, pour m'avoir épaulé dans la réalisation de cette thèse et pour ses précieux conseils pragmatiques. J'ai eu la chance de travailler à ses côtés et de pouvoir bénéficier d'une expérience enrichissante, tant d'un point de vue professionnel qu'humain.

Je tiens ici à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse. En particulier, Yacine Kharchi et Tahar Abdellaoui, de l'ONS Algérie, pour m'avoir fourni leur aide au début de cette thèse. Je souhaite exprimer ma gratitude envers Kamal Serrhini, qui a souvent été disponible pour m'écouter et discuter. J'adresse aussi mes remerciements à Brynhild Drain pour m'avoir aidé considérablement en anglais durant cette dernière année, ainsi qu'à Sabine Guitel, ma collègue et voisine de bureau, pour les échanges que nous avons eu et pour le travail réalisé en commun.

Je remercie aussi Lydia Seabra pour sa patience et pour le temps qu'elle a consacré aux formalités administratives de ma thèse.

J'exprime enfin toute mon affection à ma famille, pour le soutien et le réconfort qui m'a été apporté durant ces dernières années.

## Résumé

Le secteur résidentiel en Algérie consomme 25 % de l'énergie finale et émet en moyenne 21 % des gaz à effet de serre. Or, il existe un important gisement d'économie d'énergie dans ce secteur. Ce constat a conduit à rechercher la manière de rendre le secteur du logement plus efficient en termes de consommation d'énergie et d'émission de CO<sub>2</sub>. Cette thèse vise à développer différentes méthodes d'analyse quantitative dédiées à l'amélioration performantielle du secteur résidentiel à l'horizon 2050. Il s'agit, en clair, d'infléchir les consommations d'énergie et de stabiliser les émissions de CO<sub>2</sub>. La comparaison entre la France et l'Algérie doit permettre de mettre en lumière les différences, tant dans les dynamiques des structures de parcs que dans celles induites par les différentiels climatiques.

Ce travail s'inscrit dans une démarche prospective. Il s'appuie sur les principes de l'exercice prospectif développés par Jacques Arcade et Michel Godet, et il s'inspire pleinement de nombreux travaux de recherche (ETHEL, CLIP...). Il a pour ambition de développer un modèle de prospective énergétique *bottom-up*, capable de mesurer différentes trajectoires de l'évolution des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel et les émissions qui en découleraient à l'horizon 2050.

Ce modèle s'articule à partir des données du scénario central de la démographie et du parc de logements de l'Office national des statistiques algérien, ainsi que des hypothèses argumentées relatives aux évolutions démographiques des ménages. La poursuite des tendances actuelles, en termes de consommations d'énergie et d'émissions à l'horizon 2050, permet de tracer un scénario de référence sur lequel la thèse s'appuie pour identifier les actions à mettre en œuvre afin d'y apporter d'éventuelles solutions. En se basant en effet sur un ensemble de leviers technologiques, notre modèle peut établir des scénarios volontaristes dans lesquels l'on suppose plusieurs trajectoires de l'évolution du couple consommations/émissions.

Outre l'intérêt scientifique de ce travail, le développement de ce modèle peut constituer un outil d'aide à la mise en œuvre d'une politique énergétique portant sur l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du logement ; les scénarios réalisés peuvent en outre constituer une feuille de route pour de nouvelles stratégies énergétiques.

**Mots-clés :** Démarche prospective ; Modèle de prospective énergétique *bottom-up* ; Secteur résidentiel ; Consommations d'énergie ; Émissions de CO<sub>2</sub> ; Scénarios prospectifs.

## Résumé en anglais

The residential sector in Algeria consumes 25% of the final energy and emits about 21% of greenhouse gas emissions. However, there is a significant potential of energy saving in this sector. This leads to looking for ways to make the sector of housing more efficient in terms of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. This thesis aims to develop different methods of quantitative analysis dedicated to improving the performance of the residential sector in 2050. In other words, the objective is to reduce energy consumption and stabilize CO<sub>2</sub> emissions. The comparison between France and Algeria should help to clarify the differences in both dynamic structures housing stock as well as in those induced by climate differentials.

This research work fits into a prospective approach. It is based on the principles of prospective exercise developed by Jacques Arcade, Michel Godet, and it is influenced by numerous research works (ETHEL, CLIP). It has the ambition to develop a model of bottom-up energy prospective capable of measuring various trajectories of the evolution of energy consumption in the residential sector and resulting emissions by 2050.

This model is based on the data of the central scenario of demography and the housing stock of the Algerian National office of Statistics, and on the well-argued assumptions concerning the demographic evolution of households. The continuation of current trends in terms of energy consumption at the approach of 2050 allows us to draw up a reference scenario on which the thesis is based to identify the actions to be implemented to identify possible solutions. Indeed, by basing itself on a set of technological levers, our model can establish voluntarist scenarios in which several trajectories of the evolution of the consumption/emissions pair can be envisaged

Besides the scientific interest of this work, the development of this model can establish a help tool for the implementation of an energy policy concerning the improvement of the energy efficiency in the sector of housing; moreover, the scenarios undertaken could constitute a road map for new energy strategies.

**Keywords:** Prospective modeling bottom-up; Energy efficiency; Residential sector; Energy consumption; CO<sub>2</sub> emissions.

# Table des matières

Remerciements .....	2
Résumé.....	3
Résumé en anglais .....	4
Introduction .....	12
<b>Chapitre 1 Enjeux énergétiques dans le contexte algérien .....</b>	<b>17</b>
1.1 Principaux enjeux énergétiques dans le contexte algérien .....	17
1.2 Enjeux environnementaux des politiques énergétiques .....	35
1.3 Efficacité énergétique, un potentiel pour baisser les émissions de GES.....	42
<b>Chapitre 2 État de l’art de la démarche prospective énergétique et classification des modèles existants .....</b>	<b>45</b>
2.1 Objectifs de l’état de l’art.....	45
2.2 Fondement de la démarche prospective .....	46
2.3 La démarche prospective.....	48
2.4 Principe de l’exercice prospectif .....	50
2.5 Prospectives et enjeux énergétiques .....	50
2.6 Méthodes prospectives dans l’analyse des besoins énergétiques.....	51
2.7 Grandes phases de la méthode des scénarios .....	55
2.8 Modèles <i>bottom-up</i> et <i>top-down</i> .....	57
2.9 Modèles <i>top-down</i> ou économiques (approche descendante) .....	57
2.10 Modèles <i>bottom-up</i> ou technologiques .....	59
2.11 Modèles hybrides .....	66
2.12 Famille des modèles prospectifs .....	74
2.13 Analyse des modèles <i>bottom-up</i> pour la consommation d’énergie dans le secteur résidentiel .....	75
2.14 Modèles de consommations/émissions dans le contexte européen .....	81
<b>Chapitre 3 Hypothèses et méthodologie .....</b>	<b>94</b>
3.1 Formulation des objectifs de recherche.....	94
3.2 Contexte spatio-temporel .....	95
3.3 Étapes du travail de recherche.....	96
3.4 Méthode prospective employée et hypothèses retenues.....	97

3.5	Caractéristiques constructives des bâtiments .....	100
3.6	Apports internes et solaires .....	104
3.7	Hypothèses climatiques.....	110
3.8	Hypothèses retenues dans le modèle de prospective.....	112
3.9	Hypothèses et méthodes d'estimation des besoins énergétiques.....	117
3.10	Architecture générale du modèle prospectif.....	124
3.11	Hypothèses et méthodes de calcul des émissions de CO <sub>2</sub> dans le bâtiment.....	126
<b>Chapitre 4 État du parc, des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub> 129</b>		
4.1	Démographie et parc de logements .....	129
4.2	Effectif et dynamique territoriale du parc .....	132
4.3	Typologie des logements existant dans le parc .....	134
4.4	Caractéristiques techniques et matériaux de construction.....	138
4.5	Mouvements dans le parc .....	139
4.6	Constructions neuves et mouvements dans le parc .....	141
4.7	Surfaces habitables .....	142
4.8	Consommations d'énergie par poste et typologie des logements en 2008.....	144
4.9	Consommations d'énergie à l'échelle du parc en 2008.....	155
4.10	Émissions de CO <sub>2</sub> à l'échelle du parc en 2008.....	159
<b>Chapitre 5 Prospective de la demande énergétique à l'horizon 2050..... 164</b>		
5.1	Démographie et parc de logements à l'horizon 2050.....	165
5.2	Hypothèses relatives au scénario tendanciel .....	174
5.3	Hypothèses relatives aux scénarios volontaristes.....	175
5.4	Résultat du scénario tendanciel (référence).....	178
5.5	Résultats des scénarios portant sur la réduction des consommations d'énergie ....	186
5.6	Synthèse des scénarios .....	190
5.7	Résultats des scénarios relatifs aux émissions de CO <sub>2</sub> .....	195
5.8	Discussion des résultats et perspectives .....	199
5.9	Réduction des consommations à l'horizon 2050.....	200
<b>Conclusion..... 205</b>		
<b>Bibliographie..... 211</b>		

## Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Part des paiements du compte courant couverte par les exportations pétrolières (2004) .....	22
Tableau 1-2 : Indicateur « épargne nette ajustée » pour les pays exportateurs de pétrole .....	26
Tableau 1-3 : Tableau comparatif des PCI par type d'énergie .....	28
Tableau 1-4 : Émissions de GES par type de gaz, dues à l'utilisation d'énergie en 2000 .....	37
Tableau 1-5 : Émissions de GES par type de gaz dues à l'utilisation d'énergie en 2000 .....	39
Tableau 1-6 : Tableau comparatif des émissions de GES en 1994 et en 2000 .....	39
Tableau 2-1 : Avantages et limites des approches de modélisation bottom-up et top-down ...	66
Tableau 2-2 : Illustration de quelques exemples d'application du modèle bottom-up .....	91
Tableau 3-1 : Coefficient de déperdition surfacique existant par type de logement .....	103
Tableau 3-2 : Valeurs du débit extrait minimal de référence dans un logement .....	104
Tableau 3-3 : Valeurs du débit extrait maximal de référence dans un logement .....	104
Tableau 3-4 : Gains dus aux occupants .....	106
Tableau 3-5 : Valeurs d'irradiation solaire moyenne journalière (Is) en W/m <sup>2</sup> .....	109
Tableau 3-6 : Valeurs du facteur de correction pour l'ombrage .....	109
Tableau 3-7 : Récapitulatif des températures moyennes et des DJU de chauffage par zone .	112
Tableau 3-8 : Surface unitaire moyenne par type de logement .....	116
Tableau 3-9 : Récapitulatif des températures moyennes de refroidissement par zone .....	120
Tableau 3-10 : Facteurs d'émissions de CO <sub>2</sub> par source d'énergie .....	127
Tableau 4-1 : Évolution des mariages, du taux brut de nuptialité et des logements neufs ...	130
Tableau 4-2 : Évolution de l'indice synthétique de fécondité et de l'âge des femmes à la première maternité (AMA) .....	132
Tableau 4-3 : Récapitulatif des principaux matériaux de construction de l'enveloppe bâtie	139
Tableau 4-4 : Dynamique du parc de logements ventilés par typologie en 1998 et 2008 .....	140
Tableau 4-5 : Nombre de logements neufs ventilé par type pour la période 2004-2011 .....	142
Tableau 4-6 : Surface unitaire moyenne par type de logement (échantillonnage in situ) .....	142
Tableau 4-7 : Consommations d'énergie pour la cuisson en 2008 .....	153
Tableau 4-8 : Performances énergétiques par poste de consommation en 2008 .....	156
Tableau 4-9 : Reconstitution des performances énergétiques moyennes par typologie en 2008 .....	158
Tableau 5-1 : Répartition de la population par groupes d'âge (2008-2030) .....	166
Tableau 5-2 : Évolution des mariages enregistrés et du taux brut de nuptialité .....	167
Tableau 5-3 : Hypothèses de renforcement de la réglementation thermique .....	176
Tableau 5-4 : MTD retenues en logements neufs et dans la réhabilitation du parc existant (scénarios : RT97, BFC et BBC) .....	176
Tableau 5-5 : Technologies utilisées dans le secteur résidentiel .....	177
Tableau 5-6 : Synthèse des scénarios d'entrées de logements et de réhabilitation du stock existant .....	194
Tableau 5-7 : Synthèse des scénarios de consommations et émissions à l'horizon 2050 .....	199

## Liste des figures

Figure 1 : La consommation mondiale d'énergie dans le secteur résidentiel en 2007.....	14
Figure 1-1 : Répartition de la production de l'énergie primaire en 2010.....	18
Figure 1-2 : Exportation de gaz naturel par destination, Algérie (2011) .....	19
Figure 1-3 : Évolution de la production/consommation/exportation de gaz naturel (1990-2011) .....	20
Figure 1-4 : Évolution de la production/consommation/exportation de pétrole brut (1990-2011).....	21
Figure 1-5 : Contribution des exportations d'hydrocarbures au PIB, Algérie .....	23
Figure 1-6 : Structure des exportations (en mds USD), Algérie. ....	23
Figure 1-7 : Évolution de la consommation d'énergie entre 1980 et 2010 .....	25
Figure 1-8 : Évolution de la production d'énergie par type de source .....	27
Figure 1-9 : Synthèse des flux énergétiques de l'année 2011 .....	29
Figure 1-10 : Évolution de la consommation en énergie finale des différents secteurs d'activité .....	30
Figure 1-11 : Répartition de la consommation du secteur résidentiel par source 2007 .....	31
Figure 1-12 : Évolution de l'intensité énergétique primaire de l'Algérie et de la France entre 1980 et 2010 .....	34
Figure 1-13 : Évolution de l'intensité énergétique en Algérie entre 1980 et 2010 .....	35
Figure 1-14 : Évolution consommation/émissions en Algérie entre 1980 et 2011 .....	38
Figure 1-15 : Répartition des émissions par secteur en 2000 (y compris les torches) .....	40
Figure 1-16 : Émissions de CO <sub>2</sub> par secteur en 2000 (hors émissions des torches).....	41
Figure 1-17 : Parts des émissions de CO <sub>2</sub> par secteur d'activité en 2007 .....	41
Figure 1-18 : Répartition de la production d'électricité par filière en 2009.....	43
Figure 2-1 : La démarche prospective selon Jacques Arcade .....	49
Figure 2-2 : Méthode des scénarios selon Godet (1991).....	55
Figure 2-3: Techniques de modélisation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel .....	58
Figure 2-4 : Schéma du modèle hybride Markal-Macro (M-M) au Royaume-Uni.....	69
Figure 2-5 : Familles et approches de modélisation d'après AIE (1998) ; Parson et Fisher-Vanden (1997).....	71
Figure 2-6 : Catégories des principaux modèles de prospective .....	75
Figure 2-7 : Architecture du modèle UKDCM (2005).....	83
Figure 2-8 : Architecture du modèle BREHOMES (The Building Research Establishment's Housing Model for Energy Studies, 1997).....	84
Figure 2-9 : Architecture générale du modèle prospectif, les gisements du développement urbain (2010).....	88
Figure 2-10: Architecture du modèle de McKenna et al. (2013) .....	89
Figure 3-1 : Processus de sélection des variables pour la construction de scénarios prospectifs (selon J. Arcade).....	97
Figure 3-2 : Zones climatiques selon la réglementation thermique algérienne.....	111
Figure 3-3 : Architecture du modèle d'estimation du nombre de logements .....	114
Figure 3-4 : Modèle de consommation d'énergie pour le chauffage .....	117
Figure 3-5 : Modèle de consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire .....	119
Figure 3-6 : Modèle de consommation d'énergie pour le refroidissement .....	121
Figure 3-7 : Modèle de consommation d'énergie des appareils électroménagers .....	123
Figure 3-8 : Couplage de sous-modèles de consommation/émissions au parc de logements .....	125
Figure 3-9 : Architecture modèle des émissions de CO <sub>2</sub> .....	126
Figure 4-1 : Répartition du TML par zone climatique en 1998 et 2008 .....	131

Figure 4-2 : Nombre de logements par département entre 1998 et 2008 .....	133
Figure 4-3 : Logements en immeubles collectifs (type haussmannien et postcolonial).....	135
Figure 4-4 : Maison individuelle (autoconstruction).....	136
Figure 4-5 : Maison traditionnelle.....	137
Figure 4-6 : Constructions précaires .....	138
Figure 4-7 : Ventilation du nombre de logements par type de logement et par zone .....	141
Figure 4-8 : Répartition de la surface habitable par personne et par département en 2008 ...	143
Figure 4-9 : Consommations de chauffage par type de logement et selon la zone climatique en 2008.....	145
Figure 4-10 : Consommation unitaire moyenne de chauffage par typologie et zone en 2008	146
Figure 4-11 : Besoins annuels pour la production d'ECS selon la zone climatique .....	147
Figure 4-12 : Consommations d'énergie pour l'ECS par type de logement et par zones en 2008.....	148
Figure 4-13 : Consommations unitaires moyennes pour l'ECS par type de logement et par zone climatique .....	149
Figure 4-14 : Degrés-jour unifiés pour le refroidissement par zone climatique .....	150
Figure 4-15 : Consommations de refroidissement par type de logement et selon les zones en 2008.....	151
Figure 4-16 : Consommations unitaires moyennes pour le refroidissement par type de logement et selon la zone climatique .....	152
Figure 4-17 : Consommation d'énergie pour la cuisson par type de logement et par zone en 2008.....	153
Figure 4-18 : Consommations unitaires moyennes pour la cuisson par type de logement et par zone en 2008.....	154
Figure 4-19 : Consommations des équipements par type de logement et par zone .....	155
Figure 4-20 : Consommations unitaires moyennes des équipements par type de logement et par zone .....	155
Figure 4-21 : Répartition des consommations par poste dans le parc .....	156
Figure 4-22 : Répartition des consommations d'énergie par zone climatique.....	157
Figure 4-23 : Consommations du secteur résidentiel en 2008 par type de logement et selon la zone climatique .....	158
Figure 4-24 : Performances énergétiques dans le secteur résidentiel.....	159
Figure 4-25 : Émissions de CO <sub>2</sub> par type de consommation et par source .....	160
Figure 4-26 : Répartition des émissions par type de logement et par zone climatique.....	162
Figure 4-27 : Ventilation des consommations par source et par zone climatique.....	162
Figure 5-1 : Évolution de la population à l'horizon 2030 .....	165
Figure 5-2 : Projection de la population et des ménages à l'horizon 2050 .....	167
Figure 5-3 : Projection du nombre de personnes par ménage et par logement en 2050 à l'horizon 2050 (scénario de référence).....	168
Figure 5-4 : Projection du nombre de logements à l'horizon 2050.....	169
Figure 5-5 : Projection du nombre de logements par typologie .....	170
Figure 5-6 : Évolution de la typologie du parc à l'horizon 2050 .....	171
Figure 5-7 : Nombre de logements par typologie et selon la zone climatique (2008-2050)..	172
Figure 5-8 : Estimation de la surface totale du parc à l'horizon 2050 .....	173
Figure 5-9 : Projection de la surface moyenne par personne et par logement à l'horizon 2050 .....	174
Figure 5-10 : Durée de vie moyenne des appareils électroménagers (en années).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 5-11 : Consommation d'énergie pour le chauffage à l'horizon 2050 (sc. tendanciel)	179
Figure 5-12 : Consommations d'énergie pour l'ECS à l'horizon 2050 (scénario tendanciel)	179

Figure 5-13 : Consommations d'énergie pour le refroidissement à l'horizon 2050 (scénario tendanciel) .....	180
Figure 5-14 : Consommations d'énergie pour la cuisson à l'horizon 2050 (scénario tendanciel) .....	181
Figure 5-15 : Consommations d'énergie pour les équipements électroménagers à l'horizon 2050 (scénario tendanciel) .....	181
Figure 5-16 : Parts des besoins en énergie par typologie du parc (scénario tendanciel).....	182
Figure 5-17 : Consommations d'énergie du parc de logements (scénario tendanciel) .....	183
Figure 5-18 : Consommations unitaires par typologie du parc (scénario tendanciel).....	184
Figure 5-19 : Évolution des émissions dans le parc de logements (scénario tendanciel) .....	185
Figure 5-20 : Émissions de CO <sub>2</sub> par source d'énergie (scénario tendanciel).....	186
Figure 5-21 : Consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050 (scénario RT97) .....	188
Figure 5-22 : Consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050 (scénario BFC).....	189
Figure 5-23 : Consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050 (scénario BBC) .....	190
Figure 5-24 : Performances énergétiques moyennes selon les quatre scénarios.....	192
Figure 5-25 : Parts des consommations par poste selon les quatre scénarios .....	193
Figure 5-26 : Gains énergétiques induits par trois hypothèses de réhabilitation du parc.....	195
Figure 5-27 : Scénarios des émissions de CO <sub>2</sub> dans le secteur résidentiel .....	196
Figure 5-28 : Parts des émissions de CO <sub>2</sub> par poste selon les quatre scénarios.....	196
Figure 5-29 : Les émissions de CO <sub>2</sub> par source d'énergie .....	198
Figure 5-30 : Les quatre scénarios des émissions de CO <sub>2</sub> par personne .....	198
Figure 5-31 : Consommations énergétiques par poste et selon les quatre scénarios.....	201

## Liste des annexes

Annexe 1: Bilan de consommation et des émissions en Algérie.....	230
Annexe 2: Caractéristiques des zones climatiques.....	231
Annexe 3: Architecture du modèle complet de consommation/émission .....	231
Annexe 4: Etat du parc et des consommations en 2008 .....	235
Annexe 5 : Projection et scénarisation des consommations.....	244

# Introduction

L'accélération de l'activité humaine, avec en toile de fond l'accroissement des consommations énergétiques, notamment des énergies fossiles, est à l'origine de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), et particulièrement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). En effet, les consommations dans les pays développés (OCDE) s'accroissent en moyenne de 1,1 % par an. Les économies émergentes, dans leur ensemble, devraient voir leur consommation d'énergie primaire croître à un taux annuel moyen de 3,2 % jusqu'en 2025 (Asif et Muneer, 2007). L'International Energy Outlook prévoit une forte croissance de la demande mondiale d'énergie d'ici 2025. Ce constat devient alarmant lorsque l'on s'aperçoit que les combustibles fossiles contribuent à hauteur de 80 % à 95 %<sup>1</sup> de la demande mondiale en énergie primaire. Cette forte dépendance augmente en effet le risque d'un éventuel « *black-out* » énergétique, qui pourrait être causé par l'épuisement de ces ressources naturelles. De plus, le puissant pouvoir émissif des énergies fossiles est à l'origine d'effets néfastes causés à l'environnement. La communauté scientifique, représentée notamment par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), estime que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont « très probablement » à l'origine d'un réchauffement climatique de la planète (GIEC, 2013).

À l'instar des pays en voie de développement, l'Algérie connaît ces dernières années un accroissement de ses consommations énergétiques, corrélé à celui de sa population et au développement socio-économique des ménages. La consommation moyenne d'énergie primaire a été estimée à environ 0,89 Tep<sup>2</sup>/habitant en 1981. Elle a atteint 1,35 Tep/habitant en 2010 (AIE, 2013). Selon l'Ademe<sup>3</sup>, cette consommation pourrait atteindre 1,88 Tep/habitant en 2020. Outre les émissions de CO<sub>2</sub> induites par ce type d'énergie, l'accroissement des consommations aurait un impact économique majeur, puisque l'industrie des hydrocarbures demeure le principal moteur économique du pays. En effet, le secteur des hydrocarbures représente 97 % des recettes d'exportation et 70 % des recettes de l'État, via la fiscalité pétrolière (FMI, 2013). Dans ce contexte, le secteur résidentiel consomme l'équivalent de 25 % (cf. Figure 1) et émet en moyenne 21 % des gaz à effets de serre. Il est à ce titre considéré comme la deuxième source d'émissions de CO<sub>2</sub> après les transports. Les bâtiments du secteur résidentiel disposent néanmoins d'un important potentiel d'économies d'énergie et d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub>.

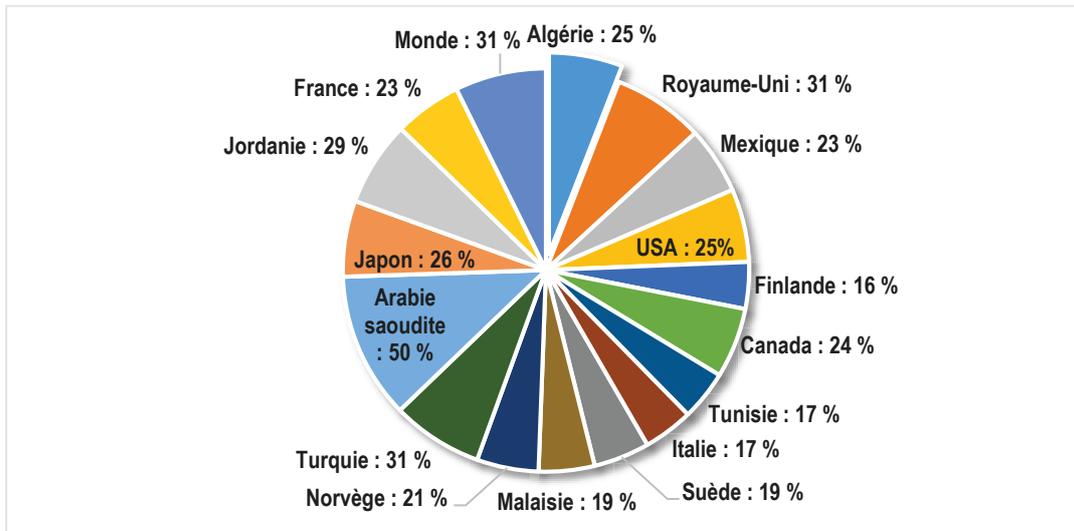
---

<sup>1</sup> Source : [www.global-chance.org/IMG/pdf/HS4\\_Fiche19\\_p82-85.pdf](http://www.global-chance.org/IMG/pdf/HS4_Fiche19_p82-85.pdf).

<sup>2</sup> Tep : tonne d'équivalent pétrole. Elle représente l'équivalent de 11 628 kWh.

<sup>3</sup> Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Figure 1 : La consommation mondiale d'énergie dans le secteur résidentiel en 2007



Source : Saidur *et al.* (2007) ; APRUE (2007).

Actuellement, en Algérie, les politiques font des efforts pour mettre en place des leviers technologiques en faveur de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel. On cite, à titre d'exemple, l'amélioration de l'enveloppe (isolation thermique) des bâtiments résidentiels, ou la réalisation de logements neufs (pilotes) aux normes HPE<sup>4</sup>, répartis dans différentes zones géographiques et climatiques du territoire. De plus, les pouvoirs publics tentent de sensibiliser les ménages à un usage rationnel de l'énergie par le choix des meilleures technologies disponibles en équipement électroménager et en éclairage (label A+ pour les quelques équipements électroménagers, lampes basse consommation, etc.).

Ces efforts risquent cependant d'être inefficaces sans une vision prospective de l'évolution des consommations d'énergie, et notamment de celle du secteur résidentiel, c'est-à-dire sans l'élaboration d'un modèle de prospective énergétique. Il est alors légitime de s'interroger sur l'insatisfaction, rapportée ci-dessus, exprimée concernant l'efficacité des outils actuels dans la réduction des consommations et l'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub>.

Quels sont les futurs possibles de l'évolution des trajectoires des consommations et des émissions ?

Quelles sont les stratégies répondant aux incertitudes réelles quant à la croissance future des consommations d'énergie ?

<sup>4</sup> Le label « haute performance énergétique » (HPE, 2005) peut être attribué aux bâtiments qui présentent une consommation conventionnelle d'énergie inférieure d'au moins 10 % de la consommation de référence.

Quels sont les gisements d'économies d'énergie dans le secteur résidentiel, et avec quelles méthodes les quantifier et les exploiter ?

Quels sont les leviers technologiques disponibles pour atteindre nos cibles en termes d'amélioration de la performance énergétique des logements et de stabilisation des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 ?

L'existence de nombreuses solutions techniques différentes rend ces gisements d'économies rapidement exploitables. L'efficacité de ces solutions impose des actions à la fois sur les bâtiments neufs et sur le stock existant. Cependant, le choix des leviers d'action à mettre en œuvre sur le parc existant, à savoir la réhabilitation, demeure limité en raison, d'une part, de la complexité juridique et foncière de certains segments du parc, liée au statut juridique de ceux-ci (problème des propriétés collectives), mais aussi de l'ampleur que représente cette opération au regard des programmes de construction de logements en cours. De plus le manque d'information relatif aux gains énergétiques que la réhabilitation pourrait générer semble constituer un frein supplémentaire à sa mise en œuvre. En effet, Souami (2014) montre que les efforts d'information spécifiques pourraient représenter un important levier d'action sur les décisions des habitants, propriétaires ou gestionnaires quant à une réhabilitation énergétique massive.

L'objectif de ce travail est de développer des méthodes d'analyse quantitative pour réduire la consommation énergétique et ralentir, voire stabiliser, les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050. Il s'agit de développer un modèle de prospective capable de simuler différents leviers d'efficacité énergétique, afin de pouvoir faire perdurer les ressources actuelles en respectant les engagements environnementaux, et d'offrir, *in fine*, un éclairage plus précis quant aux impacts des politiques énergétiques sur les 35 prochaines années.

## Organisation du travail de thèse

Le premier chapitre de la thèse présente un panorama général du secteur énergétique en Algérie. Il relate de manière détaillée les enjeux économiques et environnementaux globaux liés à l'évolution des consommations énergétiques dans le contexte algérien. Ce chapitre se concentre par la suite à l'échelle du secteur résidentiel, afin de dresser la part des consommations énergétiques et des émissions dans le parc de logements. On termine cette partie introductive par un examen rapide de la politique actuelle d'efficacité énergétique en Algérie.

Le deuxième chapitre de cette thèse est consacré à un état de l'art relatif à la démarche prospective. On propose de porter d'abord un regard historique sur cette méthode. Puis, à travers l'analyse bibliographique, on évoque le fondement de cette démarche et les différentes méthodes et phases d'analyse prospective. On expose également une description des différentes techniques de modélisation (*bottom-up*, *top-down*...), ainsi que les avantages et les limites de chacune d'entre elles. Après avoir rappelé le cadre général de l'analyse énergétique, ce chapitre propose ensuite une description des grandes familles de modèles prospectifs. Il se concentre sur l'examen des modèles de scénarios énergétiques à travers une grille d'analyse portant sur un ensemble d'études et de recherches en adéquation avec notre thèse.

Le troisième chapitre décrit notre modèle *bottom-up*. Il relate également la méthodologie développée ainsi que les hypothèses retenues, qui interviennent dans l'élaboration de notre modèle.

Le quatrième chapitre présente un inventaire détaillé de l'état du parc de logements et des consommations énergétiques, avec une sorte de reconstitution des consommations énergétiques actuels du parc en fonction de la typologie des logements et selon les variables climatiques. Le développement est effectué dans l'environnement de calculs numériques MatLab, afin de réaliser les différentes simulations numériques de l'évolution des besoins énergétiques et des émissions.

Ensuite, sur la base d'un scénario central de l'évolution de la démographie et du parc, le cinquième chapitre expose les principaux résultats d'un scénario tendanciel des consommations/émissions de CO<sub>2</sub> dans le parc de logements algérien à l'horizon 2050, ainsi que les résultats des différents scénarios de réduction des consommations et des émissions.

Enfin, nous concluons sur les apports du modèle présenté et sur quelques perspectives de recherche et d'amélioration futures.

# Chapitre 1 Enjeux énergétiques dans le contexte algérien

Ce chapitre illustre essentiellement les principaux enjeux de la croissance de la consommation d'énergie. On distingue deux approches : la première est systémique, et présente les enjeux globaux de la politique énergétique et l'impact économique et environnemental ; la deuxième est sectorielle, et vise à pointer les enjeux de la croissance de la demande d'énergie associés aux besoins du secteur résidentiel. Dans ce contexte, cette partie du travail de recherche expose une analyse rétrospective de l'évolution de la consommation énergétique par secteur d'activité et par source d'énergie, ainsi que de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre qui en découlent. Elle se focalise ensuite particulièrement sur le secteur résidentiel.

## 1.1 Principaux enjeux énergétiques dans le contexte algérien

Il est fréquent que les enjeux de la réduction de la consommation d'énergie soient liés, essentiellement, à la décroissance du recours à la transformation d'énergie d'origine fossile et à la baisse des émissions de gaz à effet de serre. L'Algérie est un important pays producteur et exportateur d'hydrocarbures<sup>5</sup>. Elle possède l'un des plus grands gisements de pétrole et de gaz d'Afrique du Nord. Au-delà du rôle des produits hydrocarbures utilisés comme source d'énergie au niveau local, les revenus provenant de l'exportation d'hydrocarbures représentent le principal moteur de l'économie de ce pays.

Bien entendu, les ressources d'énergie d'origine fossile sont limitées. Or, l'exploitation intensive de ces gisements d'énergie accélère leur épuisement. Ce rapide constat devient inquiétant quand il est corrélé à des enjeux économiques et environnementaux. Dans ce sens, il nous semble pertinent d'effectuer un examen du secteur énergétique ainsi que de ses enjeux globaux, économiques et environnementaux, à une échelle macroscopique, avant de nous focaliser sur le secteur résidentiel.

---

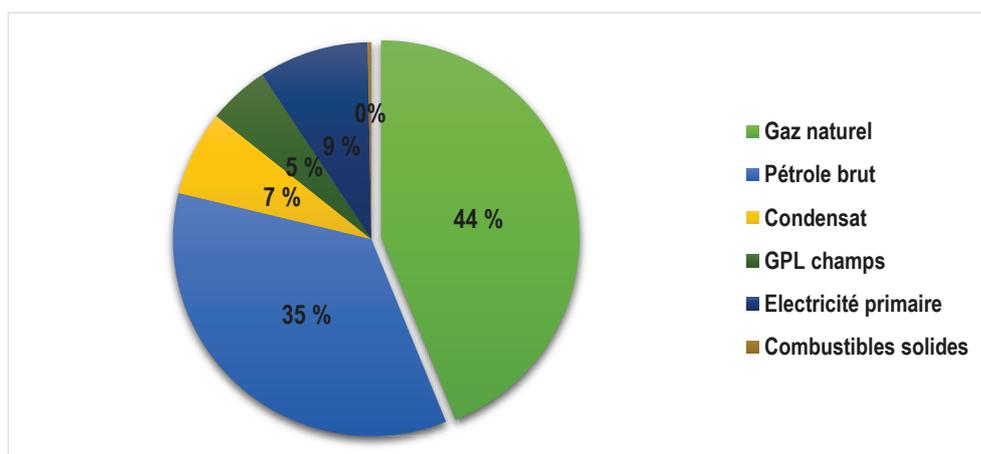
<sup>5</sup> Principalement : le pétrole et le gaz.

### 1.1.1 Panorama général du secteur énergétique en Algérie

Actuellement, les ressources exploitées sont essentiellement d'origine fossile. Il s'agit surtout d'hydrocarbures et, dans une certaine mesure, du charbon. Les énergies renouvelables constituent une importante source énergétique, du fait de la situation géographique du pays. Toutefois, cette source n'est pas encore exploitée commercialement, et son utilisation se limite à certaines zones géographiques isolées, non couvertes par le réseau électrique.

En 2010, l'Algérie possédait environ 1 % des réserves mondiales de pétrole et 3 % de celles de gaz. Selon le bilan annuel du ministère de l'Énergie et des Mines algérien, plus de 99 % du mix énergétique est constitué de produits pétroliers et de gaz. Le pétrole et le condensat représentent plus de 45 % de ce mix, et le gaz en représente 54,9 %. Le charbon et l'électricité primaire n'interviennent, quant à eux, chacun que pour seulement 0,03 % (cf. Figure 1-1).

Figure 1-1 : Répartition de la production de l'énergie primaire en 2010



Source : (MEM, 2011).

Les rapports de l'Agence internationale de l'énergie<sup>6</sup> montrent qu'en 2005, dans le classement mondial des pays producteurs et exportateurs d'énergie, l'Algérie occupait la 11<sup>e</sup> place en matière de réserves d'hydrocarbures (gaz et pétrole réunis). Concernant la production, elle figurait à la 12<sup>e</sup> place, et elle occupait la 9<sup>e</sup> place pour les exportations. Dans le marché des exportations d'hydrocarbures au niveau mondial, l'Algérie figurait en 12<sup>e</sup> position pour le pétrole et au 9<sup>e</sup> rang des pays producteurs de gaz, juste après la Norvège, le Qatar et la Chine. Selon ces rapports, ces sources d'énergie sont concentrées dans plus de 200 gisements répartis en majorité dans la région sud du territoire. Le volume total des gisements d'hydrocarbures est

<sup>6</sup> Source : [www.eia.gov](http://www.eia.gov).

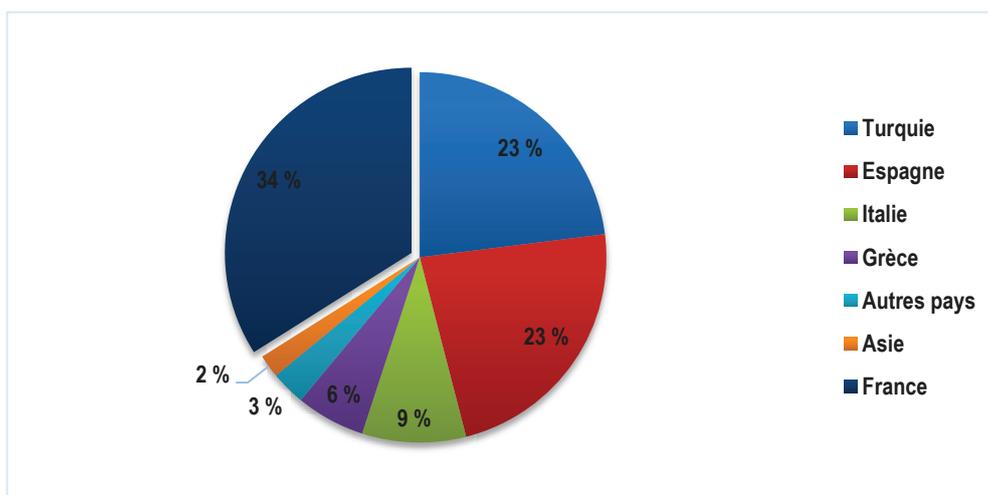
estimé à près de 300 milliards de barils équivalent pétrole, dont plus de 40 milliards de barils sont considérés comme exploitables. Les réserves de gaz sont estimées à hauteur de 4 500 milliards de mètres cubes, et représentent l'équivalent de 57 % de la totalité des réserves ; celles de l'huile, 28 % ; enfin, le condensat et le GPL, respectivement 9 % et 6 % de ces réserves.

Ces capacités d'exploration et de production ont permis à l'Algérie d'occuper une place importante dans le marché mondial de l'énergie. En effet, elle exporte plus de 60 milliards de mètres cubes de gaz en moyenne annuelle, ce qui la place comme un important fournisseur de produits gaziers (MEM, 2002).

Selon l'agence internationale de l'énergie, la production, en 2011, s'est élevée à environ 83 milliards de mètres cubes de gaz, soit 2,4 % de la production mondiale. La production commercialisée a été d'un peu plus de 80 milliards de mètres cubes, dont près de 52 milliards pour l'exportation et plus de 30 milliards pour la consommation nationale, ce qui représente près du tiers de la production totale. Le reste, soit plus de 1 milliard de mètres cubes, est injecté dans les gisements pour maintenir la pression et assurer un bon taux d'extraction. La majeure partie des exportations de gaz, en 2011, étaient destinées au marché européen (cf. Figure 1-2), soit près de 34 % pour la France, 23 % pour l'Espagne et 9 % pour l'Italie, ce qui fait de l'Algérie le deuxième fournisseur de gaz naturel de l'Europe, après la Russie (41 %) et devant la Norvège (25 %) (AIE, 2013).

---

Figure 1-2 : Exportation de gaz naturel par destination, Algérie (2011)



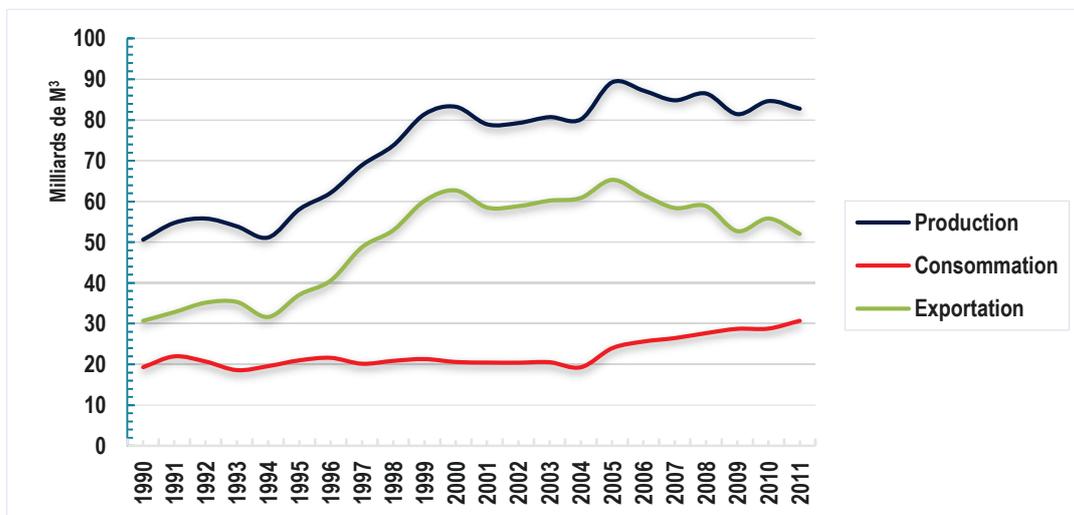
Source : (AIE, 2013).

---

Cependant, selon l'AIE, ces dernières années, la balance de la production/exportation/consommation s'est nettement modifiée. La production annuelle de gaz

naturel est passée d'un volume total de 80 milliards de mètres cubes en 2003 à 83 milliards en 2011 (cf. Figure 1-3) ; la consommation nationale est passée d'environ 20 milliards de mètres cubes de gaz en 2003 à plus de 30 milliards en 2011, soit une augmentation de près de 30 %. Le volume des exportations a néanmoins connu une nette régression ; il est passé en effet de plus de 62 milliards de mètres cubes en 2000 à environ 52 milliards en 2011. L'augmentation de la consommation locale de gaz et la quasi-stabilité du volume total de production expliquent bien la régression du volume de gaz destiné à l'exportation.

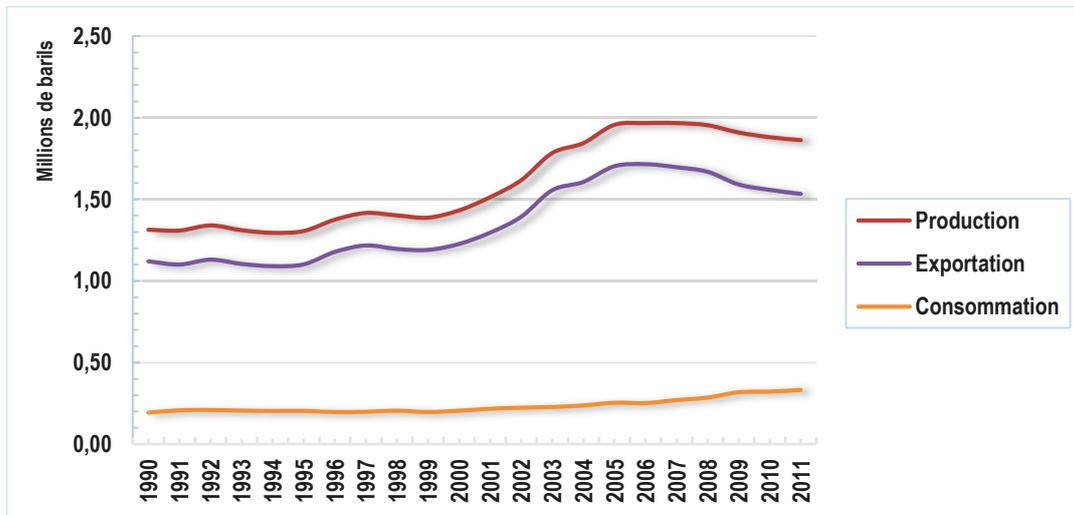
Figure 1-3 : Évolution de la production/consommation/exportation de gaz naturel (1990-2011)



Source : (MEM, 2012).

De plus, la figure 1-4 rejoint la tendance actuelle de la balance du gaz naturel : elle montre qu'en effet, la production de produits hydrocarbures liquides (pétrole brut et autres liquides) connaît une régression relativement nette. La production annuelle est passée de 1,96 million de barils de pétrole brut par jour en 2005 à environ 1,86 million de barils/jour en 2011, soit une baisse de production proche de 5 %. Dans la même période, la consommation nationale est passée de 254 000 barils de pétrole par jour à 333 000, soit une augmentation de 30 %. Concernant l'exportation du pétrole, on remarque une diminution : elle passe de 1,70 million de barils de pétrole par jour en 2005 à 1,54 million de barils par jour en 2011, soit une baisse de plus de 10 % en six ans.

Figure 1-4 : Évolution de la production/consommation/exportation de pétrole brut (1990-2011)



Source : (AIE, 2013).

### 1.1.2 Secteur énergétique comme levier économique en Algérie

Comme on l'a dit auparavant, et à l'instar de la plupart des pays producteurs d'hydrocarbures – particulièrement les pays en voie de développement –, les ressources énergétiques, en Algérie, sont d'une importance cruciale. Elles constituent non seulement une source d'énergie pour subvenir à la demande énergétique intérieure, mais aussi l'élément catalyseur de l'appareil économique. En Algérie, les exportations pétrolières représentent 79 % des paiements du compte courant (revenus des biens, services, transferts et investissements nets) (cf. Tableau 1-1). Le secteur économique algérien s'appuie principalement sur la rente provenant de l'exportation d'hydrocarbures. Dans ce sens, le pays utilise son industrie énergétique comme un levier capital de relance économique. Grâce à cela, il connaît actuellement une confortable embellie économique. En effet, ces dernières années, la hausse des prix des produits hydrocarbures lui a permis de payer plus de 98 % de ses dettes extérieures et de se doter d'une importante réserve de change, estimée à plus de 200 milliards de dollars (Lazar et Nehad, 2014). Cette embellie financière a également permis de relancer tous les secteurs économiques, notamment le secteur du logement et des infrastructures urbaines, etc.

---

Tableau 1-1 : Part des paiements du compte courant couverte par les exportations pétrolières (2004)

Algérie	79 %
Iran	68 %
Koweït	53 %
Arabie saoudite	67 %
Émirats arabes unis	71 %
Venezuela	73 %
Nigeria	81 %
Russie	31 %

Source : World Development Indicators (2005).

---

En 2012, Natixis<sup>7</sup> a affirmé que, durant la période située entre 2000 et 2011, l'accroissement du prix des hydrocarbures et de sa demande mondiale a permis à l'économie algérienne de se redynamiser, avec un taux de croissance moyen de l'ordre de 3,6 %. Cette croissance a principalement bénéficié aux investissements dans le secteur public. Depuis 2001, et en se basant sur la rente tirée des hydrocarbures, le gouvernement algérien a lancé d'ambitieux projets d'infrastructures et de logements qui se sont inscrits dans trois plans quinquennaux successifs. La Figure 1-5 montre qu'en effet, durant cette période, on a constaté une nette augmentation de la FBCF<sup>8</sup>, conjointement à la croissance de la consommation des ménages. Ce développement économique a permis l'amélioration du niveau économique des ménages et l'élévation des revenus de ces derniers.

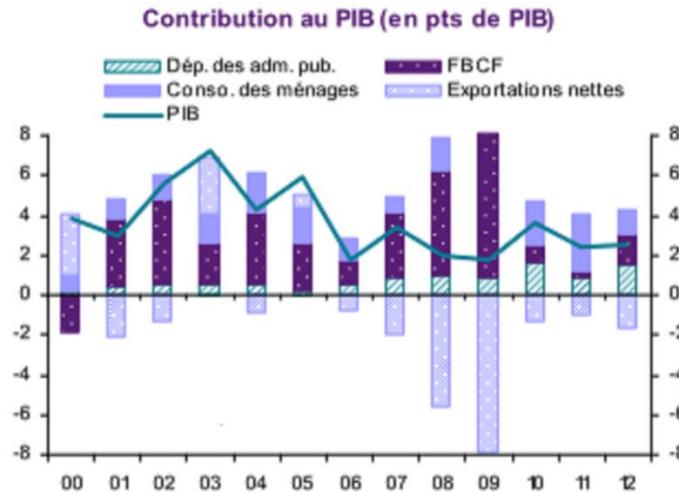
Si l'on partait de l'hypothèse selon laquelle l'augmentation des revenus des ménages est un des facteurs de la croissance de leur demande énergétique, on expliquerait alors une bonne part de l'augmentation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel.

---

<sup>7</sup> « Natixis [...] est la banque de financement, de gestion et de services financiers du groupe BPCE, issue de la fusion des groupes Caisse d'épargne et Banque populaire. L'entreprise intervient dans les métiers de la banque grande clientèle, de l'épargne et des services financiers spécialisés et intègre des équipes de recherche en économie » (source : wikipedia.org).

<sup>8</sup> « La FBCF, ou formation brute de capital fixe, est l'agrégat qui mesure, en comptabilité nationale, l'investissement [...] en capital fixe des différents agents économiques résidents » (source : wikipedia.org).

Figure 1-5 : Contribution des exportations d'hydrocarbures au PIB, Algérie

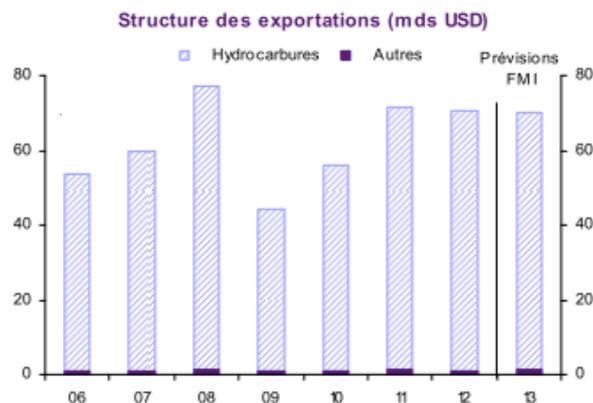


Source : (EIU, 2013).

L'économie algérienne demeure dépendante de sa rente pétrolière à plus d'un titre : outre sa contribution directe à son PIB, le secteur des hydrocarbures représente 97 % des recettes d'exportation et 70 % des recettes de l'État via la fiscalité pétrolière (FMI, 2013). De plus, la faible rentabilité des autres secteurs économique a rendu ce pays tributaire vis-à-vis des cours du pétrole et du gaz (cf. Figure 1-6). Mitchell et Rochefort (2006) insistent particulièrement sur ce point :

*« la politique de certains pays exportateurs de pétrole peut sembler “instable” de l'extérieur. De “l'intérieur”, le facteur dominant est toujours le rôle que joue le pétrole dans l'affirmation et la préservation de l'indépendance nationale ».*

Figure 1-6 : Structure des exportations (en mds USD), Algérie.



Source : (EIU, 2013).

Comme nous l'avons précisé auparavant, la rente provenant des hydrocarbures est le principal levier du développement économique. Par contre, la stabilité économique algérienne a tendance à être fragilisée par sa propre croissance intérieure. Selon le bilan énergétique communiqué par le ministère de l'Énergie en 2010, l'accroissement de la demande locale en énergie est en moyenne de 2,4 % par an. Dans le même temps, la production nationale est en baisse de 1,3 % par an, la capacité d'exportation en baisse de 1,60 % par an et les prix des produits d'exportation relativement stables. La poursuite de ces tendances conduit à accélérer l'épuisement des ressources. D'ici quelques années, la production nationale suffira à peine à répondre aux besoins énergétiques locaux et à couvrir ses engagements en matière d'exportation. En 2012, l'Algérie a ainsi connu le premier plafonnement de ses revenus d'exportation : ceux-ci couvraient à peine le budget intérieur.

Au regard du constat économique et énergétique actuel, ne serait-il pas pertinent de réexaminer l'efficacité de la politique énergétique ?

### 1.1.3 Mix énergétique, dynamique de la production/consommation et ressources

L'examen des rapports de l'Agence internationale de l'énergie montre une certaine dynamique de changement dans le mix mondial des ressources énergétiques. Le terme « énergie » est généralement, et de manière erronée, pris pour un synonyme de « pétrole », alors que ce type d'énergie n'est plus dominant dans le mix mondial. Selon ces rapports, si le pétrole représentait 50 % des ressources mondiales dans les années soixante-dix, il n'en représente plus que 30 % actuellement.

La Figure 1-4 décrite précédemment montre la prédominance du gaz naturel dans le mix énergétique algérien. Celui-ci représente plus de la moitié de la production nationale, suivi par le pétrole et ses dérivés. De plus, il figure comme la première forme d'énergie destinée à l'exportation. Concernant sa consommation intérieure, l'Algérie a opté pour le choix quasi exclusif du gaz dans la génération de l'électricité et comme forme d'énergie finale (chauffage, cuisson ou eau chaude sanitaire). Ce choix répond, tout simplement, à la mise en valeur de cette forme d'énergie, relativement abondante dans le pays. Les résultats provenant des bilans du ministère de l'Énergie et des Mines algérien montrent que, ces dernières années, la consommation d'énergie a enregistré une importante évolution. En effet, en énergie primaire, la consommation est passée de 30,1 Mtep<sup>9</sup> en 2000 à 43,3 Mtep en 2010, soit une augmentation

---

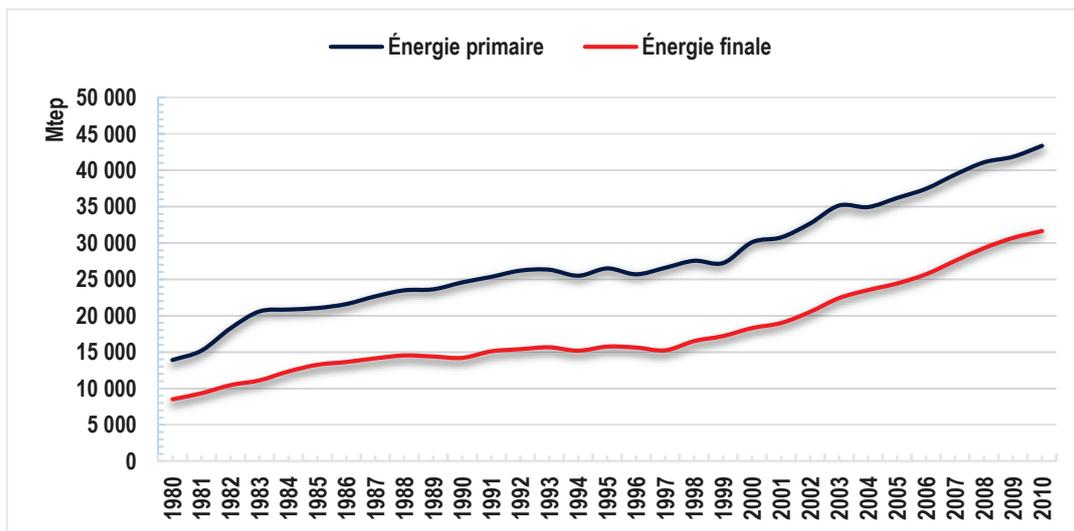
<sup>9</sup> Mtep : millions de tonnes d'équivalent pétrole.

moyenne de plus de 3 % par an. En énergie finale, cette évolution est plus importante : avec une moyenne annuelle de l'ordre de 4 %, elle est passée de 18,3 Mtep en 2000 à 31,6 Mtep en 2010 (cf. Figure 1-7). À l'échelle de la consommation individuelle, cette augmentation s'avère plus importante, puisque la consommation d'énergie primaire est passée d'une moyenne de 0,89 Tep/hab. en 1981 à plus de 1,35 Tep/habitant en 2010 (AIE, 2013). La consommation d'énergie primaire par habitant de ces trente dernières années a augmenté de plus de 50 %.

Si l'on suppose qu'il n'existe pas, dans tous les pays, de disparité dans les modes de consommation d'énergie (confort thermique, équipements électroménagers, transport, industrie, agriculture, etc.), ceci nous permet de comparer leurs consommations énergétiques. Dans cette hypothèse, peu probable, il est évident qu'en 2010, une consommation de 1,35 Tep/hab. représente un chiffre relativement moyen dans la grille de consommation énergétique mondiale. En France, par exemple, cette consommation est de 3,84<sup>10</sup> Tep/hab. ; en Allemagne, de 3,75 Tep/hab. Or, la consommation en France est en baisse depuis ces dix dernières années. À l'inverse, en Algérie, durant la même période, la consommation unitaire a augmenté et continue son augmentation selon un rythme accru.

L'étude prospective de 2004, présentée par l'Ademe en collaboration avec l'APRUE<sup>11</sup>, prévoit une hausse de la consommation énergétique, laquelle pourrait atteindre 1,88 Tep/hab. en 2020.

Figure 1-7 : Évolution de la consommation d'énergie entre 1980 et 2010



Source : (MEM, 2011).

<sup>10</sup> Source : <http://www.statistiques-mondiales.com/energie.htm>.

<sup>11</sup> APRUE : Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'énergie.

Il est clair que cette dynamique de production/consommation génère une baisse progressive de ces ressources énergétiques. Le Tableau 1-2 présente ainsi les taux d'épuisement des gisements de pétrole pour certains pays producteurs d'hydrocarbures. Ce tableau révèle qu'en 2005, l'Algérie a épuisé l'équivalent de 37 % de ses ressources énergétiques, notamment celles des gisements d'hydrocarbures en cours d'exploitation.

La Banque mondiale a mis en œuvre un indicateur pour évaluer la fragilité de l'économie des pays exportateurs d'hydrocarbures. L'épargne nette ajustée est un indicateur de soutenabilité qui quantifie la proportion de produit national brut (PNB) « préservé » par l'investissement, y compris en matière d'éducation, après estimation de la consommation de capital déprécié et prise en compte de l'épuisement de la ressource et de la pollution de l'environnement (Mitchell et Rochefort, 2006). Conformément aux indications de la Banque mondiale, les pays avec de hauts chiffres négatifs pour cette « épargne nette ajustée » ne maintiennent pas leur socle d'actifs pour les générations futures. D'après ce tableau, le taux d'épuisement des ressources hydrocarbures de l'Algérie en 2003 est mesuré à une valeur de 37,5 %. Celle-ci représente un taux relativement important par rapport à certains autres pays exportateurs de pétrole, comme la Norvège ou la Colombie, qui pourraient maintenir leur socle actif pour les générations futures.

Tableau 1-2 : Indicateur « épargne nette ajustée » pour les pays exportateurs de pétrole

	Épargne nette ajustée (% du PNB)	Dont : épuisement des ressources énergétiques (en %)
Algérie	-2,9	-37,5
Angola	-28,5	-43,6
Azerbaïdjan	-41,2	-45,4
Colombie	-1,1	-7,7
Iran	1,7	-33,2
Koweït	-30,9	-50,8
Norvège	13,3	-6,9
Russie	-10,7	-29,6
Arabie saoudite	-18,8	-49,2
Venezuela	-19,6	-37,2

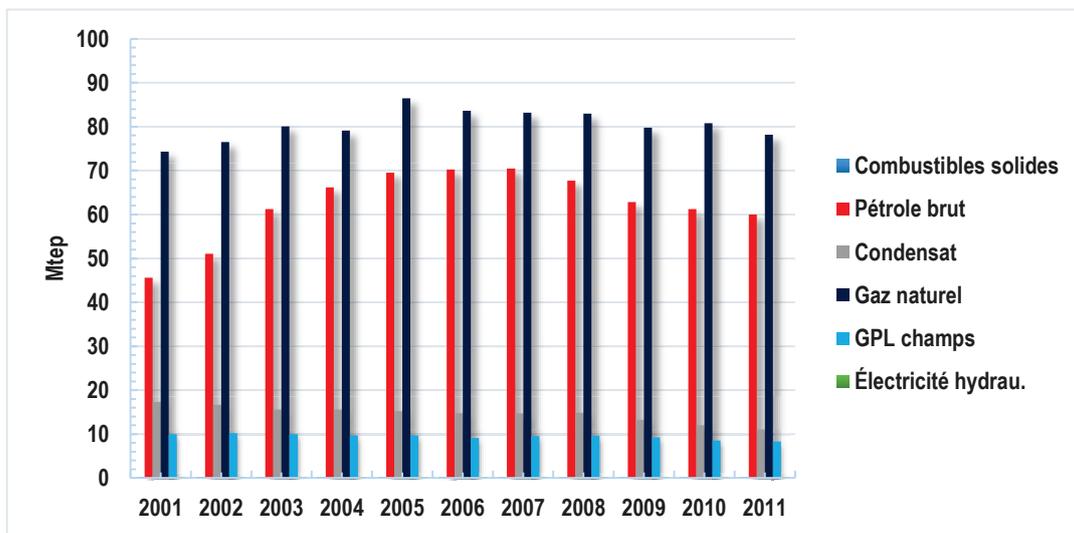
Source : World Development Indicators (2005).

#### 1.1.4 Enjeux du modèle énergétique actuel

Comme énoncé précédemment, il ressort de l'examen du bilan énergétique que, depuis 2006, la production d'énergie primaire en Algérie est en baisse. Elle totalise près de 157 Mtep

en 2011, contre 162 Mtep en 2010, soit une baisse de 3,1 %. L'analyse de ce bilan détaillé indique que cette baisse concerne l'ensemble des produits d'énergie primaire, à l'exception de l'électricité. La production de pétrole, condensat, GPL champs et gaz naturel a en effet baissé, respectivement, de près de 2,1 %, 7,7 %, 2,0 % et 3,3 % par rapport à l'année 2010. Quant aux combustibles solides, cette baisse est plus significative, à près de 69,3 % (cf. Figure 1-8). La production d'électricité primaire<sup>12</sup> a quant à elle fortement augmenté, de l'ordre de 187,9 %, avec l'entrée en production de la centrale hybride de Hassi R'mel<sup>13</sup> (capacité de 150 MW, dont 25 MW en solaire).

Figure 1-8 : Évolution de la production d'énergie par type de source



Source : (MEM, 2012).

Cette analyse montre que, dans une situation générale de baisse de production d'hydrocarbures depuis 2008, si la quantité de production en gaz naturel connaît une certaine variation, elle reste toutefois quasi stable comparée au rythme de la baisse des quantités de production des autres types d'énergie. Or, la volonté actuelle de développer la production du gaz naturel (GN) révèle la prise de conscience de l'enjeu représenté par le potentiel du gaz naturel comme source d'énergie, pour subvenir à la fois à la demande nationale et à l'exportation. Cette tendance devrait se poursuivre au regard des nombreux avantages qu'offre le gaz naturel :

- son abondance, qui peut permettre d'élargir son exploitation ;

<sup>12</sup> Production d'électricité primaire : hydraulique + solaire (centrale hybride + villages solaires).

<sup>13</sup> La première centrale hybride solaire-gaz en Algérie a été inaugurée le 14 juillet 2011. Située à Hassi R'mel, cette centrale a été dénommée SPP I, du nom de l'entreprise qui l'a réalisée, Solar Power Plant One.

- son faible coût d'extraction par rapport aux autres types d'énergie fossile ;
- ses précieux atouts environnementaux (facteur d'émission de CO<sub>2</sub> relativement faible) ;
- son avantageux pouvoir calorifique inférieur (PCI)<sup>14</sup> par rapport aux autres sources d'énergie (cf. Tableau 1-3).

Tableau 1-3 : Tableau comparatif des PCI par type d'énergie

	Pouvoir calorifique	Unité de référence	PCI	
			kcal	kWh
Bois		Kilogramme	3,30	3,800
Charbon tous types		Kilogramme	de 6,65 à 7,80	de 7,600 à 9,070
Électricité		kWh	0,86	1,000
Fioul domestique		Litre	8,60	10,000
Gaz naturel		M <sup>3</sup>	7,56	8,800
Gaz propane		Kilogramme	11,00	12,800

Source : Acqualys (2013).

Compte tenu de ses nombreux avantages, le modèle énergétique du gouvernement algérien vise à valoriser en priorité le gaz naturel dans la structure du mix énergétique. Actuellement, la quasi-totalité du parc de génération d'électricité s'appuie sur la transformation du gaz naturel. Selon le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER), en 2012, 96 % de la production d'électricité a été générée à partir du gaz naturel, 3 % à partir du diesel (pour les régions isolées du Sud algérien) et 1 % à partir de l'eau. Les centrales hydrauliques génèrent l'équivalent de 100 MW. Quant à la production d'électricité à partir des ENR<sup>15</sup>, elle ne représente que 25 MW. En termes d'énergie finale, ce modèle énergétique a permis d'élargir significativement le réseau de raccordement en électricité et en gaz naturel, qui couvre désormais plus de 98 % du parc de logements du pays, et près de 57 % de ce parc pour le réseau de gaz naturel (MEM, 2012).

### 1.1.5 Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel

Il convient de rappeler qu'un des principaux objectifs de ce travail est l'analyse quantitative de la consommation d'énergie dans le parc de logements (cf. *plus loin*). Signalons que cette partie sera consacrée, dans un premier temps, à l'analyse de l'évolution du niveau de

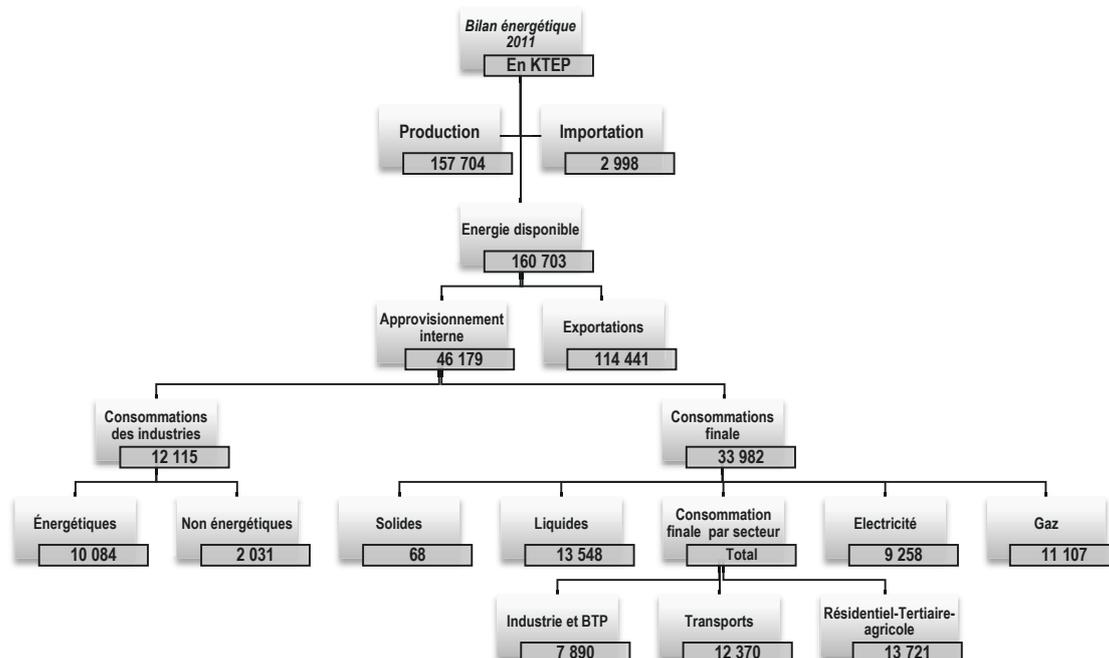
<sup>14</sup> Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel, dans le contexte algérien, reste concurrentiel en raison de son prix relativement bas par rapport aux autres types d'énergie.

<sup>15</sup> ENR : énergies nouvelles et renouvelables.

consommation d'énergie du secteur du bâtiment, puis à un examen de la demande énergétique par source d'énergie.

Le rapport des répartitions de la consommation énergétique dans les différents secteurs d'activité montre que le secteur résidentiel-tertiaire-agricole est le premier secteur de consommation d'énergie finale, avec 40 % (13 721 Mtep), suivi par le transport, avec 36 % (12 370 Mtep), et enfin l'industrie et le BTP, avec 23 % (7 890 Mtep) (cf. Figure 1-9). Selon le rapport PNUD<sup>16</sup> de 2010, le taux de consommation globale en énergie finale des secteurs résidentiel-tertiaire-agricole est passé de 39 % en 1980 à plus de 52 % en 2008. En examinant la Figure 1-10, on constate que cette forte progression du niveau de consommation dans le secteur résidentiel a commencé à partir du début des années 2000. Ceci étaye l'hypothèse de la partie précédente, selon laquelle la croissance de la consommation d'énergie est corrélée à l'évolution du mode de vie des ménages. Il s'agit, en fait, de l'évolution du niveau d'équipement des logements en appareils électroménagers et de confort thermique.

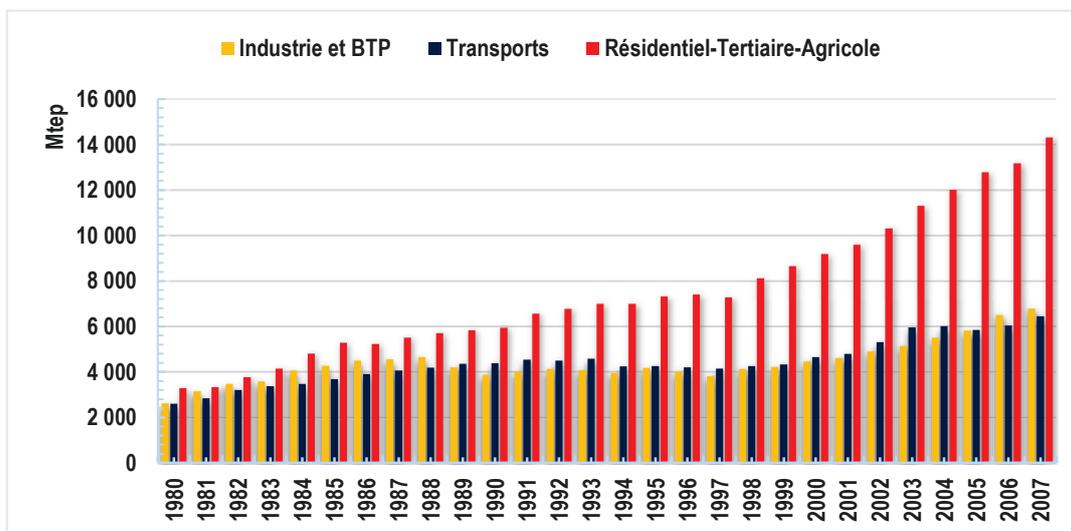
Figure 1-9 : Synthèse des flux énergétiques de l'année 2011



Source : (MEM, 2012).

<sup>16</sup> PNUD : Programme des Nations unies pour le développement.

Figure 1-10 : Évolution de la consommation en énergie finale des différents secteurs d'activité

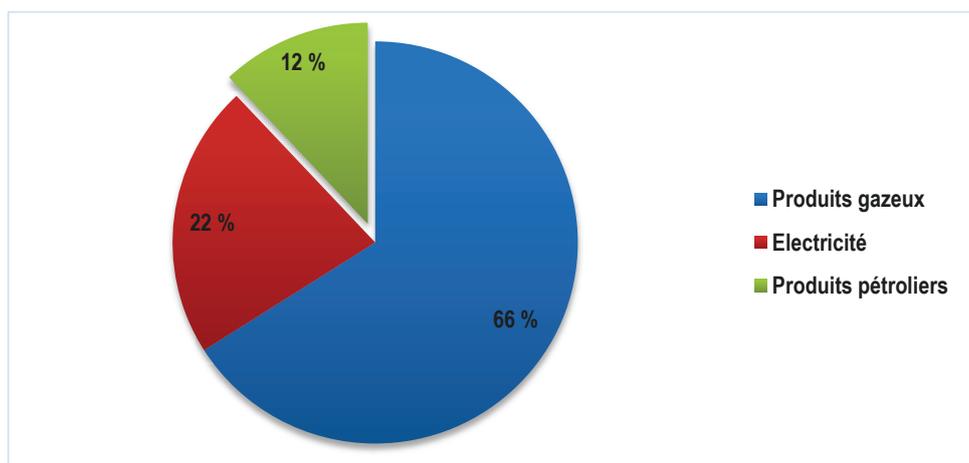


Source : (MEM, 2011).

En termes de mix énergétique, on remarque la prédominance du gaz naturel et de l'électricité dans la consommation d'énergie du secteur résidentiel. En effet, les produits gazeux (gaz naturel, GPL) représentent l'équivalent de 66 % de la consommation énergétique dans ce secteur. L'accroissement à ce niveau de consommation montre la volonté de la politique énergétique d'élargir<sup>17</sup> l'usage de ce type d'énergie (cf. *plus haut*). Ce niveau est suivi par celui de l'électricité, avec près de 22 %, et les produits pétroliers, près de 12 %. C'est dans ce contexte d'accroissement de la consommation d'énergie que nous allons examiner les besoins d'énergie par source (cf. Figure 1-11).

<sup>17</sup> On note qu'entre 2000 et 2008, le taux de raccordement du parc de logements au GN est passé de 29 % à 42 %, soit l'équivalent de 2,6 millions de logements raccordés en 2008. Toutefois, l'évolution de la consommation est nettement plus importante que le taux de raccordement au GN.

Figure 1-11 : Répartition de la consommation du secteur résidentiel par source 2007



Source : APRUE (2007).

Selon le CREG<sup>18</sup>, le taux moyen de croissance de la consommation annuelle de gaz naturel est de 9,7 %. On note que le secteur résidentiel a consommé l'équivalent de 5,7 milliards de mètres cubes de GN en 2009 contre 3,9 milliards en 2005. Il est donc la principale source d'énergie consommée dans les secteurs résidentiel et tertiaire. L'accroissement de la demande en électricité connaît également un rythme plus soutenu. Elle a atteint 42,8 TWh en 2009, soit une augmentation de 7 % par rapport à 2008 (MEM, 2012).

Il devient évident que l'effet rebond de consommation d'électricité de ces dernières années est lié directement à l'accroissement des revenus des ménages. Cet accroissement de consommation se traduit par l'achat d'équipements électroménagers (climatisation, appareils multimédias, etc.) pour certains ménages, ce qui peut entraîner des niveaux de suréquipement<sup>19</sup> des logements quand il s'agit d'un ménage collectif<sup>20</sup>.

### 1.1.6 Politique d'efficacité énergétique

### 1.1.7 Politique énergétique et stratégie

Il semble clair que, pour de nombreux pays, l'objectif fondamental des politiques énergétiques est de garantir une satisfaction des besoins en énergie à court, moyen et long termes. Il s'agit d'un choix crucial qui permet d'assurer la stabilité du développement

<sup>18</sup> CREG : Commission de régulation d'électricité et du gaz, Algérie.

<sup>19</sup> Plusieurs appareils du même type dans un même logement.

<sup>20</sup> Un ménage est dit « collectif » lorsque plusieurs ménages cohabitent dans un même logement.

économique du pays en question. Pour les pays développés appartenant à l'OCDE<sup>21</sup>, notamment les pays importateurs d'hydrocarbures, le choc pétrolier des années soixante-dix est à l'origine de la recherche d'une sécurité énergétique la plus importante possible. En effet, pour éviter les conséquences d'une telle crise, la plupart des pays développés ont imposé la constitution de stocks, dans le but d'assurer une couverture des besoins d'énergie pour une période d'au moins trois mois. Ce dispositif a permis à l'Europe d'éviter, sans trop de dégâts, la crise ukrainienne de l'hiver 2009, à la suite de l'interruption de pompage du gaz russe vers l'Europe. C'est grâce à ces mesures de sécurité que le Japon a pu également éviter le « *black-out* » qu'aurait causé le récent tremblement de terre de Fukushima, celui-ci ayant été provoqué par l'arrêt des centrales nucléaires qui approvisionnaient plus de 50 % des besoins en électricité du Japon. En plus de ce dispositif de sécurité, la politique énergétique de l'OCDE a permis de réduire la consommation énergétique. En effet, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande potentielle d'énergie a été réduite de 60 % entre 1974 et 2006.

À l'inverse, en Algérie, les enjeux énergétiques ne consistent pas seulement à garantir la sécurité du besoin intérieur en énergie, mais surtout à développer une politique énergétique basée sur la gestion la plus rationnelle possible des ressources du pays.

Actuellement, la stratégie énergétique du gouvernement algérien se résume aux objectifs suivants :

- maîtriser la consommation intérieure ;
- éviter la surexploitation des réserves pétrolières et gazières afin de prolonger leur durée d'exploitation, d'assurer une sécurité énergétique et de conserver l'augmentation des revenus qu'elles génèrent ;
- explorer d'autres gisements en dehors des ressources actuelles, par le développement de nouveaux mix. Actuellement, la politique énergétique algérienne hésite entre l'exploitation du potentiel solaire et l'exploration de gaz de schiste<sup>22</sup>.

### 1.1.8 Intensité énergétique, indicateur d'efficacité

L'intensité énergétique est un indicateur développé et appliqué par les économistes pour évaluer, contrôler et expliquer les différences, en termes d'efficacité énergétique, entre pays,

---

<sup>21</sup> OCDE : l'Organisation de coopération et de développement économiques est une organisation internationale d'études économiques.

<sup>22</sup> Selon le ministère de l'Énergie et des Mines algérien, les réserves de gaz de schiste sont estimées à 27 000 milliards de mètres cubes.

lorsque ceux-ci partagent de nombreux facteurs en commun. C'est un indicateur monétaire qui définit la quantité d'énergie nécessaire pour produire une unité de PIB. Cet indicateur peut représenter une bonne estimation des performances énergétiques de l'économie d'un pays (Missaoui et al., 2012). L'intensité énergétique ne se limite pas à l'évaluation du développement économique ou à l'estimation des besoins énergétiques futurs. Elle permet également de définir les objectifs globaux des pays.

L'élaboration de l'intensité énergétique est liée à plusieurs facteurs spécifiques à chaque pays, tels que les politiques mises en œuvre, les facteurs climatiques ou même le niveau de vie de la population. Elle est considérée comme une valeur relative, et ne peut, en aucun cas, être utilisée pour mesurer les performances énergétiques des pays les uns par rapport aux autres. En revanche, elle permet d'examiner les trajectoires de leurs évolutions dans un intervalle temporel.

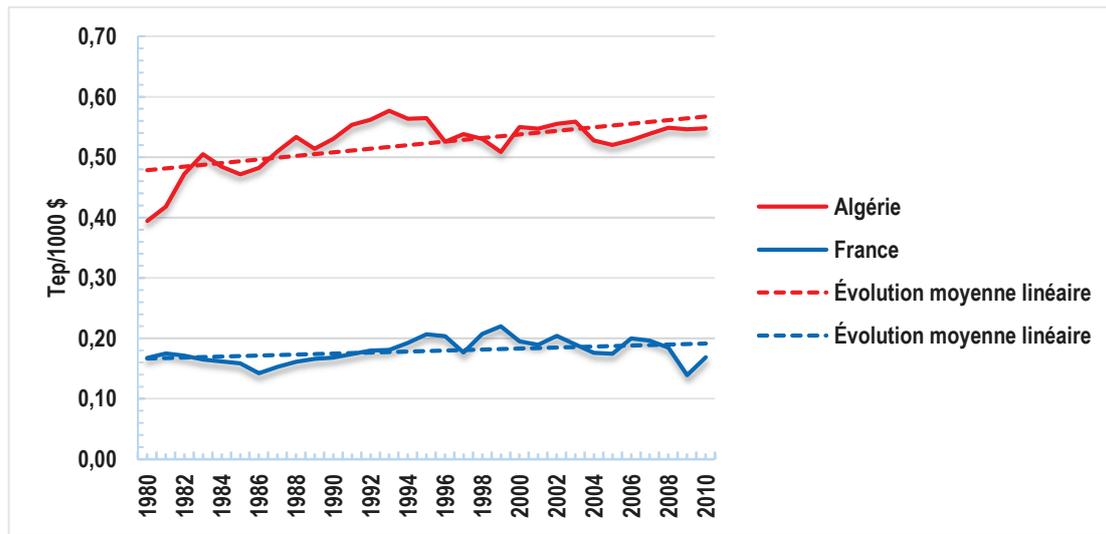
En raison du manque de données nécessaires pour établir l'évolution de l'intensité énergétique relative aux types de consommation par secteur d'activité en Algérie, on procède tout d'abord au calcul de l'intensité énergétique simple, en rapportant la consommation énergétique (par type ou par secteur, par exemple) au produit intérieur brut (PIB).

L'intensité énergétique primaire est communément utilisée par les économistes. Elle permet de déterminer l'efficacité énergétique globale de l'économie. Elle est le rapport entre la consommation d'énergie primaire et le produit intérieur brut. Ainsi, l'intensité énergétique finale vise à mesurer l'efficacité de la consommation d'énergie au niveau de l'utilisation finale. Signalons qu'il n'est pas question, ici, de comparer les performances énergétiques de l'Algérie avec celles de la France. Il est plutôt question de montrer l'évolution de l'efficacité de leurs politiques énergétiques respectives au fil des ans. En effet, les écarts d'intensités énergétiques entre pays peuvent être également liés :

- à la structure économique des pays, à savoir la contribution des différents secteurs dans le PIB ;
- au mix énergétique dans la production d'électricité (thermique, ENR et nucléaire) ;
- à l'importance des autres transformations (cas de l'Algérie, avec un secteur hydrocarbures très consommateur d'énergie),
- au climat ;
- aux modes de vie et aux niveaux de développement en général (Enerdata, 2013).

La Figure 1-12 trace l'évolution de l'intensité énergétique primaire de l'Algérie et de la France entre 1980 et 2010. Avec une moyenne de 0,169 Tep/1 000 \$ maintenue depuis l'an 2000, l'intensité énergétique primaire de la France demeure relativement stable. Or, l'intensité énergétique primaire de l'Algérie est passée de 0,394 Tep/1 000 \$ de PIB en 1980 à plus de 0,548<sup>23</sup> en 2010, soit une augmentation de l'ordre de 40 %.

Figure 1-12 : Évolution de l'intensité énergétique primaire de l'Algérie et de la France entre 1980 et 2010



Source : (AIE, 2013) ; (MEM, 2012) ; World Development Indicators (2005).

Bien entendu, la croissance de l'intensité énergétique correspond à un système économique fortement consommateur d'énergie par rapport à son PIB. La structure économique de l'Algérie, basée principalement sur l'industrie des hydrocarbures, peut expliquer la croissance de l'intensité primaire. En effet, en découplant la consommation d'énergie et le PIB, on constate qu'effectivement, le secteur de l'industrie et celui de la transformation<sup>24</sup> énergétique ont une large prédominance dans la structure de la consommation d'énergie primaire (50 % de la consommation totale en 2010). Or, l'industrie énergétique contribue en majeure partie au produit intérieur brut (PIB).

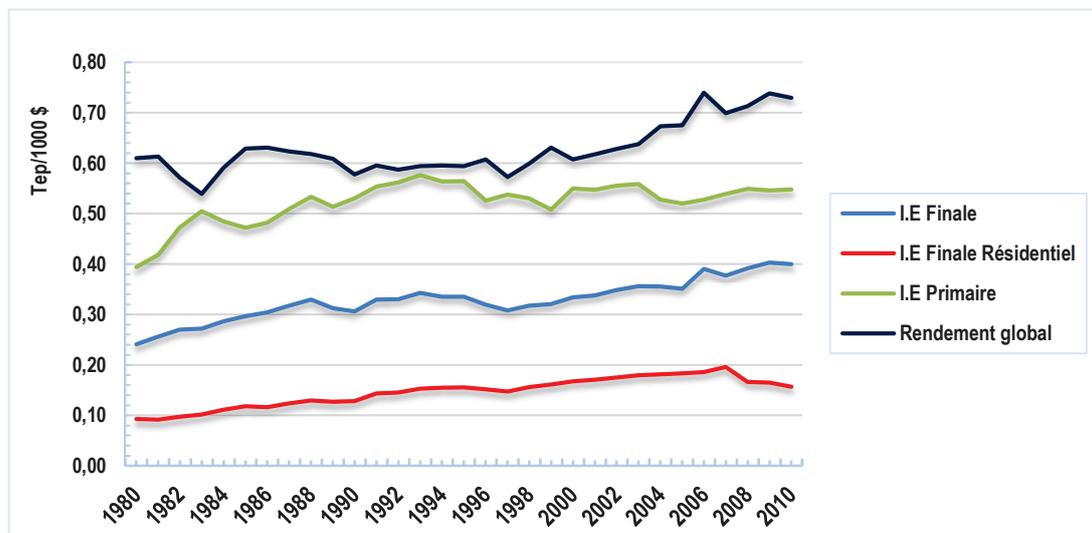
La Figure 1-13 synthétise l'évolution de l'intensité énergétique et du rendement global. Parallèlement à la croissance de l'intensité énergétique, on constate également celle du rendement global, sur un rythme plus soutenu : de 0,60 en 2000, elle est passée à environ 0,73

<sup>23</sup> Avec une telle intensité énergétique, l'économie algérienne consomme trois fois plus d'énergie que la France pour créer la même unité de valeur ajoutée.

<sup>24</sup> Les centrales électriques, le raffinage, la production d'hydrocarbures, de GPL et GNL.

en 2011, ce qui représente une moyenne d'environ 63 %, à rapprocher du taux de 68 % pour la région de l'OCDE. Pour le cas de l'Algérie, la croissance de ce niveau révèle l'amélioration performantielle du système de transformation d'énergie, mais également l'efficacité du système de production de l'électricité, liée à la pénétration des cycles combinés<sup>25</sup>. Ce constat confirme la tendance de la progression du système énergétique, en relation avec l'amélioration de l'efficacité du mix électrique et l'accroissement du recours au gaz naturel à la place du GPL dans les usages thermiques des ménages : chauffage, cuisson, ECS, etc. (cf. Figure 1-18). Notons que la transformation énergétique du GPL présente des coûts élevés par rapport au GN.

Figure 1-13 : Évolution de l'intensité énergétique en Algérie entre 1980 et 2010



Source : (AIE, 2013) ; (MEM, 2012) ; World Development Indicators (2005).

## 1.2 Enjeux environnementaux des politiques énergétiques

À l'image de nombreux pays de la communauté internationale, l'État algérien est conscient du problème du dérèglement climatique et de la nécessité qu'il y a à prendre des mesures pour lutter contre l'accroissement des émissions GES (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère. En effet, les engagements de ce pays sur la scène internationale sont à la hauteur de cet enjeu : en 1992, l'Algérie a participé au Sommet de la Terre à Rio ; en 1993, elle a ratifié la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et, en 2005, elle a signé le protocole de Kyoto. À l'instar des pays en développement, la ratification de la

<sup>25</sup> « Un cycle combiné gaz (CCG) est composé d'une turbine à combustion (TAC) et d'une turbine à vapeur (TAV), chacune équipée de son propre alternateur » (source : www.edf.fr).

CCNUCC implique pleinement l'engagement de l'Algérie à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Conformément à ces engagements, tous les acteurs concernés par la question du changement climatique ont collaboré pour mettre en œuvre, en 2001, la communication nationale initiale (CNI) et le lancement du projet « Élaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques », dont les objectifs sont les suivants :

- réalisation de l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre, conformément au guide méthodologique (version 1996) du Groupe intergouvernemental pour l'évolution du climat (GIEC) ;
- élaboration du plan d'action national pour l'atténuation des émissions des gaz à effet de serre, afin de limiter les effets relatifs aux changements climatiques sur les ressources naturelles et sur le développement socio-économique.

Cet inventaire montre que l'exploitation des énergies fossiles est responsable de la plus grande partie des émissions de gaz à effet de serre. De plus, la situation géographique de l'Algérie, pays constitué en majeure partie par des zones arides et semi-arides, qui connaissent une sécheresse récurrente, est jugée fortement vulnérable aux effets des changements climatiques.

Depuis 2001, les enjeux liés aux changements climatiques en matière d'atténuation des émissions des GES entrent progressivement dans les secteurs socio-économiques et les institutions de l'État. La stratégie nationale mise en œuvre par le gouvernement consiste, d'une part, à renforcer le dispositif législatif, réglementaire et institutionnel, et, d'autre part, à sensibiliser la population à l'approche participative.

Cette stratégie est encadrée par le Plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD), qui fixe les programmes environnementaux du pays pour la période 2012-2014, et s'appuie sur la loi relative à la protection de l'environnement et du développement durable promulguée en 2003. Ce cadre réglementaire et organisationnel englobe les différents plans d'actions des structures techniques opérationnelles. La stratégie environnementale nationale vise à intégrer ces objectifs dans tous les secteurs d'activité, à savoir : le secteur énergétique, l'industrie, les transports, les déchets, les ressources en eau, l'agriculture et les forêts. Elle s'appuie principalement sur les objectifs suivant : tout d'abord, la nécessité de s'adapter aux changements climatiques dans tous les secteurs d'activité, et ce, en mettant en place des structures institutionnelles prenant en charge les changements climatiques. L'objectif visé est de pouvoir atténuer les émissions de gaz à effet de serre.

Rappelons que la quantification des émissions de GES est effectuée à l'aide de la méthode du GIEC de 2006. Or, cette méthode repose essentiellement sur deux approches recommandées par le GIEC, à savoir : l'approche de référence et l'approche sectorielle pour l'estimation des émissions de CO<sub>2</sub>. Les guidelines du GIEC proposent des facteurs d'émission par défaut pour chaque type de combustible. Ces facteurs sont utilisés lors de l'estimation des émissions de GES par source et type de combustion (PNUD, 2010).

Les quantités des émissions de GES sont basées sur les données du bilan énergétique exprimé en pouvoir calorifique supérieur (PCS) (cf. Tableau 1-4). Or, selon les recommandations du GIEC, pour quantifier les émissions de GES, ces données doivent être converties en pouvoir calorifique inférieur (PCI). Les facteurs de conversion proposés par le GIEC sont :

Tableau 1-4 : Émissions de GES par type de gaz, dues à l'utilisation d'énergie en 2000

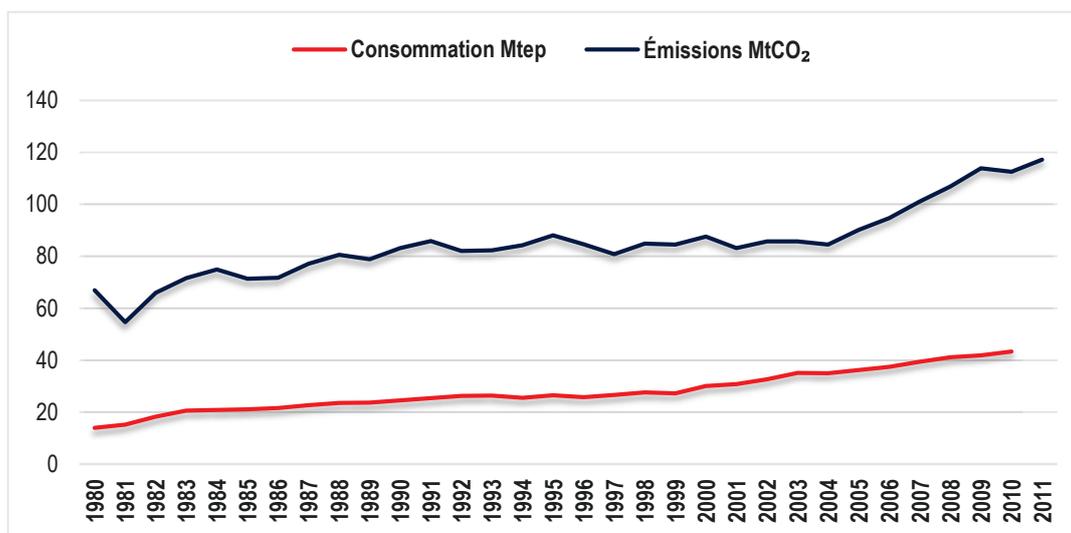
Tableau des facteurs d'émission de CO <sub>2</sub> par produits énergétiques.	
Produit énergétique	Facteur d'émission en tCO <sub>2</sub> /Tep
GPL	2,64
Essence	2,90
Gasoil	3,01
Charbon de coke	4,11
Gaz naturel	2,35
Pétrole brut	3,07
Bois de feu	5,20
Naphta	3,07

Source : PNUD (2010).

### 1.2.1 Analyse des émissions de GES

Les émissions totales de CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergie fossile se sont élevées à 117 millions de tonnes en 2011. Depuis 2004, la quantité des émissions de CO<sub>2</sub> a fortement augmenté, avec une moyenne annuelle de 4,60 % (80,50 MtCO<sub>2</sub> en 2004). La quantité de gaz émis par habitant est passée de 2,74 tCO<sub>2</sub> en 2004 à 3,26 tCO<sub>2</sub> en 2011, soit une hausse de 16 %. Or, si l'on examine l'évolution des émissions de GES antérieures à 2004 (cf. Figure 1-14), on constate une progression relativement faible des émissions globales à l'échelle nationale. Cependant, depuis 2004, on peut percevoir un effet rebond des émissions, lié bien évidemment à l'accroissement des consommations d'énergie finale.

Figure 1-14 : Évolution consommation/émissions en Algérie entre 1980 et 2011



Source : (AIE, 2013).

Les Tableau 1-5 et Tableau 1-6 synthétisent les bilans des émissions des GES répartis par type de gaz émis. Il ressort de l'inventaire CCNUCC une prépondérance du CO<sub>2</sub> pour l'ensemble des gaz émis, à hauteur de 96 % de la quantité globale des émissions pour l'année 2000. La part des autres gaz est nettement plus faible : le CH<sub>4</sub> contribue à ces émissions avec un taux de 1,45 %. Les émissions de ce gaz proviennent à 99 % des émissions fugitives, donc des industries énergétiques. Selon le Tableau 1-5, l'oxyde de carbone (CO) se positionnait en troisième place, représentant un taux de 1,43 % du total des émissions de GES. Les émissions d'oxyde de carbone (CO) proviennent à 95 % des transports. Par ailleurs, les gaz NO<sub>x</sub>, COVNM et SO<sub>2</sub> sont relativement de faible teneur dans l'atmosphère. Ils proviennent généralement des différents secteurs d'activité, notamment le raffinage du pétrole sous forme d'émissions fugitives, les transports et le secteur résidentiel.

Tableau 1-5 : Émissions de GES par type de gaz dues à l'utilisation d'énergie en 2000

Émissions de GES par type de gaz dues à l'utilisation d'énergie en 2000		
Gaz à effet de serre	Émissions (Gg)	Taux (%)
CO <sub>2</sub>	64 346,13	96,28 %
CH <sub>4</sub>	1 001,32	1,45 %
N <sub>2</sub> O	0,51	0,00 %
NO <sub>x</sub>	278,87	0,40 %
CO	985,62	1,43 %
COVMN	257,27	0,37 %
SO <sub>2</sub>	40,40	0,06 %

Source : PNUD (2010).

Tableau 1-6 : Tableau comparatif des émissions de GES en 1994 et en 2000

Tableau comparatif des émissions de CO <sub>2</sub> en 1994 et en 2000 en MtCO <sub>2</sub>				
		Taux %	CO <sub>2</sub>	
1994	Les secteurs d'activités			
	Industrie énergétique	45,97	27,23	
	Industrie et BTP	10,26	6,07	
	Transport	23,48	13,91	
	Résidentiel-Tertiaire	20,29	12,02	
	Agriculture	NC	NC	
	Total des secteurs d'activités total 1994	100 %	59,24	
2000	Industrie énergie	44,11	28,28	
	Industrie manufacturière et BTP	12,01	7,75	
	Transport	19,82	12,78	
	Résidentiel-Tertiaire	22,07	14,22	
	Agriculture	1,99	1,28	
		Total des secteurs d'activité 2000	100 %	64,34
		Émissions des torches 2000		23,25
	Total des émissions 2000		87,59	

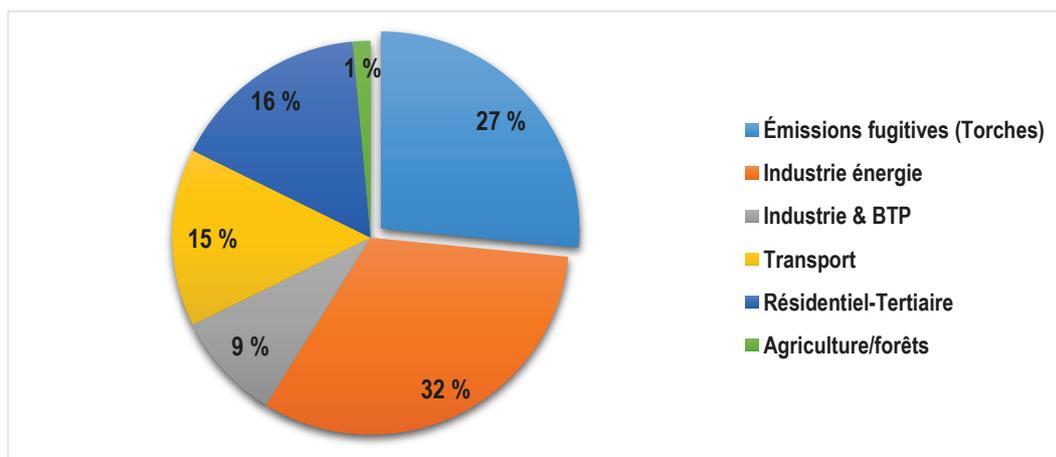
Source : PNUD (2010).

## 1.2.2 Structure sectorielle des émissions de CO<sub>2</sub>

L'inventaire des émissions de l'année 2000 présente un total de 87,59 MtCO<sub>2</sub>. Les émissions de gaz fugitives représentent l'équivalent de 23,25 MtCO<sub>2</sub>, soit 27 % du total des émissions. En dehors des émissions fugitives et de celles des torches, la répartition sectorielle

des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion de l'énergie primaire montre la prédominance des industries énergétiques (pétrolière et gazière), avec 28,25 MtCO<sub>2</sub> (44 % des émissions totales), devant le secteur résidentiel et tertiaire, avec 14,13 MtCO<sub>2</sub> (22 % du total des émissions), suivi par le secteur du transport, qui totalise plus de 12,69 MtCO<sub>2</sub>, ce qui représente plus de 20 %. Le secteur de l'industrie-BTP et le secteur de l'agriculture-forêts émettent quant à eux respectivement 7,69 MtCO<sub>2</sub> (12 %) et 1,27 MtCO<sub>2</sub> (2 %) du total (cf. Figure 1-15).

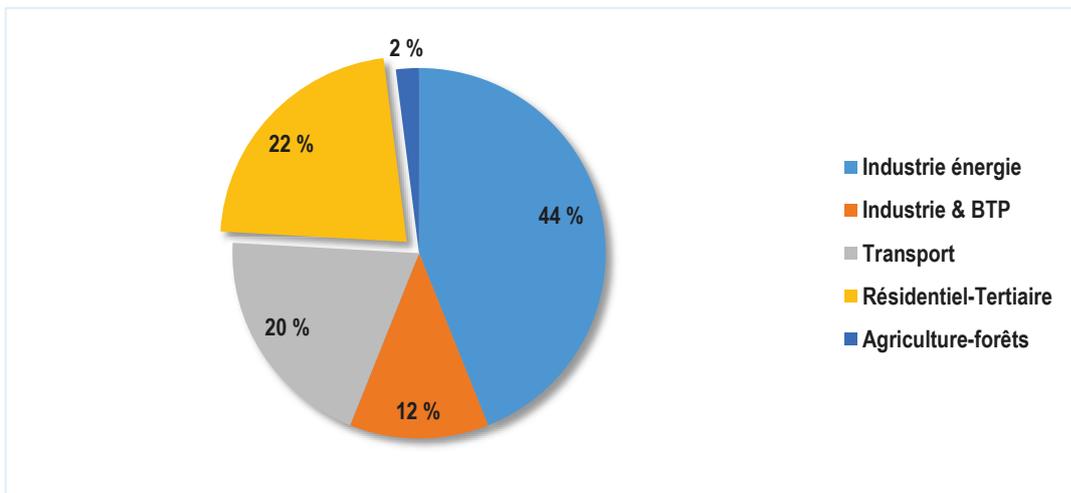
Figure 1-15 : Répartition des émissions par secteur en 2000 (y compris les torches)



Source : PNUD (2010).

Comme nous l'avons évoqué, la période comprise entre 1994 et 2000 est en progression relativement faible en matière d'émissions de GES, soit une moyenne de 1,5 %/an. Or, l'examen de l'évolution des parts des émissions de chaque secteur révèle, en effet, que l'augmentation des émissions GES concerne les secteurs d'activité en forte croissance, comme le secteur résidentiel-tertiaire, avec une hausse de 18 % et le secteur Industrie-BTP à plus de 28 %. Le faible accroissement des émissions dans le secteur de l'industrie énergétique notamment (1,59 % des émissions totales) explique, par conséquent, l'avantage du recours au gaz naturel, la production d'électricité et la place des produits pétroliers. Les émissions fugitives sont relativement importantes. Elles représentent une hausse de 8,1 % par an (cf. Figure 1-16).

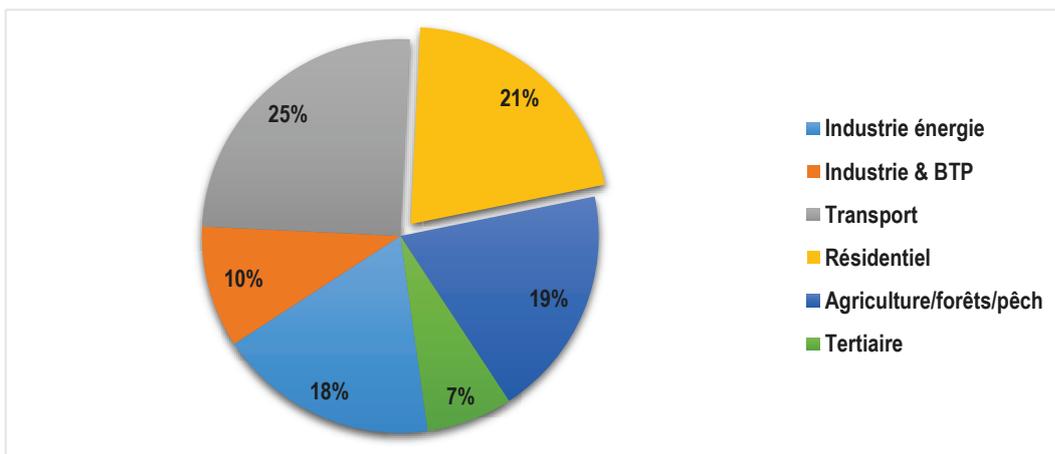
Figure 1-16 : Émissions de CO<sub>2</sub> par secteur en 2000 (hors émissions des torches)



Source : PNUD (2010).

La structure des émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation finale de 2007 se répartissent de façon très contrastée en fonction du secteur d'activité, après une forte baisse de 8 % pour la période 1994-2000, le secteur des transports occupe la première place, avec 25 % du total des émissions de GES, devant le secteur résidentiel, 21 %. Ils sont suivis par le secteur agriculture-forêts-pêche et les industries énergétiques, avec respectivement 19 % et 18 %. Les émissions du secteur de l'industrie manufacturière et le BTP représentent 10 % des émissions totales, et le secteur tertiaire 7 % (cf. Figure 1-17).

Figure 1-17 : Parts des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur d'activité en 2007



Source : (APRUE, 2007).

Il convient de signaler ici que la forte hausse des émissions de GES durant cette période, notamment celle du secteur résidentiel et des transports, est l'effet d'une importante croissance

de la demande d'énergie finale pour le parc de logements et le parc automobile en Algérie. Le parc automobile algérien comptait en effet plus de 4,1 millions de voitures (toutes catégories) en 2011, soit une augmentation de 1,1 million de voitures neuves, représentant un accroissement de l'ordre de 26,2 % par rapport à 2004. Pour la même période, le parc de logements a connu une croissance de 21 %, passant de 5,5 millions de logements en 2004 à 7,5 millions en 2011, soit 2 millions de logements supplémentaires.

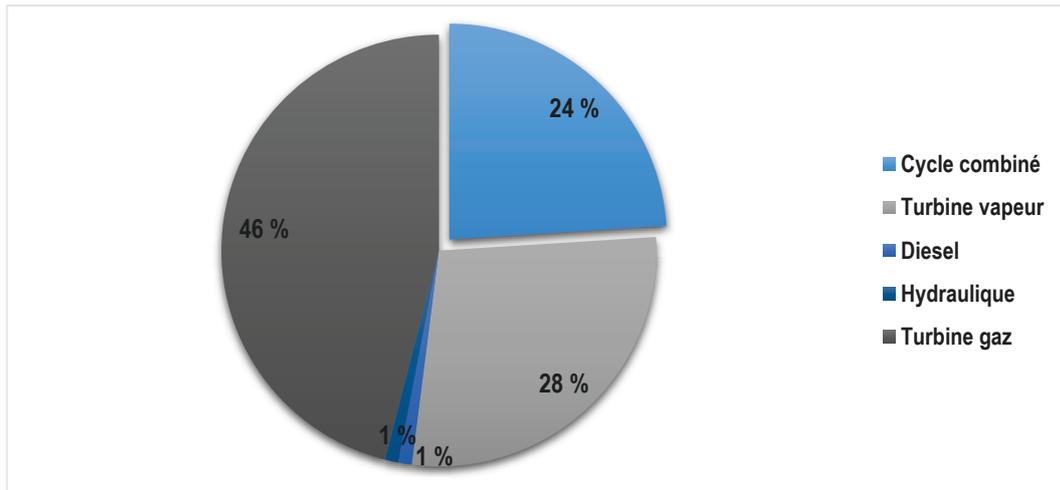
### 1.3 Efficacité énergétique, un potentiel pour baisser les émissions de GES

Si l'on considère l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre directes liées à la consommation d'énergie finale de tous les secteurs d'activité, on constate que près de 21 % découlent directement du secteur résidentiel et proviennent principalement des installations de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de cuisson et d'électricité primaire. Ces émissions sont ainsi associées principalement à la combustion de gaz ou de produits pétroliers comme énergie finale ou pour la transformation énergétique, lors de la génération d'électricité. Comme nous l'avons déjà évoqué, entre 2004 et 2011, ces émissions ont connu une augmentation moyenne d'environ 3 % par an. Si l'on comptabilise l'énergie finale (électricité, gaz...) et celle utilisée dans l'industrie de l'énergie pour l'année 2011, on estime que la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel a entraîné l'émission d'environ 24 MtCO<sub>2</sub>. Aujourd'hui, il existe un potentiel significatif pour une diminution substantielle des émissions de GES. L'efficacité énergétique constitue un important levier pour baisser les émissions de GES. En effet, on a constaté en France une nette décroissance de ces émissions, et ce, depuis la mise en application des règlements thermiques. En outre, les gains d'efficacité énergétique obtenus par l'amélioration des performances thermiques du logement se situaient autour de 26 % (soit 1,3 %/an) entre 1990 et 2010 dans le résidentiel, du fait de gains concernant le chauffage (25 %) et l'eau chaude sanitaire (18 %). Ces progrès résultent, d'une part, d'une augmentation de la part des nouveaux logements performants dans le parc de logements existants, et, d'autre part, d'une substitution énergétique vers l'électricité (Mure, 2012).

Actuellement, en Algérie, environ 46 % de l'électricité provient de centrales fonctionnant exclusivement au gaz naturel, ce qui signifie qu'il existe un important potentiel pour généraliser l'utilisation du GN dans la production de l'électricité et baisser la quantité des émissions, dans un premier temps (cf. Figure 1-18). Cependant, les solutions sur le long terme se situent dans

la transition énergétique, c'est-à-dire dans le passage effectif aux ENR. L'Algérie bénéficie de 3 650 à 3 500 heures de soleil par an, avec une moyenne d'énergie reçue estimée entre 1 700 et 2 650 kWh/m<sup>2</sup>/an (RCEEE, 2010). Elle détient donc une source énergétique alternative considérable et une solution au problème des émissions des GES, ne serait-ce que dans le secteur résidentiel.

Figure 1-18 : Répartition de la production d'électricité par filière en 2009



Source : (MEM, 2010).

Cela signifie qu'il existe un potentiel important pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES. Notons, dans ce passage, que les statistiques d'intensité énergétique sont souvent couplées à des statistiques d'« intensité carbone » qui mesurent les émissions de CO<sub>2</sub> par point de PIB.

## Conclusion

Le diagnostic de la situation générale du secteur énergétique en Algérie, que nous avons présenté dans ce chapitre, est à la fois inquiétant et optimiste :

Il est *inquiétant* parce qu'il constate, à travers de nombreuses enquêtes et statistiques tirées de sources diverses, que le secteur énergétique est un important moteur stratégique, dont dépend principalement l'économie algérienne (97 % des devises proviennent de la rente des hydrocarbures). Cependant, cette totale dépendance s'avère une source d'inquiétude quand on remarque que le volume de la production d'hydrocarbures est en baisse relativement à celui des consommations, notamment concernant le secteur résidentiel, en forte progression ces dernières années. D'autre part, les émissions de gaz à effet de serre induites par ces consommations sont

également en forte croissance, et ceci est en contradiction avec l'engagement du pays de limiter les émissions de GES.

Il est *optimiste* parce qu'il exprime une prise de conscience par les politiques des enjeux économiques et environnementaux de l'accroissement des consommations énergétiques et des émissions de GES. En effet, la mise en place d'un organisme public, à l'instar de l'APRUE, exprime la volonté des pouvoirs publics d'encadrer et de promouvoir l'efficacité énergétique. Cela se traduit par un ensemble d'initiatives qui se résument souvent à des gestes préconisés dans une démarche pour optimiser les consommations dans les logements.

Ces initiatives expriment certes une prise de conscience pour réduire les consommations d'énergie et atténuer les émissions de GES, mais elles restent insuffisantes et souvent limitées au regard de l'ampleur de l'accroissement des consommations/émissions. De plus, elles demeurent totalement fortuites, en l'absence d'une politique énergétique basée sur une vision prospective de l'évolution des besoins énergétiques.

# Chapitre 2 État de l'art de la démarche prospective énergétique et classification des modèles existants

*« L'objet propre de la prospective ne réside ni en un effort de divination du futur ni en rêverie sur le devenir » (Découflé, 1972).*

Ce propos succinct est un rappel de la divergence intrinsèque entre la prospective et la prévision.

Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche prospective. Il consiste principalement à développer un modèle prospectif capable de simuler des scénarios énergétiques dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050. Avant d'entamer cet exercice, il nous semble néanmoins opportun de revenir sur le fondement de la démarche prospective elle-même. Outre l'historique de son évolution, cette partie de thèse porte en effet une attention particulière sur le développement des différentes méthodes d'analyse prospective.

Ensuite, à la lumière de la méthode d'analyse morpho-fonctionnelle, l'élaboration d'une stratégie énergétique se base sur des modèles de prospective pour l'analyse quantitative des scénarios énergétiques. Cette méthode propose des simulations pour évaluer les impacts des leviers sur la réduction de la consommation énergétique. Le recours à cette méthode d'analyse est lié essentiellement au choix du modèle de prospective. Notre ambition, à travers ce chapitre, est d'analyser les scénarios et les modèles existants pour tenter de répondre à la question de la pertinence de la modélisation.

## 2.1 Objectifs de l'état de l'art

L'ambition de cette partie de travail est d'établir dans un premier temps une analyse bibliographique des différents travaux en relation avec les objectifs de la thèse. Il s'agit de construire un bilan synthétique des recherches mettant en relation les dynamiques du parc de logements avec la démarche prospective dédiée à la modélisation de la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050. Le but de l'état de l'art, ici, n'est pas d'analyser la totalité des recherches dans le domaine de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel : compte tenu de l'étendue de la littérature abordant ce domaine, il nous paraît judicieux, à ce stade, de nous concentrer sur les mots-clés que vise notre recherche

bibliographique. Dans ce sens, nous concentrerons notre analyse bibliographique sur la démarche prospective et les différentes méthodes de modélisation.

Afin de sélectionner les références bibliographiques opportunes et de faciliter la lecture comparative de tous ces travaux, nous nous sommes contraints à examiner la littérature à travers le filtre d'une grille d'analyse constituée des éléments suivants :

- le secteur résidentiel ;
- les objectifs (exemple : la réduction des consommations d'énergie) ;
- l'échelle et la nature de l'objet d'étude (échelle nationale ou régionale) ;
- la méthodologie et le type de modélisation (*bottom-up*, *top-down*, etc.) ;
- les types de variables retenus (démographie, parc de logements, etc.) ;
- les principaux résultats produits (facteur 2 pour les consommations, facteur 4 pour les émissions, etc.).

## 2.2 Fondement de la démarche prospective

Un aperçu historique<sup>26</sup> de la prospective montre que son apparition peut être assimilée à la recherche menée par l'homme pour connaître l'avenir. Cette quête semblait toutefois tout d'abord dépourvue de toute approche « scientifique<sup>27</sup> », d'où la confusion avec la prévision. Après la Seconde Guerre mondiale, de nombreux travaux de prospective se sont développés, tendant ainsi à se distinguer clairement de la prévision. À l'issue de ces premiers travaux, la prospective a prospéré dans les années soixante. À la suite de la publication, par le Club de Rome, du rapport *The Limits to growth*, en 1972, puis du rapport *Our common future*, (CNUED, 1987), elle a connu un important progrès et un élargissement de son activité.

Dans sa définition générale, la prospective est considérée comme un ensemble de techniques d'aide à la décision, dans le but d'accompagner les décideurs dans la sélection et l'approbation d'une ou plusieurs actions. La prospective peut s'intégrer à toutes sortes de disciplines. En effet, au regard de certaines situations d'incertitude, l'éventail des domaines contraints de se servir de cette démarche dans leurs prises de décision est vaste.

---

<sup>26</sup> On trouvera une présentation de l'histoire de la prospective dans l'ouvrage de Fabrice Hatem, *La Prospective : pratiques et méthodes*, Paris, Economica, 1993, 385 p.

<sup>27</sup> Elle s'oppose en cela à la prospective dite « scientifique », c'est-à-dire dont la théorie a été formalisée et dont il existe des applications pratiques tangibles.

L'analyse bibliographique montre la présence de plusieurs définitions de la prospective, dont celle de Plassard (2004), pour lequel la prospective peut se résumer à un outil d'aide à la prise de décision, c'est-à-dire à une technique ou à un ensemble de techniques qui permettent d'éclairer les preneurs de décision à la fois sur la marge de liberté des mises en œuvre possibles dans le futur et les conséquences de ces décisions dans le futur.

*« La prospective est un regard sur l'avenir destiné à éclairer l'action présente ».*

D'après Jouvenel (1999) :

*« la prospective n'a pas objet de prédire l'avenir, de nous le dévoiler comme s'il s'agissait d'une chose déjà faite, mais de nous aider à le construire. Elle nous invite donc à le considérer comme à faire, à bâtir... Cette fonction de veille est sans nul doute à la base de toute démarche prospective ».*

L'exercice pragmatique de la prospective consiste à parcourir et examiner les futurs possibles au regard des situations actuelles, afin d'accompagner et cibler les futurs souhaitables, ainsi que la détermination des leviers disponibles à explorer pour les atteindre. Godet (1991) souligne que la prospective est « le panorama des futurs possibles d'un système destiné à éclairer les conséquences des stratégies d'action envisageables ». En effet, la définition d'une stratégie d'action ne consiste pas seulement à rassembler les variables d'appréciation, quantitatives ou descriptives, concernant l'avenir, et dont l'objectif est de préparer les décisions grâce auxquelles l'objectif dans le futur sera identique aux souhaits préalables, mais aussi à proposer un éclairage de la stratégie à construire (Cazes, 1986).

Dans ce sens, Plassard (2004) définit la prospective comme un ensemble de techniques d'aide à la décision, donc un outil pour aider les décideurs à déterminer leurs choix. Hatem *et al.* (1993) soulignent quant à eux que la prospective ne cherche pas à prévoir les événements futurs, mais à préparer les réactions possibles à ces événements. En effet, cette démarche permet de réduire les certitudes et d'esquisser un panorama homogène des futurs possibles. En fait, elle a pour objectif de définir les leviers d'actions capables d'atteindre un but préalablement visé.

*« La prospective a pour but de structurer la vision de l'avenir ».*

Cette définition est partagée par Plassard (2003), qui ajoute que la prospective « prépare l'action par l'anticipation, et la motive par l'appropriation ».

Comme cela a été évoqué plus haut, à la différence de la prévision, qui vise à révéler « ce qui sera » (à l'image des prévisions météorologiques), la démarche prospective s'inscrit dans une logique à l'inverse de la prédiction. Elle peut à la fois projeter dans le futur possible de

l'évolution d'un facteur ou de plusieurs facteurs clés, examiner les différentes situations imaginées et, enfin, développer les stratégies futures. La prospective n'a pas pour but de présager l'avenir, mais elle nous aide à spécifier ce qui pourrait survenir. Dans cette optique, il existe un large consensus, entre de nombreux auteurs<sup>28</sup> et chercheurs, pour « considérer la démarche prospective comme relevant avant tout d'une attitude d'esprit ».

Berger *et al.* (2007) montrent qu'il existe cinq principes fondamentaux permettant de définir ce que l'on appelle « l'attitude prospective<sup>29</sup> » : il s'agit de « voir loin, voir large, analyser en profondeur, prendre des risques et penser à l'homme ».

La prospective se situe en fait à la convergence de l'anticipation et de l'action. Jouvenel (2009) résume l'intérêt d'entreprendre la démarche prospective en trois questions auxquelles cette démarche cherche à apporter des réponses. Elles sont simples : « Que peut-il advenir ? Que pouvons-nous faire ? Que voulons-nous faire ? »

En 2002, le *Guide pratique de prospective territoriale en France* (publié par la Commission européenne) rejoint clairement la définition générale de cette démarche. Selon cette Commission, la prospective se définit aussi comme un processus participatif d'élaboration des futurs possibles à moyen et long terme, ayant pour but d'éclaircir les décisions du présent et de mobiliser les moyens nécessaires à l'engagement d'actions communes. Il s'agit avant tout, ici encore, d'une attitude d'esprit (anticiper et vouloir) et d'un comportement (imaginer et espérer) au service du présent et du futur<sup>30</sup>.

Appliquée à la thèse, cette démarche revient à définir les futurs possibles de l'évolution de la consommation énergétique et des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050.

## 2.3 La démarche prospective

Conformément aux précautions méthodologiques exposées précédemment, l'objectif ne sera pas, dans ce travail, de décrire ce que sera la consommation d'énergie dans le secteur

---

<sup>28</sup> Gaston Berger, Pierre Papon, Jacques arcade, Michel Godet, Fabrice Hatem, etc.

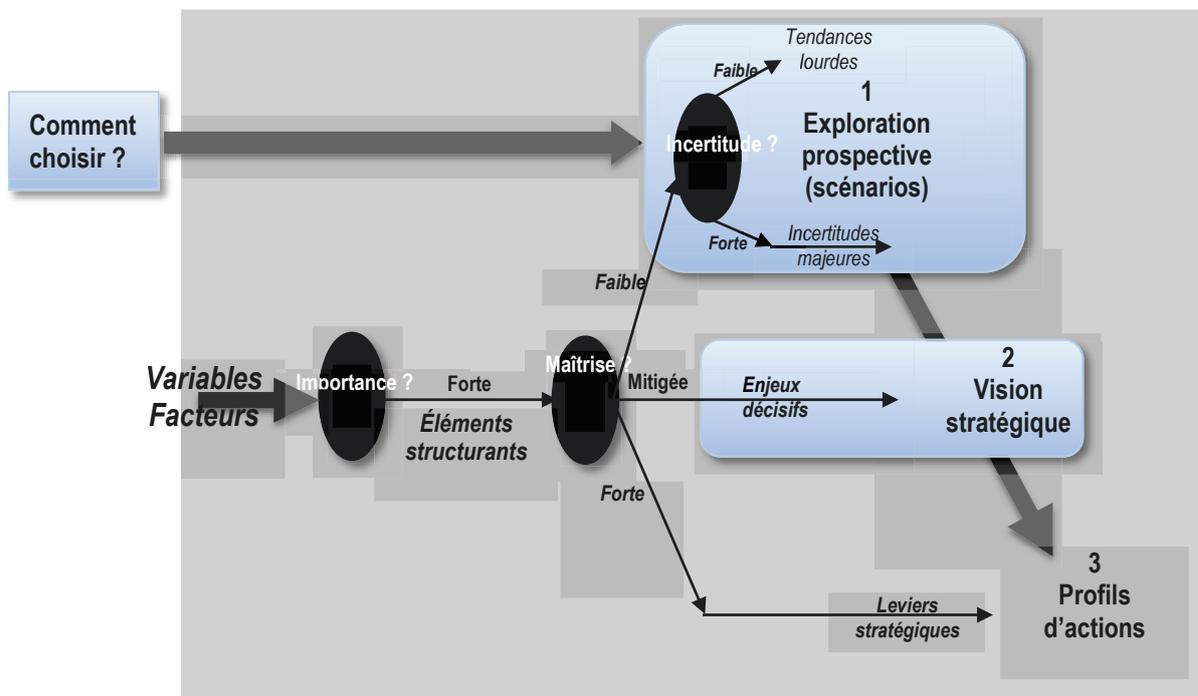
<sup>29</sup> « – Voir loin : veut dire qu'il n'est plus possible de ne considérer que les résultats immédiats de nos actions en cours ;  
– Voir large : sous-entend que face à l'interdépendance des phénomènes, il s'agit d'éviter la spécialisation des approches pour favoriser au contraire la diversité des expertises ;  
– Analyser en profondeur : suppose de s'interroger sur les facteurs et les tendances qui poussent les hommes dans certaines directions ;  
– Prendre des risques : insiste sur l'importance de ne pas inscrire les raisonnements dans une logique de l'urgence mais plutôt dans une logique de projet qui se donne la liberté d'envisager des futurs possibles ;  
– Penser à l'homme : c'est considérer enfin la prospective comme une connaissance au service de l'humain. C'est-à-dire envisager les événements et leurs conséquences du point de vue de celui qui regarde. »

<sup>30</sup> Commission européenne, *Guide pratique de prospective territoriale en France*, 2002, p. 201.

résidentiel en 2050 ni de prédire la quantité de CO<sub>2</sub> à cet horizon. Compte tenu de la connaissance que nous avons des liens entre les différentes variables qui agissent directement sur la consommation d'énergie et les émissions de GES, il s'agira de réfléchir à la manière dont on peut envisager leur évolution à partir de diverses hypothèses, et de définir les leviers d'action à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs souhaités.

À la lumière des objectifs avancés, et si notre finalité est d'infléchir la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050, l'attitude de la démarche prospective représente un outil précieux dans l'émergence des actions à programmer dans le futur. Dans un premier temps, par le biais d'une analyse fonctionnelle, le système est décomposé en variables (cf. chapitre 3 § 3.1.). Concrètement, il s'agit d'identifier les variables motrices agissant directement ou indirectement sur l'évolution de la consommation d'énergie. Une analyse morpho-fonctionnelle permet ensuite la construction des scénarios possibles, c'est-à-dire de tester les éventuelles hypothèses prospectives susceptibles de conduire à la baisse du niveau de consommation d'énergie et d'émission de GES. La mise en place d'une telle méthode permet à la fois d'explorer les stratégies adoptées et d'apprécier leurs corollaires (cf. Figure 2-1).

Figure 2-1 : La démarche prospective selon Jacques Arcade



Source : Plassard (2004).

## 2.4 Principe de l'exercice prospectif

D'un point de vue analytique, l'exercice de la prospective s'articule en réalité autour de plusieurs réflexions (analyse fonctionnelle, analyse morphologique, etc.), et selon des processus qui peuvent être utilisés indépendamment les uns aux autres (Jouvenel, 2009). Elle se pratique donc de façon très hétérogène et selon différentes techniques.

En France, de nombreuses recherches et études (ETHEL, CLIP, etc.) ont recours à la démarche prospective. Elle constitue, par son essence, un exercice de réflexion intellectuelle, qu'il soit individuel ou collectif. Cette démarche repose essentiellement sur des raisonnements logiques formalisés, et donne une place aussi importante à l'approche littéraire, qui permet d'interpréter et d'analyser les futurs envisagés (Nicolas et Morice, 2006).

Soulignons ici l'importance que revêt le choix des données sources (indicateurs statistiques quantitatifs et qualitatifs) dans toute étude prospective, car c'est sur ces dernières que repose la perception du présent, des évolutions passées et, par conséquent, la construction des futurs possibles.

## 2.5 Prospectives et enjeux énergétiques

La croissance<sup>31</sup> de la demande mondiale en énergie et la dégradation progressive de l'environnement, due aux émissions des gaz à effet de serre, sont des mots-clés à l'origine de nombreuses études et recherches de prospective énergétique, suggérant ainsi la nécessité d'un développement par l'efficacité énergétique et une réforme des politiques énergétiques.

Dans cette optique, l'étude *Energy for Sustainable World* (1987), parue en version française en 1990 sous le titre *Énergie pour un monde vivable*, est la plus connue en termes de prospective énergétique. Elle est l'œuvre d'une équipe composée d'Amula K. Reddy, Robert Williams, Thomas Johansson et José Goldemberg. Ces auteurs ont montré que, dans l'hypothèse générale d'une croissance constante de la demande d'énergie et sans ralentissement de la croissance d'un pays, l'application des technologies les plus performantes dans la consommation d'énergie pourrait conduire à baisser d'une manière significative la consommation d'énergie à l'horizon 2020.

---

<sup>31</sup> Selon l'Agence internationale de l'énergie, la demande énergétique mondiale a connu une croissance soutenue sur les quarante dernières années, passant de près de 5 000 Mtep en 1970 à 12 000 Mtep en 2010. Elle a été multipliée par plus de 2,4 durant cette période, ce qui correspond à un rythme de croissance annuelle moyen de l'ordre de 2,24 %.

Goldemberg *et al.* (1998) ont publié une approche pour un scénario NOE (nouvelles options énergétiques). Celui-ci est considéré comme le premier scénario mondial « normé ». Il se caractérise par une réflexion du comportement énergétique portée sur une vision plus lointaine (à l'horizon 2100), en se basant sur des projections à partir des tendances lourdes, notamment démographiques. Selon Laponche (2008) :

*« ce scénario impose par ailleurs deux “normes” environnementales : baisse du recours à l'énergie nucléaire jusqu'à son abandon total en 2060 et limitation des émissions de carbone à 3 milliards de tonnes en 2060 ».*

L'Agence internationale de l'énergie publie périodiquement des études « Energy Technology Perspectives », relatives à l'analyse des besoins, des ressources énergétiques et portant sur les tendances actuelles des pays (scénario « *business as usual* »). Du point de vue méthodologique, les prospectives élaborées se basent essentiellement sur les modèles économétriques ou *Top-Down* : il s'agit principalement d'approches basées sur les relations économétriques échangées entre l'offre et la demande d'énergie, et leurs effets sur les prix de l'énergie. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la poursuite des tendances actuelles, à savoir la croissance de la population et celle de l'économie, aura tendance à favoriser l'augmentation de la demande énergétique dans les prochaines décennies. En 2010, la population mondiale était estimée à plus de 7 milliards, et elle devrait atteindre les 9 milliards à l'horizon 2050, soit une hausse de 30 % (AIE, 2013). La croissance économique mondiale, assurée essentiellement par les pays émergents (Inde, Chine, Brésil...) en dehors des pays appartenant à l'OCDE<sup>32</sup>, favorisera l'accroissement de la demande mondiale en énergie, et notamment en énergie finale, du fait de la croissance des besoins et de l'électrification de nouvelles zones urbanisées.

## 2.6 Méthodes prospectives dans l'analyse des besoins énergétiques

Il existe plusieurs méthodes dans l'élaboration d'une analyse prospective. Citons ici, et d'une manière non exhaustive, les méthodes les plus formalisées : l'analyse structurelle, la consultation d'experts (Delphi), la méthode des impacts croisés, et les scénarios. Cependant, ces méthodes ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres, voire elles peuvent être souvent complémentaires entre elles.

---

<sup>32</sup> « L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, en anglais Organisation for Economic Coopération and Development, OECD) est une organisation internationale d'études économiques, dont les pays membres, des pays développés pour la plupart, ont en commun un système de gouvernement démocratique et une économie de marché. Elle joue essentiellement un rôle d'assemblée consultative ». Entrée « Organisation for Economic Coopération and Development (OECD) » sur l'Encyclopædia Britannica (version en ligne du 30 novembre 2008).

### 2.6.1 Analyse structurelle

Cette méthode consiste à créer un système de variables qui matérialise, grâce à une matrice des causalités, les influences ou les dépendances mutuelles qu'entretiennent ces variables, pour représenter le fonctionnement d'un système complexe. Les premières apparitions de cette méthode remontent au début des années soixante. Elle a été appliquée pour la première fois à la demande du Club de Rome, dans un travail de prospective portant sur le devenir mondial de la croissance et des ressources naturelles.

D'après Hatem *et al.* (1993), l'analyse structurelle est une technique d'analyse de système qui se penche sur le domaine étudié en procédant en trois étapes successives :

- identification des composantes du système ainsi que des relations existant entre ces composantes ;
- exposition du fonctionnement du système ;
- esquisse des évolutions du système.

Plassard (2004) considère que c'est le caractère systémique de cette méthode qui fait son intérêt. En effet, en fonction des objectifs ou des contraintes d'un système, cette méthode définit et analyse les évolutions temporelles de certaines variables stratégiques ou tendances lourdes. La pertinence de cette méthode consiste en ce qu'elle conduit à identifier et à choisir des variables, à établir entre elles des relations directes et/ou indirectes, quantifiées ou non, pour construire un système. Il est donc clair que ces paramètres font la richesse de cette méthode.

### 2.6.2 Consultation d'experts

Cette méthode est plus connue sous le nom de « méthode Delphi ». Elle vise à rechercher un consensus entre différents argumentaires individuels, et parfois subjectifs, sur l'évolution de certains paramètres d'un système. Cette méthode est fondée sur l'effet rétroactif d'avis d'experts. Elle consiste à donner des réponses à des questions bien précises sur un problème se posant dans l'avenir, en interrogeant un groupe d'experts d'un domaine donné. Ensuite, sur la base des réponses obtenues, des solutions sont calculées et présentées aux mêmes experts, pour qu'ils donnent leurs avis. Ce processus de consultation peut se dérouler de manière itérative afin d'obtenir le consensus recherché.

Dans les années soixante et grâce à sa mise en œuvre relativement aisée, la méthode Delphi a été largement utilisée aux États-Unis. Elle a permis de dégager un consensus sur un certain

nombre de questions d'ordre stratégique, concernant notamment l'armement, les technologies, les transports, etc.

Jouvenel (2009) a mis en évidence le fait que le principal intérêt de la méthode Delphi réside dans l'établissement de dialogues entre experts. Il souligne que cette méthode peut certes permettre de formuler des hypothèses sur des variables, mais qu'en revanche, la concordance des opinions n'est pas une garantie de leur validité. Cette méthode a tendance à être de moins en moins utilisée, car elle est souvent longue à mettre en œuvre. De plus, elle privilégie la création de consensus plutôt que la mise en valeur des idées divergentes, sans s'inscrire dans une vision plus large pour traiter le problème en question.

### 2.6.3 Méthode des impacts croisés

Cette méthode, à l'inverse de la méthode Delphi, s'inscrit dans une démarche plus large dans le cadre du traitement d'une question. Elle s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle toutes les variables retenues ne sont pas indépendantes les unes des autres. Cette méthode se focalise dans l'analyse de la causalité entre variables au sein d'un même système. Selon Godet, la méthode des impacts croisés est le terme générique par lequel on désigne une famille de techniques qui tente d'évaluer les changements dans les probabilités d'apparition d'un ensemble d'événements à la suite de l'apparition de l'un d'eux. Cette méthode est par conséquent considérée comme probabiliste. Elle a pour objectif non seulement de déterminer les scénarios les plus plausibles, mais aussi d'examiner des combinaisons d'hypothèses que l'on aurait exclues *a priori*. Jouvenel (2009) considère que la méthode des impacts croisés semble la technique la plus adaptée au service d'une réflexion prospective, et apparaît comme une véritable méthode de prospective.

Elle se présente comme une alternative à l'approche plus rigide de la méthode Delphi. Cependant, il faut rappeler que la méthode des impacts croisés repose sur un système de probabilités, les opinions, qui sont parfois subjectives. Ainsi, il faut rester prudent et éviter une application systématique et mécanique de ce type de méthode.

### 2.6.4 Méthode d'analyse morpho-fonctionnelle

Sachant que le présent travail s'appuie en majeure partie sur la méthode d'analyse morpho-fonctionnelle, il paraît important, ici, de décrire avec plus de détails le fondement de cette méthode. Dans la littérature, il existe de nombreuses recherches sur la méthode des

scénarios. Dans ce travail, on se réfère aux travaux de Godet (1991) pour les définitions théoriques, et à ceux de Jouvenel (2009) dans les applications.

Cette méthode conjugue en réalité une analyse morphologique et une analyse fonctionnelle. Elle se base sur l'extrapolation tendancielle pour construire des évolutions dans le futur. Elle cherche à mettre en évidence à la fois l'évolution des facteurs peu ou pas maîtrisables (tendances lourdes) à la date qui est la cible de l'exercice prospectif, et les leviers qui permettent de viser les changements possibles d'une situation vers une autre. En fait, la méthode des scénarios, appliquée dans un exercice de prospective énergétique, permet à son destinataire d'envisager les futurs possibles, à savoir les scénarios, en se basant sur l'examen des facteurs agissant de façon directe sur la consommation d'énergie, les ressources disponibles, les leviers et les objectifs ciblés pour une date précise dans le futur.

La méthode des scénarios est souvent identifiée à la réflexion prospective elle-même, comme s'il n'y avait de prospective qu'à travers elle. Godet (1991) rappelle qu'un scénario est un moyen de se représenter la réalité future en vue d'éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles et souhaitables.

Si l'on se réfère toujours à Godet, les objectifs de la méthode des scénarios sont les suivants :

- déceler quels sont les points à étudier en priorité, les variables clés, en mettant en relation, par une analyse explicative globale la plus exhaustive possible, les variables caractérisant le système étudié ;
- déterminer, notamment à partir des variables clés, les acteurs fondamentaux, leurs stratégies et les moyens dont ils disposent pour faire aboutir leurs projets ;
- décrire sous la forme de scénarios l'évolution du système étudié, compte tenu des évolutions les plus probables des variables clés et à partir de jeux d'hypothèses sur le comportement des acteurs.

Le scénario est, en fait, un exercice de décryptage d'un éventuel événement dans le futur. Il est évident que la pertinence du résultat d'un tel scénario est tributaire des choix des hypothèses retenues. Dans ce sens, selon Godet, un scénario doit posséder cinq qualités pour être valable : la pertinence, la cohérence, la vraisemblance, l'importance et la transparence.

Généralement, pour établir un ensemble de scénarios, on détermine d'abord un scénario tendanciel. Ce dernier sert à représenter l'évolution d'un système dans la poursuite des tendances en cours, c'est-à-dire en l'absence de toute action visant à modifier la transformation

de ce système. Le scénario contrasté (par rapport à celui tendanciel) ainsi présenté, en insistant sur des hypothèses d'actions, montre les éventuelles transformations du comportement de ce même système.

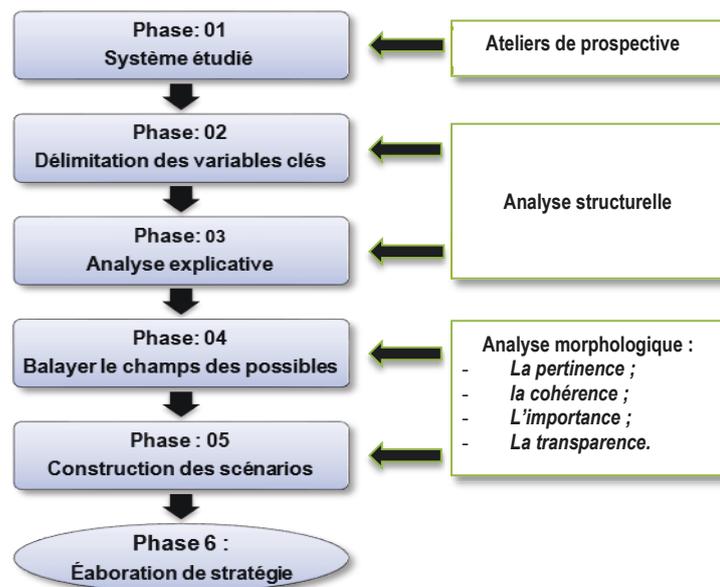
Il existe deux principes de projection permettant d'établir des scénarios :

- Le *backcasting* : à partir des objectifs supposés atteints, le principe de projection à rebours consiste à définir à terme les leviers pour y arriver. C'est une forme d'extrapolation rétrospective qui relie l'avenir au présent. Si nous voulons atteindre un objectif, quelles sont les mesures qui doivent être prises pour y parvenir ?
- Le *forecasting* : ce principe de projection trace l'évolution des tendances actuelles pour définir « un scénario de référence », notamment au moyen de scénarios contrastés en intégrant des leviers d'action, puis l'interprétation et l'analyse des deux scénarios conduit à proposer les stratégies à mettre en œuvre. Si nous modifions le présent, à quel point les objectifs seront-ils atteints ?

## 2.7 Grandes phases de la méthode des scénarios

La Figure 2-2 illustre, de manière synthétique, les grandes phases de la méthode des scénarios mise au point par Godet. Ces phases seront détaillées et appliquées dans les prochaines parties de ce travail.

Figure 2-2 : Méthode des scénarios selon Godet (1991)



Source : D'après la méthode de Plassard (2004).

### 2.7.1 Délimitation du système

Cette première phase comprend essentiellement les points suivants :

- le sujet et l'horizon temporel de l'étude ;
- les attendus précis ;
- le calendrier d'atteinte de l'objectif ciblé.

### 2.7.2 Représentation dynamique du système

La construction de scénarios débute par une connaissance de la situation étudiée. Il s'agit de déterminer les facteurs susceptibles d'influencer fortement l'avenir. Cette phase repose sur l'analyse structurelle du système prospectif. Elle vise à identifier les variables clés (existantes et prospectives) sur lesquelles va s'appuyer l'étude.

### 2.7.3 Simulation rétrospective et prospective relative aux variables du système

Il convient, dans cette étape, d'examiner les évolutions possibles des variables clés identifiées. Il s'agit également de tracer les variations rétrospectives et prospectives de chacune d'entre elles. Le but de cette phase est d'établir une représentation dynamique du système.

### 2.7.4 Construction de scénarios

Cette phase a pour objectif d'élaborer quelques scénarios d'évolution du système de variables. Il s'agit d'une analyse morphologique qui consiste à :

- balayer des futurs possibles en construisant des scénarios de leurs évolutions sur la base des combinaisons de variables retenues ;
- réduire les sensibilités en testant l'effet de modifications des variables sur l'ensemble du système.

### 2.7.5 Élaboration de stratégie

Cette étape a pour objectif de passer à l'action stratégique pour parvenir aux résultats souhaités au préalable. Il convient alors de déterminer comment on utilise concrètement ces leviers pour atteindre l'objectif recherché. Cette phase permet :

- de clarifier des enjeux stratégiques ;
- d'identifier des leviers d'action ;

- de construire un dispositif d'observation du sujet étudié, utile à la fois à la compréhension des dynamiques en cours et à l'éventuelle évaluation des politiques ou des stratégies élaborées à partir de l'étude prospective (Jouvenel, 2009).

Il existe plusieurs approches concernant la définition des modèles ; cependant, il nous semble que celle développée par Jouvenel (2004) est la plus exhaustive. Selon lui :

*« les modèles sont des systèmes d'équations au travers desquels on entend représenter comment interagissent entre elles les variables d'un sous-système que l'on a isolé de son contexte, système d'équations dont on va se servir pour effectuer des simulations sur l'avenir. Ce système est bâti sur l'observation du passé. »*

## 2.8 Modèles *bottom-up* et *top-down*

Les facteurs déterminants de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel se révèlent nombreux et leur causalité est souvent complexe. Le choix d'un modèle global est nécessaire pour évaluer l'impact technico-économique lors de l'adoption d'une politique énergétique. Il existe un large éventail de techniques de modélisation utilisées dans la quantification des consommations énergétique.

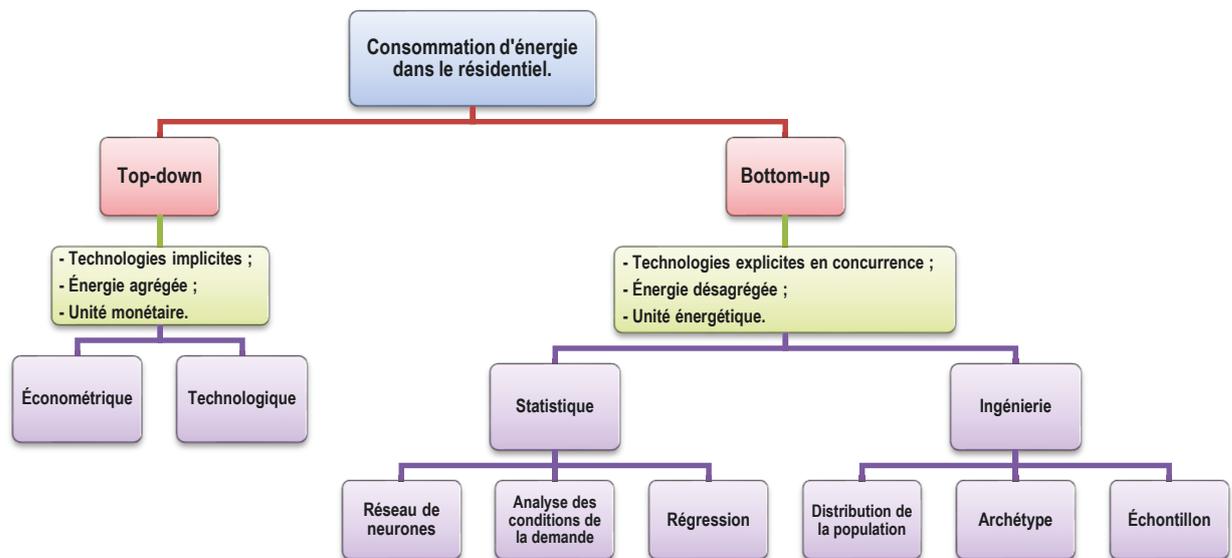
Swan *et al.* (2009) identifient deux approches fondamentales de modélisation, utilisées dans l'estimation des consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel : les approches *top-down* et *bottom-up* (cf. Figure 2-3). Chaque technique repose sur un type d'entrée d'information ; la distinction entre les deux approches s'opérait en fonction de l'utilisation des données et selon le niveau hiérarchique du secteur dans son ensemble. Cependant, ces deux techniques peuvent être combinées dans certains cas, notamment pour les modèles réputés les plus « sophistiqués ».

## 2.9 Modèles *top-down* ou économiques (approche descendante)

L'approche *top-down* (statistique) a été développée et utilisée dans les années soixante-dix, après le choc pétrolier de 1973. De grands modèles économétriques ont été développés pour la planification des consommations d'énergie à l'échelle nationale, avec pour objectif de comprendre le comportement du consommateur d'énergie face à l'évolution de l'offre et la variation de la tarification des énergies fossiles. Ces modèles s'appuient sur des statistiques ainsi que des théories économiques, et nécessitent peu de détails quant aux modes proprement dits de consommation énergétique réelle.

Dans la Figure 2-3, Swan et Ugursal définissent deux groupes de modèle *top-down* : économétrique et technologique. Le modèle économétrique est basé principalement sur des variables économiques, comme le prix de l'énergie ou des appareils électro-domestiques et les revenus des ménages. Par contre, le modèle technologique s'appuie essentiellement sur les caractéristiques générales du parc de logements, telles que les propriétés technologiques des appareils ménagers, pour déterminer la consommation d'énergie.

Figure 2-3: Techniques de modélisation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel



Source : Lukas G. Swan et Ugursal (2009). Cette figure a été réadaptée pour ce travail.

La technique de modélisation *top-down* est utilisée pour déterminer les besoins d'énergie à moyen et long terme du secteur résidentiel, au regard des changements et des transitions qui peuvent l'accompagner. Swan et Ugursal (2009) montrent que dans cette approche macroéconomique, les variables couramment utilisées sont limitées à des indicateurs macroscopiques (produit intérieur brut, taux d'emploi, indices des prix), aux conditions climatiques, au mouvement dans le parc de logements (construction/démolition) et au nombre d'appareils électroménagers en circulation.

La technique de modélisation *top-down* nécessite peu de données désagrégées et bénéficie des valeurs historiques liées à la consommation d'énergie pour le secteur résidentiel. Selon l'hypothèse retenue par Swan et Ugursal, à savoir que le secteur résidentiel ne subit que rarement des changements radicaux dans les types d'énergies utilisées (par exemple, l'électrification de tous les systèmes de chauffage...), un modèle pondéré peut offrir une bonne

capacité de prospective pour les petits écarts par rapport aux données de base. Par exemple, si la construction de logements a augmenté de 2 %, une augmentation de la consommation d'énergie résidentielle totale de 1,5 % peut être envisagée dans le modèle de type *top-down*. En revanche, si cet écart se révèle plus important, soit, par exemple, de l'ordre de 10 % de croissance du parc de logements, ce modèle pourrait avoir des difficultés à réaliser une estimation pertinente de l'énergie correspondant à cette croissance du parc.

Le modèle *top-down* s'appuie essentiellement sur les données historiques pour estimer la consommation d'énergie. Ceci constitue un inconvénient, et ce, malgré le recours à la technique technologique. L'approche *top-down* montre là son incapacité à modéliser le progrès discontinu dans la technologie (Swan et Ugursal, 2009). De plus, le manque de détails relatifs à la consommation finale par type de logement ou par poste de consommation est une difficulté supplémentaire pour cibler les facteurs agissant sur l'accroissement de cette consommation. On peut ainsi conclure que ce type de modélisation montre une autre limite dans la détermination de facteurs clés qui pourraient intervenir dans la baisse de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel.

## 2.10 Modèles *bottom-up* ou technologiques

La Figure 2-3 développée par Swan et Ugursal (2009) résume le principe de fonctionnement général de chacune des deux approches de modélisation. À l'inverse de la méthode d'approche macroéconomique *top-down*, le modèle *bottom-up* a été développé afin d'identifier la contribution de chaque utilisation finale d'énergie dans la consommation globale du parc de logements. Swan et Ugursal (2009) expliquent que cette technique de modélisation sert à affiner la compréhension des détails liés à la consommation d'énergie. En effet, ce processus de décomposition de la consommation d'énergie d'un ménage, ou même à l'échelle de la totalité du parc, permet, d'une part, de définir en détail la consommation d'énergie relative à chaque poste ; d'autre part, d'identifier les options les plus efficaces en matière de technologies disponibles pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Le principe de fonctionnement de l'approche *bottom-up* s'appuie sur l'utilisation des données selon une hiérarchie ascendante à partir du niveau inférieur jusqu'au système dans son ensemble. Concrètement, la modélisation de la consommation d'énergie d'un parc de logements, à l'échelle régionale ou même nationale, est basée sur l'extrapolation de la consommation d'énergie finale d'un seul logement ou d'une typologie de logements. Shorrock et Dunster (1997) ont montré que la structure du modèle est établie à un niveau désagrégé, et

exige le recours à des bases de données statistique et empirique détaillées pour appuyer la description de chaque composant ou de chaque variable du système.

Différentes techniques appliquées dans la modélisation *bottom-up* ont été développées. Le choix d'une technique est lié essentiellement au type et à la structure de données disponibles : statistiques ou basées sur la physique du bâtiment. Cela signifie qu'à partir d'un tel paramétrage du type de valeurs d'entrée et de la conception de la structure du modèle, on peut définir la technique qui correspond au modèle *bottom-up*.

### 2.10.1 Technique statistiques

La méthode statistique est basée essentiellement sur les données historiques pour identifier la relation entre la demande en énergie finale et la production. De nombreux chercheurs appliquent cette méthode pour évaluer la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel. Cette technique s'appuie, pour construire ses bases de données, sur les informations fournies par les facturations énergétiques des clients.

Catalina *et al.* (2008) ont développé un modèle de régression afin de modéliser la demande d'énergie mensuelle pour le chauffage dans le secteur résidentiel des climats tempérés. Ce modèle est devenu un outil d'aide à la conception, destiné aux architectes et aux ingénieurs, leur permettant de rechercher des solutions énergétiques efficaces pour leurs projets architecturaux. Les entrées pour les modèles de régression sont constituées par le facteur de la forme du bâtiment, conductance du bâtiment  $U_{\text{bât}}$ , le rapport de surface de plancher et fenêtres, et le climat, qui est défini en fonction de la température extérieure et de la température de consigne pour le chauffage. Aux États-Unis, la méthode de Scorekeeping Princeton (Prism<sup>33</sup>) a été largement utilisée par de nombreux acteurs, notamment les services publics et les organismes de recherche, pour analyser les mesures de rénovation dans le secteur du bâtiment. C'est un modèle de régression linéaire des factures de consommation d'énergie, mensuelles et annuelles, d'un logement, dans le but de créer des indices de normalisation de la consommation annuelle ajustés aux données météorologiques (Fels, 1986). En fonction des caractéristiques des bâtiments, les chercheurs ont développé plusieurs méthodes pour estimer les consommations d'énergie.

L'analyse de régression est utilisée pour déterminer les coefficients correspondant à chaque paramètre d'entrée des données dans le modèle. Sur la base de ces paramètres, cette technique

---

<sup>33</sup> Prism: the Princeton Scorekeeping Method.

détermine l'impact de chaque facteur, dans la consommation d'énergie du logement, qui pourrait avoir une interprétation physique, comme l'évaluation des niveaux des ménages en lien avec les sources de chauffage des logements.

Quant à l'analyse des conditions de la demande, cette technique analyse la consommation d'énergie finale des différents appareils dans un logement. La régression de la consommation d'énergie finale totale d'un logement sur la liste des appareils (qui sont indiqués comme une variable) détermine ainsi le coefficient relatif à la consommation d'énergie. Ce dernier représente simultanément le niveau et le taux d'utilisation. L'utilisation de cette technique nécessite une enquête de recueil de données sur les appareils utilisés par l'occupant et les factures du fournisseur d'énergie. Cependant, pour produire des résultats fiables en fonction des nombreux variables, il est nécessaire de traiter les données de plusieurs logements (Swan et Ugursal, 2009).

La technique NN<sup>34</sup> repose sur des modèles mathématiques de réseaux de neurones. « Le réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. » (Blayo et Verleysen, 1996). L'utilisation de cette méthode dans la modélisation de la consommation d'énergie du secteur résidentiel a toujours été limitée, probablement en raison des exigences de calcul et de données, ou de l'absence de signification physique des coefficients relatifs à la consommation d'énergie totale.

### 2.10.2 Approche par ingénierie ou par caractéristiques physiques du bâtiment

Cette méthode détermine explicitement l'utilisation finale de l'énergie. Elle se base généralement sur les caractéristiques physiques du bâtiment pour estimer les consommations énergétiques. Cette approche de modélisation utilise des méthodes de calcul énergétique pour calculer la consommation d'énergie d'un échantillon de logements, représentant le parc de logements, qui sera ensuite extrapolée pour estimer la consommation totale d'énergie du parc dans son ensemble. À l'inverse de nombreuses autres approches de modélisation, l'approche par l'ingénierie peut estimer pleinement la consommation d'énergie sans aucune information quant à l'historique de la consommation d'énergie.

---

<sup>34</sup> NN : Neural Network.

L'utilisation de la méthode d'ingénierie exige néanmoins la saisie d'informations composées de données quantitatives sur la physique du bâtiment et des variables spécifiques à ce dernier, telles que :

- la qualité de l'espace ;
- les systèmes de chauffage et leurs caractéristiques ;
- des informations sur les différents éléments composant le logement (murs, toiture, plancher, fenêtres, portes) et leurs caractéristiques thermiques (valeurs  $U_{\text{bât}}$ ) ;
- la température interne ;
- la température externe spécifique à chaque zone climatique ou géographique ;
- les différents appareils électroménagers ventilés par type de consommation d'énergie et rendement de système ;
- le nombre d'occupants ;
- les apports d'énergie internes et externes, etc.

Wilson et Swisher (1993) soulignent que la combinaison de la physique du bâtiment et les données empiriques issues d'enquêtes de logement, ainsi que des hypothèses sur le fonctionnement des bâtiments donnent aux modélisateurs des outils pour estimer la consommation d'énergie dans les logements pour le passé, le présent et le futur. En développant divers scénarios, les modèles *bottom-up* semblent suffisamment robustes pour évaluer l'impact des mesures spécifiques de réduction de carbone sur la demande globale d'énergie. C'est la raison pour laquelle cette méthode est couramment utilisée pour identifier les mesures technologiques et fournir aux décideurs des estimations sur l'efficacité des politiques énergétiques.

Il semble qu'en revanche, la principale limite de la méthode d'ingénierie est celle du manque de transparence dans la quantification de l'impact des facteurs comportementaux des occupants sur la consommation d'énergie (par exemple : l'impact issu du changement du facteur démographique, à savoir l'âge de la population, sur l'évaluation des apports calorifiques induits par les occupants afin d'estimer les besoins en termes de chauffage). De plus, ce type d'approche nécessite un certain nombre de données détaillées et précises, démographiques ou technologiques, concernant le parc, qui s'avèrent parfois difficiles à recueillir (car non accessibles au public), ce qui constitue donc un véritable obstacle à la réalisation de cette

méthode de modélisation. Précisons en outre que cette méthode fournit des résultats basés sur des calculs théoriques.

Dans le domaine de la modélisation énergétique à l'échelle macroscopique, la technique de l'archétype est utilisée pour structurer l'organisation du parc de logements selon : la taille du parc, la typologie de logements, la surface habitable, etc. Swan et Ugursal (2009) définissent comme un archétype chaque catégorie principale de logement dont on utilise les descriptions comme des données d'entrée pour la modélisation d'énergie. Ainsi, l'estimation de la consommation d'énergie des archétypes représentatifs du parc de logements régional ou national est extrapolée en multipliant la consommation unitaire par le nombre de logements correspondants.

La classification des archétypes représentatifs d'un parc de logements peut s'avérer une lourde tâche, compte tenu du nombre important de dimensions décrivant un logement. Dans ce sens, il est important d'établir un mode de classification correspondant aux entrants des simulations de consommation d'énergie. Parekh (2005) propose trois critères de base des archétypes :

- les configurations géométriques : ces configurations comprennent le tracé en plan du bâtiment, le volume et l'orientation ;
- les caractéristiques thermiques : elles comprennent les données de l'enveloppe du bâtiment ( $U_{\text{bât}}$ ), les systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire, l'étanchéité et les systèmes de ventilation ;
- les paramètres d'exploitation : ils concernent les charges de consommation de base (éclairage, équipements électroménagers) et les données de température intérieure.

La combinaison des différents entrants en corrélation permet de définir les diverses typologies existantes. Les données de ces groupes sont à la base de la simulation énergétique du logement.

Du fait de la possibilité de représenter le parc de logements au moyen d'un nombre limité de groupes avec des simulations détaillées, la méthode de modélisation par archétype est largement employée. Il existe de nombreux travaux de modélisation énergétique utilisant cette méthode. Citons ici l'étude de Famuyibo *et al.* (2012), qui développe 13 archétypes représentatifs du parc de logements pour modéliser la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel en Irlande ; celle de Shimoda *et al.* (2004) pour modéliser la consommation de la ville d'Osaka, au Japon, fondée sur 20 archétypes de logements et 23 types de ménages. En France, Maïzia *et al.* (2010)

ont ainsi configuré plus de 400 archétypes de logements pour modéliser la consommation d'énergie du parc.

Le recours à la technique de l'échantillon s'inscrit dans la même logique de représentation examinée dans la technique des archétypes représentatifs du parc de logements. Cependant, la différence réside ici dans la manière dont les données sont recueillies et utilisées. La technique d'échantillonnage fait référence à des informations réelles. Dans cette approche de modélisation, les données d'entrée sont recueillies à partir d'échantillons de logements existants. De la même manière que pour les archétypes, si l'échantillon est représentatif du parc de logements, la consommation d'énergie pour le secteur résidentiel peut être estimée en appliquant une extrapolation à l'échelle régionale ou nationale.

Cette technique permet effectivement d'identifier avec précision les segments de logements ou même les régions à forte consommation d'énergie. Seulement, elle nécessite une grande base de données réelle et représentative des différents segments de parc. Or, cela constitue en effet une contrainte dont l'application reste limitée.

Dans la littérature, il existe peu de travaux de modélisation se servant de la technique d'échantillon. Mata *et al.* (2013) l'utilisent pour examiner la consommation d'énergie (énergie nette et énergie finale par type de combustible) dans le parc de logements suédois. Ces auteurs exploitent 1 400 échantillons représentatifs du parc de logements (en se basant sur les données de 2005) pour déterminer 12 mesures d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Sur une échelle plus réduite, Filippín *et al.* (2013) ont utilisé un modèle pour évaluer l'historique (périodes : 1996 et 2009) de la consommation du gaz naturel pour le chauffage en utilisant une sélection par étapes et une analyse multivariable. En appliquant la technique d'échantillonnage, ces auteurs ont sélectionné 72 appartements en immeubles collectifs de la capitale de la province de La Pampa, en Argentine. En se basant sur les caractéristiques des bâtiments en Argentine et sur la recherche précédente, dix bâtiments ont pu être sélectionnés, dont les plus représentatifs ont été choisis en utilisant une méthode pas à pas. Ensuite, les logements (en immeubles collectifs) ont été regroupés en appliquant des techniques de *clustering*<sup>35</sup>, et les centres de gravité de chaque groupe ont été déterminés par la moyenne des

---

<sup>35</sup> « L'analyse de *cluster* (grappe) est la tâche consistant à regrouper un ensemble d'objets de manière à ce que les objets dans le même groupe soient plus proches (dans un sens ou un autre) de l'autre que pour les autres groupes (*clusters*). C'est la tâche principale d'exploration de données, une technique commune pour l'analyse des données statistiques, utilisée dans de nombreux domaines, y compris l'apprentissage informatique, la reconnaissance des formes, l'analyse d'image, la recherche informatique et la bio-informatique ». (Tryon, 1939).

variables qui décrivent le *cluster* (grappe). En utilisant cette technique, Filippín *et al.* (2013) ont mis en évidence le décalage qui existe entre l'étiquette du standard argentin et la consommation d'énergie réelle pour le chauffage.

Dans le même sens, la méthode des distributions utilise la répartition de la possession d'appareils électroménagers, et se sert de la notice de consommation commune à chaque appareil pour calculer la consommation d'énergie finale de chaque utilisation. Ainsi, la consommation d'énergie dans un parc de logements est estimée en agrégeant la consommation d'énergie des appareils à l'échelle régionale ou nationale.

Swan et Ugursal (2009) considèrent que le modèle de distribution peut être construit en utilisant la distribution régionale ou nationale des taux de possession et du facteur d'usage, afin de déterminer la consommation d'énergie finale. Le modèle s'appuie sur des statistiques nationales pour évaluer les taux de pénétration annuels des appareils électroménagers, et sur l'évolution du nombre de logements, pour calculer l'historique de la consommation d'énergie.

Young (2008) présente le potentiel de réduction de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel, en améliorant l'efficacité énergétique des appareils électroménagers des ménages. Il précise que cette réduction a tendance à poursuivre au fil du temps, en fonction des phases de renouvellement des anciens appareils par de nouveaux modèles. Young (2008) développe un schéma de mouvement de remplacement des appareils électroménagers (réfrigérateurs, congélateurs, lave-vaisselle, etc.) basé sur les données des statistiques canadiennes (SHEU-2003). Selon lui, l'action de renouvellement des appareils électroménagers dans le secteur résidentiel est corrélée à la durée de vie de ces équipements. Sur la base de ce postulat, l'auteur constate que les modèles de remplacement peuvent être sensiblement liés à certaines caractéristiques des ménages telles que le revenu, et montre qu'il pourrait y avoir des leviers pour des politiques ciblées visant à remplacer les vieux appareils ménagers par de nouveaux modèles plus performants.

En utilisant la technique de distribution, Santiago *et al.* (2013) ont développé un modèle permettant d'estimer les pertes d'énergie dans le secteur résidentiel espagnol, par l'utilisation de petits appareils contenant de l'électronique de puissance. Les données de ce modèle sont basées sur l'emploi du temps des enquêtes (2009-2010) menées par l'Institut national de la statistique en Espagne, pour obtenir des informations sur l'utilisation de matériels audiovisuels et sur les mesures des différents types d'appareils ménagers disponibles dans la base de données

Panda<sup>36</sup>. Bien qu'un dispositif unique de matériel audiovisuel ait un rôle de consommation d'énergie relativement faible, Santiago *et al.* montrent que le regroupement de tous ces types d'appareils génère une importante demande annuelle en énergie, de l'ordre de 4 000 GWh.

La technique des distributions permet en effet de cibler des consommations d'énergie à une échelle réduite et avec précision. En revanche, comme les utilisations sont généralement calculées séparément, cette technique ne tient pas compte des interactions entre les utilisations finales.

Tableau 2-1 : Avantages et limites des approches de modélisation *bottom-up* et *top-down*

Caractéristiques	<i>Top-down</i>	<i>Bottom-up</i> (méthode ingénierie)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se focalise sur l'interaction entre le secteur de l'énergie et l'ensemble de l'économie.</li> <li>➤ Évite les descriptions détaillées de la technologie.</li> <li>➤ Modélise les relations entre les différentes variables économiques et la demande d'énergie.</li> <li>➤ Modélise l'impact des différents avantages sociaux des politiques énergétiques et des scénarios d'émission.</li> <li>➤ Utilisation de données économiques agrégées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Décrit les technologies actuelles et prospectives en détail.</li> <li>➤ Utilise les données physiquement mesurables.</li> <li>➤ Mise en action de stratégies pour viser plus efficacement une cible de consommation.</li> <li>➤ Évalue et quantifie l'impact de différentes combinaisons de technologies sur la consommation d'énergie.</li> <li>➤ Estime la combinaison la moins coûteuse des mesures techniques pour répondre à la demande énergétique.</li> </ul>
Limites	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dépend des interactions passées de l'économie d'énergie pour prévoir les tendances futures.</li> <li>➤ Manque du niveau de détail technologique.</li> <li>➤ Moins approprié pour l'examen des politiques spécifiques à la technologie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Faible description des interactions du marché.</li> <li>➤ Manque de relations entre l'utilisation de l'énergie et l'activité macroéconomique.</li> <li>➤ Exige une grande quantité de données techniques.</li> <li>➤ Ne peut pas déterminer le comportement humain dans le modèle, mais par des hypothèses externes.</li> </ul>

Source : (Swan and Ugursal, 2009).

## 2.11 Modèles hybrides

Comme évoqué précédemment, chacun des deux modèles, *top-down* et *bottom-up*, possède ses avantages et ses limites (cf. Tableau 2-1). En général, la principale divergence entre les deux réside dans la mise en valeur des détails techniques du système énergétique vis-à-vis de l'exhaustivité des ajustements endogènes du système économique. Ceci explique l'émergence d'un large éventail de modèles hybrides qui combinent les avantages

<sup>36</sup> La base de données Panda web contient des informations sur les mesures de différents types d'appareils ménagers et de matériels de bureau, effectuées dans différents laboratoires à travers le monde.

méthodologiques offerts par le modèle *bottom-up* (prise en compte de l'approche technologique) et les mécanismes économiques offerts par le modèle *top-down*.

Böhringer et Rutherford (2008) résument en trois catégories les efforts induits par les modèles hybrides :

- L'approche de modélisation hybride peut lier un modèle *top-down* et un modèle *bottom-up* développés indépendamment. Selon ces auteurs, cette technique de liaison a été adoptée depuis les années soixante-dix.
- Cette approche combine les deux approches, mais offre la possibilité de se focaliser sur un modèle *top-down* ou *bottom-up*, en utilisant une représentation réduite de l'autre modèle.
- L'approche hybride peut fournir un modèle totalement intégré, basé sur le développement d'algorithmes pour résoudre les problèmes communs ciblés par les deux modèles *top-down* et *bottom-up*.

Ces auteurs soulignent l'importance de cette approche dans l'analyse de l'activité basée sur la technologie, afin d'évaluer les changements structurels induits par les politiques à l'échelle sectorielle.

Giraudet *et al.* (2012) développent en France un modèle hybride pour évaluer les besoins énergétiques des ménages à l'horizon 2050 et optimiser le potentiel de réduction des besoins énergétiques pour le chauffage dans le parc de logements français. Giraudet *et al.* (2012) utilisent le modèle *bottom-up* de consommation d'énergie pour le chauffage Res-IRF, dans l'objectif de :

- séparer clairement l'efficacité énergétique, notamment les investissements dans les technologies d'économie d'énergie, du coût des consommations d'énergie, ce qui permet d'évaluer l'effet de rebond ;
- prendre en compte les freins supposés de l'efficacité de l'énergie sous la forme de coûts intangibles ;
- permettre une détermination endogène du processus de rénovation, représenté par un arbitrage entre le nombre et la qualité des rénovations.

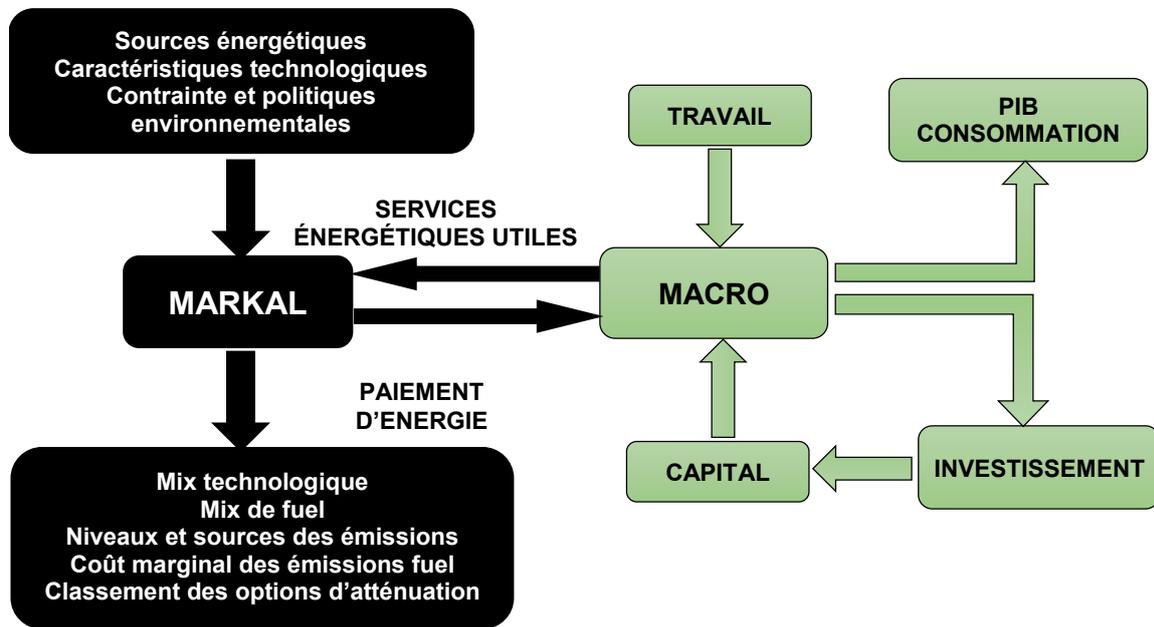
Ce modèle a pour intérêt principal d'évaluer les politiques et les instruments réglementaires (normes, taxe carbone, subventions à la rénovation...). Le cadre général de modélisation

s'appuie sur la connexion d'un modèle *bottom-up* Res-IRF enrichi par des mécanismes microéconomiques (conçus avec une architecture de simulation flexible qui permet le couplage de connaissances d'ingénierie et de divers domaines économiques), au grand modèle d'équilibre général calculable par IMACLIM-R. Ces auteurs concluent qu'au regard des résultats de réduction de la consommation d'énergie finale réalisables dans d'autres études similaires, une réduction supplémentaire de 21 % pourrait être atteinte si les obstacles pour l'efficacité et la suffisance étaient surmontés.

Strachan et Kannan (2008) ont réalisé le modèle hybride Markal-Macro (M-M). Ce modèle vise à étayer l'analyse à long terme du système énergétique du Royaume-Uni, pour lequel l'objectif est d'atteindre une réduction de 60 % des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050. Dans cette étude, l'hybridation se situe dans le couplage du modèle d'optimisation du système énergétique (Markal) avec un modèle compact macroéconomique (Macro) (cf. Figure 2-4). Il s'agit d'un modèle hybride qui maintient la précision technologique de l'approche *bottom-up* avec une demande d'énergie agrégée, et qui examine ses impacts sur le PIB dans un modèle de croissance unique. Les auteurs confirment, à travers ce modèle, qu'il est possible d'atteindre l'objectif de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à long terme. Cependant, ils mettent en évidence les incertitudes récurrentes, notamment dans l'évaluation simultanée des options comportementales et technologiques de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de ses impacts sur le système énergétique. Selon un scénario de pénétration modérée de nouvelles options technologiques à faible carbone dans le futur (2050), Strachan et Kannan concluent que les impacts macroéconomiques de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> générés par ces options passeraient de 0,3 % à 1,5 % du PIB du Royaume-Uni d'ici 2050.

On constate, pour ces études, que les modèles développés manquent de détails en ce qui concerne la corrélation des hypothèses comportementales avec les variables quantifiées. En d'autres termes, la quantification comportementale n'apparaît pas clairement dans ces études.

Figure 2-4 : Schéma du modèle hybride Markal-Macro (M-M) au Royaume-Uni



Source : Strachan et Kannan (2008).

### 2.11.1 Modèles IAM (approche climatique)

Les modèles d'évaluation intégrée (IAM) essaient de lier, dans un cadre de modélisation simple, les principales caractéristiques de la société et de l'économie avec la biosphère et l'atmosphère (Schneider, 1997). Ils ont pour ambition de passer d'un système intégré à une approche systémique unifiée. Chaque question de ce système est traitée à l'aide de modèles plus ou moins complexes.

Les modèles IAM représentent des outils importants pour étudier l'impact des activités humaines sur le changement climatique. À cet effet, différents domaines sont couplés et placés en interaction les uns avec les autres – par exemple : un modèle climatique, un modèle d'utilisation des terres et un modèle économique. Les résultats des IAM constituent, pour les décideurs, des instruments appréciables pour définir les stratégies et les politiques en réponse aux enjeux du changement climatique d'origine anthropique (Dowlatabadi, 1995). Les modèles IAM ont contribué à la publication de plusieurs rapports, comme celui du GIEC (2011), le rapport spécial sur les énergies renouvelables, ou le World Outlook 2011 (International Energy Agency, 2011). De plus, sur la base des résultats fournis par des modèles IAM, sont planifiées des politiques à long terme, comme l'UE Energy Roadmap 2050 (CE COM, 2011), une

référence de base d'informations sur les négociations internationales relatives aux politiques climatiques (cf. Figure 2-6).

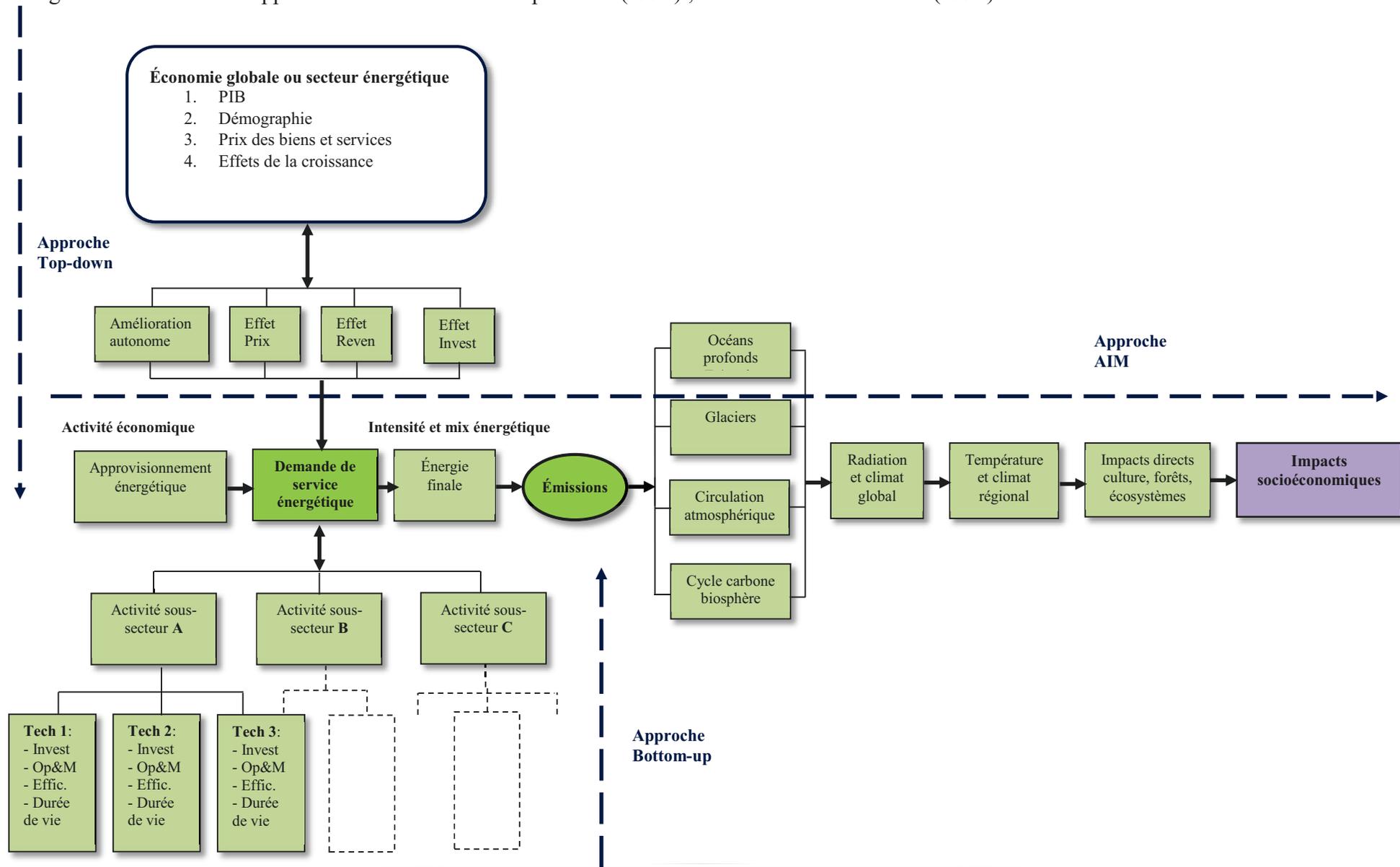
Schwanitz (2013) montre que l'objectif de ces modèles est de concevoir un système de variables de modélisation dans lequel le « système terre<sup>37</sup> » constitue la partie endogène. Il s'agit d'un processus continu dans lequel les principaux verrous méthodologiques entre les disciplines scientifiques doivent être levés. Par exemple, le mode d'optimisation de la plupart des modèles économiques doit être lié avec des modèles basés sur les processus de climat ou sur la recherche en biogéochimie. Toutefois, compte tenu de la grande complexité du système complet, les modèles IAM sont essentiellement fondés sur un grand nombre d'hypothèses simplificatrices. Dowlatabadi (1995) souligne qu'aucun modèle ne pourra réussir à maîtriser en détail toutes les interactions qui déterminent la dynamique du système dans sa globalité. Ce degré de maîtrise dans le fonctionnement de la dynamique du système et la réponse de celui-ci aux mesures de contrôles extérieurs ne sera atteint que par le développement d'un ensemble de modèles fonctionnant comme un seul système intégré.

Parson *et al.* (1997) précisent que les principaux éléments constitutifs d'IAM sont des modèles bien établis dans des disciplines spécifiques, par exemple : les modèles climatiques, de biogéochimie, d'économie générale ou démographiques. Il s'agirait d'un système de modèles composé de sous-modèles ou de modules de différentes disciplines interconnectées par l'échange de données d'entrée et de l'ensemble des données de sortie. La création des « raccourcis de simplification » se révèle souvent nécessaire pour rendre le système d'échange de données de sortie cohérent entre plusieurs modules de différents domaines. Dans certains cas, des modules spécifiques doivent être développés dans des versions simplifiées. Cette forme de conception des modèles IAM a été construite, dans un premier temps, comme créant des entités individuelles avec les différentes représentations des composantes du problème interagissant au sein d'un modèle. Actuellement, les modèles IAM sont représentés par un système modulaire, c'est-à-dire un ensemble de modules séparés, chacun avec son interface utilisateur, et une certaine flexibilité, qui permet d'ajouter ou de retirer une interface, si nécessaire, pour répondre à différentes questions.

---

<sup>37</sup> Système terre : constitue, ici, les variables endogènes objets de la modélisation, c'est-à-dire les variables liées à l'activité humaines, comme la quantité des gaz à effet de serre, la quantité d'énergie consommée, etc.

Figure 2-5 : Familles et approches de modélisation d'après AIE (1998) ; Parson et Fisher-Vanden (1997)





### 2.11.2 Structure générale des modèles d'évaluation intégrée IAM

Dowlatabadi (1995) décrit les modèles IAM comme des modèles dynamiques intégrés dans un système informatique composé des différents systèmes complexes appartenant au domaine naturel ou celui des activités humaines. Les sous-modèles (modules) sont liés par des équations représentant les différents domaines dans une forme d'intégration générale. La structure de chaque sous-modèle est déterminée par la thématique du sous-modèle, mais également par la méthodologie adoptée et le type de solution aux questions.

Un IAM constitue un ensemble d'équations décrivant l'évolution dans le temps du système qu'est la Terre dans son ensemble. En résumé, un IAM est un modèle dynamique qui implique les types d'équation suivants, illustrés par des exemples simplifiés :

- équations concernant l'évolution, reliant une période à la période suivante. Par exemple, l'équation qui établit que le niveau de concentration de CO<sub>2</sub> dépend de l'effet de serre, de son atténuation et des différents processus naturels d'absorption de ce gaz. D'autres équations classiques, dans la même catégorie, impliquent l'évolution de biens d'équipement par l'investissement, l'obsolescence et le démontage, et les descriptions de l'évolution démographique en fonction du taux de natalité et de mortalité.
- équations liant les variables contemporaines ;
- équations liant les concentrations de GES à la température mondiale ; les relations entre les dommages et la température mondiale.

En ce qui concerne les variables, il est d'usage, dans un premier temps, de faire la distinction entre :

- les variables de flux (émissions, CO<sub>2</sub> capté par les forêts et la biomasse, consommation finale, investissement, mort et naissance) ;
- les variables de stock (niveau de CO<sub>2</sub> atmosphérique, niveaux de divers stocks de capital, chiffres de la population).

Le modèle IAM monolithique obtenu est alors uniquement applicable dans le domaine de validité des composantes de celui-ci. Les principaux exemples sont :

- *IMAGE* (Bouwman *et al.*, 2006) : le modèle d'image est un modèle multidisciplinaire intégré, conçu pour simuler la dynamique du système société-biosphère-climat mondial. Il met l'accent sur les aspects scientifiques du modèle, dont l'objectif est d'enquêter sur

les liens et rétroactions dans le système mondial, et d'évaluer les conséquences des politiques climatiques.

- *DICE* (Nordhaus, 1993) : ce modèle peut être utilisé pour étudier des approches alternatives visant à ralentir le changement climatique. L'évaluation des cinq politiques suggère qu'une taxe carbone modeste serait une approche efficace pour ralentir le réchauffement climatique, alors que les approches par émission de stabilisation rigide imposent des coûts économiques nets importants.

Depuis les années quatre-vingt, les modèles d'évaluation intégrée IAM sont apparus comme un nouveau paradigme. En effet, le développement des technologies informatiques a soutenu le développement de nouveaux interfaçages, dans les domaines scientifique et politique, pour le traitement des questions environnementales complexes telles que le changement climatique. Les modèles IAM peuvent prendre en charge la gestion des systèmes environnementaux complexes d'une manière équilibrée en tenant compte des aspects biophysiques, institutionnels, sociaux et économiques (Argent, 2004).

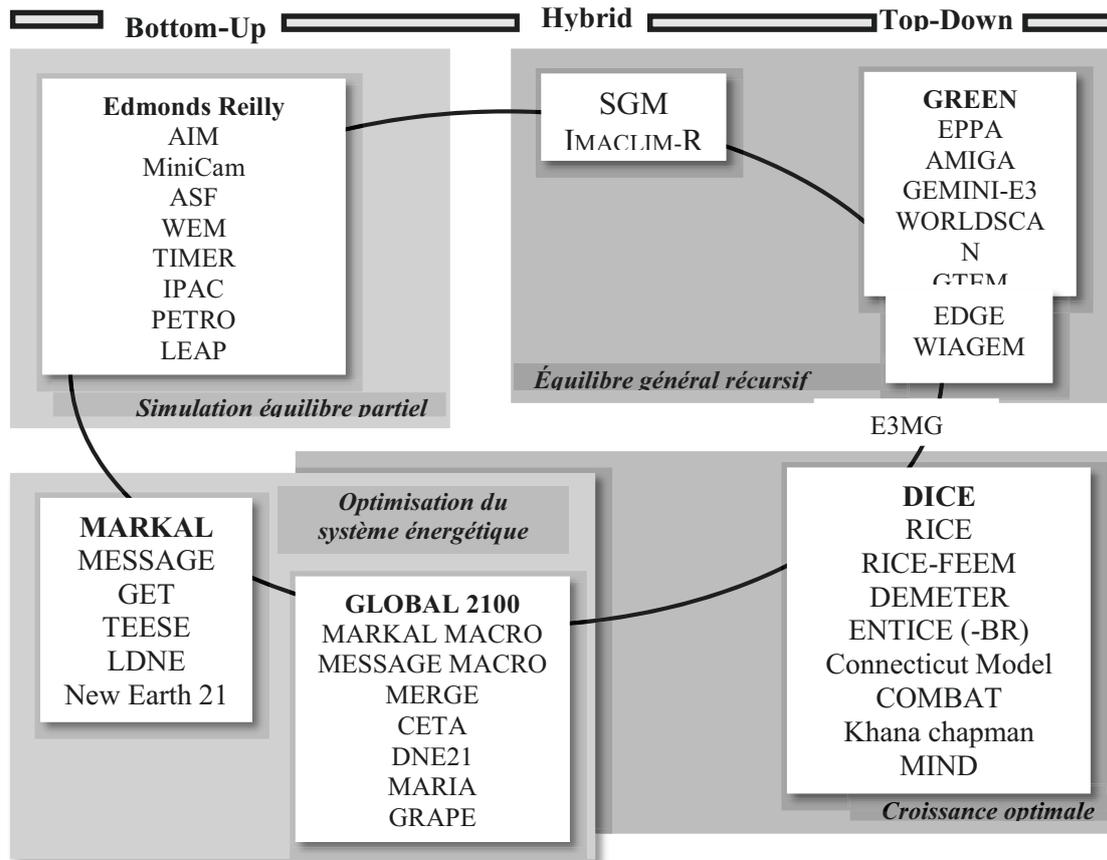
## 2.12 Famille des modèles prospectifs

À travers le monde entier, de nombreux modèles prospectifs sur la question énergie/climat ont été développés au fil des besoins de la recherche scientifique. Aujourd'hui, il existe un nombre important de modèles dans la base de données du GIEC, et autant de scénarios correspondants. Crassous (2008) a identifié plus de 55 modèles utilisés pour 698 scénarios sur un total de 959, ce qui correspond à 72 % du nombre total des scénarios recensés. Il établit, à travers la Figure 2-6 ci-dessous, une répartition des principaux modèles identifiés :

- Famille Edmonds-Reilly (1983) ;
- Famille Markal (Fishbone *et al.*, 1983) ;
- Famille DICE (Nordhaus, 1993) ;
- Famille Global 2100 (Manne et Richels, 1990) ;
- Famille Green (Burniaux *et al.*, 1991).

On constate que ces modèles se différencient les uns des autres en fonction de l'approche de modélisation employée, à savoir *top-down* ou *bottom-up*, et selon les objectifs visés par la modélisation, soit la simulation ou l'optimisation.

Figure 2-6 : Catégories des principaux modèles de prospective



Source : Crassous (2008).

## 2.13 Analyse des modèles *bottom-up* pour la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel

### 2.13.1 Efforts d'efficacité énergétique dans le contexte algérien

Ce travail d'analyse bibliographique est basé bien entendu sur la modélisation prospective de la consommation d'énergie. En Algérie, le débat sur l'efficacité énergétique prend de l'ampleur avec la problématique de la croissance de la consommation d'énergie (hydrocarbures) et de son corollaire sur la balance de l'économie algérienne, avec son impact environnemental, notamment le respect des engagements pris par l'État dans le cadre du protocole de Kyoto (cf. chapitre 1). De nombreuses recherches ont porté sur l'efficacité énergétique, au fil de ces dernières années. Citons-en succinctement quelques-unes, récemment publiées.

Chabane (2013) évoque les enjeux globaux de la politique énergétique algérienne pour les prochaines décennies. L'auteur analyse le modèle énergétique actuel. De façon systémique, il tente d'assimiler l'efficacité énergétique à un immense gisement d'économie. L'intégration progressive des ENR dans le mix énergétique actuel pourrait constituer une alternative énergétique à long terme. L'étude de Boudghene *et al.* (2012) met en évidence l'enjeu du développement des énergies nouvelles et renouvelables en Algérie. Elle présente un inventaire détaillé des plans de développement du secteur des énergies nouvelles et du programme d'amélioration de l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment. Les auteurs s'appuient sur des modélisations, établies par les protagonistes de ces programmes à une échelle macroscopique, pour évaluer l'ensemble de la politique énergétique.

À l'échelle du bâtiment, Foura (2008) développe le modèle « SimulArch », avec pour objectif de proposer de nouveaux paramètres de confort conduisant à un gain énergétique. Cette thèse de recherche fournit un exercice de simulation de nouveaux paramètres de confort d'hiver sur une cellule cible (logements de type F3 à Constantine), dans le but de réduire la consommation énergétique dans tout le parc de logements en immeubles collectifs. De manière analogue, Hamouda *et al.* (2006) réalisent des modélisations dynamiques des besoins en chauffage et en refroidissement d'une maison individuelle. Le modèle utilisé prend en considération les caractéristiques du site, la situation, les orientations et données climatiques (température, vitesse du vent, rayonnement, pluviométrie...). Cette étude permet d'identifier les sources de déperdition énergétique, ainsi que les possibilités d'économie d'énergie pour ce type de logements. Ces études se focalisent sur la modélisation des comportements thermiques du bâtiment. Elles manquent en revanche d'une approche à l'échelle urbaine du parc de logements dans son ensemble.

Berrached (2011) évalue l'impact des mesures d'efficacité énergétique sur la consommation d'énergie en Algérie. Il élabore un scénario qui permet de réduire les consommations d'énergie finale et les émissions de CO<sub>2</sub> pour tous les secteurs d'activité à l'horizon 2030. Le modèle *bottom-up* SIMED (Simulation Model Demand) a été utilisé pour calculer les gains d'énergie et les émissions évitées dans un scénario d'atténuation de la consommation d'énergie portant sur le secteur résidentiel. La méthode d'évaluation repose ici sur l'extrapolation à l'échelle nationale de la consommation d'énergie d'un échantillon de ménages. Il s'agit des consommations annuelles d'énergie pour des usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire) et d'électricité spécifique (éclairage, équipements électroménagers, etc.). L'auteur s'est appuyé sur la projection du nombre de ménages pour estimer la consommation d'énergie

à l'horizon 2030. À partir de la même méthode de projection, l'auteur a également élaboré un scénario de réduction de la consommation d'énergie. Ce scénario repose essentiellement sur la simulation de quelques leviers d'économie d'énergie « préétablis » par l'APRUE. Les actions prévues dans ce contexte sont illustrées comme suit :

- Programme LBC<sup>38</sup> : généralisation progressive de l'usage de ce type de lampe ;
- Intégration chauffe-eau solaire : 100 000 mètres carrés tous les cinq ans à l'horizon 2030 ;
- Programme isolation thermique des logements : 40 000 logements tous les cinq ans à l'horizon 2030 ;
- Intégration d'appareils électroménagers plus performants ;
- Application systématique de la réglementation thermique algérienne à partir de 2020.

À travers les résultats de ce scénario, l'auteur montre que la mise en œuvre de leviers d'efficacité énergétiques constitue un potentiel d'économie d'énergie de l'ordre de 15 % par rapport à la consommation d'énergie finale à l'horizon 2030. Selon cette étude, ce potentiel d'économie engendrera une baisse des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 41 %.

D'un point de vue strictement quantitatif, l'estimation de la consommation globale en énergie finale du parc de logements est basée sur l'extrapolation de la consommation d'énergie d'un seul type de ménage. La contestation d'une telle approche de modélisation, fondée sur le nombre de ménages comme unique variable, revient à mettre en évidence la disparité typologique des ménages ainsi que de leurs consommations énergétiques. Dans les méthodes de calcul des besoins en énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, les facteurs énoncés sont indiqués de manière agrégée et ne tiennent pas compte de la taille du logement, des catégories d'âge ni des conditions climatologiques. Là encore, cette étude ne considère pas la dynamique du parc de logements ni la composition typologique des bâtiments existants (architecture, systèmes constructifs, etc.). Au regard de l'approche et de la modélisation simplifiée, ce type d'étude ne semble adapté que pour quantifier des besoins théoriques en énergie à l'échelle d'un bâtiment, voire d'un ensemble réduit de bâtiments.

---

<sup>38</sup> LBC : lampe basse consommation.

### 2.13.2 Modèles d'efficacité énergétique dans le contexte régional

Dans un contexte climatique plus chaud que celui des pays européen, Radhi (2009) évalue l'effet des changements climatiques et la consommation énergétique dans le secteur résidentiel aux Émirats arabes unis (EAU). Le modèle développé en *bottom-up* LEAP quantifie le corollaire entre le réchauffement climatique et la croissance de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la climatisation dans le parc de logements de l'émirat d'Al-Ain aux EAU. La méthode employée s'appuie sur les variations des degrés-jours et les effets de ces derniers sur la consommation d'électricité pour le chauffage et le refroidissement de deux archétypes d'habitation représentatifs du parc de logements. À travers une simulation d'accroissement de la température de 5,9 °C à l'horizon 2050, le scénario de référence montre une augmentation de 23,5 % de la demande d'énergie pour le refroidissement, les émissions nettes de CO<sub>2</sub> pouvant augmenter de l'ordre de 5,4 % au cours des prochaines décennies.

L'auteur identifie trois facteurs impactant l'efficacité énergétique dans le bâtiment dans le contexte de la ville d'Al-Ain :

- la conception optimale de l'enveloppe du bâtiment : un impact positif sur les systèmes de construction, en particulier les systèmes de ventilation et d'éclairage ;
- la conception optimale du système de climatisation (chauffage, refroidissement) : le rapport optimal entre les besoins énergétiques et la taille de l'équipement permettent d'avoir un meilleur rendement des systèmes de climatisation ;
- une modification des comportements des occupants : la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement dépend de la température extérieure et de la température de consigne (en regard du climat chaud de la ville d'Al-Ain, où la température moyenne maximale atteint 46 °C, une température interne de 26 °C à 27 °C serait considérée comme confortable).

À travers le jeu des scénarisations, l'auteur conclut que l'efficacité du secteur résidentiel d'Al-Ain est un objectif techniquement accessible. La réduction des émissions pourrait atteindre 13 % et 15 % du total des émissions de CO<sub>2</sub> du parc de logements. La conception bioclimatique des logements (conception des fenêtres, dimension, orientation, type de vitrage, etc.) avec une enveloppe isolée réduirait significativement les consommations énergétiques. L'économie d'énergie réalisée pourrait atteindre 26,2 % pour le chauffage, et 21,5 % pour le refroidissement.

L'auteur montre l'efficacité de l'application de ces facteurs dans la réduction de la consommation d'énergie et des émissions. Toutefois, cette étude se base exclusivement sur deux exemples de maisons individuelles neuves, qui diffèrent par la taille, la période de construction et le système constructif des autres typologies manquantes du parc de logements d'Al-Ain. C'est une limitation considérable, car, par exemple, le segment des maisons traditionnelles, fortement représenté dans la vieille ville, n'est pas pris en compte dans ce modèle.

Chedid et Ghajar (2004) utilisent le même modèle LEAP pour évaluer les options d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment du Liban à l'horizon 2040. Une approche *bottom-up* est adoptée dans l'objectif non seulement d'élaborer un scénario de référence qui reflète les tendances actuelles des politiques énergétiques dans le secteur du bâtiment, mais aussi de proposer et d'évaluer des scénarios d'atténuation pour améliorer les pratiques d'efficacité énergétique dans ce secteur. Pour l'estimation de la demande en énergie en 2040, ce modèle se base sur des projections macroéconomiques de l'activité économique ou sur des inventaires détaillés des technologies consommant de l'énergie électrique. L'hypothèse maintenue dans cette étude est celle d'une croissance de l'économie libanaise de 3 % entre 2005 et 2040. Afin de déterminer la composition du parc de logements, ventilée par année de construction, utilisation et distribution géoclimatique, le modèle s'appuie sur les données officielles du Bureau libanais de la statistique. Pour réaliser un bilan complet, ce modèle prend en compte les bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire.

En poursuivant les tendances actuelles de consommation d'énergie, Chedid et Ghajar estiment, à travers un scénario de référence, la demande en électricité et les émissions dans le secteur du bâtiment. Afin d'engager des mesures d'efficacité énergétique, cette étude accorde plus d'intérêt à la combinaison de leviers technologiques qui portent sur :

- les caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment. En 1999, le Liban ne disposait pas de normes ou de codes concernant l'enveloppe du bâtiment (règlement thermique). Dans cette étude, un *guidelines* a été proposé pour évaluer les caractéristiques thermiques des bâtiments  $U_{\text{bât}}$  ;
- les équipements de consommation : la contribution d'autres équipements plus performants et économiques, comme la pompe à chaleur pour le refroidissement et le chauffage, et le solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire.

Deux scénarios ont été élaborés sur le modèle LEAP. Le premier se fonde sur une application partielle des normes techniques des bâtiments à l'horizon 2040, tandis que le second s'appuie sur une application facultative des normes jusqu'en 2015, puis une application systématique sur tout le secteur du bâtiment libanais jusqu'en 2040. Les résultats de ses scénarios montrent une diminution de la consommation électrique pouvant atteindre respectivement 13 % et 18 % pour la période 2000 et 2040. Les auteurs concluent que la croissance de la consommation d'énergie est liée à la sous-performance des mesures d'efficacité énergétique dans le bâtiment (enveloppe et système énergétique). Ici également, cette étude ne prend pas en compte les données relatives au parc de logements, à savoir : le mouvement du parc, les typologies de logements, etc. De plus, elle s'appuie sur des indicateurs de croissance économique pour évaluer la demande d'énergie en 2040. Or, cette approche macroéconomique ne permet pas d'identifier les variables désagrégées de la croissance de la demande d'énergie, ni d'évaluer des leviers et scénarios d'atténuation.

Özer *et al.* (2013) développent pour leur part un modèle LEAP afin d'évaluer le potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de l'électricité en Turquie à l'horizon 2030. Ces auteurs montrent que, dans ce pays, le mix électrique s'appuie à 70 % sur la transformation des énergies fossiles. Ainsi, la croissance de la demande en électricité est le corollaire de la croissance des émissions de CO<sub>2</sub>. À cet effet, le modèle LEAP vise à décrire comment l'énergie est produite, transformée et consommée selon une batterie d'hypothèses relatives à la population, au développement économique, à la technologie et au prix de l'énergie. Pour estimer la demande en électricité propre à chaque secteur d'activités, ce modèle repose sur les facteurs suivants : la démographie, le PIB et la proportion de chaque secteur de la demande dans la consommation totale, en fonction des taux de croissance annuels. Le jeu de simulation, dans ce modèle, s'appuie essentiellement sur la capacité de production des différentes centrales électriques, l'intensité énergétique des usines et l'intensité des émissions des combustibles.

Özer *et al.* construisent deux scénarios de ce modèle sur la base des données de l'année 2006. Il s'agit d'un scénario « *business as usual* » (BAU) ou de référence, à savoir l'hypothèse d'une poursuite des tendances des politiques énergétiques actuelles jusqu'en 2030. Dans ce scénario, les auteurs révèlent que, si aucun contrôle n'est imposé en Turquie, les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur de l'électricité seront probablement plus importantes, soit près de 206,5 millions de tonnes de plus pour chaque année entre 2006 et 2030. Ce constat contrarie les engagements de ce pays dans le cadre du protocole de Kyoto pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, et ceux de la Communauté européenne, en vue de sa candidature à l'intégration dans celle-ci.

Le deuxième scénario comprend des options d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2030. Ce dernier intègre les technologies d'énergies renouvelables (sauf le solaire) dans le mix énergétique actuel. Il évalue ainsi le potentiel des sources d'énergies renouvelables de la Turquie. Il fournit également le bilan des émissions de CO<sub>2</sub> avec les nouvelles installations. Dans ce scénario, Özer *et al.* montrent une nette diminution de la consommation intérieure, ainsi qu'une réduction des pertes de distribution, et donc une baisse des émissions de CO<sub>2</sub> des centrales alimentées au gaz naturel et au lignite. Avec les hypothèses du scénario d'atténuation, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de l'électricité sont susceptibles de baisser de 170,4 millions de tonnes chaque année par rapport au premier scénario exposé.

Certes, sur une échelle macroscopique, le deuxième scénario du modèle LEAP permettrait de réduire significativement la consommation énergétique et d'atténuer les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2030. Cependant, il ne vise pas à réduire la consommation d'énergie ou les émissions de CO<sub>2</sub> pour un secteur en particulier. En effet, si l'on compare la consommation d'énergie par secteur pour 2006 et 2030, on constate que le niveau du secteur résidentiel est passé de 25 % du total de la consommation intérieure en 2006 à 28 % en 2030. Or ce secteur représente un potentiel d'économie d'énergie qui n'apparaît pas dans les résultats.

## 2.14 Modèles de consommations/émissions dans le contexte européen

### 2.14.1 Modèles UKDCM et BREHOMES

Boardman *et al.* (1996) ont développé un modèle domestique de carbone (UKDCM<sup>39</sup>) pour le parc de logements existant au Royaume-Uni. Le but de ce modèle est de simuler la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> du stock de logements en 2050, à partir de l'année de référence 1996 (cf. Figure 2-7). Le modèle UKDCM dispose d'un haut degré de désagrégation de l'ensemble des bâtiments. Ce modèle comprend plus de 20 000 configurations de logements : types de logements, classe d'âge, région, type de logement, système constructif, nombre d'étages. Ces combinaisons permettent de suivre les modifications de la rénovation du parc de logements, les démolitions, et les nouvelles constructions. Dans le même temps, le modèle prend en compte un large éventail de systèmes énergétiques, tels que le chauffage et le refroidissement, l'eau chaude, l'éclairage et tout autre appareil électrique, ou la pile à combustible. Chaque type de donnée est une variable pondérée pour modéliser un scénario spécifique. L'UKDCM est essentiellement un modèle numérique des flux d'énergie, tenant

---

<sup>39</sup> United Kingdom Domestic Carbon Model (UKDCM).

compte de toutes les sources de gain de chaleur et de la perte de chaleur dans un parc de logements dont les caractéristiques évoluent dans le temps.

Le modèle inclut le calcul d'ingénierie (méthodes de calcul BREDEM<sup>40</sup>) *bottom-up* détaillé des différents mécanismes de perte de chaleur. L'augmentation de l'efficacité énergétique est modélisée en définissant les points terminaux pour la diffusion des mesures d'efficacité énergétique. À l'appui de ce modèle, Boardman *et al.* élaborent 3 scénarios :

- un scénario au fil de l'eau (« *business as usual* »), soit un développement qui poursuivrait la tendance actuelle en termes de croissance des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 ;
- un scénario d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 44 % au-dessous du niveau de 1990 ;
- un scénario d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 25 %.

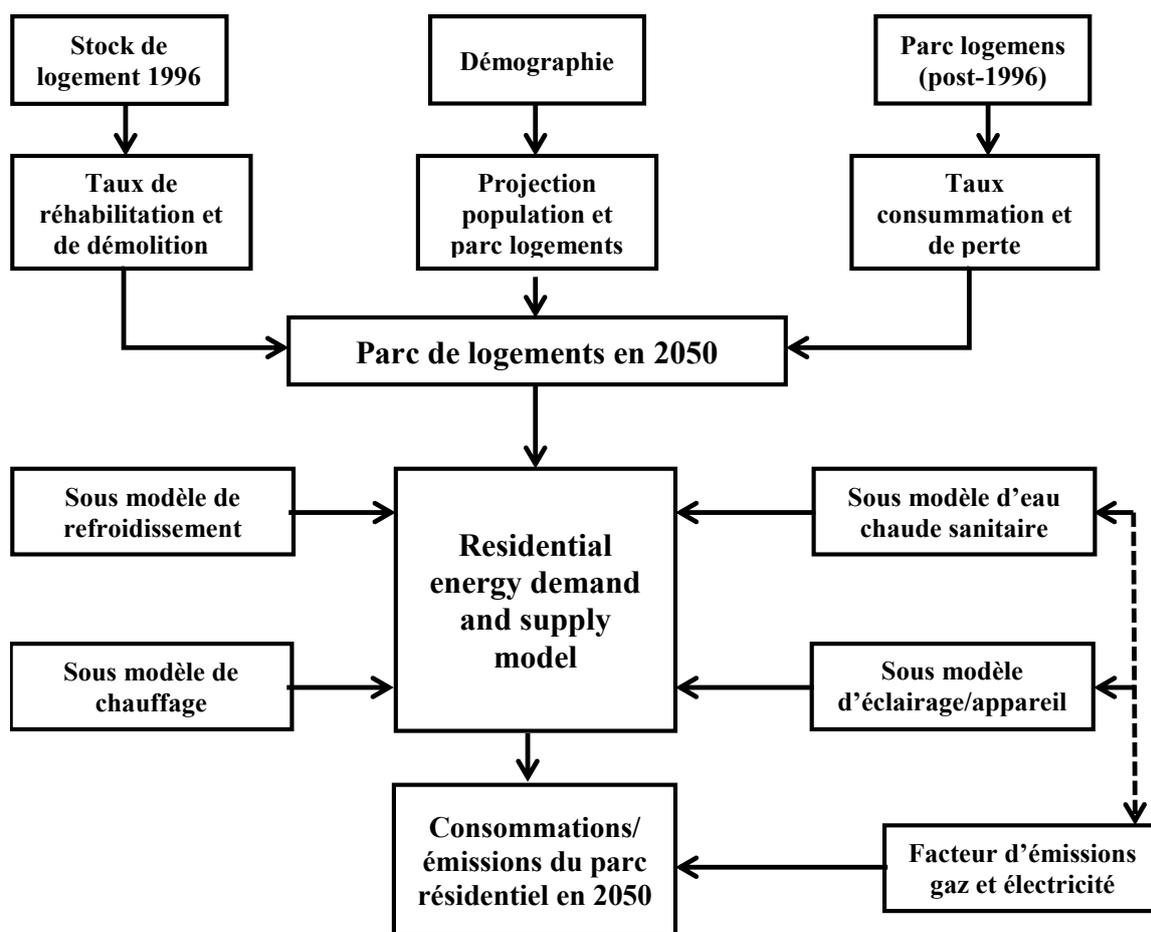
Les auteurs montrent que pour atteindre une telle réduction des émissions de carbone en 2050, il est nécessaire d'augmenter considérablement la part des systèmes de chauffage à faible émission de carbone, en particulier les pompes à chaleur et la biomasse en chaudière dans le parc de logements.

Ce modèle semble très complexe au regard du nombre de variables considérées. La consommation d'énergie finale dans le parc de logements est l'objet d'une estimation plus détaillée. De plus, le niveau de désagrégation des données relatives à la dynamique du parc résidentiel permet d'établir des projections prospectives du parc de logements et de la consommation d'énergie avec un plus haut niveau de précision.

---

<sup>40</sup> BREDEM : BRE Domestic Energy Model.

Figure 2-7 : Architecture du modèle UKDCM (2005)



Source : Kavgić *et al.* (2010).

Shorrock et Dunster (1997) développent le modèle BREHOMES pour l'évaluation de la consommation d'énergie et les émissions dans le secteur résidentiel au Royaume-Uni (cf. Figure 2-8). Les calculs de ce modèle *bottom-up* sont basés sur la physique de la consommation d'énergie dans le parc de logements. Le modèle intègre plus de 1 000 typologies de logements qui se distinguent par l'année de construction, la forme du bâti et le type de chauffage central. Pour le calcul des consommations d'énergie dans le logement, le modèle utilise le BREDEM, qui nécessite un certain nombre de données relatives à la superficie des différents éléments des logements, leurs caractéristiques thermiques, les caractéristiques du système de chauffage, les températures intérieure et extérieure, les systèmes de chauffage, le nombre d'occupants et les apports solaires.

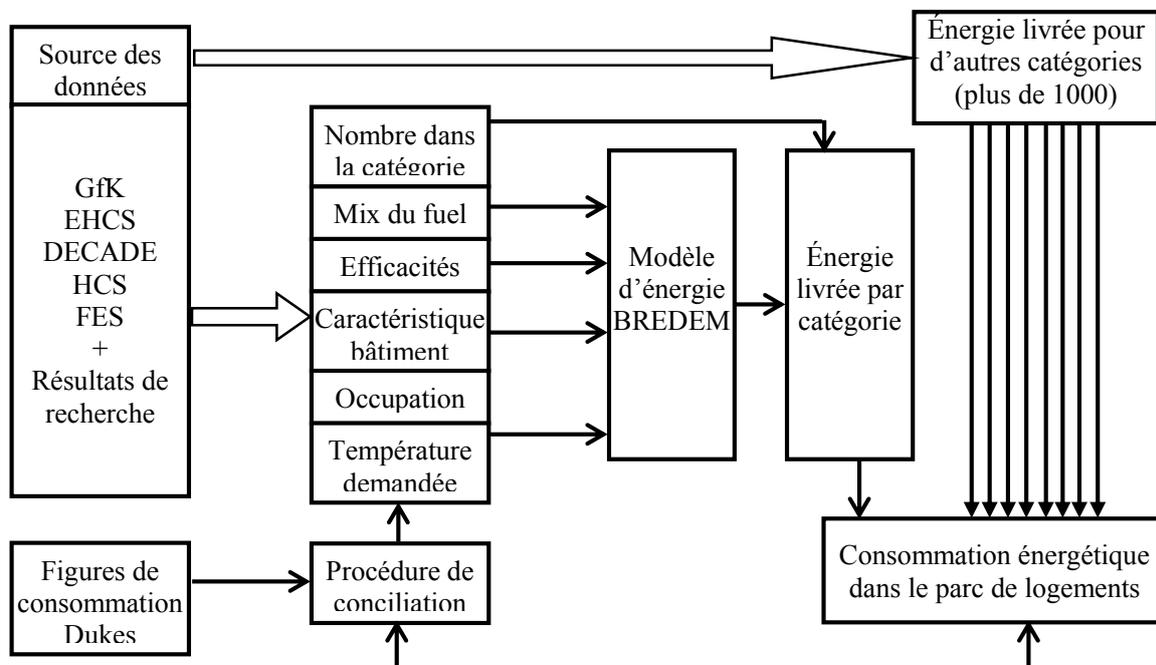
Dans cette étude, deux scénarios de consommation d'énergie ont été construits. Un scénario de référence, et un scénario « d'efficacité » ont été testés dans le modèle BREHOMES. L'objectif du scénario d'efficacité est de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> dans

le secteur résidentiel à l'horizon 2050. En sus des mesures d'efficacité adoptées dans le scénario de référence, le scénario d'efficacité consiste à augmenter les gains énergétiques par l'isolation des combles et la pénétration de différentes catégories de chauffage à faible consommation et émission de CO<sub>2</sub>. En outre, un large éventail de mesures techniques, permettant la réduction de l'intensité de carbone, a été introduit et réparti en trois groupes distincts :

- les techniques permettant l'augmentation de l'efficacité de la conversion d'énergie ;
- les technologies à émission de CO<sub>2</sub> très faible ou nulle ;
- les technologies de capture et de stockage des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion de combustibles fossiles.

À travers ce modèle, Shorrocks et Dunster montrent que pour atteindre une économie de carbone de 60 % en 2050, il est nécessaire d'augmenter considérablement la part des systèmes de chauffage à faible émission de carbone, en particulier les pompes à chaleur et les chaudières à biomasse dans le parc de logements. La configuration de plus de 1 000 typologies de logements dans ce modèle peut paraître un exercice lourd à réaliser. Cependant, au regard de la précision des résultats sortants, le modèle BREHOMES semble plus pertinent pour l'évaluation des mesures d'efficacité énergétique dans le cas du secteur résidentiel.

Figure 2-8 : Architecture du modèle BREHOMES (The Building Research Establishment's Housing Model for Energy Studies, 1997)



Source : Shorrocks et Dunster (1997b).

## 2.14.2 « Facteur 4 » en France : une cible et plusieurs modèles

En France, ce sont les travaux du Club d'ingénierie prospective énergie et environnement (CLIP) qui représentent cette catégorie de recherches. Dans le but d'atteindre le « facteur 4 » des émissions de CO<sub>2</sub> induites par la consommation énergétique des secteurs résidentiel et des transports à l'horizon 2050 (par rapport à la référence de 1990) – objectif repris par Loi POPE du 13 juillet 2005 –, de nombreuses études et recherches ont été conduites. Maïzi et Assoumou (2007) ont montré que l'optimisation d'un coût technique, économique ou environnemental associé à une représentation technico-économique du système énergétique au moyen du modèle Markal-France permettait une approche prospective plus appropriée des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050. Selon ces auteurs, la représentation technologique désagrégée *bottom-up* de type Markal favorise la création d'une économie virtuelle où les différentes technologies sont mises en concurrence afin d'estimer les émissions de GES selon le scénario envisagé. Appliquant ceci aux secteurs des transports et de la production d'électricité, Maïzi et Assoumou ont élaboré différents scénarios des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050. Ils en ont conclu qu'il était possible, au moyen du modèle Markal, de proposer différentes alternatives de l'avenir énergétique en intégrant des enjeux environnementaux. En effet, le modèle a permis de retracer d'autres trajectoires de l'évolution des émissions à l'horizon 2050, en optant pour des choix technologique focalisés en priorité dans les secteurs des transports et de la production d'électricité. En revanche, du fait du poids important, dans la consommation, du secteur résidentiel, ce dernier constitue un potentiel considérable d'économie d'énergie et d'atténuation des émissions à exploiter.

Dans cette optique, Traisnel *et al.* (2010) ont développé un modèle de simulation de l'impact des mesures environnementales des politiques publiques en France. Le volet habitat du modèle Betel permet l'identification des variables clés (tendances lourdes...) agissant de manière directe ou indirecte sur l'évolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> dans le parc de logements. Ce modèle dynamique est alimenté par des variables désagrégées relatives aux mouvements dans le parc de logements (sorties, entrées et vacances des logements), ainsi qu'aux évolutions démographiques à l'horizon 2050. Le modèle *bottom-up* Betel se base sur une des méthodes de calcul d'ingénierie des dépenses énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub> liées au bâtiment, pour un logement type. Il permet l'évaluation approfondie des gains d'efficacité énergétique obtenus suite aux opérations qui pourraient être effectuées sur le parc

de logements, en fonction des caractéristiques de ce dernier, et ce, en fonction des choix énergétiques mobilisés pour atteindre le « facteur 4 ».

De nombreuses simulations permettent de proposer plusieurs scénarios de leviers techniques et technologiques qui pourraient réduire significativement la consommation énergétique dans le parc de logements (chauffage et eau chaude sanitaire), et induire une réduction de leur corollaire en termes d'émission de CO<sub>2</sub>, à savoir :

- la réhabilitation thermique et la rénovation du parc de logements existants ;
- la contribution du solaire thermique à la réduction des consommations énergétiques pour la production d'eau chaude sanitaire ;
- la contribution des cogénérations décentralisées de faible puissance à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- le potentiel de développement des pompes à chaleur électrique dans le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

Le modèle Betel est enrichi d'un large éventail de variables inhérentes aux bâtiments, qui permettent d'explorer de multiples solutions techniques. Toutefois, si l'on considère la température de consigne de 19 °C (RT 2005), qui est inférieure à la température intérieure majoritairement programmée dans les logements en période de chauffe (soit près de 21 °C), les moteurs de calcul des besoins en chauffage du modèle Betel sous-estiment les besoins réels en énergie pour le chauffage, et donc les quantités réelles en termes d'émission de CO<sub>2</sub>. Par ailleurs, ce modèle ne prend pas en considération la dimension urbaine, dans le sens où il convient d'aborder les consommations et les émissions d'un point de vue spatial qui permette d'explorer les formes urbaines et les types de tissus auxquels les logements sont associés.

Dans ce sens, Maïzia *et al.* (2010) mettent en évidence le potentiel de la contribution quantitative de la forme urbaine dans la balance énergie/CO<sub>2</sub> des ménages. Le modèle développé est un croisement entre le secteur résidentiel et celui des transports. Il permet de modéliser les dépenses énergétiques et les émissions directes des ménages dans ce qui relève de l'aménagement urbain. Dans ce contexte, les auteurs mesurent les effets de la morphologie du tissu urbain (mitoyenneté, compacité, etc.) sur la consommation énergétique du logement, et identifient les gisements d'économie d'énergie permettant d'atteindre le « facteur 4 ».

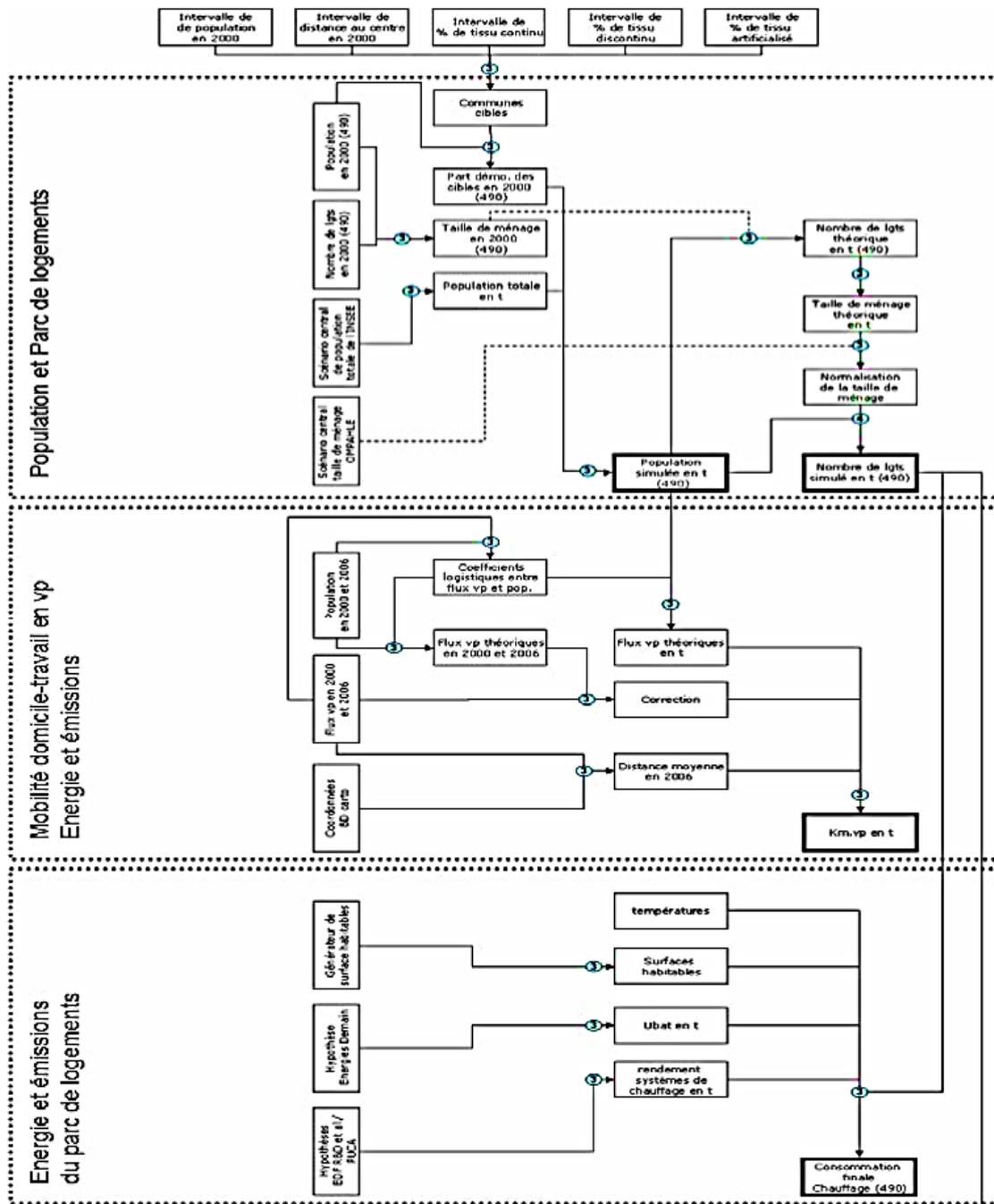
Les auteurs développent un modèle dynamique *bottom-up* de parc intégrant la dimension urbaine. Le modèle établi est composé de variables dynamiques du parc réactualisées (RGP<sup>41</sup> 2006), et d'un nombre restreint de combinaisons des typologies morpho-fonctionnelles existantes des tissus urbains ventilées à l'échelle de la commune. Pour dresser les bilans de la consommation d'énergie et des émissions de l'habitat/transport, ce modèle est enrichi par un sous-modèle mathématique liant la forme urbaine à des données de description des déplacements.

Maïzia *et al.* réalisent trois scénarios de consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 (cf. Figure 2-9). Le premier est tendanciel, le deuxième se rapporte à l'éloignement des ménages, et le troisième est un scénario de rapprochement. Les auteurs montrent, à travers l'analyse quantitative de ces scénarios, que certains paramètres de développement urbain constituent un important levier d'économie d'énergie et des outils qui pourraient améliorer l'efficacité énergétique à l'échelle de l'aire urbaine. Le nombre très important de combinaisons dans cette étude rend complexe la réalisation d'un catalogue typologique existant des formes des tissus urbains.

---

<sup>41</sup> RGB : recensements généraux de la population.

Figure 2-9 : Architecture générale du modèle prospectif, les gisements du développement urbain (2010)



Source : Maizia *et al.* (2010).

### 2.14.3 Modèle d'efficacité énergétique en Allemagne

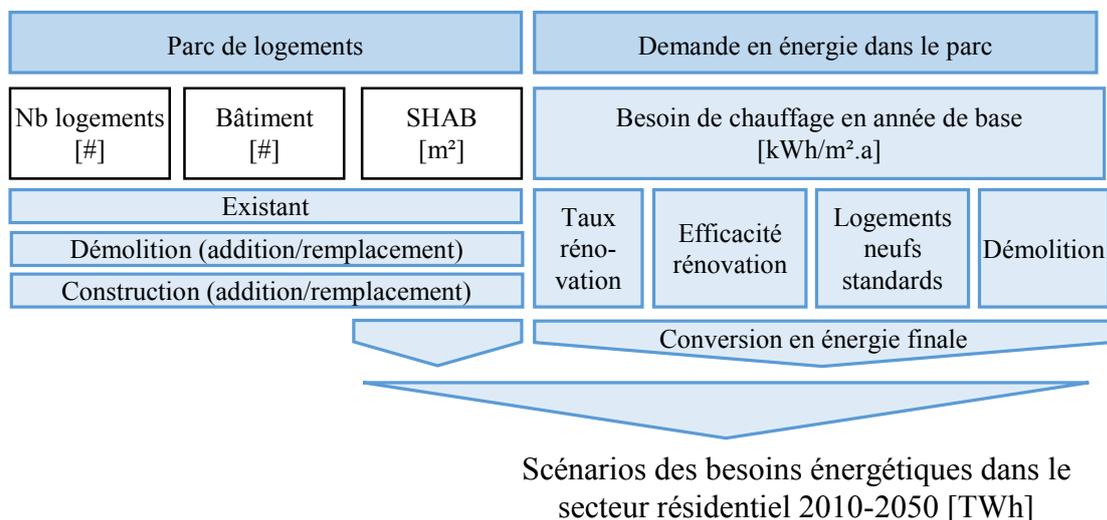
McKenna *et al.* (2013), en citant Bettgenhäuser (2011), examinent le rôle des mesures de rénovation des logements existants face aux politiques visant à réduire la demande d'énergie pour le chauffage de 20 % d'ici 2020, et celle de l'énergie primaire de 80 % en 2050, dans le secteur résidentiel en Allemagne. Selon ces auteurs, la pertinence de leurs calculs réside dans

la prise en compte de la dynamique du parc de logements. Leur méthode est basée sur des projections désagrégées des surfaces de plancher et des taux de démolition/rénovation dans le parc.

McKenna *et al.* considèrent que la désagrégation des typologies des logements existants (type d'occupation), ventilées en fonction des caractéristiques du bâti, est essentielle pour viser de manière précise les mesures de politique d'efficacité énergétique. De cette façon, leur modèle dynamique des taux et de l'étendue de la rénovation tient compte de certaines variables inhérentes aux typologies d'occupation des logements (maison unifamiliale/logement bifamilial/immeuble collectif) et à l'âge du bâtiment, comme un indicateur, d'une part, de l'état de la rénovation et de l'étendue de la rénovation, et, d'autre part, de la probabilité de la rénovation en fonction de l'âge de la construction.

Dans leur modèle développé *bottom-up*, la détermination des taux de rénovation par type de logement dépend de la combinaison de l'état du bâti, de la probabilité et de l'étendue des travaux de rénovation. La projection de la consommation de chauffage est basée sur l'évaluation de la consommation à l'état d'origine du logement et celle atténuée par la rénovation. Selon les auteurs, une telle configuration de combinaisons engendre des résultats avec un haut degré de précision (cf. Figure 2-10).

Figure 2-10: Architecture du modèle de McKenna *et al.* (2013)



Source : McKenna *et al.* (2013).

Les résultats tirés du modèle de McKenna *et al.* (2013) sont comparés à ceux de l'étude de Bettgenhäuser (2011), basés sur un taux de rénovation statique. Selon les auteurs, la projection d'un même taux de rénovation global, de l'équivalent de 1 % par an pour tout le parc de

logements jusqu'en 2050, donne des résultats différents. Le modèle *bottom-up* envisage une étendue de rénovation et une augmentation de la surface habitable nettement plus importantes que celles prévues par Bettgenhäuser. Les résultats du modèle, en ce qui concerne la demande totale d'énergie finale, sont pondérés. Signalons ici que les différentes simulations de la consommation d'énergie pour le chauffage donnent des quantités de consommation d'énergie désagrégées par segment du parc de logements.

À partir d'un jeu de scénarios, les auteurs montrent que les maisons unifamiliales ont un effet impactant dans les opérations de rénovation, en partie à cause du fait qu'elles ont une surface habitable et une demande en énergie (en mètres carrés) généralement plus élevées que celles des autres types de logements. Ainsi, une augmentation du taux de rénovation pour ce type de logement a un effet relativement plus important sur la réalisation des objectifs énergétiques que celui induit par les logements situés dans des immeubles collectifs. En outre, la plupart des maisons individuelles sont occupées par leurs propriétaires, ce qui signifie que la mise en œuvre de mesures de rénovation pour ce type de logement est relativement plus simple que pour les logements en immeubles collectifs.

McKenna *et al.* se différencie de Bettgenhäuser par le développement d'un modèle disposant d'un haut degré de précision, tant pour simuler la dynamique de rénovation du parc de logements allemand, que dans le détail des résultats, ce dernier permettant d'identifier assez précisément les mesures techniques d'efficacité énergétique. Toutefois, le modèle ne prend pas en compte le comportement des utilisateurs dans la mise en œuvre des mesures d'efficacité énergétique. De plus, l'augmentation de l'efficacité énergétique est modélisée essentiellement en agissant sur les mécanismes de perte de chaleur (l'enveloppe du bâtiment). Cependant, l'étude manque de détails concernant les informations relatives aux systèmes de chauffage et les bilans globaux des émissions de CO<sub>2</sub>.

Tableau 2-2 : Illustration de quelques exemples d'application du modèle *bottom-up*

Modèle	Approche de modélisation	Développeur	Année de base	Cible	Type de données d'entrées	Application	Scénarios
UKDCM	<i>bottom-up</i> Calcul ingénierie (BREDEM) <sup>42</sup>	Environnemental Change Institute (ECI), Université d'Oxford	1996	Réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO <sub>2</sub> pour 2050	Données désagrégées 20 000 combinaisons de types logements	Parc de logements du Royaume-Uni en 2050	3 scénarios : 1- <i>Business-as-usual</i> ; 2- 44 % de réduction de CO <sub>2</sub> ; 3- 25 % de réduction de CO <sub>2</sub> au-dessous du niveau de 1990.
ETHEL (modèle Betel « habitat »)	<i>bottom-up</i> Calcul ingénierie Archétype	UMR Cité (FRE 2408), de recherche sur l'environnement et le développement UMR N° 8568	1999	Facteur 4 global sur les émissions de CO <sub>2</sub> et la consommation d'énergie à l'horizon 2050	Données désagrégées Omphale, Insee	Parc de logements en France en 2050	Plusieurs scénarios : 1- scénario de référence ; 2- réhabilitation thermique du parc existant ; 3- solaire thermique pour l'ECS ; 4- contribution des cogénérations ; 5- potentiel des pompes à chaleur ; 6- forme urbaine.
L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel allemand : une analyse <i>bottom-up</i>	<i>bottom-up</i> Calcul ingénierie Archétype	Institut européen des recherches en énergie (EIFER), Allemagne.	2010	Réduire la consommation de chauffage de 20 %, et d'énergie primaire de 80 % à l'horizon 2050 ;	Parc de logements 2011-2050 (données du parc de logements en libre accès)	Parc de logements en Allemagne 2050	3 scénarios de rénovation du parc de logements : 1- rénovation totale 1 % en 2020 ; 2- SFH : unifamiliales de 1 % à 4 %, et multifamiliales à 8 %. 3- MFH : multifamiliales de 2 %.
Évaluation des options d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment du Liban	Modèle <i>bottom-up</i> LEAP (LEAP Long-range Energy Alternatives	Faculté de l'Architecture et de l'Ingénierie, université américaine de	2004	Baisser la consommation d'énergie à l'horizon 2040	Parc de logements 1994-2040, projection du Bureau libanais des statistiques	Parc de logements libanais 2040	3 scénarios : 1- scénario de référence ; 2- application partielle des normes thermiques pour les bâtiments ; 3- application totale des normes thermiques pour les bâtiments.

	Planning system)	Beyrouth, Liban.					
Potentiel d'atténuation des émissions de CO <sub>2</sub> dans le secteur de l'électricité en Turquie	Modèle <i>bottom-up</i> LEAP	Département de l'ingénierie environnementale et de génie civil, de l'université d'Istanbul	2006	Réduire les émissions de CO <sub>2</sub> du secteur de l'électricité en Turquie à l'horizon 2030	Données désagrégées du parc de génération de l'électricité en Turquie	Parc turc de génération d'électricité 2030	2 scénarios : 1- <i>Business as usual</i> ; 2- Ajout des ENR dans le parc électrique (sauf le solaire) pour l'atténuation des émissions de CO <sub>2</sub> ;
Évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur les bâtiments résidentiels aux Émirats arabes unis	<i>bottom-up</i> Calcul ingénierie Archétype.	Département de l'architecture et d'ingénierie de l'université des E.A.U.	2006	Effet du réchauffement climatique sur la consommation et les émissions	02 logements archétypes, du parc de logements de l'état d'Al-Ain aux E.A.U.	Parc de logements de l'État d'Al-Ain aux EAU 2050-2100.	4 scénarios d'augmentation de la température : 1- +1,6 °C à l'horizon 2050 ; 2- +2,3 °C à l'horizon 2100 ; 3- +2,9 °C à l'horizon 2050 ; 4- +5,9 °C à l'horizon 2100.

<sup>42</sup> BREDEM : Building Research Establishment Domestic Energy Model.

## Conclusion

À la lumière de cette analyse bibliographique, il semble que l'adoption de cette démarche d'analyse, dans un premier temps, s'avère un choix pertinent. Celui-ci est en effet étayé par la sélection d'une combinaison de méthodes d'analyse prospective sur lesquelles nous nous appuierons pour développer notre modèle prospectif. On a vu ensuite qu'outre les approches de modélisation *bottom-up* et *top-down*, il existe aussi un nombre important de méthodes de modélisation hybrides. Tous ces modèles ont bien entendu leurs avantages et leurs limites.

Dans ce travail, il apparaît que le recours au modèle *bottom-up* présente plusieurs avantages clés qui en font certainement l'outil le plus approprié. En effet, en se concentrant sur ce type de modélisation, on a montré, à travers plusieurs exemples, comment ce choix de modélisation se décline en fonction du contexte sectoriel, (résidentiel, tertiaire...), en désagrégeant les variables exogènes selon la version d'échelle, départementale, régionale ou nationale. De plus, par son architecture modulaire et son approche par ingénierie (caractéristiques physiques du bâtiment), il se présente comme un modèle robuste conçu pour répondre aux besoins multiples et évolutifs des politiques énergétiques, notamment dans le secteur résidentiel.

## Chapitre 3 Hypothèses et méthodologie

Ce travail se situe à l'interface de plusieurs disciplines de recherche : d'un point de vue théorique, il s'appuie sur les travaux d'analyse prospective<sup>43</sup> développés par Jacques Arcade et Michel Godet, et s'inspire pleinement des exercices réalisés selon une démarche prospective (notamment ceux de Traisnel *et al.*, 2010 ; Maïzia, 2007).

Le cadre théorique et les méthodes d'analyse permettent d'aborder et de traiter la problématique de la croissance de la consommation d'énergie et celle des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel en Algérie. Ils permettent en effet de construire un système de variables, selon lequel on peut :

- identifier les variables ayant le plus d'effet sur le couple consommation/émissions ;
- arrêter un jeu d'hypothèses précises ;
- établir divers scénarios prospectifs contrastés de consommation et d'émission.

Enfin, le but est de définir les leviers d'action en matière de politique énergétique susceptibles de réduire significativement la consommation et les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050.

### 3.1 Formulation des objectifs de recherche

Ce travail consiste à produire différents scénarios, dans les résidences principales, de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone, en se basant sur des hypothèses de généralisation des meilleures technologies disponibles (MTD) dans le parc de logements à l'horizon 2050. Ce travail est borné à la période 2008-2050, cette dernière permettant d'envisager les opérations dans le parc de logements sur une longue durée. Il s'agit de mesurer les effets :

- de la réhabilitation massive et progressive du stock de logements ;
- du renouvellement des équipements électroménagers.

---

<sup>43</sup> Cette démarche s'inspire d'un travail de Jacques Arcade (Proactivité conseil), cité par F. Plassard (2003), *Rétrospective de la prospective – La prospective dans le domaine des transports – Recherche critique*, Rapport pour le PREDIT.

L'exercice vise à tracer les trajectoires des consommations et des émissions, en exploitant au mieux les gisements d'économie d'énergie induits par la réhabilitation thermique du parc existant et en testant de nouvelles normes constructives dans le parc des logements neufs. Il s'agit de déterminer les leviers disponibles ainsi que les marges de manœuvre des politiques énergétiques susceptibles d'avoir une meilleure efficacité énergétique dans le secteur résidentiel.

## 3.2 Contexte spatio-temporel

### 3.2.1 Échelle spatiale

Appliquée en Algérie, cette thèse s'occupe exclusivement du secteur résidentiel. La désagrégation spatiale adoptée dans ce travail permet de rendre possible une lecture fine de la question étudiée : en ventilant le parc de logements sur les 48 départements du pays, nous proposons ainsi une échelle relativement réduite pour tous les exercices de modélisation et de simulation.

### 3.2.2 Contexte temporel

Toutes les études réalisées dans les années passées permettent de dresser une analyse rétrospective de la question observée. En effet, les données du RGPH (1998 et 2008) servent de base de données relativement fiable pour tracer toutes les évolutions possibles de la dynamique urbaine (démographie, parc de logements, etc.) et celles des consommations/émissions de CO<sub>2</sub>.

L'horizon temporel retenu dans ce travail est 2050. Ce choix se positionne dans une temporalité dictée par le protocole de Kyoto, à savoir réduire les consommations et les émissions à cet horizon. En outre, il inscrit cette recherche dans la perspective de nombreux travaux réalisés en Europe et dans le monde entier. De plus, une durée de presque quarante ans peut être considérée comme suffisante pour d'éventuelles réalisations de grande ampleur (par exemple, la réhabilitation massive du parc).

## 3.3 Étapes du travail de recherche

### 3.3.1 Construction d'un système de variables

À ce stade de travail, on s'intéresse tout d'abord à recenser les variables impactant de manière directe l'évolution de la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> dans le parc de logements. Ensuite, la construction d'un système de variables permettra, d'une part, d'identifier les « variables clés », auxquelles sont attribués des degrés de « maîtrise » et « d'incertitude » ; d'autre part, de distinguer, parmi les évolutions envisageables pour chaque variable clé, celles qui peuvent être assimilées à des « tendances lourdes » ou à des « leviers » technologiques disponibles. Cette grille d'analyse sera établie à l'échelle départementale pour tout le territoire national.

### 3.3.2 Construction d'un modèle dynamique de parc de logements

L'objectif de cette étape est de réaliser la simulation de la dynamique du parc de logements et d'estimer les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> induites.

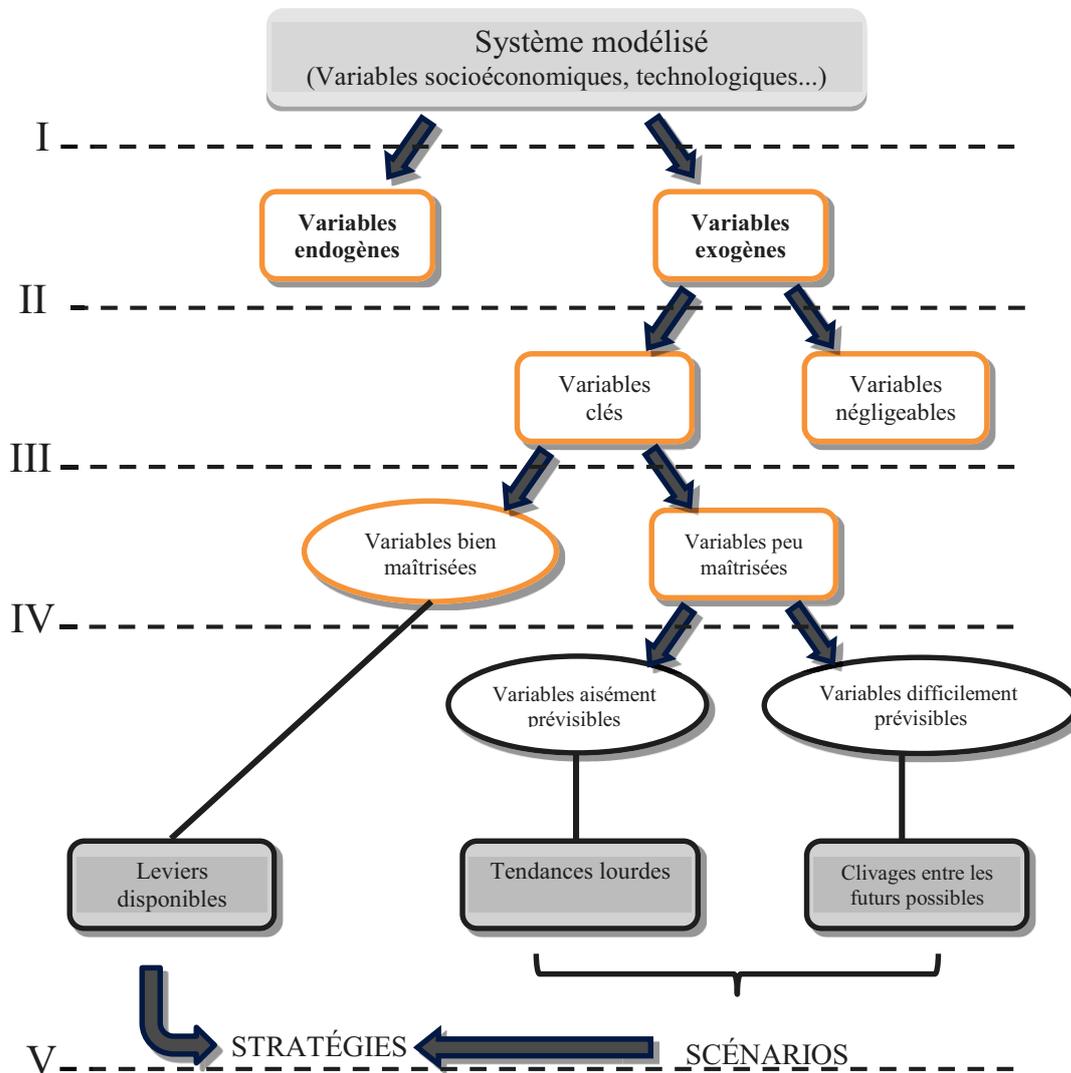
### 3.3.3 Scénarios prospectifs énergie/CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050

La simulation dynamique permet également de tester les leviers technologiques dans le bâtiment pour stabiliser ou réduire les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette étape consiste à établir des scénarios prospectifs énergie/CO<sub>2</sub> au regard de la croissance du parc de logements.

Le scénario tendanciel ou « laisser-faire » considère une poursuite linéaire du modèle énergétique actuel. Il s'agit d'une projection des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> des bâtiments résidentiels sans modification des systèmes constructifs et énergétiques, et ce, en écartant tout effet de levier technologique à l'échelle du bâtiment qui permette d'améliorer son efficacité énergétique. Ce scénario est considéré comme le plus défavorable et sert de référence aux autres scénarios.

Ceux-ci nécessitent la mise en œuvre des leviers technologiques disponibles à l'échelle du bâtiment et une mobilisation à l'échelle du parc de logements afin de réduire, le plus substantiellement possible, les niveaux de consommation et d'émissions.

Figure 3-1 : Processus de sélection des variables pour la construction de scénarios prospectifs (selon J. Arcade)



Source : Nicolas et Morice (2006).

### 3.4 Méthode prospective employée et hypothèses retenues

À l'instar des travaux de recherche Ethel et CLIP, ce travail de recherche adopte une méthode d'analyse structurelle afin de produire des scénarios fondés sur des extrapolations tendanciennes et des prévisions conditionnelles (« forecasting »).

La réalisation d'un exercice prospectif pourrait conduire à identifier un certain nombre d'hypothèses : variables endogènes et/ou exogènes. La simulation de nombreuses variables peut cependant parfois s'avérer une tâche lourde à réaliser. Or, la pertinence d'un tel exercice réside dans la manière dont son système de variables est établi et structuré. Afin de réaliser cette tâche, il nous semble judicieux de formuler nos hypothèses selon la grille d'analyse adoptée précédemment (cf. § 3.1. ci-dessus).

### 3.4.1 Hypothèses démographiques

Les jeux d'hypothèses et de projections de la population quant à la taille des ménages sont empruntés à l'ONS (Office national des statistiques algérien). Trois scénarios sont envisagés :

- un scénario central relatif à la population algérienne à l'horizon 2050 ;
- un scénario central de l'évolution du nombre d'occupants par logement à l'horizon 2050 ;
- un scénario prenant en compte l'évolution du nombre de ménages<sup>44</sup> par logement. En Algérie, la structure familiale est assez complexe, et le nombre de ménages par logement ne correspond pas au nombre de logements. En d'autres termes, un logement peut être occupé par un ménage « collectif » constitué d'une ou plusieurs ménages « ordinaire ». Ce scénario envisage un niveau de satisfaction de la demande de logement à l'horizon 2050 (un ménage ordinaire par logement).

En effet, la question de l'évolution de la structure des ménages en Algérie est extrêmement importante et repose sur des considérations culturelles et sociétales. Ici, la variabilité de la structure des familles que nous avons retenue peut doublement affecter notre modèle. Elle concerne : premièrement, la baisse substantielle de la taille des ménages ; deuxièmement,

---

<sup>44</sup> Il nous semble important de préciser que selon l'ONS : les ménages algériens peuvent être composés de ménages « ordinaires » ou de ménages « collectifs ». Cette classification est définie en fonction du nombre de ménages de même famille occupant un même logement. Notons que selon l'Insee, « Un ménage regroupe l'ensemble des occupants d'une résidence principale, qu'ils aient ou non des liens de parenté. Un ménage peut être composé d'aucune, une ou plusieurs familles. Un ménage composé d'une personne seule ou d'une unique famille est un ménage simple, sinon c'est un ménage complexe. Les personnes résidant dans une communauté (foyers de travailleurs, maisons de retraite, résidences universitaires, établissements pénitentiaires...) ou vivant dans des habitations mobiles (y compris les marinières et les personnes sans-abri) sont considérées comme vivant "hors ménage". »

l'accroissement rapide du nombre de ménages ordinaires sous l'effet de la décomposition des ménages collectives. En d'autres termes :

*« la famille algérienne a subi et continue de subir des modifications irréversibles dans ses structures. La mutation la plus décisive se situant au niveau d'une réduction vers l'unité du nombre de noyaux familiaux cohabitant. Le processus de nucléarisation est non seulement entamé, mais réalisé dans une large mesure »* (Khelladi et Safir, 1979).

### 3.4.2 Parc de logements

Pour étayer ces hypothèses et afin d'atteindre l'objectif de notre scénario de référence (un ménage ordinaire par logement à l'horizon 2050), on maintient la dynamique actuelle dans la construction de logements neufs, soit 200 000 logements par an (logements en immeubles collectifs et maisons individuelles), avec une accélération progressive de ce rythme de construction pour combler le déficit entre la demande de logements et le stock du neuf.

La projection du nombre de logements se fera selon le système constructif actuel tout en conservant la typologie existante des logements (y compris les constructions précaires, qui sont considérées comme des logements illicites sur les plans réglementaire et normatif).

On retient l'hypothèse de maintenir la présence de constructions précaires même à l'horizon 2050. Cette hypothèse peut sembler contestable et ne fait pas forcément l'objet d'un consensus. Cependant, ce choix se justifie par le fait que, parfois, la pression démographique implique le recours à des solutions provisoires de logement (constructions illicites). On peut en effet penser que ce segment de parc correspond au reliquat entre le nombre de nouveaux ménages et le nombre total de logements neufs construits. Cette hypothèse s'inscrit également dans un scénario « pessimiste », sachant que ce type de logement, par son état très vétuste, est *a priori* le plus énergivore.

### 3.4.3 Hypothèses socio-économiques

On admet ici que l'Algérie poursuivra la dynamique socio-économique actuelle jusqu'à l'horizon 2050. Le maintien de cette dynamique permet :

- à l'échelle macroscopique, de poursuivre la construction de logements neufs ;
- de maintenir le niveau de consommation des ménages.

### 3.4.4 Hypothèses générales du calcul énergétique à l'échelle urbaine

On part de l'hypothèse selon laquelle la consommation d'énergie n'est pas uniquement liée aux comportements individuels et rationnels (consistant à maximiser le niveau de confort dans le logement sous la contrainte de ce qu'autorise le niveau de revenu), mais qu'elle relève des qualités constructives des logements : l'habitation est en effet un bâti, lequel, à travers des normes de construction et d'équipement, contient des dispositifs d'isolation, de ventilation et de chauffage (Maresca *et al.*, 2009). Il s'agit de prendre en compte :

- les hypothèses relatives aux caractéristiques constructives des bâtiments (nature et composition de l'enveloppe, taux de vitrage, etc.) ;
- les hypothèses relatives aux modes d'habiter et aux scénarios d'occupation ;
- les hypothèses relatives au climat (localisation dans l'espace géographique national).

## 3.5 Caractéristiques constructives des bâtiments

Les échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement extérieur dépendent essentiellement de son enveloppe extérieure. Ces surfaces sont la principale source de déperditions énergétiques dans un bâtiment. L'enveloppe d'un bâtiment dépend principalement des systèmes constructifs et du contexte architectural, des caractéristiques des matériaux utilisés, de l'âge des constructions du bâti et des réglementations constructives en vigueur.

Ces paramètres, couplés aux données typologiques des logements (RGPH), autorisent la classification typologique des enveloppes des logements. L'analyse architecturale permet dans un premier temps de quantifier la surface de chaque élément (opaque ou vitré), sur la base d'un échantillonnage *in situ*, et de déduire la conductance des façades, de la toiture et des planchers à partir des matériaux employés.

### 3.5.1 Niveau d'isolation thermique des parois opaques

L'analyse de l'enveloppe d'un bâtiment permet de comprendre le comportement thermique de ce dernier avec son environnement extérieur, ainsi que de quantifier ces échanges thermiques. En effet, les écarts de température entre un bâtiment et son environnement extérieur permettent un transfert d'énergie sous forme de déperdition en période de chauffe ou d'apports énergétiques en période de refroidissement. Cependant, il est important de modéliser ces

transferts d'énergie pour pouvoir estimer les besoins au regard des conditions de confort, en hiver comme en été.

La formule de calcul des besoins calorifiques pour les occupants est la suivante :

$$\text{Besoins} = \text{déperditions} - \text{apports}$$

Les déperditions de chaleur dans un bâtiment dépendent principalement :

- de la température intérieure ;
- de la température extérieure ;
- de la qualité d'isolation du bâtiment ;
- du renouvellement de l'air ;
- de la surface de l'enveloppe.

### 3.5.2 Déperditions d'énergie par transmissions surfaciques

Le coefficient  $U_{\text{bât}}$  quantifie la transmission surfacique moyenne de l'enveloppe d'un bâtiment avec son environnement extérieur. Il représente la somme des flux de chaleur transférés à travers l'enveloppe d'un bâtiment, sous forme de déperdition de chaleur en hiver et de gains d'énergie en été.

Pour les logements en immeubles collectifs, on adopte ici les méthodes de calcul préconisées par la réglementation thermique algérienne. En effet, au regard des plans macroscopiques encadrant ces programmes de construction, tous ces logements ont la particularité d'être construits selon les réglementations en vigueur et de répondre aux normes de construction. On considère donc que tous les logements en immeubles sont réalisés selon les normes et sans réserves de malfaçon. En d'autres termes, pour alimenter notre modèle, les données techniques relatives aux enveloppes et surfaces des bâtiments sont prises à partir des documents techniques (plans, cahiers des charges, etc.) de ces bâtiments.

Le DTR<sup>45</sup> préconise des règles et des formules de calcul pour limiter toutes les formes de déperdition :

$$D_t = U \times A \times (t_i - t_e) \quad [W]$$

---

<sup>45</sup> DTR97 : Document technique et réglementaire.

Avec :

- U : coefficient de transmission surfacique du flux de chaleur à travers la paroi [W/°C] ;
- A : surface de la paroi de transmission de flux [m<sup>2</sup>] ;
- t<sub>i</sub> : température intérieure de consigne en [°C] (21 °C, selon la RT algérienne) ;
- t<sub>e</sub> : température extérieure de base selon la zone climatique, en [°C].

Remarque : le coefficient U remplace le coefficient K utilisé dans la réglementation thermique algérienne.

En ce qui concerne les autres types de logements dans le parc – à savoir : les maisons individuelles, les maisons traditionnelles et les constructions précaires –, on signale que ces types de logements ne sont pas conformes aux normes de la réglementation thermique algérienne. Dans ce cas, on détermine les valeurs des coefficients U de manière empirique *in situ*.

Bien entendu, le coefficient U<sub>bât</sub> dépend du type de matériau utilisé, de l'âge du bâtiment, de la surface de son enveloppe. Il est donc lié au coefficient de conductivité de chaque matériau composant l'enveloppe et sa surface de contact avec son milieu extérieur.

L'estimation du coefficient U<sub>bât</sub> pour tous les logements dans le parc conduit à recenser tous les logements disposants d'U<sub>bât</sub> identiques. Ensuite on multiplie celui-ci par le nombre de logements dans le parc. Or, cette tâche est extrêmement lourde, voire impossible à réaliser, en raison d'un nombre important de cas à recenser. Rappelons que cet exercice n'a jamais été réalisé pour le parc de logements en Algérie.

Afin d'estimer la conduction thermique moyenne relative aux logements dans le parc, on sélectionne plusieurs échantillons *in situ* de chaque type de logements (MI, MT et CP), situés dans les différentes zones climatiques. Ensuite, on calcule leur coefficient U<sub>bât</sub> (cf. Tableau 3-1).

Tableau 3-1 : Coefficient de déperdition surfacique existant par type de logement

Type de logements	Toiture	Plancher bas	Paroi	Porte	Porte-fenêtre
Logement en immeuble collectif	1,1	2,40	1,2	2,5	4,5
Maison individuelle (réglementaire)	2,0	2,40	1,2	2,5	4,5
Maison traditionnelle	2,0	2,40	1,4	2,5	4,5
Construction précaire	2,5	2,40	1,4	2,5	4,5

### 3.5.3 Déperditions d'énergie par renouvellement d'air

Les déperditions par renouvellement d'air représentent les pertes thermiques que subit un bâtiment à travers le mouvement de l'air de son intérieur vers l'extérieur. Le remplacement d'air vicié par l'air neuf dans un bâtiment est une condition essentielle pour assurer un niveau convenable de confort aux occupants. Or, ce renouvellement d'air, selon l'écart de température, engendre une déperdition d'énergie en période de chauffe, ou des apports calorifiques en période de refroidissement.

Selon la réglementation thermique algérienne, les déperditions par renouvellement d'air s'expriment comme :

$$D_r = 0,34 \times (Q_v + Q_{vs}) \times (t_i - t_e) \quad [W]$$

Avec :

- 0,34 correspond à la chaleur volumique de l'air en  $[Wh/m^3 \cdot ^\circ C]$  ;
- $Q_v$  : le débit spécifique de ventilation en  $[m^3/h]$  ;
- $Q_{vs}$  : le débit supplémentaire par infiltration due aux vents en  $[m^3/h]$  ;
- $t_i$  : la température intérieure de consigne en  $[^\circ C]$  (21  $^\circ C$ , selon la RT algérienne) ;
- $t_e$  : la température extérieure de base selon la zone climatique en  $[^\circ C]$ .

Le débit spécifique de ventilation  $Q_v$  pour un logement est donné par :

$$Q_v = \text{Max}[0,6 \times Vh ; V_{\text{réf}}] \quad \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

Avec :

- $V_h$  : le volume habitable en  $[m^3]$  ;
- $V_{réf}$  : le débit extrait de référence en  $[m^3/h]$ .

$$V_{réf} = \frac{5 \times Q_{vmin} + Q_{vmax}}{6} \quad \left[ \frac{W}{\text{°C}} \right]$$

Avec :

- $Q_{vmin}$  : le débit extrait minimal de référence en  $[m^3/h]$  ;
- $Q_{vmax}$  : le débit extrait maximal de référence en  $[m^3/h]$ .

Les valeurs du débit extrait minimal de référence  $Q_{vmin}$ , en fonction du nombre de pièces principales du logement, sont données dans le Tableau 3-2 ci-après :

Tableau 3-2 : Valeurs du débit extrait minimal de référence dans un logement

Nombre de pièces principales	1	2	3	4	5	>5
$Q_{vmin}$ en $[m^3/h]$	25	50	75	100	110	On ajoute 10 $m^3/h$ par pièce supplémentaire.

Source : DTR32 1997, Algérie.

Le débit extrait maximal de référence  $Q_{vmax}$  est la somme des débits extraits de chaque pièce de service du logement, dont les valeurs sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3-3 : Valeurs du débit extrait maximal de référence dans un logement

Nombre de pièces principales par logement	$Q_{vmax}$ en $[m^3/h]$			
	Cuisine	Salle de bains	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisance
1	75	15	15	15
2	90	15	15	15
3	105	30	15	15
4	120	30	15	30
5 et plus	135	30	15	30

Source : DTR32 1997, Algérie.

### 3.6 Apports internes et solaires

On recense ici principalement les apports énergétiques provenant de l'activité des occupants, ainsi que ceux induits par le fonctionnement des appareils électroménagers ou par

l'ensoleillement. Notons que ces apports peuvent être considérés comme un avantage quand ils contribuent aux besoins énergétiques pour le chauffage. En revanche, ces mêmes apports peuvent être vu comme une source d'inconfort pour les besoins de refroidissement.

Les apports énergétiques internes et externes sont exprimés par la formule suivante :

$$Q_t = Q_s + Q_r + Q_p + Q_e \quad [W]$$

Avec :

- $Q_s$  : les apports par l'énergie solaire des parois et vitres ;
- $Q_r$  : les apports par renouvellement d'air ;
- $Q_p$  : les apports par les occupants ;
- $Q_e$  : les apports par les équipements électriques.

### 3.6.1 Apports des occupants

Les apports d'énergie induits par les occupants sont considérés comme une source d'énergie sensible et latente. Ces apports dépendent essentiellement de l'activité à l'intérieur des bâtiments (cf. Tableau 3-4) mais aussi du nombre d'occupants et de la période d'occupation.

Concernant les occupants, c'est le niveau d'activité qui constitue le contenu calorifique du corps (convection, radiation, évaporation par respiration et sudation).

Les apports par les occupants sont exprimés dans la formule suivante :

$$Q_p = C_p \times P \times h_p \pm 1/1000 \quad [W]$$

Avec :

- $C_p$  : la chaleur dégagée par occupant en [W] ;
- $P$  : le nombre d'occupants ;
- $h_p$  : le ratio estimé de la présence moyenne par tranche de 24 heures, (par exemple, 0,33 représente une présence de 8 heures/24 heures) [sans unité].

On constate, dans le tableau ci-dessous, que la chaleur dégagée par les occupants varie en fonction de l'activité exercée, mais aussi de la période d'occupation (cf. Tableau 3-4). Les horaires d'occupation se répartissent entre deux types de fonction de la manière suivante :

- pour la fonction activité : la tranche horaire d'occupation est comprise entre 9 heures et 19 heures, et ce, 5 jours par semaine.
- la tranche horaire d'occupation d'un logement pendant la semaine est de 19 heures à 9 heures.

Les vendredis<sup>46</sup> et samedis, l'occupation est considérée comme permanente.

Tableau 3-4 : Gains dus aux occupants

Degré d'activité	Exemple d'application	Température sèche du local (°C)									
		28		27		26		24		21	
		Apports sensibles (Sen) et latents (Lat) en W/pers.									
		Sen	Lat	Sen	Lat	Sen	Lat	Sen	Lat	Sen	Lat
Assis, repos	Classe, salle de spectacle	51	51	57	45	62	40	67	35	76	27
Assis, travail très léger	Logement, bureau, hôtel, amphithéâtre	52	79	58	73	63	69	71	60	83	49
		52	94	58	88	64	83	74	72	85	62
Debout, marche Travail léger	Magasin, accueil Atelier, usine	60	102	66	96	72	91	82	80	93	70
		56	164	64	156	72	148	86	134	107	113
Travail assez pénible	Atelier, usine, salle de sport	79	214	88	205	97	197	112	181	135	158
Travail pénible	Atelier, usine, salle de sport	131	293	136	288	142	283	154	271	177	248

Source : DTR C 3-2, Algérie.

### 3.6.2 Apports par renouvellement d'air dans le cas du refroidissement

Le renouvellement d'air dans un local climatisé est nécessaire pour des problèmes d'hygiène. Il se fait en règle générale par la ventilation (naturelle ou mécanique) des locaux, ainsi que par infiltration, en introduisant de l'air extérieur dans le local climatisé. Il est source d'apport de chaleur sensible et latent dans le local à conditionner. Ici, il s'agit de la chaleur provenant essentiellement des entrées d'air à travers les ouvertures.

La quantité de chaleur journalière par renouvellement d'air est exprimée par la formule suivante :

$$Q_r = 0,34 \times 0,6 \times V_h \times (t_e - t_i) \quad [W]$$

<sup>46</sup> Le vendredi et le samedi sont les jours de fin de semaine (week-end) en Algérie.

Avec :

- 0,34 est la chaleur volumique de l'air en [Wh/m<sup>3</sup>.°C] ;
- $V_h$  : le volume habitable en [m<sup>3</sup>] ;
- $t_i$  : la température intérieure en [°C] ;
- $t_e$  : la température extérieure en [°C].

### 3.6.3 Apports de l'éclairage artificiel et des appareils électroménagers

Il est difficile d'estimer de manière exacte ces apports énergétiques à l'échelle d'un parc. Dans de nombreuses études, ces estimations sont basées sur l'éclairage artificiel et un nombre restreint d'équipements de base dans un logement.

L'éclairage artificiel constitue en effet une source d'énergie sensible. L'estimation de cette chaleur dépend principalement de la puissance du luminaire et de la période d'éclairage. Dans un logement, cette période est estimée à partir du moment où la luminosité intérieure est inférieure à 500 lux/m<sup>2</sup> (Maizia *et al.*, 2010). Or, la durée d'éclairage et sa puissance sont aussi liées aux spécificités géométriques, à l'emplacement géographique et à l'orientation du bâti, ainsi qu'à la profondeur des pièces de chaque logement. La mise en marche des appareils électroménagers dans l'habitat fournit également un apport énergétique. La chaleur provenant des équipements (en mode marche ou en veille) représente une source d'énergie sensible et latente. Dans un logement, la puissance fournie est liée au nombre d'appareils, à la puissance absorbée et à la période d'activation.

De manière simplifiée et approximative, Énergie plus<sup>47</sup> estime entre 6 et 9 W/m<sup>2</sup> la puissance en moyenne de la chaleur sensible transmise par l'appareil d'éclairage dans un logement. Cette estimation peut varier en fonction du type d'éclairage utilisé mais aussi de l'usage des surfaces éclairées. En ce qui concerne les équipements électroménagers, les apports de chaleur sont estimés à 6 W/m<sup>2</sup>. Ces estimations sont basées sur un nombre restreint d'équipements de base dans un logement. Signalons ici qu'on maintient cette valeur même si elle paraît relativement faible. Cette hypothèse s'inscrit également dans un scénario pessimiste de consommation de chauffage.

---

<sup>47</sup> Source : <http://www.energie-plus.com>.

D'après TNS Sofres, le nombre moyen d'appareils électroménagers par ménage est équivalent à 6. Les apports de chaleur dus à l'éclairage et aux équipements électroménagers installés sont exprimés par la formule suivante :

$$Q_e = P_e \times SHAB \quad [W]$$

Avec:

- $P_e$  : la chaleur dégagée équipement en  $[W/m^2]$  ;
- SHAB : la surface habitable en  $[m^2]$ .

### 3.6.4 Apports des parois opaques et vitrées

Dans le bâtiment, la chaleur transmise par les rayons solaires est considérée comme un important apport énergétique. Le transfert d'énergie se fait principalement à travers les parois vitrées et, dans une moindre mesure, à travers les parois opaques. La transmission de chaleur à l'intérieur d'un bâtiment se fait par convection à travers les parois extérieures et par rayonnement dans l'air ambiant.

Les charges thermiques transmises par les parois sont relativement importantes pour le calcul des besoins de refroidissement, voire même prépondérantes sur les charges de déperdition. La méthode présentée ici donne des valeurs calculées qui prennent en compte le flux solaire direct et diffus. Ces valeurs intègrent le déphasage et l'amortissement des apports thermiques effectifs par rapport aux apports thermiques instantanés. Ceci explique la raison pour laquelle les valeurs calculées sont supérieures à zéro après le coucher du soleil.

Les apports solaires représentent l'énergie transmise à travers l'ensoleillement des vitres et par la transmission des parois. Ils sont exprimés comme suit :

$$Q_s = Q_{ens} + Q_{tr} \quad [W]$$

Les apports dus à l'ensoleillement à travers une paroi vitrée  $Q_{ens}$  sont exprimés par :

$$Q_{ens} = I_s \times A_s \times F_s \times S \quad [W]$$

Avec :

- $I_s$  : le rayonnement total maximal réel pour l'orientation et la latitude considérées  $[W/m^2]$  (cf. Tableau 3-5) ;

- $A_s$  : la surface totale vitrée en  $[m^2]$  ;
- $F_s$  : le facteur de correction pour l'ombrage : le coefficient d'amortissement relatif aux gains de référence des parois vitrées pour l'orientation considérée – les valeurs de  $F_s$  sont données par le Tableau 3-6 – ;
- $S$  : le coefficient de correction en fonction du type de menuiserie (pour une menuiserie bois,  $S = 0,44$  ; pour une menuiserie PVC,  $S = 0,42$  ; pour une menuiserie métal,  $S = 0,46$ ).

Tableau 3-5 : Valeurs d'irradiation solaire moyenne journalière ( $I_s$ ) en  $W/m^2$

		Zone A	Zone B	Zone C	Zone D1	Zone D2
Janvier	Gloabl vitres	62	77	97	92	88
Juillet	Gloabl vitres	109	123	133	127	106

Source : Météo, Algérie.

Tableau 3-6 : Valeurs du facteur de correction pour l'ombrage

Type de locaux	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Logement, locaux à usage d'hébergement	0,95	0,26	0,31	0,44	0,68	0,62	0,43	0,30

Source : DTR C 3-2, Algérie.

Les apports d'énergie transmis par les parois  $Q_{tr}$  sont exprimés par :

$$Q_{tr} = U_{bât} \times S \times (t_e - t_i) \quad [W]$$

Avec :

- $U_{bât}$  : le coefficient de transmission de chaleur des parois en  $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$  ;
- $S$  : la surface des parois et vitres comptées de l'intérieur en  $[m^2]$  ;
- $t_i$  : la température intérieure de consigne en  $[^\circ C]$  (25  $^\circ C$  selon la RT algérienne) ;
- $t_e$  : la température extérieure en  $[^\circ C]$  ;

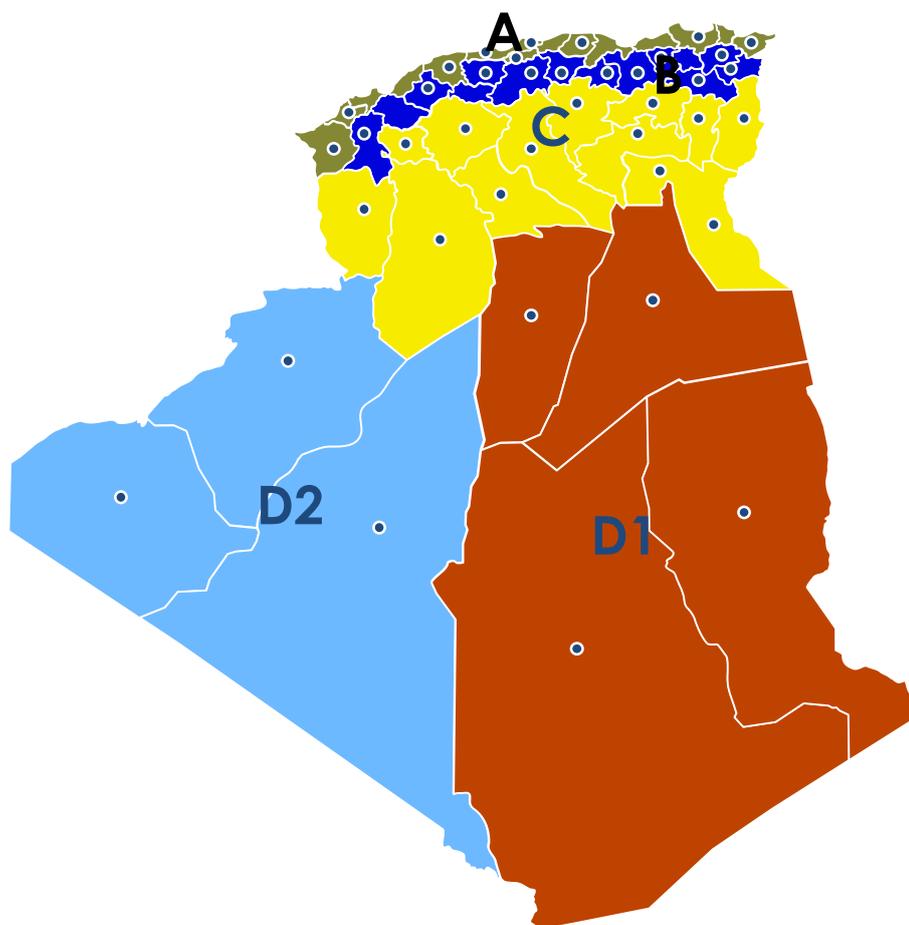
### 3.7 Hypothèses climatiques

Dans cette partie de travail, l'objectif fondamental est de calculer les besoins théoriques pour les consommations d'énergie annuelles concernant le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement pour tout le territoire national. Envisager un tel calcul de manière dynamique pour l'ensemble des 1 541 communes réparties sur les 48 wilayas du territoire algérien peut s'avérer trop ardu, et ce, du fait de la complexité des données désagrégées propres à chaque commune, qui pourraient être exigées lors des calculs. Nous nous sommes inspiré des méthodes de calcul des besoins énergétiques théoriques employées dans d'autres rapports de recherche et nous avons eu, ici, recours à une méthode statique de calculs conventionnels, qui nous a semblé inévitable.

L'emploi de la méthode des calculs statiques dans ce travail permet de désagréger les données météorologiques propres à chaque zone géographique à l'échelle d'une wilaya (département). Concrètement, la répartition de ces zones géographiques est faite selon un découpage national des zones climatologiques pour l'hiver et pour l'été : Zones A, B, C, D1 et D2 (cf. Figure 3-2).

---

Figure 3-2 : Zones climatiques selon la réglementation thermique algérienne



Source : Données Météo, Algérie.

---

Les données météorologiques désagrégées fournies par ce découpage, et notamment les températures en saison chaude et en saison froide, sont à la base de nos calculs des besoins théoriques d'énergie pour le chauffage, l'ECS et le refroidissement, en accord avec la réglementation thermique en vigueur en Algérie et en considérant une température intérieure (consigne) fixée à 21 °C en période de chauffe et à 25 °C en période de refroidissement.

Il existe plusieurs hypothèses sur les niveaux des températures estivales à l'horizon 2050 selon les zones climatiques. Certes, la prise en compte de ce facteur serait nécessaire pour des simulations plus réalistes du confort thermique. Malheureusement, l'absence d'estimation exacte quant à l'évolution des températures hivernales et estivales à l'horizon 2050 n'a pas permis de prendre en compte cet aspect dans la présente recherche. Les simulations des besoins

prospectifs de chauffage et de refroidissement seront effectuées selon les données climatiques actuelles à climat constant (Traisnel *et al.*, 2004).

En l'absence de référentiel climatique des degrés-jour (DJU) relatifs à chaque département du territoire algérien, on a employé la méthode dite « météo<sup>48</sup> », avec un calcul simple pour estimer le DJU pour chaque département. Dans cette méthode, le nombre de degrés-jour unifiés est déterminé par la formule suivante :

$$DJU_{21} = \sum_0^{n_i} n_i \times \theta_i. \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{jour}]$$

Avec :

- DJU = les degrés-jour unifiés de base (21 °C) en °C.jours ;
- $\theta_i$  = la température moyenne journalière  $\theta_i = (\theta_{\min} + \theta_{\max})/2$  ;
- $n_i$  = le nombre de jours à la température  $\theta_i$ .

Le Tableau 3-7 synthétise de manière détaillée la variation du DJU et du NJ (nombre de jours) de chauffage en fonction de la variation des températures moyennes mensuelles relatives à chaque zone climatique.

Tableau 3-7 : Récapitulatif des températures moyennes et des DJU de chauffage par zone

Zone	DJU Chauf	NJ Chauf	Jan	Fév.	Mar s	Avri l	Mai	Juin	Juil.	Aoû t	Sept	Oct.	Nov	Déc.
A	769	90	11,1	11,8	13,3	15,5	18,4	21,8	25,0	25,8	23,4	19,4	15,3	12,1
B	1 409	120	7,1	7,8	10,0	12,9	16,6	21,2	25,2	25,3	21,7	16,3	11,5	7,6
C	1 026	90	7,4	8,9	11,7	15,3	19,6	24,5	27,4	27,9	23,7	17,7	12,2	8,2
D1	365	30	11,2	15,7	17,1	21,5	26,2	30,5	31,8	31,6	28,1	22,3	16,3	11,8
D2	447	59	12,9	16,0	17,9	21,6	25,8	30,6	33,5	34,5	28,9	23,1	17,2	12,0

Source : Données Météo, Algérie.

### 3.8 Hypothèses retenues dans le modèle de prospective

La méthodologie adoptée dans ce travail repose sur un exercice de modélisation prospective. Avant d'aborder cette partie centrale de travail, il nous paraît important de procéder

<sup>48</sup> Méthode simple et conforme à la méthode réglementaire du Costic (Centre d'études et de formation pour le génie climatique et l'équipement technique du bâtiment).

à une présentation du modèle prospectif pour une implémentation numérique ultérieure. À l'instar de plusieurs modèles prospectifs (Ethel, Betel...), ce modèle s'appuie sur une approche empirique.

Notre modèle rejoint la démarche adoptée dans de nombreux modèles prospectifs (cf. *supra*). En effet, le modèle repose sur la relation causale qui existe entre les variables et peut être construite à partir de plusieurs corrélations. En d'autres termes, ce modèle s'appuie sur des entrants sociodémographiques (tendances lourdes) qui seront considérés comme des variables exogènes dans la scénarisation de l'évolution du parc de logements. Il s'agit de variables généralement issues de bases de données de recensement, comme celles de l'ONS. Ici, par exemple, le nombre de logements dans le parc est lié à la population et à la taille des ménages. Dans les prochaines étapes (chapitre 4 et chapitre 5), la clarification des diverses relations entre les variables de ce modèle permettra non seulement de présenter les tendances actuelles mais également d'engager une prospective à l'horizon 2050.

### 3.8.1 Population

La scénarisation du nombre de logements est basée sur un modèle que nous appelons ici « modèle départements » ; cette démarche revient à ventiler à l'échelle du département la population et à observer son évolution à l'horizon 2050. On ne retient qu'un seul scénario démographique de référence. Il est basé sur les hypothèses centrales de l'évolution de la population de l'ONS et celles relatives à la population en 2050, mais aussi sur le modèle de projection de la population par département à l'horizon 2030, réalisé par l'ONS.

Dans le scénario référentiel, la projection de la population départementale est effectuée selon les hypothèses du scénario central de l'ONS. Il s'agit de prolonger de manière linéaire, à l'horizon 2050, le nombre représentant la population départementale selon les taux d'évolution estimés dans le scénario central de l'ONS. Signalons que cette projection est également calée selon celle du nombre total représentant la population algérienne en 2050<sup>49</sup>.

---

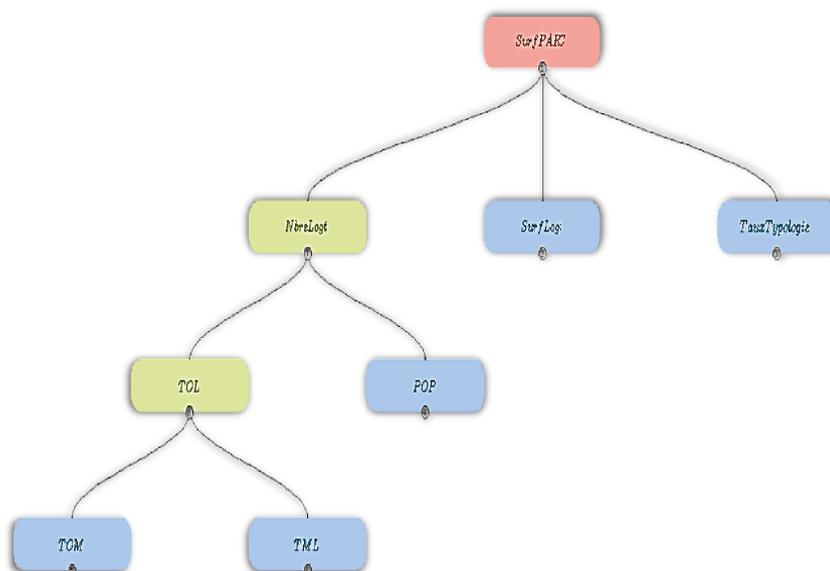
<sup>49</sup> Source : <http://populationpyramid.net/fr/algerie/2050/>.

### 3.8.2 Taille des ménages et nombre de logements

Le modèle prospectif du parc de logements découle de l'hypothèse selon laquelle l'accroissement du nombre de logements entre deux années est déterminé par l'augmentation du nombre de ménages. Outre la population, la taille des ménages est un facteur majeur dans la scénarisation du nombre de logements. Dans de nombreuses études, notamment Ethel, la taille des ménages est corrélée au nombre d'occupants d'une même famille (ménage ordinaire) dans un logement. Or, cet indicateur peut être lui-même lié à une autre variable quand il s'agit de cohabitation de plusieurs ménages dans un seul logement.

Dans ce cas de recherche et d'après les données du RGPH 2008, le nombre total des ménages est supérieur au nombre de logements occupés dans le parc. Cela démontre qu'un logement peut être occupé par un ou plusieurs ménages ordinaires. Il est donc clair que le taux d'occupation par logement (TOL) n'est pas lié seulement au nombre représentant la population ni à la taille du parc mais aussi au nombre de ménages par logement (TML). En effet, c'est une nouvelle variable qui s'ajoute à celle de la population et du taux d'occupation des ménages (TOM). Celle-ci sera prise en compte lors de la projection de la taille du parc de logements à l'horizon 2050 (cf. Figure 3-3).

Figure 3-3 : Architecture du modèle d'estimation du nombre de logements



Source : Architecture du modèle réalisé avec Toaster Systems (Maïzia, 2014).

Le modèle reconstitue la demande de logements par typologie désagrégée à l'échelle départementale, et ce, en se basant sur la taille des ménages de 2008, définie par le RGPH. Or, en l'absence de données sur la taille des ménages ventilées par typologie de logement, le modèle admet une taille moyenne des ménages identique pour tous les segments du parc. Ce modèle s'appuie sur l'hypothèse de la diminution progressive de la taille des ménages. La méthode employée dans les projections repose donc sur un taux de diminution de la taille des ménages pour tout le territoire algérien, ventilé par département. Ces taux s'appuient sur des analyses rétrospectives des RGPH antérieurs. Cette méthode a comme avantages d'établir des valeurs propres relatives aux caractéristiques de chaque département, et de respecter l'équilibre général des territoires.

Dans ce modèle, le scénario référentiel adopté ne s'appuie pas seulement sur le sous-peuplement des logements des occupants dans le cas d'un ménage ordinaire (simple), mais aussi sur la réduction progressive du taux de ménages par logement dans les situations de cohabitation de plusieurs ménages. Cette variable (TML) est rarement prise en compte dans les modèles démographiques réalisés en Europe, et particulièrement en France, en raison de l'absence de situation de cohabitation des ménages (un logement est souvent occupé par un seul ménage, constitué d'une seule famille). Signalons que cette situation est généralement liée aux facteurs culturels ou socio-économiques, notamment le déficit du stock et de la construction de logements neufs face à l'accroissement du nombre de ménages.

La tendance observée prévoit une baisse progressive du taux de ménages par logement, c'est-à-dire une situation de « nucléarisation » des ménages (famille) collectives (Guetta et Megdiche, 1990). Ce taux représente une variable supplémentaire, laquelle s'ajoute au nombre de ménages ainsi qu'au nombre représentant la population. Il aura un effet accélérateur sur les besoins en logements à divers horizons.

Il est donc clair que le nombre de logements dépend du nombre de ménages par logement et du nombre de personnes par ménage. L'estimation du nombre de logements s'exprime par la formule suivante :

$$Logt(t) = \sum_{1}^{dept=48} \frac{Pop(t, dept)}{TOM(t, dept) \times TML(t, dept)}$$

$$Logt(t + 1) = \sum_1^{dept=48} \left( Logt_{IC,MI,MT,CP}(t, dept) \times (1 + Taux_{IC,MI,MT,CP}(t, dept))^{t-2008} \right)$$

$$\forall t \in \{2008, \dots, 2050\}, \{dept = 1: 48\}$$

Avec :

- Pop : la population en 2008 ;
- TOM : le taux d'occupation par ménage ;
- TML : le taux de ménages par logement.

### 3.8.3 Surfaces habitables

L'estimation des besoins énergétiques d'un logement dépend aussi de sa surface habitable. Cette dernière est donc une variable primordiale, dans cet exercice, pour l'estimation des apports internes ou des déperditions. La modélisation des besoins énergétiques dans le parc est liée également à la variation de la surface unitaire de logement. On va voir plus loin qu'en effet, les besoins de chauffage, de refroidissement ou d'éclairage sont corrélés à la surface habitable.

Les données des RGPH ne prennent pas en compte le recensement de la surface habitable. En raison de cette absence, on procède à un échantillonnage *in situ* des surfaces habitables ventilées par type de logement. En ce qui concerne les logements en immeubles collectifs. On prend en compte les surfaces moyennes des logements selon les cahiers des charges de réalisation établis par le ministère de l'Habitat algérien (cf. Tableau 3-8) .

Pour la projection de la surface de l'ensemble du parc de logements à l'horizon 2050, on considère que les surfaces moyennes par type de logement sont stables ; ainsi, l'augmentation de la surface totale du parc dépendra uniquement du nombre de logements.

Tableau 3-8 : Surface unitaire moyenne par type de logement

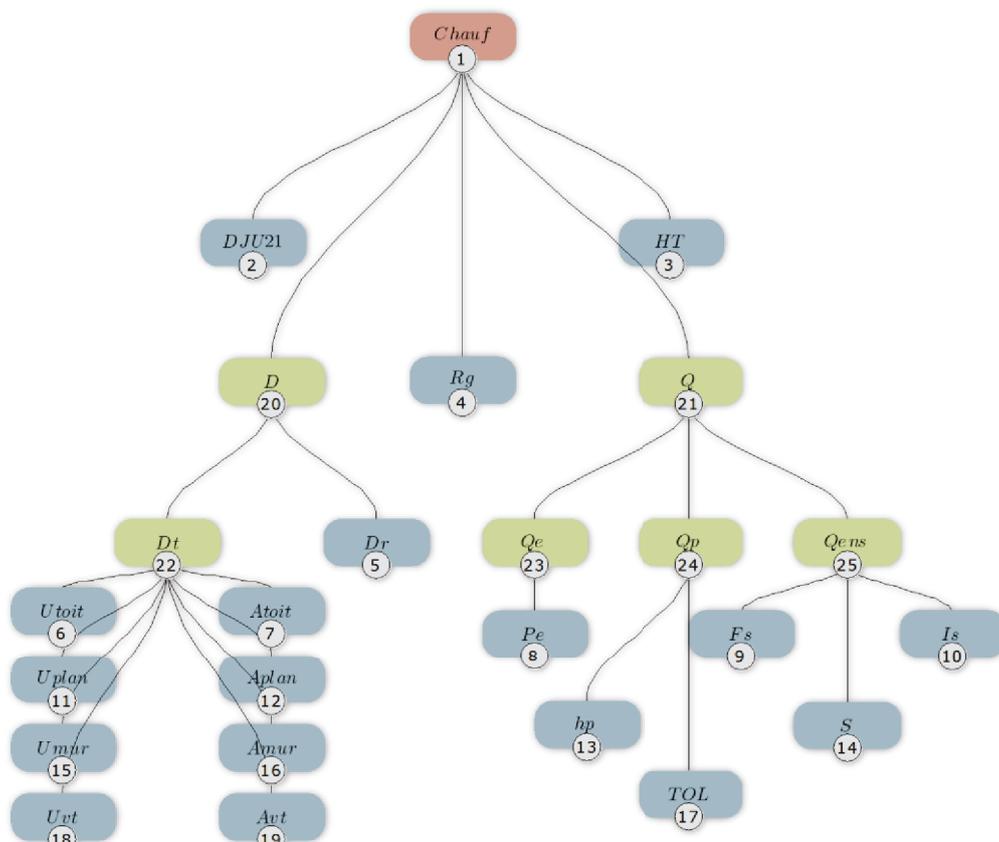
Types de logements	Logements en IC	Maisons individuelles	Maisons traditionnelles	Constructions précaires
Surfaces unitaires	65,39	144,00	120,00	50,00

## 3.9 Hypothèses et méthodes d'estimation des besoins énergétiques

### 3.9.1 Consommations d'énergie pour le chauffage

Le calcul de la consommation d'énergie pour le chauffage s'appuie sur les hypothèses (climatique, démographique, etc.) développées précédemment, associées aux méthodes de calcul préconisées par la réglementation thermique algérienne (DTR 97). Cette méthode emploie des calculs en mode statique, ce qui signifie que les apports et les déperditions sont en état stationnaire, sans prise en charge des variations subies par le bâtiment ni des changements intervenus dans le mode de fonctionnement des équipements. Notons que la méthode de calcul statique cherche à réduire les variations de ces composantes thermiques dans le temps. Cette méthode a en effet l'avantage d'être relativement simple à appliquer dans la modélisation énergétique des bâtiments moins complexes, à l'image de notre parc de logements (cf. Figure 3-4).

Figure 3-4 : Modèle de consommation d'énergie pour le chauffage $\psi$



Le calcul de la consommation d'énergie pour le chauffage s'effectue comme suit :

$$\text{Chauf} = 24 \times \frac{\text{DJU}_{21} \times (\text{D}_t + \text{D}_r) - \text{HT} \times (\text{Q}_e + \text{Q}_p + \text{Q}_{\text{ens}})}{\text{R}_g \times 1000} \quad [\text{kWh}]$$

Avec

- $\text{DJ}_{21}$  : les degrés-jour unifiés de base (21 °C) en [°C.jours] ;
- $\text{D}_t$  : les déperditions par transmission surfacique du bâti en [W/°C] ;
- $\text{D}_r$  : les déperditions par renouvellement d'air du bâti en [W/°C] ;
- $\text{HT}$  : le nombre de jours de chauffage en [J] ;
- $\text{Q}_e$  : les apports des occupants en [W] ;
- $\text{Q}_p$  : les apports d'éclairage artificiel et des équipements en [W] ;
- $\text{Q}_{\text{ens}}$  : les apports d'ensoleillement des parois opaques et vitrées en [W] ;
- $\text{R}_g$  : le rendement général de l'installation de chauffage.

Concernant l'énergie utilisée dans ce poste de consommation, on admet que le gaz (naturel ou butane) est la principale source d'énergie pour répondre aux besoins de chauffage. Ainsi, en fonction du taux de raccordement en gaz naturel, on estime le type de gaz utilisé. Rappelons que nous disposons dans ce travail des taux de raccordement au réseau de gaz naturel pour tout le territoire, désagrégés à l'échelle départementale. Ces données ne sont pas détaillées par type de logement. En revanche, elles excluent le segment des constructions précaires du nombre total de logements raccordés au gaz naturel. Ceci explique que le taux de raccordement au GN ne concerne que les types de logements restants. Pour les logements non raccordés au réseau de gaz, on maintient l'hypothèse d'un recours général au gaz butane.

### 3.9.2 Eau chaude sanitaire

Il est assez difficile de cerner avec suffisamment de précision les besoins en eau chaude sanitaire car ceux-ci sont fonction du nombre d'occupants, de leurs âges respectifs, de leurs professions, de leur mode de vie, du jour de la semaine (ouvrable, week-end ou férié), de la saison, et de bien d'autres circonstances encore.

De nombreuses méthodes ont été développées pour exprimer les besoins en énergie pour la production de l'eau chaude sanitaire. On emprunte ici la méthode de calcul conventionnel des besoins théoriques en énergie utile (kWh/an/pers). D'après cette méthode, ces besoins d'énergie

sont liés au nombre de personnes par logement, à la surface habitable (SHAB) mais également à la température moyenne annuelle de l'eau. Ici, on considère que la température de l'eau est proche de celle de l'air.

La consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire est calculée selon la méthode dite « DPE-3CL ». Elle est exprimée par les formules suivantes :

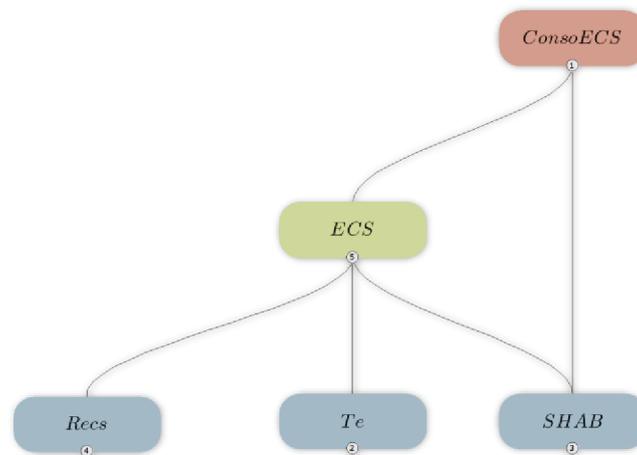
$$ECS = \frac{1,163 \times Q_{ecs} \times (40 - T_{ef}) \times 48}{R_{ecs} \times 1000} \quad [\text{kWh}]$$

Avec :

$$Q_{ecs} = 470,9 \times \ln(\text{SHAB}) - 1075$$

- $T_{ef}$  : la température de l'eau froide en [°C] ;
- SHAB : la surface habitable en [m<sup>2</sup>] ;
- $R_{ecs}$  : le rendement du système de production d'eau chaude sanitaire (cf. Figure 3-5).

Figure 3-5 : Modèle de consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire



### 3.9.3 Refroidissement

Concernant le climat algérien, la question du confort hygrothermique n'est pas réservée exclusivement aux besoins de chauffage. Les données météorologiques montrent un accroissement progressif des températures du nord vers le sud, qui atteignent parfois plus de 45 °C au mois de juillet. En nous basant sur une température de consigne de 25 °C préconisée par la réglementation algérienne en période estivale, nous admettons un besoin généralisé de

refroidissement dans tout le territoire. Ce besoin est substantiel pour les zones du Grand Sud (zones D1 et D2) (cf. Tableau 3-7 et Tableau 3-9).

Tableau 3-9 : Récapitulatif des températures moyennes de refroidissement par zone

Zone	Nbre de jours de Refroidissement	Jan.	Fév.	Ma.	Av.	Ma.	Juin	Juil.	Ao.	Sep.	Oct.	Nov	Déc.
A	27	11,1	11,8	13,3	15,5	18,4	21,8	26,0	25,8	23,4	19,4	15,3	12,1
B	27	7,1	7,8	10,0	12,9	16,6	21,2	27,2	25,3	21,7	16,3	11,5	7,6
C	75	7,4	8,9	11,7	15,3	19,6	24,5	27,4	27,9	23,7	17,7	12,2	8,2
D1	145	11,2	13,7	17,1	21,5	26,2	30,5	31,8	31,6	28,1	22,3	16,3	11,8
D2	132	11,9	15,0	17,9	21,6	25,8	30,6	33,5	34,5	28,9	23,1	17,2	12,0

Source : Météo Algérie.

Les besoins de refroidissement dépendent de la température de consigne et de celle de l'extérieur en fonction de la zone climatique, de la qualité de l'enveloppe du bâtiment et des charges intérieures et solaires.

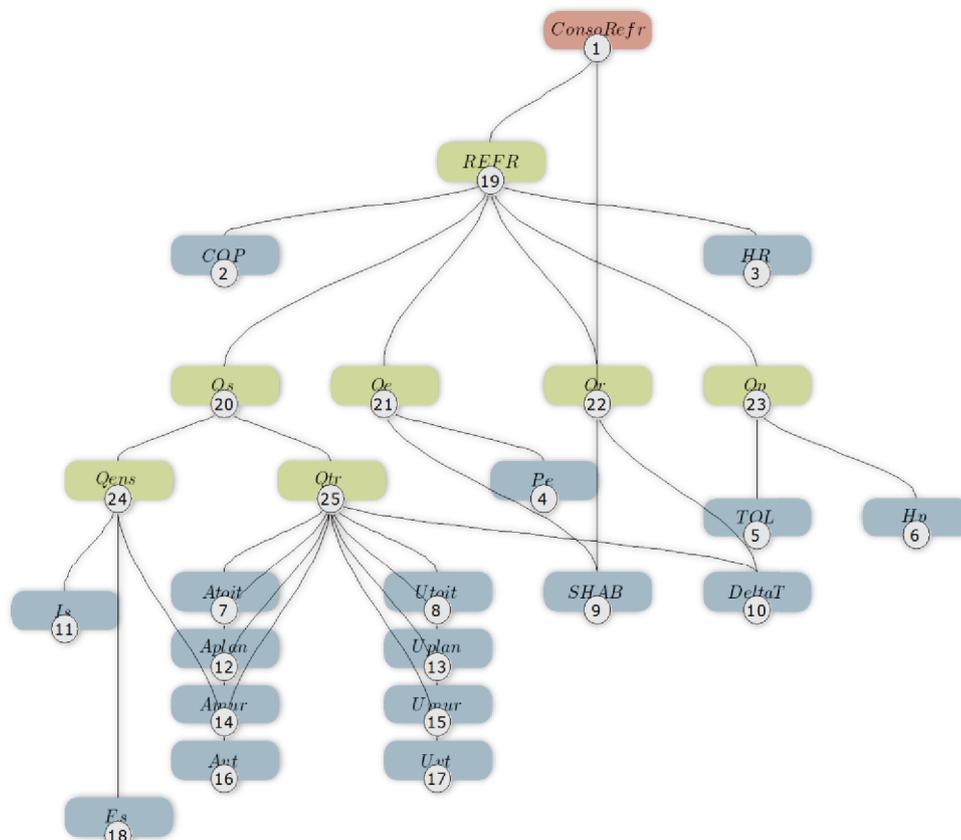
Calculer les besoins d'énergie pour le refroidissement, c'est faire l'inventaire de la quantité de chaleur à extraire de l'intérieur d'un logement pour maintenir constante la température à 25 °C. Il s'agit de calculer la somme des apports de chaleur internes et solaires dans un logement, afin d'estimer la puissance frigorifique ainsi que les besoins énergétiques annuels nécessaires pour le refroidissement.

Comme cela a été évoqué précédemment, les apports thermiques comprennent 5 types principaux de charges :

- les apports thermiques par les parois vitrées, qui sont souvent prépondérants ;
- les apports thermiques par les parois opaques ;
- les apports thermiques dus au renouvellement d'air ;
- les apports thermiques dus aux occupants ;
- les apports thermiques dus à l'éclairage et aux appareils électroménagers (cf.

Figure 3-6).

Figure 3-6 : Modèle de consommation d'énergie pour le refroidissement



Les apports solaires par ensoleillement et les apports solaires par transmission sont pris en compte, contrairement au calcul réalisé pour les besoins en chauffage, dans le calcul des besoins d'énergie pour le refroidissement. L'estimation des apports solaires est liée à l'intensité du rayonnement solaire, mais aussi à l'orientation du bâtiment. À l'échelle du parc, la prise en compte de toutes les orientations relatives aux différents segments du parc en fonction de leurs localisations climatiques peut paraître une tâche lourde et difficile à réaliser. Ici, on admet une valeur moyenne du facteur de correction d'ombrage pour les quatre orientations (cf. Tableau 3-6 ci-dessus). Certes, cette méthode ne fera pas l'objet d'un consensus si un calcul précis des apports d'ensoleillement à l'échelle microscopique d'un bâtiment est nécessaire, mais il nous semble tout à fait acceptable à l'échelle macroscopique. Notre modèle considère que toutes les orientations dans un bâtiment sont équiprobables, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune préférence d'orientation pour un bâtiment.

La consommation d'énergie pour le refroidissement est exprimée par la formule suivante :

$$\text{Refr} = 24 \times \frac{\text{HR} \times [\text{Q}_p + \text{Q}_r + \text{Q}_e + \text{Q}_s]}{\text{COP} \times 1000} \quad [\text{kWh}]$$

Avec :

- HR : le nombre de jours de refroidissement en [jour/an] ;
- $\text{Q}_e$  : les apports des occupants en [W] ;
- $\text{Q}_p$  : les apports d'éclairage artificiel et des équipements en [W] ;
- $\text{Q}_s$  : les apports solaires par transmission et par ensoleillement en [W] ;
- COP : le coefficient de performance de refroidissement de l'installation.

### 3.9.4 Cuisson

Dans le modèle de consommation d'énergie pour la cuisson, on considère que les besoins d'énergie utile pour ce poste dépendent uniquement de la capacité de l'appareil de cuisson et de la fréquence d'usage. D'après le RGPH, tous les ménages algériens ne disposent pas du même niveau d'équipements de base pour la cuisson. Il nous paraît donc pertinent de prendre en compte la variable qui concerne, pour les ménages, le facteur de possession d'appareils de cuisson.

Rappelons qu'ici, le nombre de ménages n'est pas identique à celui des logements. On maintient ici cette forme de cohabitation des ménages mais avec une forme d'autonomie, c'est-à-dire que chaque famille dispose de ses propres équipements. Il est important de signaler que l'estimation des besoins d'énergie pour la cuisson est liée au nombre de ménages et non à celui des logements.

Le calcul de la consommation d'énergie pour la cuisson est exprimé par la formule suivante :

$$\text{CUIS} = \text{Puis} \times \text{Fusag} \quad [\text{kWh}]$$

Avec :

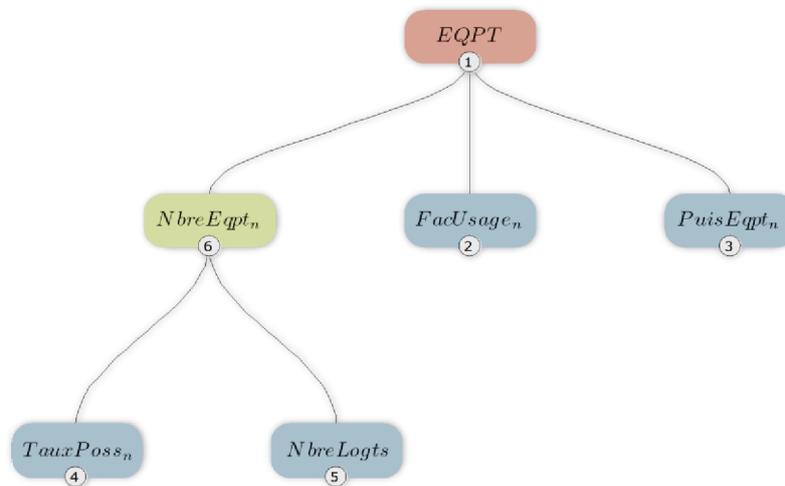
- Puis : la puissance en [W] ;
- $\text{F}_{\text{usag}}$  : la fréquence d'usage en [heures/jour].

### 3.9.5 Éclairage et équipements électroménagers

Notre modèle d'estimation des besoins pour l'éclairage rejoint la méthode simplifiée et utilisée par l'APRUE. Elle consiste à estimer les besoins énergétiques sur la base d'une estimation moyenne du nombre d'ampoules et de leur durée d'utilisation. Rappelons que le besoin d'éclairage, à l'intérieur d'un logement, est basé sur un seuil de luminosité moyenne de 500 lux/m<sup>2</sup> (cf. § 6.3).

En ce qui concerne les besoins en énergie des appareils électroménagers, ceux-ci sont liés à la puissance des appareils et aux fréquences d'utilisation. En revanche, la variable la plus discriminante entre les ménages est le taux de possession d'équipements. La variation du taux de possession d'appareils électroménagers est liée systématiquement au niveau de revenu des ménages. On ne dispose pas de données désagrégées relatives au nombre d'appareils électroménagers par segment de logement. Pour cette raison, la méthode employée consiste à sélectionner un nombre limité d'appareils électroménagers « de base ». L'estimation des besoins en énergie dépend donc de la puissance de chaque appareil, mais aussi de la durée d'utilisation (cf. Figure 3-7).

Figure 3-7 : Modèle de consommation d'énergie des appareils électroménagers



Le nombre d'appareils électroménagers dans le parc nous donne un taux de possession moyen à l'échelle du département, relatif à chaque type d'appareil et au nombre de ménages. Signalons ici que la cohabitation des ménages peut engendrer un effet de suréquipement dans certains

logements. Cet effet conduit non seulement à une surconsommation d'énergie, mais aussi à la majoration des apports calorifiques internes.

La consommation d'énergie pour les appareils électroménagers est exprimée comme suit :

$$EQPT = \sum_0^n P_{eqpt}(n) \times F_{usag}(n) \quad [kWh]$$

Avec :

- $P_{eqpt}$  : la puissance par appareil en [W] ;
- $F_{usag}$  : la fréquence d'usage en [heures/jour] ;
- $n$  : le type d'appareils électroménagers.

### 3.10 Architecture générale du modèle prospectif

L'architecture générale du modèle prospectif est fondée essentiellement sur un couplage du sous-modèle de parc de logements avec celui des besoins énergétiques. La structure du modèle repose sur des relations déterministes construites à partir d'observations empiriques.

Comme nous l'avons évoqué au début de cette partie, la modélisation prospective repose sur un modèle désagrégé à l'échelle des départements. Les départements deviennent l'objet d'un développement urbain et poursuivent leur évolution selon des dynamiques observées entre 1998 et 2008. Celles-ci déterminent la structure du parc de logements en termes de typologie et de besoins énergétiques, tout en respectant les plafonds fixés par le scénario central de l'ONS (cf. Figure 3-8).

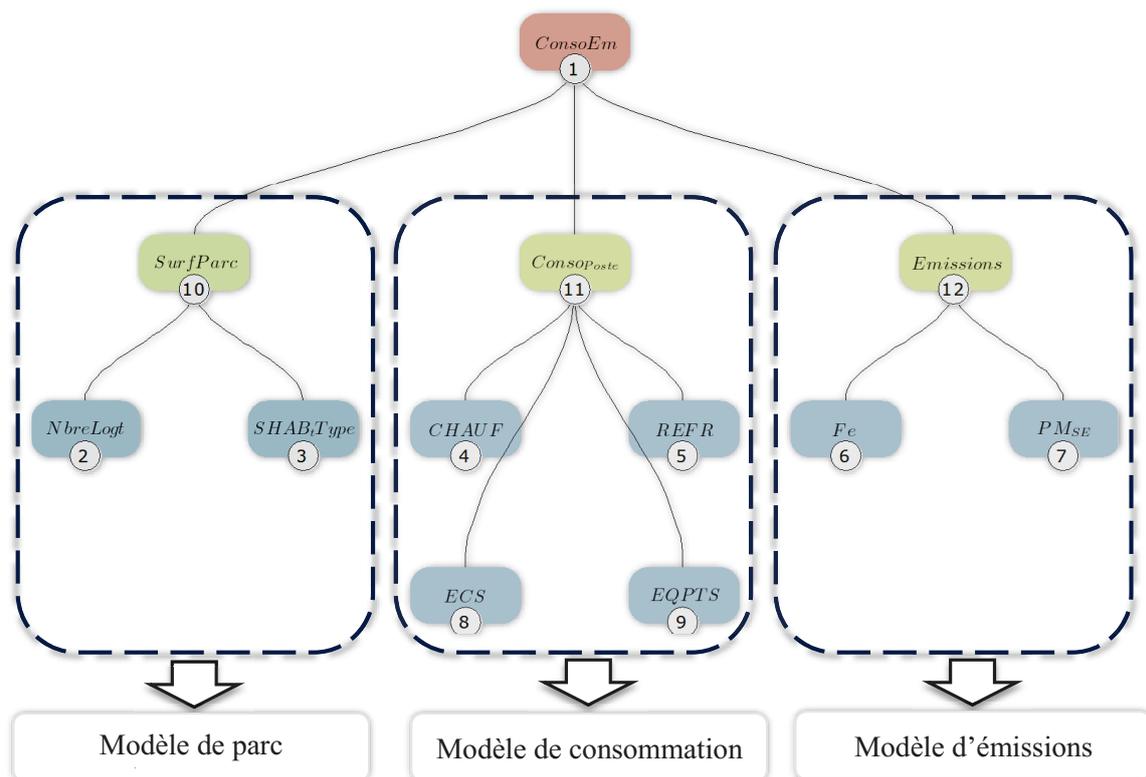
Notre modèle dynamique complet prend en compte à la fois les variables liées au parc de logements et celles liées aux besoins d'énergie. C'est un modèle de prospective fondé sur un processus de simulation des besoins énergétiques et des émissions, qui se base sur les projections du nombre de logements et de ménages réalisées plus haut. Il considère l'ensemble des départements du territoire national comme des cibles.

À ce titre, cette modélisation prospective nécessite la construction virtuelle d'un parc de logements neufs en plus de celui existant, sur lequel on construit différents scénarios de diminution des besoins d'énergie, notamment pour le chauffage, l'ECS, le refroidissement, la cuisson et les équipements électroménagers, ainsi que les émissions qui en découlent. En

d'autres termes, il s'agit de tester différentes solutions d'amélioration de la performance énergétique dans le bâti (parc existant et parc du neuf), en choisissant les meilleures technologies disponibles (MTD), afin de mesurer leurs impacts sur la diminution des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050.

Le scénario tendanciel « laisser-faire » revient, par cette approche, à maintenir l'évolution des besoins énergétiques du parc de logements en poursuivant les tendances actuelles en termes de caractéristiques de l'enveloppe bâtie et de systèmes de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire, etc. *A contrario*, un scénario contrasté équivaut à sélectionner un ensemble d'hypothèses technologiques pour améliorer la performance énergétique. Dans ce dernier cas, le modèle impose la construction virtuelle d'un parc de logements neufs et l'amélioration de la performance du parc existant en fonction des objectifs prospectifs, en termes de consommation d'énergie et d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon retenu.

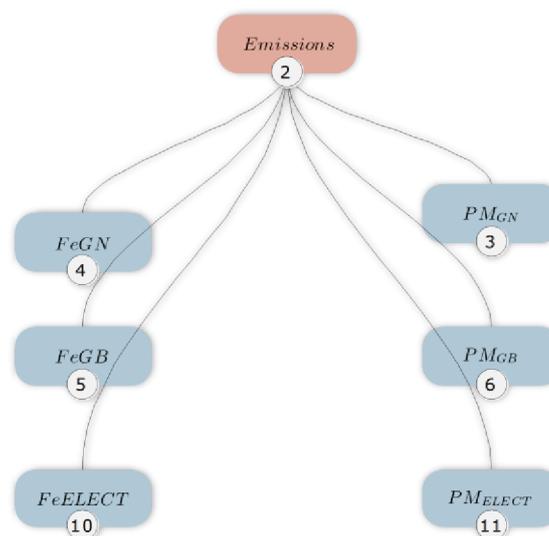
Figure 3-8 : Couplage de sous-modèles de consommation/émissions au parc de logements



### 3.11 Hypothèses et méthodes de calcul des émissions de CO<sub>2</sub> dans le bâtiment

Conformément aux conventions de calcul des émissions dans le bâtiment, le modèle des émissions de CO<sub>2</sub> ne prend en compte que les émissions directes, négligeant les émissions des cycles en amont pour les combustibles fossiles, et celles en amont et en aval pour l'électricité (l'extraction des fossiles, la transformation, le transport et la distribution). En d'autres termes, ce modèle ne prend en compte que l'énergie finale consommée dans le bâtiment dans les différents postes de consommation : chauffage, ECS, refroidissement, cuisson et appareils électroménagers (cf. Figure 3-9).

Figure 3-9 : Architecture modèle des émissions de CO<sub>2</sub>



Le modèle s'appuie sur la méthode du contenu en CO<sub>2</sub> du kWh pour l'estimation des émissions, en faisant référence aux valeurs adoptées par le GIEC (cf. Tableau 3-10). Notons que nous ne disposons pas de données désagrégées relatives aux types d'énergie dans le parc.

Dans ce travail, on a opté pour une méthode de calcul simplifiée. Pour les logements raccordés aux réseaux de gaz naturel, on admet l'utilisation de ce type d'énergie pour le chauffage, la cuisson et l'ECS. Pour le reste du parc, on suppose le recours au gaz butane pour le chauffage et la cuisson, et à l'électricité pour l'eau chaude sanitaire. On calcule les émissions en fonction des consommations par source d'énergie, relativement au facteur d'émission propre à celle-ci.

Il existe certes d'autres formes d'énergie utilisées – par exemple : le pétrole (mazout, essence) ou le bois pour le chauffage, la cuisson ou pour la production de l'électricité (groupe électrogène). Cependant, elles restent très rarement utilisées comme principales sources d'énergie dans le parc, et représentent des taux très faibles dans le mix énergétique. Pour cette raison, les émissions induites par la combustion de ces types d'énergie ne sont pas prises en considération dans cette recherche.

Concernant l'électricité spécifique, il existe plusieurs filières de production de l'électricité, et chacune dispose de son propre facteur d'émission en fonction du combustible transformé : gasoil, gaz naturel, mode combiné, etc. (cf. *supra*). Les facteurs d'émission du secteur électrique sont donc exogènes au modèle.

L'estimation des émissions liées à la consommation d'électricité par segments de parc nécessite de coupler la situation géographique du parc des centrales électriques (filières de production) et celui des logements. Or, cette tâche paraît lourde et complexe. Ici, on prend une moyenne nationale des émissions des centrales en fonction de leur nombre dans le parc et de la teneur de chaque combustible utilisé ; on applique ensuite cette valeur aux consommations d'électricité spécifiques par logement.

---

Tableau 3-10 : Facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> par source d'énergie

Combustible	Émissions de CO <sub>2</sub>
Gaz naturel	205
Gaz propane ou butane	230
Électricité cycle combiné	404

Source : (GIEC, 2007).

---

## Conclusion

À la lumière de ce qui a été avancé, il est désormais clair de déterminer les méthodes à employer ainsi que les hypothèses à adopter dans ce travail. Ce cadre méthodologique permet en effet de développer un modèle de prospective *bottom-up*.

Celui-ci incorpore une représentation des besoins d'énergie à un niveau très désagrégé dans le logement, en le couplant avec la dynamique du parc. Cette approche consiste à lier l'évolution des besoins énergétiques et celle du parc de logements, notamment en représentant de manière

spécifique « l'effet de rattrapage » en termes de nombre de logements et de consommations d'énergie induites par la nucléarisation des ménages « collectifs » algériens. Elle permet de gagner en robustesse et réalisme par rapport aux différents scénarios de demande d'énergie. Cette architecture détaillée du modèle de consommation dans le secteur résidentiel permet également de reconstituer les consommations d'énergie et les émissions, ainsi que de visualiser leur évolution au cours du temps. Il sera ensuite possible de tester différents scénarios de réduction des consommations et des émissions dans ce secteur.

# Chapitre 4 État du parc, des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub>

Cette partie de travail est consacrée à la présentation de l'état actuel du secteur résidentiel et des consommations d'énergie. Dans un premier temps, cette analyse quantitative présente les évolutions observées chez les ménages et dans le parc de logements en 1998 et 2008, dans l'optique d'une extrapolation ultérieure à l'horizon 2050. Ensuite, à la lumière des éléments évoqués dans le chapitre 3, il sera possible de reconstituer les consommations énergétiques pour le chauffage, l'ECS, le refroidissement, etc., ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> qui en découlent, ventilés par type de logement et en fonction de la zone climatique.

## 4.1 Démographie et parc de logements

### 4.1.1 Taille et nombre de ménages par logement

La demande globale de logements et de service énergétique repose sur les demandes unitaires décrites dans le chapitre 3, ainsi que sur les effectifs des ménages. Comme cela a été dit précédemment, dans le contexte du secteur résidentiel algérien, le nombre et la taille des ménages par logement sont également des indicateurs majeurs pour déterminer le nombre de logements nécessaires pour satisfaire la demande et les besoins énergétiques.

Les recensements RGPH montrent une diminution, ces dernières années, du nombre d'occupants par logement. Ce taux (TOL) s'élevait à 7,1 en 1998, contre 6,2 en 2008. Ces enquêtes restent discrètes quant il s'agit de la désagrégation d'une quelconque forme d'occupation des ménages dans un même logement. Si l'on rapporte de manière globale le nombre des ménages et celui du parc de logements dans cette même période, on constate que le taux de ménages par logement (TML) est quant à lui en progression. En effet, en 1998, le nombre moyen de ménages par logement est passé de 1,07 à 1,09 en 2008. Cet accroissement est lié à plusieurs facteurs, dont l'augmentation rapide du nombre de mariages par an (formation de nouveaux ménages) associée à un nombre plus faible d'entrées de logements neufs dans le parc. En effet, le nombre de mariages, en 2011, était supérieur à 369 000. Cette tendance est

inversée par un nombre relativement faible d'entrées de logements neufs dans le parc – 212 000 par an (cf. Tableau 4-1). Ce constat confirme la tendance actuelle de la forte pression foncière liée à une augmentation rapide du nombre ménages.

Tableau 4-1 : Évolution des mariages, du taux brut de nuptialité et des logements neufs

Année	1990	2000	2008	2009	2010	2011
Nombre de mariages	149 345	177 548	331 190	341 321	344 819	369 031
Taux brut de nuptialité	5,97 %	5,84 %	9,58 %	9,68 %	9,58 %	10,05 %
Nombre de logements neufs	64 235	162 072	220 821	217 795	190 873	212 665

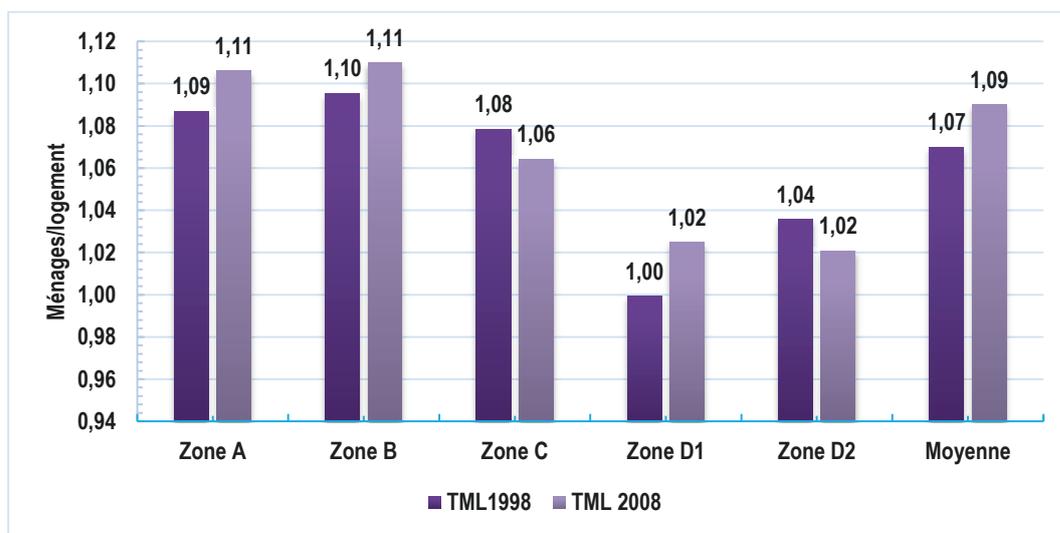
Source : ONS, ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Algérie.

Une ventilation à l'échelle départementale, du taux de ménages par logements montre une nette disparité, allant, par exemple, de 1,0 pour le département d'Illizi jusqu'à 1,19 pour celui de Blida. Le différentiel du nombre de ménages par logement est encore plus important si l'on examine cet indicateur d'un point de vue géographique : les grands pôles urbains (dôté d'une importante densité urbaine<sup>50</sup>) situés dans le nord du pays, disposent de taux de ménages par logement nettement plus élevés que ceux du sud.

La Figure 4-1 montre que le taux de ménages par logement avoisine en moyenne 1,02 dans les départements du sud du pays (zone D1 et D2). Selon les enquêtes RGPH de 1998 et de 2008, ce taux est décroissant, notamment dans les départements de l'intérieur et du sud du pays (zone C et D2). Cependant, on constate un accroissement du TML dans les départements du littoral et des plateaux (zone A et B) – 1,11, en moyenne, en 2008, contre 1,10 en 1998.

<sup>50</sup> 40 % de la population algérienne vit sur 1,5 % de la surface du pays, c'est-à-dire la zone climatique « A ».

Figure 4-1 : Répartition du TML par zone climatique en 1998 et 2008



Source : RGPH (2008), ONS Algérie.

#### 4.1.2 Nombre de personnes par ménage

Dans de nombreuses études, le nombre de personnes par logement est corrélé naturellement à celui des occupants du logement. Ici, ce postulat peut être maintenu uniquement dans le cas de familles « simples ». Rappelons que les enquêtes RGPH expriment de manière groupée le nombre d'occupants par logement, sans désagrégation du nombre de ménages qui cohabitent. Or, il est crucial pour notre modèle prospectif de suivre l'évolution de chacun de ces indicateurs pour modéliser la dynamique du parc de logements.

En 1998, le nombre moyen de personnes par ménage s'établissait à 6,6, contre 5,7 en 2008. Cette importante baisse du nombre de personnes par ménage résulte essentiellement d'une forte diminution de la fécondité et de l'accroissement de l'âge moyen au mariage. Le Tableau 4-2 montre qu'effectivement, le nombre d'enfants par femme est passé de 4,5 en 1990 à 2,93 en 2013, soit une baisse moyenne de plus de 1,5 enfant par femme. De plus, le recul de l'âge moyen à la maternité pour le premier enfant s'est poursuivi, passant de 29,5 ans en 1990 à 31,4 ans en 2013.

Tableau 4-2 : Évolution de l'indice synthétique de fécondité et de l'âge des femmes à la première maternité (AMA)

Année	1990	2000	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Indice synthétique de fécondité (enfants/femme)	4,5	2,4	2,81	2,84	2,87	2,87	3,02	2,93
Âge moyen à la maternité (en années)	29,5	32	31,9	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4

Source : ONS Algérie.

## 4.2 Effectif et dynamique territoriale du parc

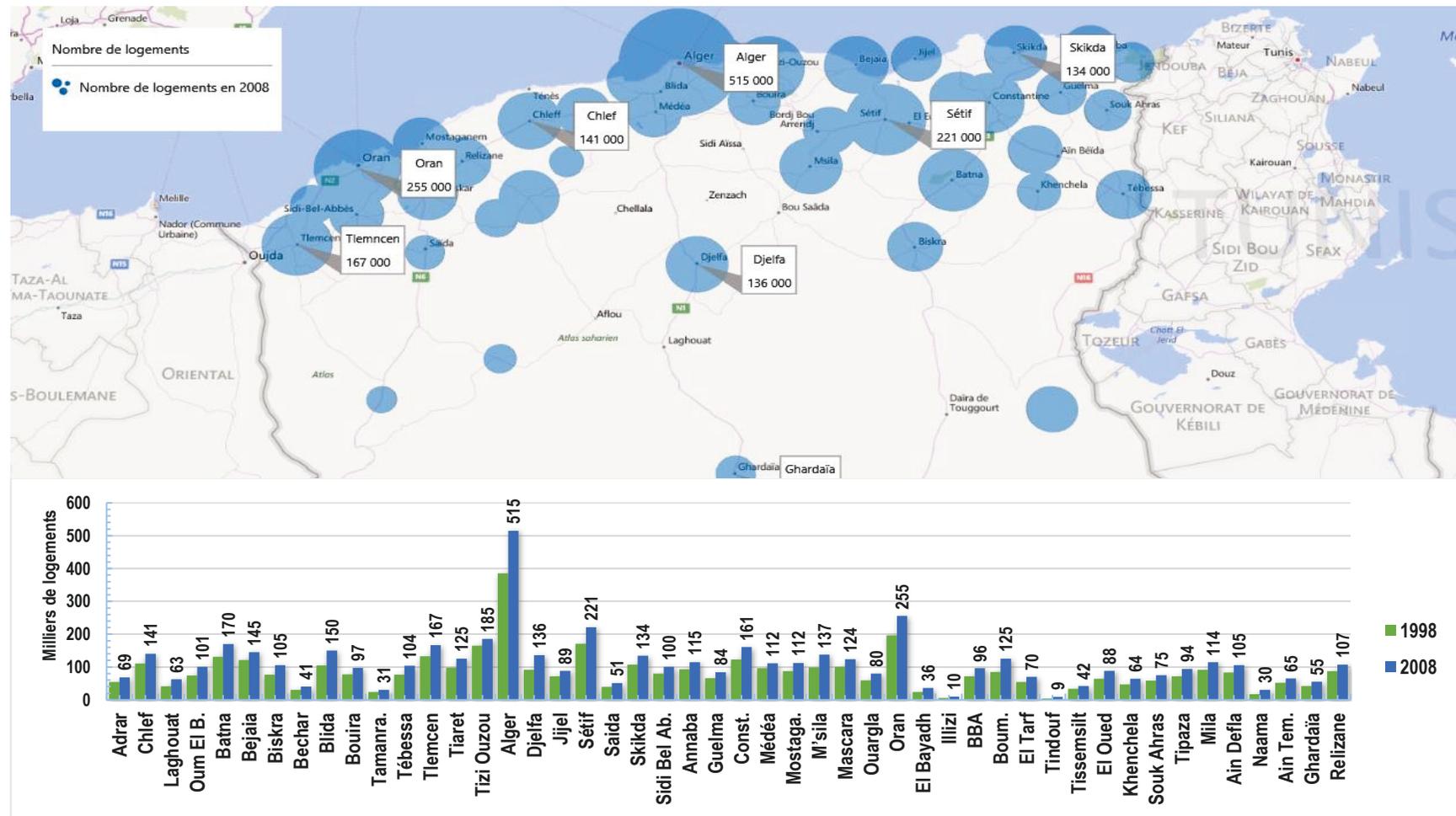
D'après le RGPH, le parc de logements comportait, en 2008, un total de 6,68 millions de logements, dont 5,30 millions de résidences principales, 0,93 million de résidences secondaires et 0,45 million de logements vacants. Selon la même source, entre 1998 et 2008, le parc de logements a crû de plus de 1,6 million de logements neufs, selon un rythme de construction toujours en vigueur aujourd'hui.

En termes de localisation, 4,6 millions de logements se situent en zones urbaines (chefs-lieux de département), soit 70 % de la totalité du parc ; plus de 1 million de logements en zones urbaines secondaires (16 %), et le reste, soit près de 1 million de logements, en zones rurales. En 1998, les logements situés en zones urbaines représentaient 55 % de la totalité du parc, contre 16,5 % en zones urbaines secondaires et 28 % en zones périurbaines et rurales. Pendant la période 1998-2008, le nombre de logements en zones urbaines a augmenté, passant de 55 % à 70 %.

Cette dynamique territoriale des zones rurales vers les zones urbaines est le corollaire de différents facteurs socio-économiques<sup>51</sup> comme l'emploi, l'état de sécurité du pays, etc. Par ailleurs, cet exode vers les grandes zones urbaines a renforcé la pression foncière.

<sup>51</sup> Ce constat est l'objet de nombreuses recherches.

Figure 4-2 : Nombre de logements par département entre 1998 et 2008



Source : (RGPH 1998 et 2008).

## 4.3 Typologie des logements existant dans le parc

La segmentation typologique du parc de logements est liée au mode d'occupation et aux styles architecturaux des logements (logements en immeubles collectifs ou maisons individuelles). Ici, on maintient cette segmentation. En revanche, en raison de la forte disparité des modes architecturaux et des systèmes constructifs dans le segment des maisons individuelles, nous proposons de décomposer ce segment de parc en plusieurs « sous-segments » que nous appelons ici : maisons individuelles « réglementaires », « maisons traditionnelles » et « constructions précaires ».

Notons que ce travail n'a évidemment pas pour ambition de chercher des réponses aux questions sociologiques liées à la précarité de certains segments du parc, mais d'examiner le comportement thermique de certains bâtiments, car les marges de manœuvre, en termes de choix et de solutions à prendre en compte, dépendent de cette analyse.

### 4.3.1 Logements en immeuble collectif

En termes de style architectural et de forme urbaine, ce segment de parc a connu plusieurs aspects et formes, s'adaptant aux époques historiques et/ou aux contextes socio-économiques, aux politiques urbaines ou réglementaires, etc. En effet, une lecture chronologique apparaît dans les styles architecturaux, avec d'abord des immeubles de type haussmannien, puis les grands immeubles issus du plan de Constantine<sup>52</sup> et les immeubles collectifs de l'époque postcoloniale (cf. Figure 4-3). Avant l'indépendance (1962), la construction de ces grands ensembles était réservée aux grandes villes, mais actuellement, la construction de logements collectifs se développe également dans les petites agglomérations.

---

<sup>52</sup> « Le Plan de développement économique et social en Algérie, ou Plan de Constantine (1959-1963), est un programme économique élaboré par le gouvernement français en 1958, au plus fort de la guerre d'Algérie, après l'arrivée au pouvoir du général de Gaulle. Visant à la valorisation de l'ensemble des ressources de l'Algérie, ce plan s'inspire de travaux menés précédemment : le rapport de la commission Maspétiol sur les relations financières entre l'Algérie et la métropole (juin 1955) et les perspectives décennales du développement économique de l'Algérie » (Source : Wikipédia).

---

Figure 4-3 : Logements en immeubles collectifs (type haussmannien et postcolonial)



Source : ww.binyen.com.

---

#### 4.3.2 Maisons individuelles « réglementaires »

La forme urbaine (le tracé urbain) est généralement l'œuvre d'une approche planifiée au préalable sous la forme d'un tracé de lotissement ou d'un plan d'occupation des sols. Le style architectural et la volumétrie du bâti sont souvent liés à la conception architecturale adoptée par le propriétaire (autoconstruction) (cf. Figure 4-4).

En théorie, la réalisation des maisons individuelles est conforme aux plans des permis de construire et aux normes de construction mises en application. Cependant, on a constaté, à travers nos échantillonnages *in situ*, que les plans d'architectures sont souvent modifiés par les propriétaires lors de la réalisation. Ces transformations peuvent amplifier les déperditions de chaleur quand elles concernent la modification de l'enveloppe bâtie, à savoir le type de matériau de construction ou l'épaisseur des parois extérieures, le plancher ou la toiture, voire la dimension ou l'orientation des ouvertures. Ceci induit généralement un accroissement des besoins de chauffage ou de refroidissement.

---

Figure 4-4 : Maison individuelle (autoconstruction)



Source : [ww.binyen.com](http://ww.binyen.com).

---

### 4.3.3 Maisons traditionnelles

À l'inverse des précédents types de logements, ce type d'habitat n'est généralement lié à aucune planification urbaine ou architecturale moderne. Du point de vue de la localisation géographique, ce segment de parc se situe dans des zonages urbains particuliers, comme les Ksour des M'Zab, la casbah d'Alger, etc., ou des zones rurales éloignées. Son aspect traditionnel n'est pas lié seulement à sa forme urbaine et/ou architecturale non régulière, mais dépend aussi de son système constructif. En effet, les matériaux utilisés dans ce type d'habitat ne sont pas conformes aux matériaux préconisés par la réglementation de construction. Il s'agit d'un mélange de plusieurs types de matériaux, généralement locaux, comme le béton de terre crue stabilisée et compressée (BTS), le bois, la pierre, etc. (cf. figure 4-5).

---

Figure 4-5 : Maison traditionnelle



Source : Photo prise dans la casbah d'Alger.

---

#### 4.3.4 Constructions précaires

D'un point de vue urbanistique, le segment des constructions précaires n'est pas considéré comme une « partie entière » intégrée dans le tissu urbain, en raison, d'une part, de son tracé non planifié et « désordonné », mais aussi de l'illégalité juridique de l'occupation des terrains et de la non-conformité de son système constructif (tôles, ferrailles, bois, etc.). Les constructions précaires sont généralement contraintes à des opérations de démolition/rénovation (renouvellement urbain), ce qui donne un aspect éphémère à ce segment de parc. Or, d'un point de vue énergétique, dans ce travail, on prend aussi en compte les besoins d'énergie pour ce segment de parc.

Actuellement, on ne dispose pas de données désagrégées relatives aux postes de consommation, tels que le nombre d'appareils électroménagers, dans cette partie du parc. On considère que les besoins énergétiques pour ce segment sont identiques à ceux des autres segments de parc. En d'autres termes, ce travail prend en compte les besoins énergétiques des constructions précaires, à savoir : le chauffage, le refroidissement, l'ECS, etc. Signalons que cette hypothèse s'inscrit dans un scénario énergétique que nous jugeons « pessimiste ».

---

Figure 4-6 : Constructions précaires



Source : Photo prise dans le quartier Essemmar d'Alger.

---

#### 4.4 Caractéristiques techniques et matériaux de construction

L'isolation de l'enveloppe bâtie relève fondamentalement de la qualité des matériaux de construction. Ceux-ci sont, de ce fait, associés aux dimensions techniques de la conception de l'efficacité thermique dans les logements. Bien entendu, le choix des matériaux de construction est souvent lié à leurs caractéristiques physiques, à savoir leur rigidité et leur résistance thermique. Ce choix est généralement l'objet d'un encadrement réglementaire technique et/ou thermique, pour assurer notamment le confort hygrothermique des logements.

En revanche, le choix des matériaux de construction, dans le parc de logements algérien, dépend également d'autres facteurs, qui sont : la typologie du logement, son statut juridique (réglementaire ou illicite), la localisation géographique et climatique, le niveau économique des ménages, etc. À travers nos échantillonnages *in situ*, on a constaté en effet que différents matériaux de construction composent les enveloppes bâties des logements.

Dans les logements en immeubles collectifs et les maisons individuelles « autoconstruction », l'enveloppe bâtie est souvent conforme à la réglementation technique. C'est moins le cas pour les maisons traditionnelles, dans lesquelles différents matériaux peuvent être utilisés, en fonction de l'époque de la construction ou de la localisation géographique (casbah, Ksours,

etc.). L'enveloppe bâtie des constructions précaires est quant à elle généralement composée de matériaux de récupération, à l'image de leur statut illicite et provisoire (cf. Tableau 4-3).

Tableau 4-3 : Récapitulatif des principaux matériaux de construction de l'enveloppe bâtie

Type de logement	Type de matériaux				
	Toiture	Plancher bas	Parois	Portes	Porte-fenêtre
Logement en IC	Dalle corps creux + étanchéité multicouche ép. = 7cm	Dalle pleine + revêtement en carrelage	Double paroi en brique avec lame d'air ép. = 30 cm	Bois ép. = 4 cm	Bois ép. = 4 cm + verre simple 3 mm
Maison individuelle	Dalle corps creux	Dalle pleine + revêtement en carrelage	Double paroi en brique avec lame d'air ép. = 30 cm	Bois ép. = 4 cm, tôle d'acier	Bois ép. = 4 cm + verre simple 3 mm
Maison traditionnelle	Dalle pleine, charpente en tuile	Dalle pleine + revêtement en carrelage	Murs en pierre taillée, BTS	Bois ép. = 4 cm, tôle d'acier	Bois ép. = 4 cm + verre simple 3 mm
Construction précaire	Tôle de zinc, TN 40...	Dalle pleine mince	Paroi simple en parpaing, brique ou en tôle	Bois ép. = 4 cm, tôle d'acier	Bois ép. = 4 cm + verre simple 3 mm

## 4.5 Mouvements dans le parc

Comme nous l'avons indiqué, les évolutions du parc entre 1998 et 2008 peuvent être résumées ici à une forte progression numérique. L'inventaire des RGPH de 1998 et 2008 montre une forte dynamique entre les segments du parc de logements. L'évolution la plus marquée se situe dans le segment des logements « réglementaires », segment dans lequel les logements en IC et les maisons individuelles connaissent le plus fort accroissement, soit respectivement 54 % et 39 %. Le segment des maisons traditionnelles connaît un accroissement relativement faible, de l'ordre de 2 %. Dans la même période, le parc de logements a également connu une forte sortie des constructions précaires, soit l'équivalent de 20 % du stock existant. En zones urbaines, ce déstockage provient généralement d'opérations de renouvellement urbain pour des entrées de logements neufs dans le parc (cf. tableau 4-4).

Tableau 4-4 : Dynamique du parc de logements ventilés par typologie en 1998 et 2008

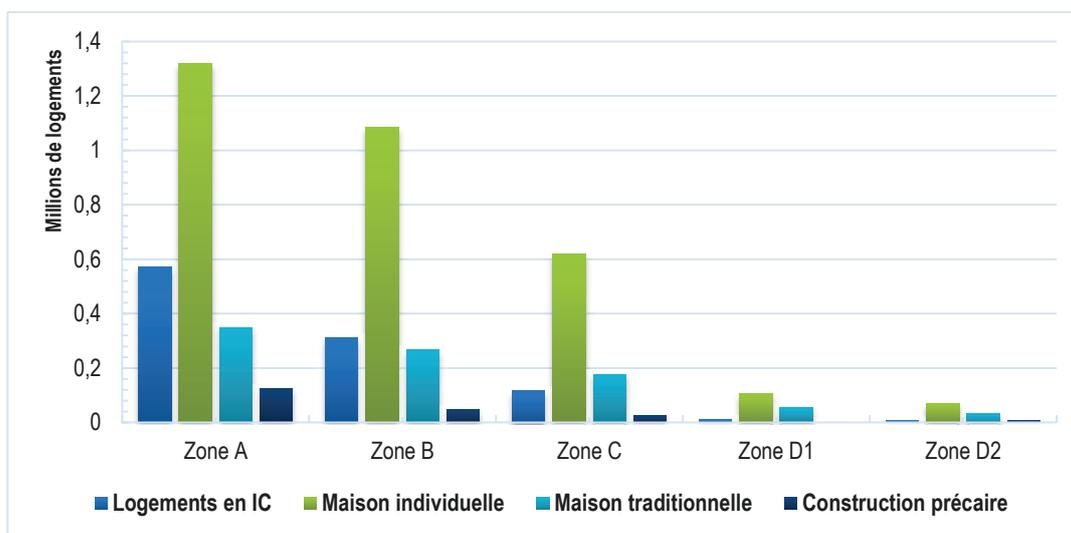
Type de logement	1998	Ratio (%)	2008	Ratio (%)	1998-2008 (%)	Neufs (renouvel.)	Neufs (construits)	Démolition
Logement en IC	657 339	16	1 015 903	19	55	54 730	358 564	-
Maison individuelle	2 294 761	56	3 198 252	60	39	-	903 491	-
Maison traditionnelle	860 164	21	880 607	17	2	-	20 443	-
Construction précaire	264 464	6	209 734	4	-21	-	-	54 730
Total	4 076 728	100	5 304 496	100		54 730	1 282 498	54 730

Source : RGPH (1998 et 2008), ONS Algérie.

Malgré l'accroissement du nombre d'entrées de logements en IC neufs dans le parc, les maisons individuelles restent majoritaires. La ventilation du nombre de logements par type et selon la localisation géographique (cf. Figure 4-7) montre en effet une prédominance numérique du segment des maisons individuelles dans toutes les zones climatiques. Pour les logements en IC et les maisons traditionnelles, on constate que la variation de leurs parts dans le parc est liée généralement à leur localisation géographique. En effet, la tendance observée traduit une diminution progressive du nombre de logements en IC du nord du pays vers le sud.

Cette tendance est inversée pour les maisons traditionnelles. En d'autres termes, le nombre le plus important de logements en IC se situe en zones urbaines, au nord et à l'intérieur du pays. À l'inverse, les maisons traditionnelles se localisent en zones urbaines ou rurales des villes du sud du pays. Enfin, les constructions précaires constituent une part quasi stable dans toutes les zones climatiques.

Figure 4-7 : Ventilation du nombre de logements par type de logement et par zone



Source : RGPH (2008), ONS Algérie.

## 4.6 Constructions neuves et mouvements dans le parc

La dynamique de la construction neuve en Algérie connaît un rythme soutenu. Entre 2004 et 2011, le nombre de logements construits annuellement est passé de 116 000 à plus de 212 000 (cf. Tableau 4-5), ce qui représente une croissance annuelle de 4 %. En sept ans, le rythme de croissance a tout simplement doublé. Ce taux illustre la vitesse de construction des logements neufs, qui résulte notamment du rythme de déstockage des constructions précaires.

Depuis 2004, l'augmentation du nombre de logements neufs trouve son origine dans le dynamisme de la construction de logements collectifs et le financement de l'autoconstruction, notamment de maisons individuelles en zones urbaines et rurales, dans le cadre de la mise en chantier des plans quinquennaux<sup>53</sup> évoqués précédemment. Cette dynamique de construction n'est pas réservée aux seules grandes zones urbaines. Elle se développe également dans les zones urbaines secondaires et rurales. Ce rythme de construction apparaît néanmoins plus

<sup>53</sup> Depuis 2004, le gouvernement algérien a mis en œuvre des plans quinquennaux pour la construction de plusieurs millions de logements. Le premier plan était inscrit pour la période 2004-2009 ; il consistait à construire plus d'un million de logements. Le second plan (2009-2015) portait sur un programme de construction de 1,2 million de logements. Le nouveau programme quinquennal (2015-2019) porte sur la construction de 1,6 million de logements.

dynamique dans les grandes villes de la façade littorale, comme Alger, Oran, Annaba, etc., où le déficit et la demande en matière de logements sont en forte croissance.

Tableau 4-5 : Nombre de logements neufs ventilé par type pour la période 2004-2011

Année	Logements en immeubles collectif	Maisons individuelles	Total
2004	57 130	59 338	116 468
2005	61 998	70 481	132 479
2006	82 859	94 917	177 776
2007	76 923	103 007	179 930
2008	100 677	120 144	220 821
2009	108 161	109 634	217 795
2010	102 873	88 000	190 873
2011	115 308	97 357	212 665

Source : Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Algérie.

## 4.7 Surfaces habitables

En 2008, la surface moyenne d'un logement en immeuble collectif avoisine 65,39 m<sup>2</sup>. Dans le segment des maisons individuelles, il résulte de l'échantillonnage *in situ*<sup>54</sup> que la surface moyenne des maisons individuelles « réglementaires » est de 144 m<sup>2</sup>, tandis que celles des maisons traditionnelles et des constructions précaires sont estimées respectivement à 120 m<sup>2</sup> et 50 m<sup>2</sup>. Selon cette nomenclature, la surface totale du parc était estimée à plus de 658 millions de mètres carrés en 1998, pour atteindre plus de 811 millions de mètres carrés en 2008 (cf. Tableau 4-6). Cet accroissement est la conséquence mécanique de l'augmentation du nombre de logements entre deux RGPH (1998 et 2008).

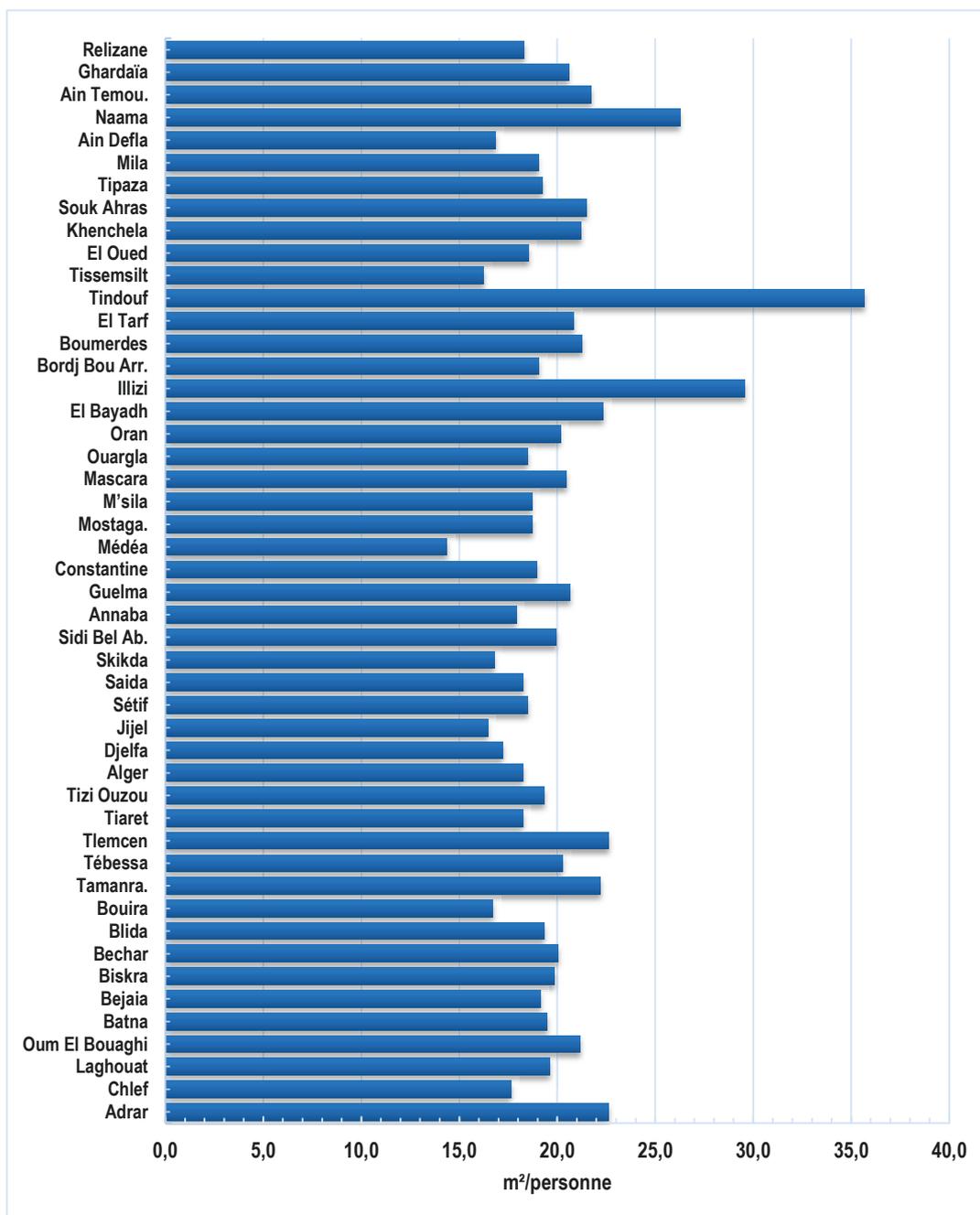
Tableau 4-6 : Surface unitaire moyenne par type de logement (échantillonnage *in situ*)

Types de logements	Logements en IC	Maisons individuelles	Maisons traditionnelles	Constructions précaires
Surfaces unitaires	65	144	120	50
Surface totale du parc	66 429 897	460 548 288	105 672 840	10 486 700

<sup>54</sup> Des relevés de surfaces habitables ont été réalisés dans plusieurs dizaines d'échantillons de maisons individuelles, maisons traditionnelles et constructions précaires, réparties dans différentes zones géographiques.

Les enquêtes de l'ONS indiquent que les conditions de logement, en surface habitable, se sont légèrement améliorées : la surface moyenne par personne est passée de 22 m<sup>2</sup> en 1998 à près de 24 m<sup>2</sup> en 2008 (cf. Figure 4-8). Cette tendance est le corollaire de l'accroissement du nombre d'entrées de logements neufs dans le parc.

Figure 4-8 : Répartition de la surface habitable par personne et par département en 2008



Source : RGPH (2008), ONS Algérie.

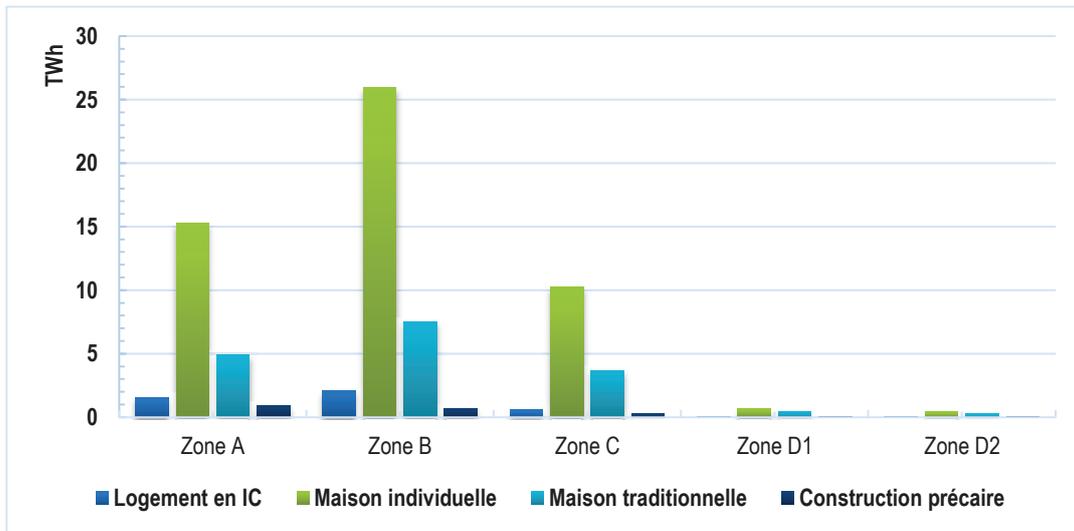
## 4.8 Consommations d'énergie par poste et typologie des logements en 2008

### 4.8.1 Chauffage

La consommation d'énergie pour le chauffage dans l'ensemble du parc de logements est estimée, en 2008, à 75,5 TWh. La performance énergétique moyenne du parc avoisine alors les 117,4 kWh/m<sup>2</sup>/an. La désagrégation des consommations par typologie de logements montre que 52,5 TWh, soit 69 % des consommations énergétiques, sont réservés aux maisons individuelles « réglementaires ». Celles-ci sont donc le segment de parc le plus énergivore en termes de chauffage, du fait notamment de leur nombre très important relativement aux autres segments du parc. Les besoins d'énergie de chauffage pour les maisons traditionnelles sont estimés à 16,8 TWh, ce qui représente l'équivalent de 22 % des consommations du parc. Suivent ensuite les logements en immeubles collectifs et les constructions précaires, avec respectivement 4,26 TWh (6 %) et 1,8 TWh (3 %) (cf. Figure 4-9).

La ventilation des consommations de chauffage par zone climatique montre que pour le segment de parc situé en zone B, les consommations de chauffage sont estimées à environ 36,2 TWh, soit 48 % de l'ensemble du parc, contre 22,6 TWh (30 %) en zone A, 14,8 TWh (20 %) en zone C, 1,1 TWh (2 %) en zone D1 et 0,7 TWh (0,9 %) en zone D2. Malgré un nombre de logements relativement inférieur à celui de la zone A, les consommations d'énergie pour cette zone sont nettement plus importantes. Il faut néanmoins noter que ces écarts de consommation entre les différents types de logements sont amplifiés par le différentiel entre la température extérieure et celle de la période de chauffe (DJU) dans les différentes zones climatiques, ce qui se traduit généralement par une surcharge de chauffage pouvant dépasser des seuils très importants, surtout dans les logements anciens.

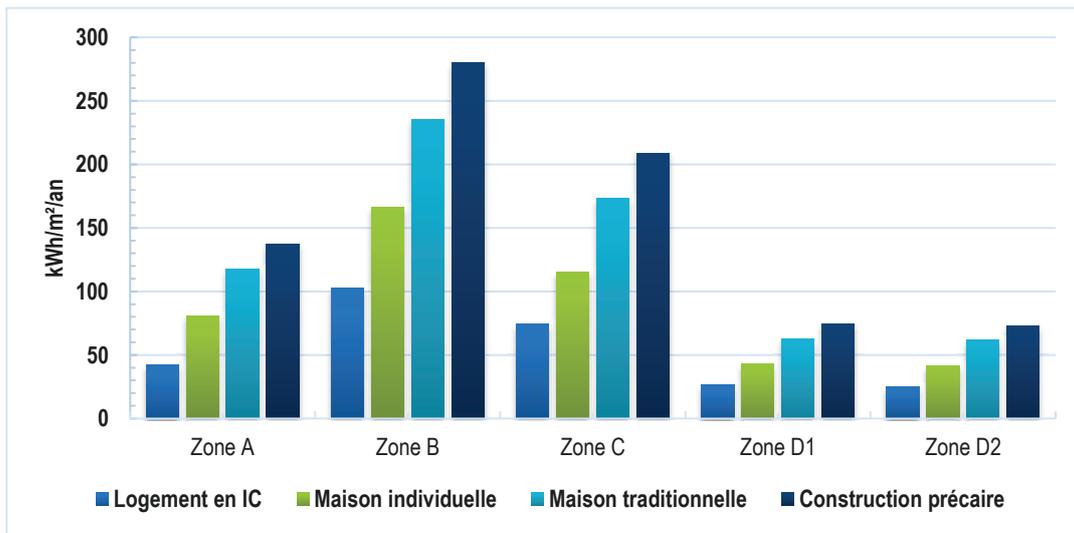
Figure 4-9 : Consommations de chauffage par type de logement et selon la zone climatique en 2008



En termes de performance, les constructions précaires et les maisons traditionnelles sont les plus énergivores en chauffage, en raison, non seulement de la grandeur des surfaces de déperdition, mais aussi de la vétusté de leurs enveloppes – à comparer à celles des maisons individuelles ou des logements en immeubles collectifs. D’après ce mode de calcul, les constructions précaires et les maisons traditionnelles consomment respectivement en moyenne 155 et 130 kWh/m<sup>2</sup>/an. Les logements en IC et les maisons individuelles, plus récents et soumis à des normes de construction, consomment quant à eux respectivement 54 et 89 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Bien entendu, les consommations unitaires pour le chauffage dépendent également des variables climatiques relatives à chaque zone. En effet, si l’on applique ces méthodes de calcul de besoins ou de consommations de chauffage à un type de logement, les écarts peuvent être très élevés d’une zone climatique à une autre. Par exemple, les consommations unitaires d’énergie pour le chauffage dans les maisons individuelles en zone climatique B représentent environ le double de celles de la zone climatique A, ou le quadruple (soit 43 kWh/m<sup>2</sup>/an) de celles de la zone D1, soit 166 kWh/m<sup>2</sup>/an contre 81 kWh/m<sup>2</sup>/an en A et 37 kWh/m<sup>2</sup>/an en D1 (cf. Figure 4-10). Pour les autres types de logements, le constat est identique à celui des maisons individuelles.

Figure 4-10 : Consommation unitaire moyenne de chauffage par typologie et zone en 2008



#### 4.8.2 Eau chaude sanitaire

L'estimation des besoins d'énergie pour l'eau chaude sanitaire dépend principalement, nous l'avons déjà dit, de la température de l'eau et du nombre d'occupants. Ici, ces besoins sont exprimés en énergie utile. Rappelons que l'estimation des besoins théoriques d'énergie pour l'eau chaude sanitaire est basée sur une consommation conventionnelle d'eau chaude par personne et par jour. Signalons que cette méthode de calcul ne prend pas en considération l'estimation des taux de satisfaction des besoins en ECS, en raison du manque de données relatives à ce poste de consommation dans le parc. Pour simplifier les calculs, on suppose un taux de satisfaction égal à 1.

D'après cette méthode de calcul, la consommation d'énergie pour la production d'ECS s'élève à près de 8,8 TWh pour l'ensemble du parc de logements, tandis que la consommation moyenne unitaire est estimée à 14 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Les consommations d'énergie pour l'ECS peuvent être effectivement différenciées selon les zones climatiques, la température de l'eau froide étant différente pour les cinq zones. En effet, on constate qu'en zone B, où la température de l'eau est relativement plus faible, soit 15,5 °C, la consommation annuelle d'énergie et par personne avoisine 257 kWh/an. Or, en zone A, où la température moyenne avoisine 17 °C, la consommation annuelle par personne s'élève à 237 kWh/m<sup>2</sup>/an (cf. Figure 4-11). Rappelons ici que le différentiel en termes de besoins

d'énergie (en zone climatique) n'est pas lié qu'aux facteurs climatiques. Il peut être parfois contrebalancé par le rendement des systèmes de production d'eau chaude sanitaire. Par exemple, les besoins annuels d'ECS en zone A sont nettement moins élevés (237 kWh/pers.) qu'en zone C (251 kWh/pers.), et ce, malgré des températures moyennes presque identiques.

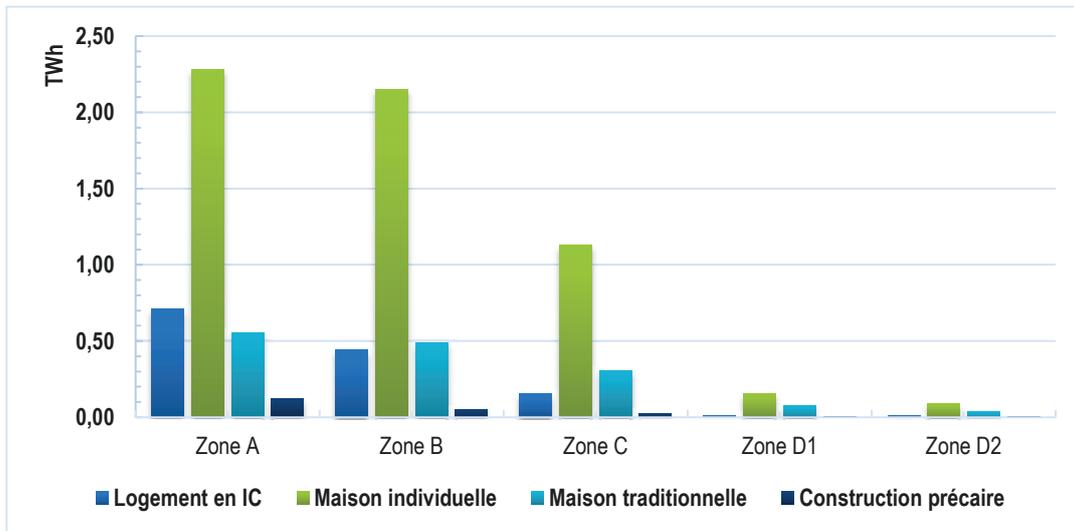
Figure 4-11 : Besoins annuels pour la production d'ECS selon la zone climatique

Zone climatique	Température moyenne (°C)	réf.	Population	Besoins d'énergie pour l'ECS (TWh)	Besoins annuels (kWh/pers/an)
Zone A	17,63		15 007 424	3,7	237
Zone B	15,51		11 402 480	3,1	257
Zone C	17,03		6 231 435	1,6	251
Zone D1	21,97		770 135	0,3	230
Zone D2	22,70		674 415	0,1	239

Source : Météo Algérie.

À l'échelle du parc de logements, la Figure 4-12 montre un important écart des besoins énergétiques par segment de parc. En effet, en zone B, les consommations pour le segment des maisons individuelles peuvent atteindre jusqu'à quatre fois ceux du segment des maisons traditionnelles, cinq fois pour les logements en IC, et jusqu'à plusieurs dizaines de fois pour le segment des constructions précaires. Ce constat est quasi identique pour toutes les zones climatiques. Ceci signifie que, outre la température de l'eau et la surface habitable, le nombre relativement important des maisons individuelles augmente significativement les besoins d'énergie pour l'ECS.

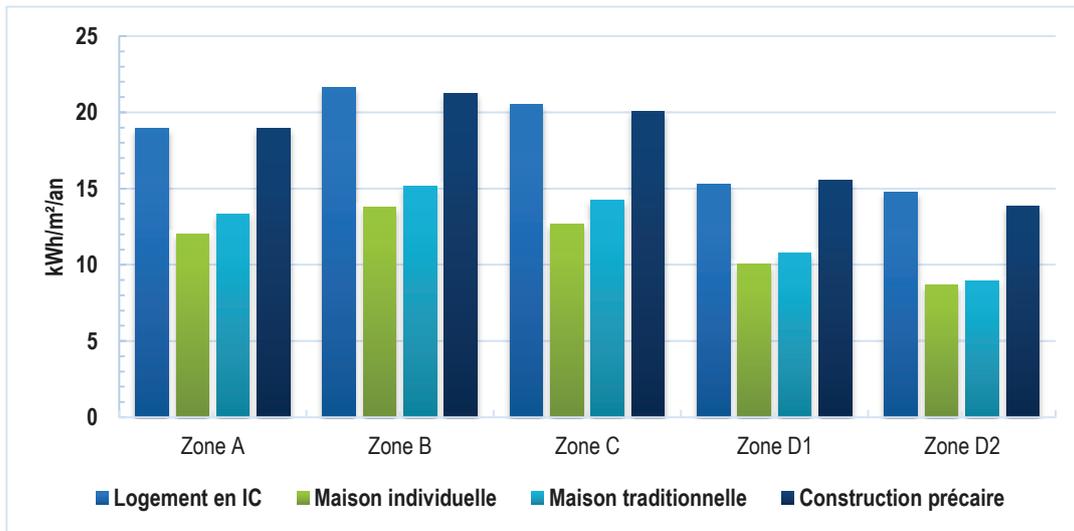
Figure 4-12 : Consommations d'énergie pour l'ECS par type de logement et par zones en 2008



De manière simplifiée, si l'on rapporte les besoins annuels à la surface habitable, on peut estimer la consommation unitaire d'ECS. On constate alors que les écarts de consommation sont relativement faibles. On peut voir, sur la Figure 4-13, que les consommations unitaires moyennes ont varié entre 9 et 14 kWh/m<sup>2</sup>/an selon les différentes zones climatiques.

Les maisons individuelles et traditionnelles apparaissent comme les moins énergivores. À l'inverse des besoins annuels, les consommations unitaires pour les maisons individuelles et traditionnelles sont contrebalancées par les valeurs plus élevées de leurs surfaces habitables, nettement plus importantes que celles des logements en IC ou des constructions précaires. Ce passage confirme que, pour ce poste également, les constructions précaires demeurent les plus énergivores relativement aux types de logements dans le parc.

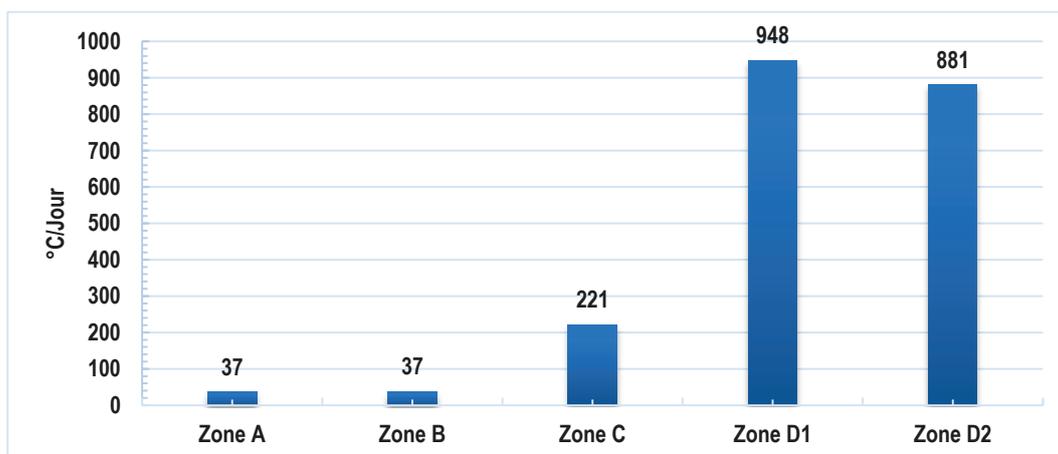
Figure 4-13 : Consommations unitaires moyennes pour l'ECS par type de logement et par zone climatique



### 4.8.3 Refroidissement

Rappelons que les besoins de refroidissement dans le logement peuvent constituer des charges énergétiques identiques à celles du chauffage, voire plus importantes dans certaines régions du Sud algérien. En effet, l'estimation des degrés-jour unifiés, sur la base des températures moyennes en été et de la température de consigne (25 °C) admise par la réglementation algérienne (cf. Figure 4-14), montre une forte disparité des besoins de refroidissement selon la localisation. En zone D1, le nombre moyen de DJU pour refroidissement est estimé à plus de 948, tandis qu'il avoisine 881 pour la zone D2. En revanche, dans les zones du Nord algérien, relativement tempérées, le nombre de DJU est nettement plus faible : 37 pour les zones climatiques A et B, et environ 221 pour la zone C.

Figure 4-14 : Degrés-jour unifiés pour le refroidissement par zone climatique



Source : Données météo, Algérie.

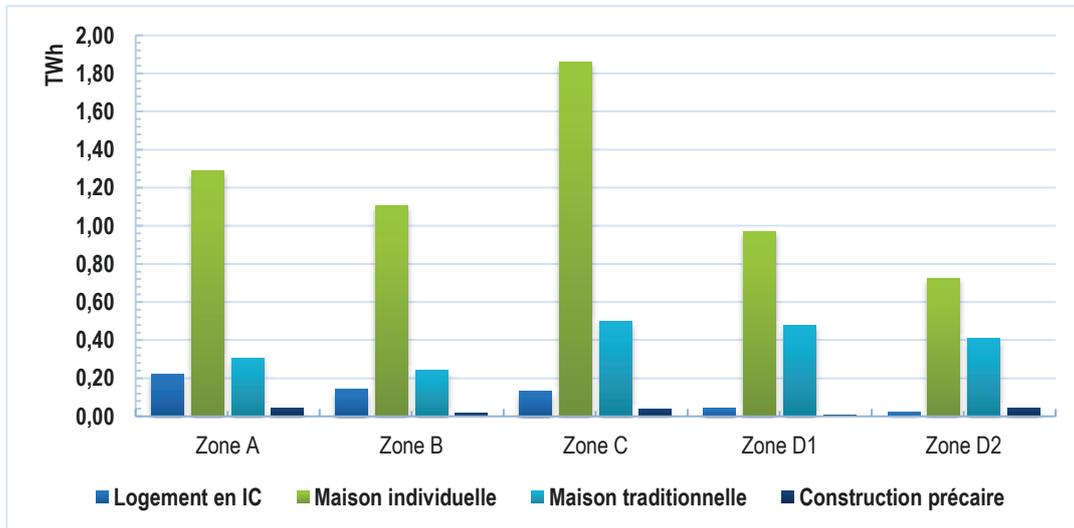
Le fondement de la méthode employée pour le calcul des consommations d'énergie pour le refroidissement (cf. chapitre 3 § 9.3. ci-dessus) consiste à estimer les apports calorifiques (internes, solaires et par renouvellement d'air) afin de calculer la puissance frigorifique nécessaire pour maintenir constante la température à 25 °C. Ceci explique que la variable climatique, notamment la température extérieure, peut amplifier considérablement les besoins énergétiques, non seulement à travers le différentiel de température (externe et de consigne), mais aussi via les apports d'ensoleillement des parois opaques et vitrées.

Selon cette méthode, la consommation d'énergie pour le refroidissement pour l'ensemble du parc est estimée à plus de 8,6 TWh. En rapportant cette consommation à la surface totale du parc, la performance énergétique moyenne pour le refroidissement avoisine 13 kWh/m<sup>2</sup>/an. Au regard de la consommation d'énergie pour le chauffage, cette valeur paraît relativement faible en raison du rendement de génération assez élevé des systèmes de refroidissement. Signalons que les valeurs de rendement des systèmes de refroidissement appliquées dans ce calcul sont basées sur les coefficients de performance (COP=3) des appareils *Split System* et qu'on admet l'hypothèse d'un recours massif à ce type de d'installation.

Il résulte de la reconstitution des consommations d'énergie selon les zones climatiques de forts écarts quantitatifs relatifs aux caractéristiques de chaque zone. À l'échelle du parc, la zone climatique C totalise des consommations de 2,5 TWh, soit près de 29 % de la consommation totale (cf. Figure 4-15). Ces consommations sont amplifiées par un double effet : d'une part, le

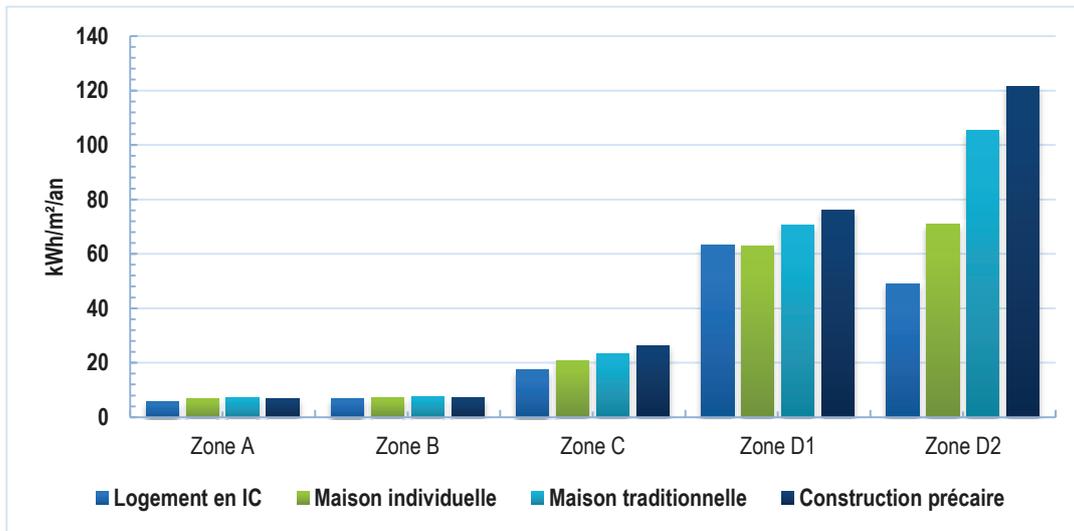
degré-jour unifié pour les besoins de refroidissement (DJU) en zone C est assez élevé par rapport à ceux des zones A et B ; d'autre part, la taille du parc dans cette zone est nettement plus importante qu'en zones D1 et D2.

Figure 4-15 : Consommations de refroidissement par type de logement et selon les zones en 2008



L'ensemble des éléments cités plus haut permet de reconstituer les consommations d'énergie pour le refroidissement par typologie de logements et selon les zones climatiques (cf. Figure 4-16). Comme indiqué plus haut, les logements situés dans des zones climatiques plus « chaudes » (D1 et D2) présentent des consommations unitaires plus importantes que celles des logements en zones A, B ou C. Par exemple, ces consommations unitaires avoisinent une moyenne régionale de 87 kWh/m<sup>2</sup>/an en zone D2, alors qu'elles sont limitées à 7 kWh/m<sup>2</sup>/an en zone A. Pour les consommations par typologie de logements, ce sont les constructions précaires qui sont également considérées comme les plus « énergivores », avec une consommation moyenne allant jusqu'à 122 kWh/m<sup>2</sup>/an en zone D. Rappelons simplement que leur niveau de consommation s'explique principalement par la médiocrité de l'isolation de leur enveloppe, comparée à celle des logements en IC, des maisons individuelles ou des maisons traditionnelles.

Figure 4-16 : Consommations unitaires moyennes pour le refroidissement par type de logement et selon la zone climatique



#### 4.8.4 Cuisson

Si les consommations précédentes étaient calculées en fonction de variables relatives aux logements, l'estimation des consommations d'énergie pour la cuisson est ici tributaire de variables liées aux ménages (nombre de personnes, taux de possession d'équipements ménagers, etc.). Rappelons que pour les logements cohabités (ménages collectifs), l'estimation des besoins d'énergie pour la cuisson est basée sur les usages énergétiques liés à chaque ménage indépendamment. En d'autres termes, on considère que chaque ménage possède ses appareils de cuisson. Ainsi, l'estimation des besoins d'énergie à l'échelle du parc revient à la somme des besoins unitaires de ces ménages. Le calcul est réalisé de manière simplifiée, en se basant sur la consommation de seulement deux équipements de base (réchaud et cuisinière), répartis selon les taux de possession issus de l'enquête RGPH.

En employant cette méthode de calcul à l'échelle du parc, nous obtenons une consommation d'énergie pour la cuisson qui s'élève à 9,7 TWh, pour un nombre total de ménages de 5,8 millions en 2008. La consommation unitaire moyenne est, quant à elle, estimée à 15 kWh/m²/an.

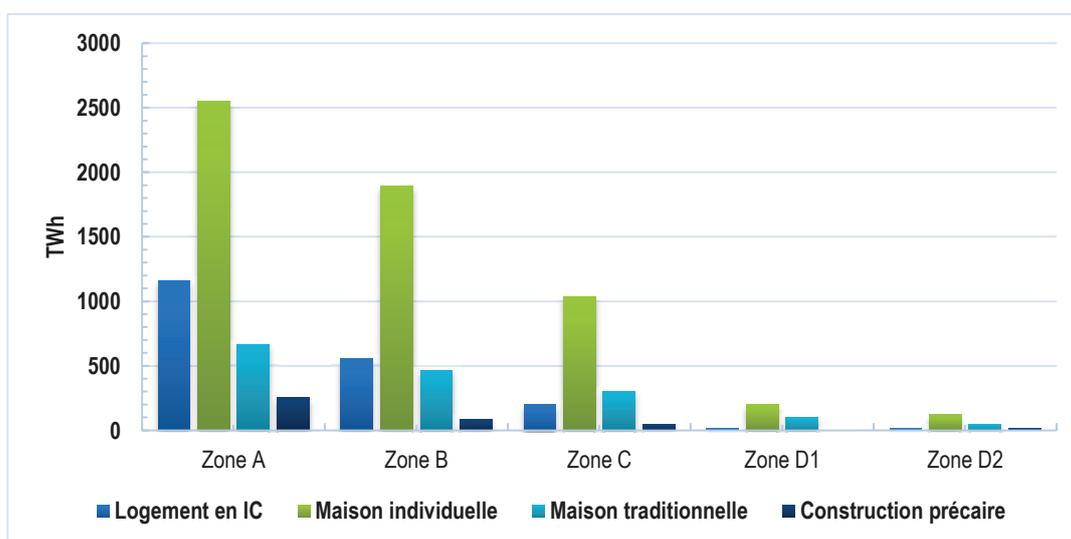
Tableau 4-7 : Consommations d'énergie pour la cuisson en 2008

Appareils	Puissance (W)	Fréquence d'usage en (h/an)	Taux possession ménage (%)	de par	Besoins théoriques d'énergie (TWh/an)
Appareil de cuisson (réchaud)	4 200	183	100		9,7
Cuisinière	2 800	365	57		

Source : RGPH (2008) et APRUE (2012), Algérie.

La Figure 4-17 montre que la consommation pour la cuisson dans le segment des maisons individuelles totalise plus de 5,8 TWh, soit près de 60 % de la consommation totale de la cuisson dans le parc. Ceci n'est pas lié seulement au nombre de maisons individuelles dans le parc, mais aussi au taux de ménages par logement relativement important dans ce segment. Notons que la surface habitable des maisons individuelles est un facteur souvent lié à la cohabitation des familles. Ceci explique que le nombre de ménages dans les maisons individuelles est généralement plus important que dans les logements en IC.

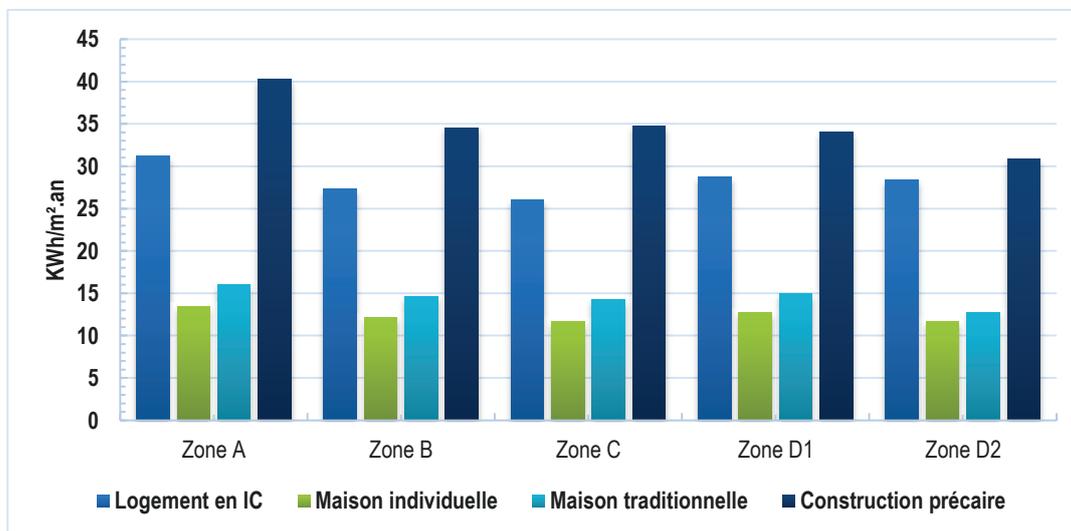
Figure 4-17 : Consommation d'énergie pour la cuisson par type de logement et par zone en 2008



Les constructions précaires et les logements en IC, du fait de leurs surfaces habitables plus réduites, affichent pour la cuisson des niveaux de consommation unitaire moyenne plus élevés :

jusqu'à 38 kWh/m<sup>2</sup>/an pour les constructions précaires en zone A, et près de 29 kWh/m<sup>2</sup>/an pour les logements en IC dans la même zone (cf. Figure 4-18).

Figure 4-18 : Consommations unitaires moyennes pour la cuisson par type de logement et par zone en 2008



#### 4.8.5 Appareils électroménagers et éclairage

La consommation d'énergie pour les appareils électroménagers correspond à la demande de froid (réfrigération), de lavage (lave-linge), d'éclairage et des produits « bruns ». Ce dernier poste renvoie aux besoins des fonctions multimédias (écran plat, équipement hi-fi). La variable la plus discriminante entre les ménages n'est pas l'efficacité énergétique de l'équipement ni la durée d'utilisation mais plutôt le taux d'équipement (cf. annexe).

On estime la consommation de ces appareils électroménagers à plus de 14,8 TWh par an, ce qui représente, pour l'ensemble du parc, une consommation unitaire moyenne de 23 kWh/m<sup>2</sup>/an. Notons que 74 % de la consommation d'énergie pour les appareils électroménagers, soit 7,0 TWh dans le parc de logements, sont localisés en zone A, c'est-à-dire dans la zone à très forte concentration urbaine (cf. Figure 4-19 et Figure 4-20).

Figure 4-19 : Consommations des équipements par type de logement et par zone

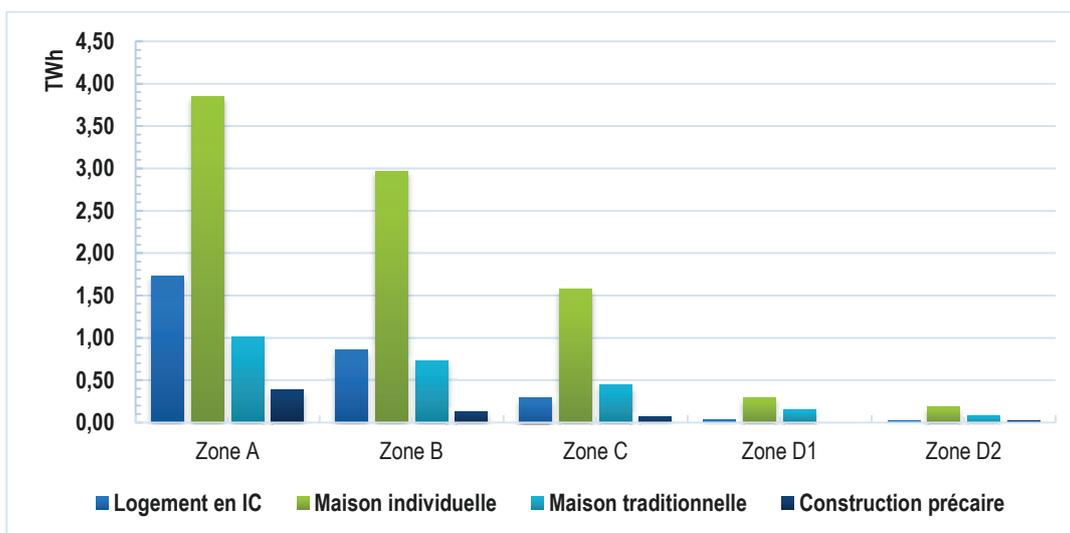
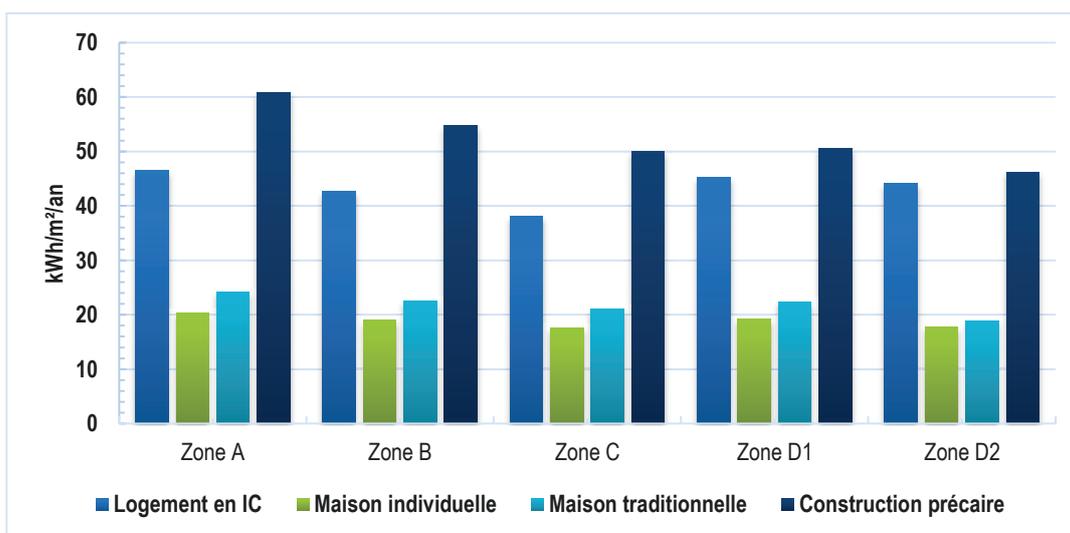


Figure 4-20 : Consommations unitaires moyennes des équipements par type de logement et par zone



## 4.9 Consommations d'énergie à l'échelle du parc en 2008

Comme nous l'avons énoncé précédemment, la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel, pour les cinq principaux postes de consommation (chauffage, ECS, refroidissement, cuisson et appareils électroménagers), est estimée à 117,4 TWh/an. Pour l'ensemble du parc de logements, ceci représente une performance énergétique moyenne égale à 182 kWh/m²/an.

À l'échelle macroscopique du parc, la Figure 4-21 fournit une synthèse des parts des différents postes de consommation dans le logement. Il est clair qu'avec plus de 64 % de la consommation, soit près de 75,5 TWh, le chauffage domine les consommations énergétiques de tout ce secteur. Ce niveau de consommation est confirmé par une consommation moyenne unitaire qui avoisine 117 kWh/m<sup>2</sup>/an (cf. tableau 4-8). En totalisant près de 14,8 TWh, soit l'équivalent de 13 % de la consommation, les appareils électroménagers forment le deuxième poste de consommation dans le parc. Notons que cette estimation est basée sur des taux de possession recueillis dans le RGPH (2008). Or, selon ce dernier, le niveau d'équipement des ménages n'atteint pas encore le niveau de satisfaction général, c'est-à-dire que le nombre d'appareils ne correspond pas encore au nombre de ménages. Ceci signifie que la consommation pour ce poste pourrait atteindre des niveaux très élevés dès lors que le taux de possession des ménages en équipements électroménagers va s'accroître. En effet, c'est une tendance observée, et il est pertinent de la prendre en compte lors de la scénarisation des besoins d'énergie des appareils électroménagers à l'horizon 2050.

Figure 4-21 : Répartition des consommations par poste dans le parc

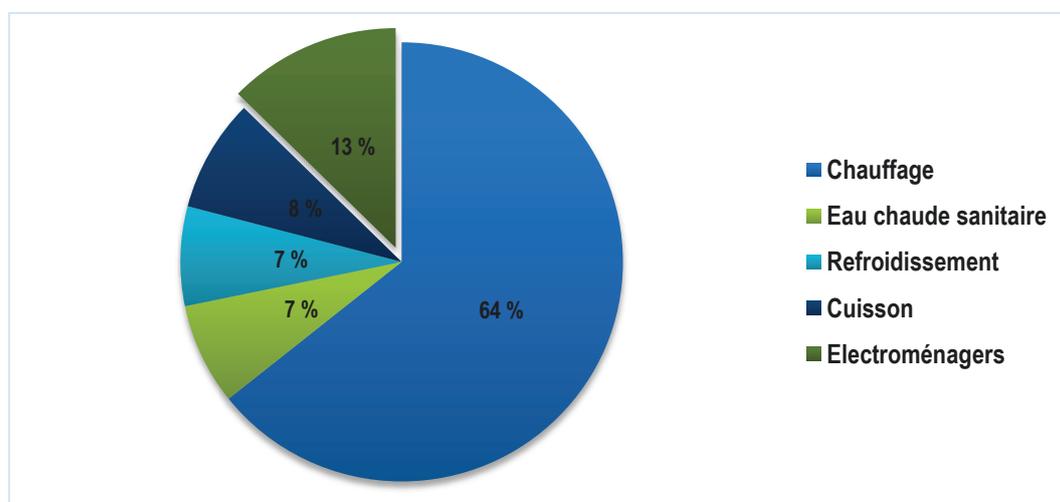
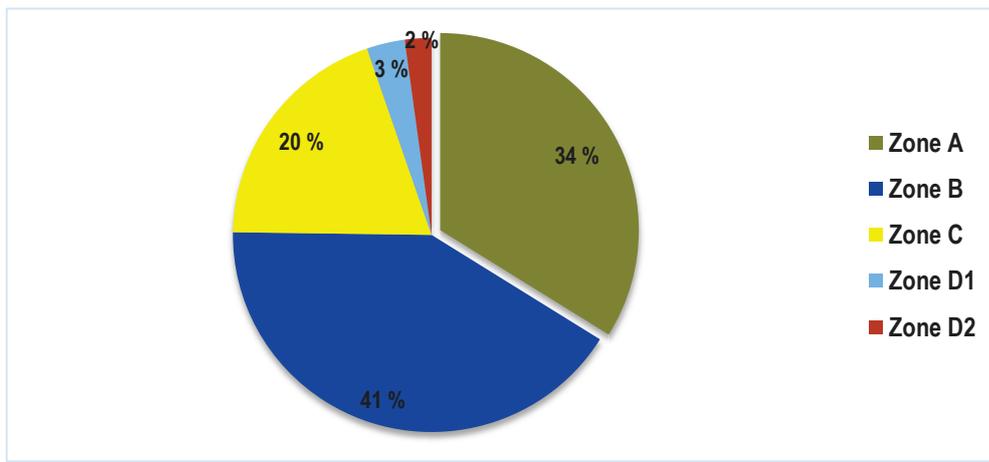


Tableau 4-8 : Performances énergétiques par poste de consommation en 2008

Poste	Chauffage	ECS	Refroidissement	Cuisson	Électroménager	Total
Consommation unitaire en (kWh/m <sup>2</sup> /an)	117	14	13	15	23	182

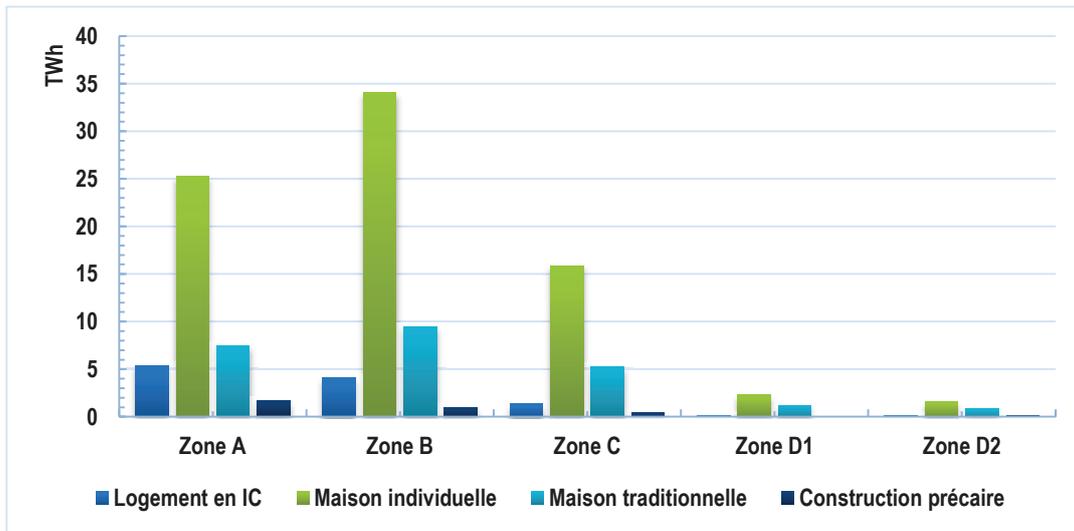
Compte tenu de ce qui a été avancé précédemment, il est clair que la zone B domine les besoins d'énergie à l'échelle régionale. En effet, avec près de 48,5 TWh, la zone B représente l'équivalent de 41 % des consommations totales du parc. Pourtant, cette zone est nettement moins peuplée que la zone A (2,36 millions de logements en zone A contre 1,70 million en zone B). En revanche, d'un point de vue climatique, la zone B est considérée comme étant la plus froide. Ceci explique que l'écart en termes de nombre de logements est contrebalancé par un différentiel significatif de la température extérieure ou de l'eau.

Figure 4-22 : Répartition des consommations d'énergie par zone climatique



La Figure 4-23 est une synthèse de la désagrégation des consommations par typologie de logements et en fonction de la zone climatique. On s'aperçoit que dans toutes les zones climatiques, le segment des maisons individuelles détient la plus grande part de consommation d'énergie. À l'échelle du parc, cette part représente 79,0 TWh (67 %). La consommation des maisons traditionnelles est estimée à près de 24,2 TWh (21 %). Les logements en IC et les constructions précaires consomment quant à eux respectivement 11,0 TWh et 3,2 TWh (soit 9 % et 3 % des consommations énergétiques du parc), ce qui est relativement faible.

Figure 4-23 : Consommations du secteur résidentiel en 2008 par type de logement et selon la zone climatique



La ventilation des consommations unitaires moyennes par typologie de logement démontre une nette disparité quantitative. Il ressort effectivement du Tableau 4-9 que les consommations unitaires moyennes dans les segments des constructions précaires et des maisons traditionnelles sont relativement plus élevées que celles des logements en IC ou des maisons individuelles. La consommation unitaire peut atteindre jusqu'à 305 kWh/m<sup>2</sup>/an pour les constructions précaires. Celles-ci sont donc considérées comme les plus énergivores. Ceci est lié essentiellement à leurs enveloppes bâties, très déperditives. À l'inverse, les logements en IC et les maisons individuelles, du fait de leurs enveloppes bâties relativement performantes, consomment respectivement 166 et 172 kWh/m<sup>2</sup>/an (soit moitié moins que les constructions précaires).

Tableau 4-9 : Reconstitution des performances énergétiques moyennes par typologie en 2008

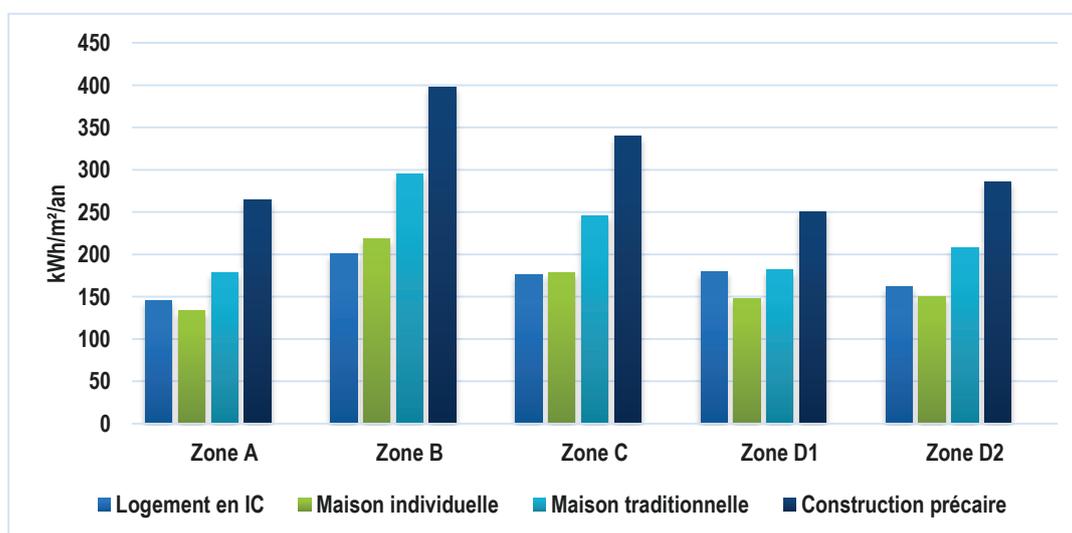
Type de logement	Logement en IC	Maison individuelle	Maison traditionnelle	Construction précaire	Moyenne
Consommation unitaire (kWh/m <sup>2</sup> /an)	166	172	229	305	182

Enfin, il sort de la désagrégation des consommations unitaires à l'échelle régionale un énorme écart quantitatif. Ce second niveau de ventilation nous permet de mesurer l'effet de la variation des températures sur la consommation unitaire à l'échelle du parc. À ce titre, la consommation

unitaire de la zone B apparaît la plus élevée, plus de 278 kWh/m<sup>2</sup>/an. Elle est donc considérée comme la plus « énergivore ».

Si nous poursuivons la désagrégation des consommations unitaires par typologie du parc, nous constatons que la Figure 4-24 montre qu'à ce niveau, les constructions précaires présentent d'énormes écarts de performance relativement aux types de logements : plus de 398 kWh/m<sup>2</sup>/an en zone B, contre 133 kWh/m<sup>2</sup>/an dans les maisons individuelles en zone A. Bien entendu, ces importants écarts de consommation sont liés à la qualité de l'enveloppe bâtie relative à chaque type de logement. On constate néanmoins que l'effet de la variation des températures amplifie fortement les consommations dans le parc.

Figure 4-24 : Performances énergétiques dans le secteur résidentiel



#### 4.10 Émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle du parc en 2008

Rappelons que notre modèle d'émissions de CO<sub>2</sub> s'appuie sur une méthode simple pour calculer le bilan carbone dans le secteur résidentiel. Il se base en effet sur les consommations ventilées par source d'énergie ainsi que sur les facteurs d'émissions relatifs à celles-ci. Les facteurs d'émissions sont donc exogènes au modèle.

La désagrégation des consommations totales par source d'énergie montre que la part du gaz naturel s'élève à plus de 43,4 TWh, celle du gaz butane à 45,8 TWh. Quant à l'électricité, elle

est de 27,7 TWh. Il est intéressant de constater que les consommations d'énergie dans le parc concernent à plus de 76 % le gaz.

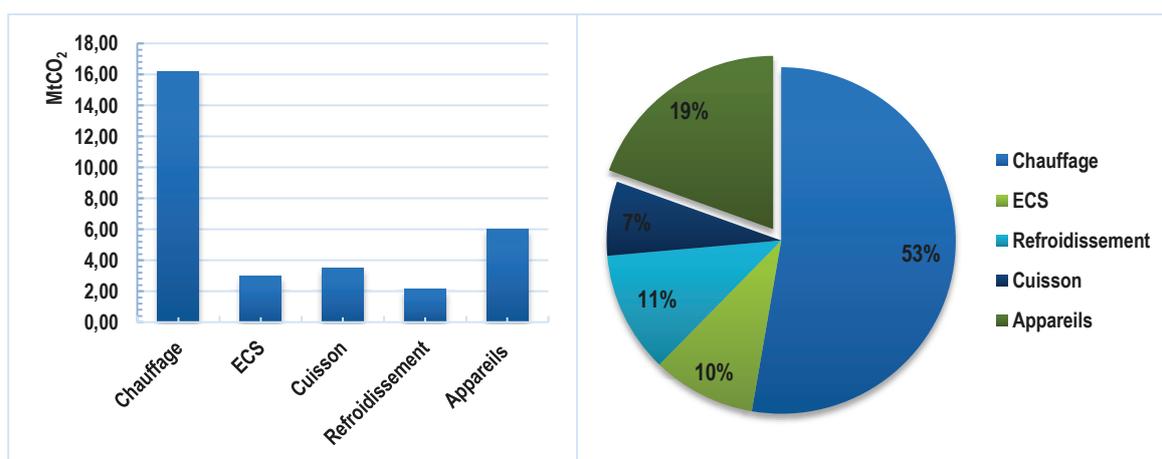
Compte tenu de ces consommations et des facteurs d'émissions (cf. *supra*), les émissions de CO<sub>2</sub> induites par la consommation d'énergie finale sont estimées à plus de 30,7 MtCO<sub>2</sub> en 2008. Ceci représente une moyenne de 0,90 tCO<sub>2</sub> par personne.

Le chauffage représente la majeure partie des émissions dans le parc, atteignant plus de 16,2 MtCO<sub>2</sub>, soit près de 53 %. La consommation de gaz pour l'eau chaude sanitaire, quant à elle, est à l'origine de l'émission de près de 2,9 MtCO<sub>2</sub> (soit 10 %). La consommation d'énergie pour le refroidissement et pour la cuisson émettent respectivement près de 3,5 et 2,1 MtCO<sub>2</sub>, tandis que les émissions induites par la consommation d'électricité des appareils électroménagers sont de 6 MtCO<sub>2</sub> (cf. Figure 4-26). Ce poste représente une part de 6 MtCO<sub>2</sub>, soit 19 % des émissions dans le parc de logements en 2008.

On a pu constater que la consommation de ce dernier poste est liée à un nombre d'appareils électroménagers inférieur à celui des familles. C'est-à-dire qu'en atteignant un taux de satisfaction général des ménages de 100 % concernant l'équipement (nombre d'appareils égal de ménages), les besoins d'énergie ont tendance à prendre des valeurs plus importantes.

On peut néanmoins s'interroger sur l'impact de cette variable sur l'accroissement des émissions dans le parc, sachant que la quasi-totalité de l'électricité provient de la combustion des hydrocarbures, avec un facteur d'émission relativement élevé de 404 gCO<sub>2</sub>/kWh.

Figure 4-25 : Émissions de CO<sub>2</sub> par type de consommation et par source



La Figure 4-26 montre la ventilation des émissions relatives à chaque type de logement en fonction de sa localisation climatique. Grâce à cette désagrégation, on constate qu'à l'échelle régionale, les zones A et B totalisent plus de 22,6 MtCO<sub>2</sub>, soit 74 % des émissions dans le parc. En zone A, la part des émissions s'élève à 10,6 MtCO<sub>2</sub> et représente donc 35 % des émissions dans le parc, tandis qu'en zone B, la part des émissions totalise près de 11,9 MtCO<sub>2</sub> (39 %).

Si l'on compare les parts des consommations à celles des émissions relatives aux zones climatiques, on constate immédiatement que les écarts sont hétérogènes (cf. plus haut) : alors qu'en zone B, on remarque une baisse des émissions relativement aux consommations d'énergie, cette tendance est inversée en zone A.

Ceci s'explique par le fait que les consommations en zone B se basent à 84 % sur le gaz (naturel ou butane) et à 16 % sur l'électricité. Les émissions dans cette zone sont donc contrebalancées par des facteurs d'émission relativement faibles comparés à celui de l'électricité, qui est de l'ordre de 404 gCO<sub>2</sub>/kWh. À l'inverse, les émissions en zone A sont amplifiées grâce à la part relativement importante des consommations d'électricité : 27 % contre 73 % pour le gaz (cf. Figure 4-27).

La ventilation des émissions selon la typologie de logement montre que la part des émissions du segment des maisons individuelles est fortement dominante dans toutes les zones climatiques. À l'échelle du parc, ces émissions totalisent près de 20,4 MtCO<sub>2</sub>, soit l'équivalent des deux tiers des émissions totales du parc de logements (67 %). Ce constat est le corollaire des consommations énergétiques relativement élevées dans ce segment de parc.

Figure 4-26 : Répartition des émissions par type de logement et par zone climatique

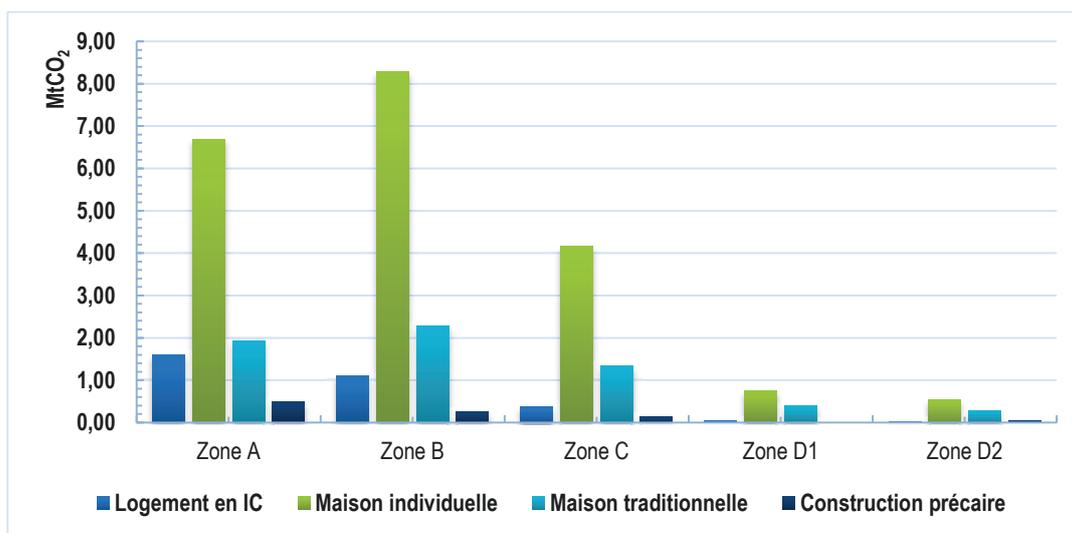
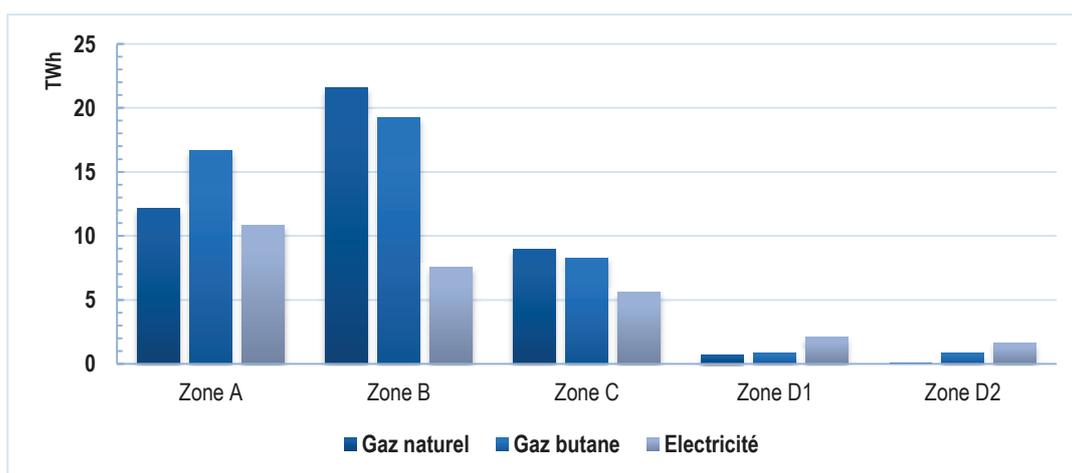


Figure 4-27 : Ventilation des consommations par source et par zone climatique



## Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées d'un tel examen de l'état du parc de logements, ainsi que de la reconstitution des consommations énergétiques et des émissions induites.

Tout d'abord, on conclut que la dynamique actuelle, au sein des ménages, notamment l'accroissement du nombre de nouveaux ménages et la nucléarisation des ménages collectifs

(familles élargies), a tendance à amplifier la demande de logements. Ceci aurait un effet mécanique sur la dynamique d'accroissement des consommations énergétiques dans le parc.

Ensuite, la modélisation des consommations énergétiques nous a permis de reconstituer des besoins énergétiques relatifs à chaque poste et par typologie de logement. Il ressort de cette ventilation que le chauffage et le refroidissement représentent une part importante des consommations d'énergie (84 TWh). Bien entendu, ceci est lié aux écarts de températures extérieure et intérieure relatifs à chaque zone climatique. Cependant, il apparaît que les consommations sont assez importantes dans les segments des maisons traditionnelles et des constructions précaires. Au regard de ce constat, il est donc clair que l'amélioration de l'enveloppe bâtie recèle un potentiel considérable de réduction de la consommation d'énergie dans les logements.

Enfin, à ce niveau de travail, on a montré que la consommation d'électricité dans le parc s'élève à 15 TWh, soit 23 kWh/m<sup>2</sup>/an. On constate que l'effet de rattrapage des ménages en équipements électroménagers pourrait augmenter significativement les besoins en énergie, mais aussi les émissions de CO<sub>2</sub>.

# Chapitre 5 Prospective de la demande énergétique à l'horizon 2050

L'objectif final du présent chapitre est de réaliser un travail prospectif afin de mesurer l'impact de la pénétration de nouvelles technologies sur les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> dans le parc de logements à l'horizon 2050. Pour ce faire, nous avons choisi de développer une approche *bottom-up* afin d'évaluer la performance des actions à l'échelle du bâtiment pour extrapoler ensuite les résultats à l'échelle du parc.

Comme indiqué, la constitution d'un scénario de long terme s'articule autour de trois sous-ensembles d'hypothèses :

- les hypothèses démographiques ;
- les hypothèses socio-économiques ;
- les hypothèses de calculs énergétiques à l'échelle urbaine.

Ces trois corps d'hypothèses s'articulent de façon homogène, et leur distinction ne signifie pas qu'elles seront considérées comme totalement séparées. Premièrement, ces hypothèses découlent d'un processus cohérent d'identification (système de variables) constitué en amont du modèle ; deuxièmement, le modèle est construit de façon à endogénéiser au maximum les interactions et les causalités entre ces trois ensembles d'hypothèses.

Précisons que le scénario de référence sous-entend ici une poursuite des tendances actuelles sans interruption jusqu'en 2050. On entend, dans ce travail, par « tendances actuelles » notamment :

- une croissance dynamique de la population et des ménages, en se basant sur les données RGPH ;
- un développement urbain continu par l'augmentation de la taille du parc de logements ;
- une croissance économique de la production et de la consommation de biens et services ;
- la pérennité des ressources énergétiques actuelles ;

- des progrès technologiques continus permettant un accès rapide à des équipements plus efficaces.

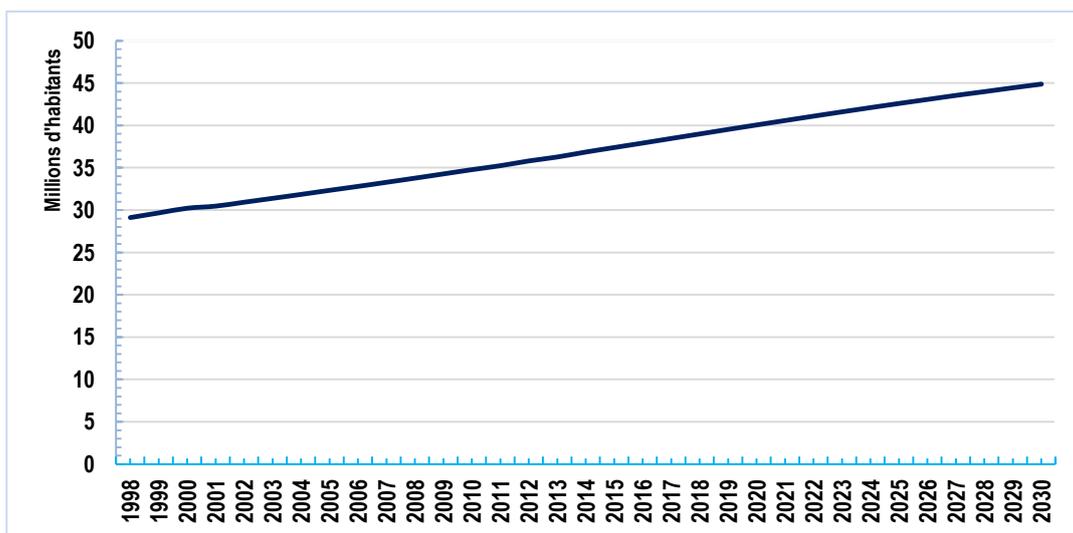
## 5.1 Démographie et parc de logements à l’horizon 2050

### 5.1.1 Population

Les variables démographiques sont prises en compte dans le modèle comme des tendances lourdes. Elles sont considérées comme des variables exogènes à notre modèle.

Ici, la projection du nombre de personnes constituant la population se base sur les hypothèses démographiques du scénario central de l’Office national des statistiques algérien (ONS). Ce scénario suppose une augmentation continue de ce nombre, selon un taux d’accroissement relativement stable. D’après les projections du scénario central de l’ONS, la population algérienne compterait 52,2 millions d’habitants à l’horizon 2050, ce qui représenterait une augmentation de près de 18,3 millions d’habitants. Ces projections envisagent une baisse significative du taux d’accroissement de la population, qui passerait de 2,9 % en 2008 à près de 1 % en 2030. Nous retenons néanmoins ces chiffres, bien que les précédentes projections montrent que la population croît plus rapidement que dans la projection centrale de l’ONS (cf. Figure 5-1).

Figure 5-1 : Évolution de la population à l’horizon 2030



Source : Scénario central pour la population et le nombre de ménages, ONS Algérie.

La désagrégation de la population selon la pyramide des âges montre une baisse de la population la plus jeune (0-19 ans), qui passe de 48,4 % en 2008 à 28,8 % en 2030. Cette baisse est contrebalancée par l'accroissement des autres tranches d'âge (cf. Tableau 5-1). Ce tableau montre un vieillissement de la population active, mais aussi une augmentation de l'espérance de vie.

Tableau 5-1 : Répartition de la population par groupes d'âge (2008-2030)

Année	Population	0-19 ans		20-59 ans		60-80 ans		80 et +	
		Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
2008	34 080 030	16 511 694	48,4	15 312 444	44,9	1 615 020	4,74	154 689	0,4
2010	34 768 843	11 867 325	34,1	18 702 880	53,7	1 370 146	3,94	1 237 918	3,5
2015	37 385 176	11 830 063	31,6	20 636 178	55,2	1 791 658	4,79	1 404 410	3,7
2020	40 053 555	12 338 367	30,8	21 927 312	54,7	2 275 299	5,68	1 647 946	4,1
2025	42 595 080	12 822 367	30,1	228 943 312	53,7	2 778 619	6,52	2 093 600	4,9
2030	44 883 825	12 959 256	28,8	23 679 095	52,7	3 447 765	7,68	2 648 076	5,9

Source : Scénario central ONS.

### 5.1.2 Nombre de ménages

On a montré, dans le chapitre précédent, que la demande globale en service énergétique est également corrélée aux besoins unitaires des ménages. La question de l'évolution des effectifs des ménages pour les différents segments décrits dans le secteur résidentiel est éminemment importante et repose sur des considérations de prospective sociétale (Cayla, 2011).

Nous ne disposons pas de projections relatives au nombre de ménages à l'horizon 2050. Les enquêtes RGPH de l'ONS restent discrètes quant à son évolution. En revanche, elles retracent sa progression entre 1998 et 2008. Pour contourner ce manque de données, on s'est contenté de projeter ce nombre selon des taux de croissance actuels ventilés par département. Il s'agit d'une simple extrapolation linéaire du nombre actuel de ménages pour 2050, sur la base du nombre de ménages de 2008 et du taux d'accroissement des deux RGPH (1998 et 2008).

Les projections du scénario central de l'ONS montrent que le nombre de ménages tend à croître plus vite que la population, en raison du nombre important de personnes situées dans la tranche d'âge 20-59 ans (44,9 % en 2008 et 52,7 % en 2030). Cette tranche de la population constitue un potentiel de formation de nouveaux ménages. En effet, les dernières enquêtes indiquent un accroissement annuel moyen de 309 000 ménages par an pour la période 1990-2013 (cf.

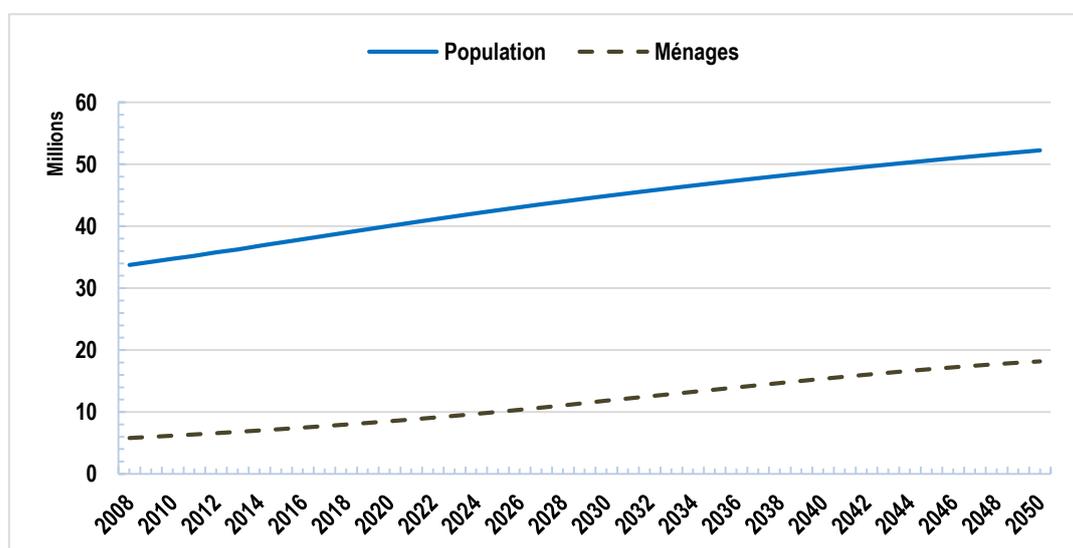
Tableau 5-2). Ceci correspond à un taux d'accroissement annuel moyen de 3 %. En maintenant la tendance observée dans cet intervalle en termes d'accroissement, on estime le nombre total de ménages à plus de 18,16 millions à l'horizon 2050 (cf. Figure 5-2).

Tableau 5-2 : Évolution des mariages enregistrés et du taux brut de nuptialité

Année	1990	2000	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Nombre de mariages	149 345	177 548	331 190	341 321	344 819	369 031	371 280	387 947
Taux brut de nuptialité (%)	5,97	5,84	9,58	9,68	9,58	10,05	9,9	10,13

Source : ONS, Algérie.

Figure 5-2 : Projection de la population et des ménages à l'horizon 2050



Source : Scénario central pour la population et le nombre de ménages, ONS Algérie.

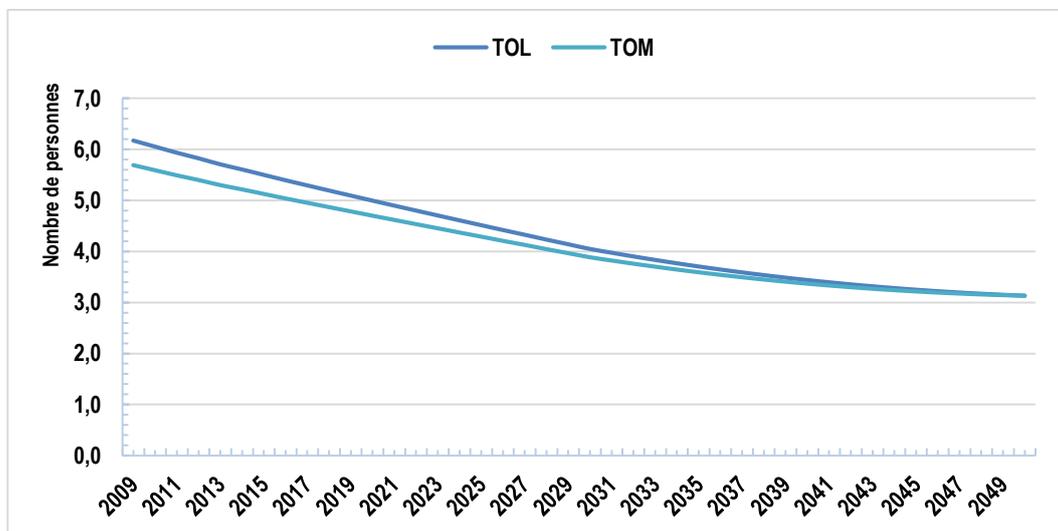
### 5.1.3 Taille du ménage et nombre de ménages par logement

Dans notre modèle, la projection du nombre de ménages par logements à l'horizon 2050 repose sur l'hypothèse d'une nucléarisation progressive des ménages collectifs (cf. chapitre 3, § 4.1. ci-dessus).

En ce qui concerne le taux de ménages par logement (TML), on suppose une baisse progressive à l'échelle départementale, afin d'atteindre l'objectif de stabiliser ce taux à 1 à l'horizon 2050 (contre 1,1 en 2008), soit un ménage par logement. Le taux d'occupants par ménage (TOM) est quant à lui prolongé par une extrapolation linéaire jusqu'en 2050. D'après ce scénario de

référence, le taux d'occupants par ménage, à l'échelle nationale, passerait de 5,9 personnes en 2008 à 3,1 en 2050 (cf. Figure 5-3). La structure des ménages serait donc homogénéisée.

Figure 5-3 : Projection du nombre de personnes par ménage et par logement en 2050 à l'horizon 2050 (scénario de référence)



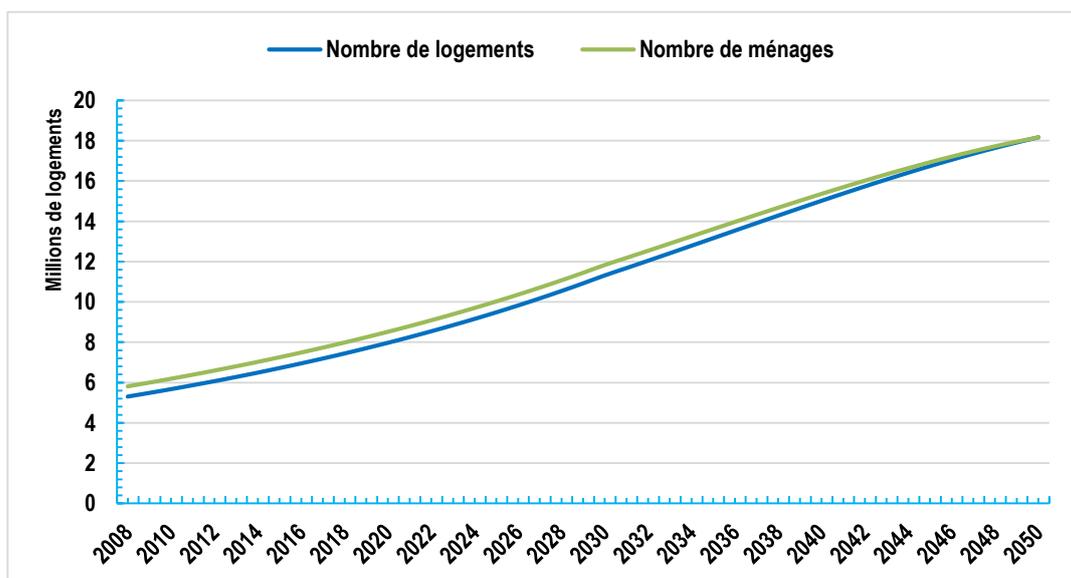
Source : Scénario central pour la population et le nombre de ménages, ONS Algérie.

Le modèle dynamique du parc de logements (résidence principale) est lié directement à l'évolution numérique des ménages. Il apparaît que l'effet mécanique de la baisse de la taille des ménages et la nucléarisation de ceux-ci renforceraient la pression de la demande de logements.

En effet, pour l'intervalle 2008-2050, le nombre total de logements passerait de 5,30 millions à 18,16 millions (cf. Figure 5-4), ce qui représente près de 13,14 millions de logements neufs. Ce chiffre semble important au regard du stock actuel, mais il est le corollaire d'un double effet : d'une part, il serait lié au nombre important de demandes de logements émanant des nouveaux ménages ; d'autre part, il prend en compte le rattrapage de la demande de logement liée au déficit existant dans le parc. Rappelons que ce déficit (évalué à 10 % du nombre total de logements) serait engendré par l'effet de la nucléarisation des ménages collectifs.

Compte tenu de l'objectif fixé de satisfaire la demande de logements à l'horizon 2050, on considère donc que le nombre d'entrées de logements neufs dans le parc serait en moyenne de l'ordre de 309 000 par an.

Figure 5-4 : Projection du nombre de logements à l'horizon 2050



#### 5.1.4 Nombre de logements par typologie et par zone climatique

Rappelons que l'un des intérêts de ce travail de prospective est de s'appuyer sur un vaste champ de désagrégation de variables, susceptible d'apporter des éléments bien plus robustes pour appuyer les données utilisées en entrées dans notre modèle. La projection du nombre de logements selon la typologie du parc constitue une tâche pertinente, sachant que la forte disparité des besoins énergétiques est liée au différentiel des caractéristiques relatives à chaque type de logement.

Comme on l'a déjà évoqué, les enquêtes RGPH (1998 et 2008) montrent une dynamique dans la structure typologique du parc. On a vu, dans le chapitre précédent, que les logements en IC neufs représentent près de 50 % du parc des logements neufs. À l'échelle des départements, ce taux peut dépasser largement cette moyenne, notamment dans des grandes agglomérations comme Alger ou Oran. C'est une tendance observée dans cet intervalle temporel et qu'on maintient dans la projection du nombre de logements à l'horizon 2050.

La projection de cette dynamique à l'échelle départementale du parc s'effectue par une extrapolation linéaire des parts actuelles de chaque type de logement, en se basant sur le mouvement observé dans la typologie du parc dans les deux années 1998 et 2008 (cf. équation ci-dessous).

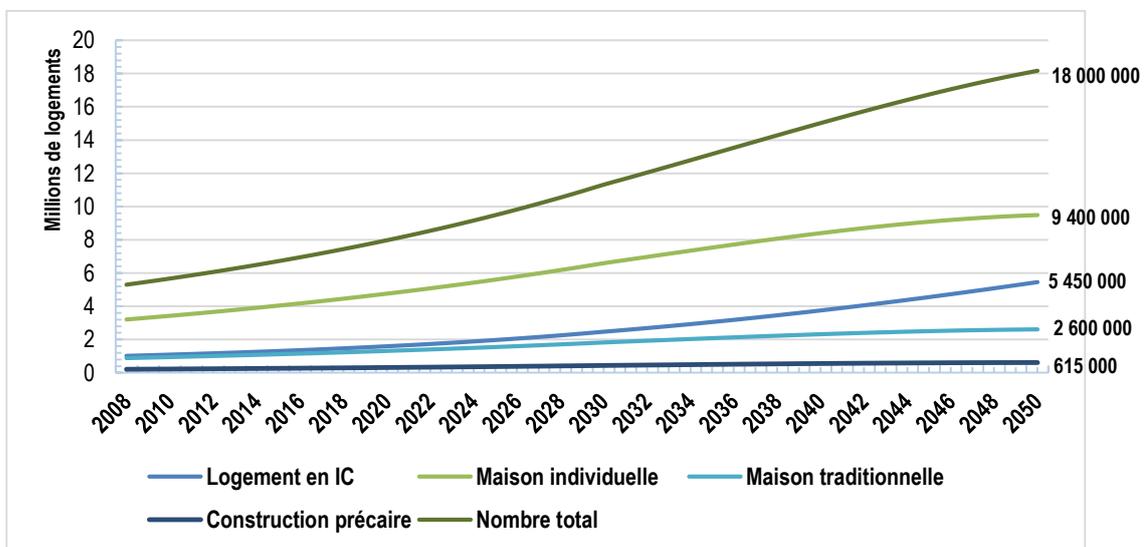
$$Logt(t) = \sum_1^{dept=48} \frac{Pop(t, dept)}{TOM(t, dept) \times TML(t, dept)}$$

$$Logt(t + 1) = \sum_1^{dept} \left( Logt_{IC,MI,MT,CP}(t, dept) \times (1 + Taux_{IC,MI,MT,CP}(t, dept))^{t-2008} \right)$$

$$\forall t \in \{2008, \dots, 2050\} \{dept = 1:48\}$$

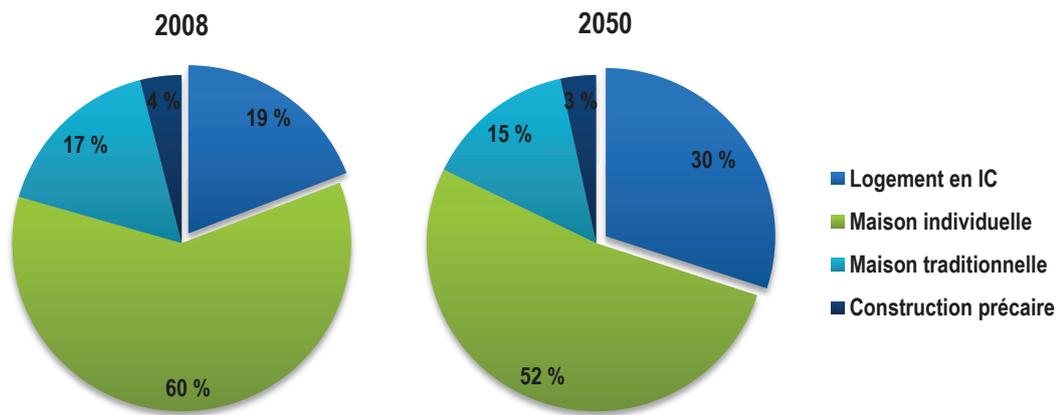
Il résulte de cette projection une augmentation numérique des tranches de logements en immeubles collectifs. Leur nombre passerait de 1,01 million en 2008 à près de 5,45 millions en 2050 (cf. Figure 5-5). Cette augmentation s'accompagne de l'accroissement de la part de ce type de logements dans le parc. En effet, pour cette période, leur taux est passé de 17 % à 30 %. L'augmentation est toutefois contrebalancée par la diminution des parts relatives aux maisons individuelles et aux maisons traditionnelles, soit respectivement 52 % et 14 % contre 60 % et 17 % en 2008. Les constructions précaires, quant à elles, verraient leur taux passer de 4 % à 3 %, soit une baisse de 0,6 % (cf. Figure 5-6).

Figure 5-5 : Projection du nombre de logements par typologie



---

Figure 5-6 : Évolution de la typologie du parc à l'horizon 2050



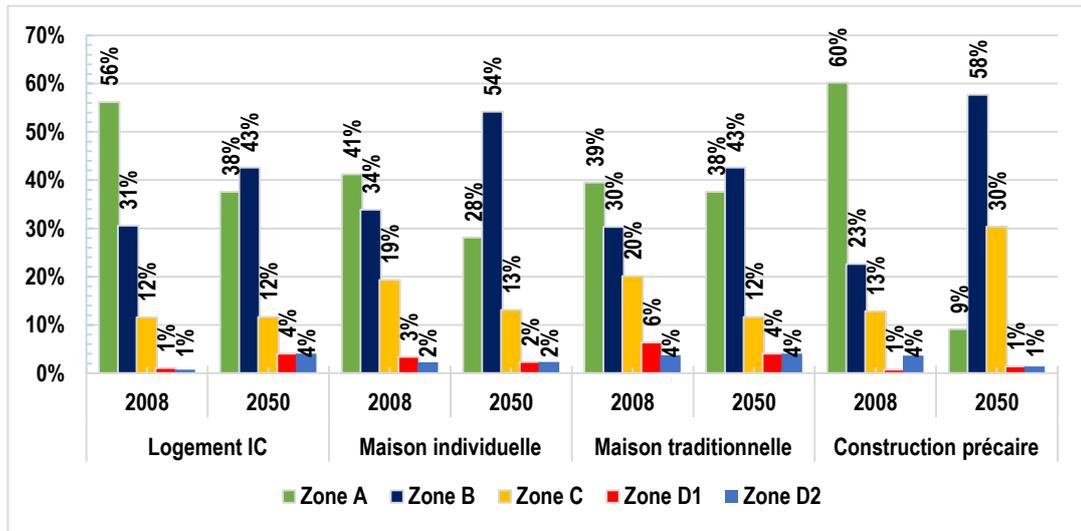
---

La ventilation du nombre de logements selon les zones climatiques permet d'examiner la distribution spatiale du développement urbain et son effet sur l'évolution des consommations énergétiques.

En désagrégant le nombre de logements par zone climatique, on peut constater que l'évolution spatiale du parc apparaît très contrastée. Pour l'intervalle temporel 2008-2050, la part du parc de logements en zone B décroîtrait relativement aux autres régions du territoire national, et passerait de 32 % à 28 %, tandis que la part de parc en zone A serait relativement stable. En ce qui concerne les zones du Sud algérien, notamment les zones C, D1 et D2, on constaterait une nette progression de leurs parts dans le parc national de logements, soit 2,7 % et 0,58 % respectivement en zones C et D1. Quant à la zone D2, le parc de logements a presque doublé au cours de cet intervalle, passant de 2,2 % à 4,0 % (cf. Figure 5-7).

Au regard de cette répartition géographique du parc, on peut admettre que cette nouvelle distribution spatiale, lorsqu'elle est corrélée aux variables climatiques, pourrait effectivement impacter les besoins énergétiques, notamment en termes de chauffage, d'ECS et de refroidissement, dans le parc à l'horizon 2050.

Figure 5-7 : Nombre de logements par typologie et selon la zone climatique (2008-2050)

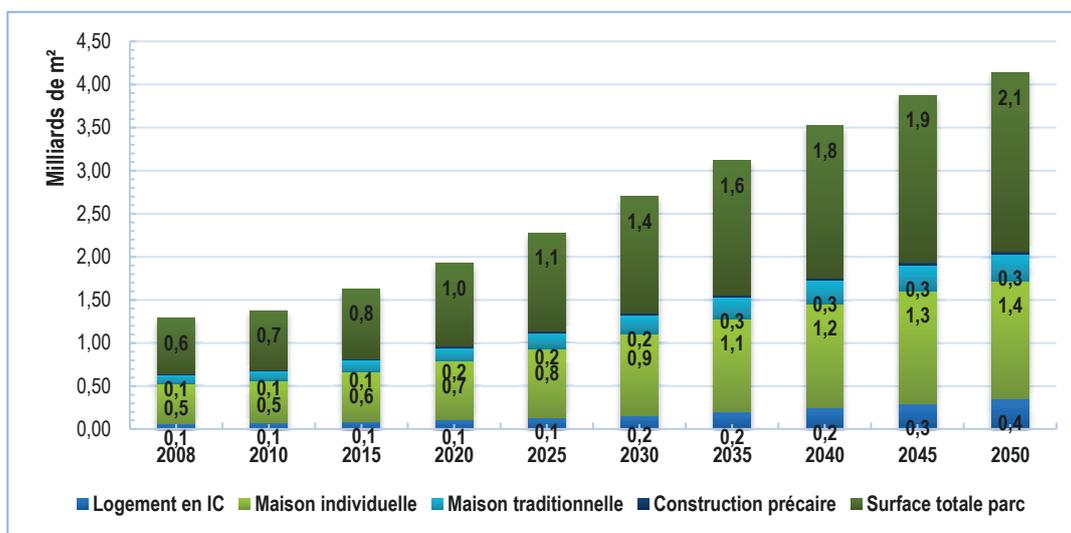


### 5.1.5 Surface du parc à l'horizon 2050

Notre modèle de parc nécessite également de prendre en compte l'évolution de la surface habitable. La mécanique d'accroissement de la surface habitable du parc est liée à deux variables : la surface habitable moyenne par typologie de logements et le nombre de logements.

Ici, on considère que la surface habitable moyenne par type de logements resterait stable à l'horizon 2050 (cf. *supra*). La projection de la surface du parc serait liée uniquement au nombre de logements et à la distribution typologique dans le parc. Dans ces conditions, la surface habitable pourrait atteindre, à l'horizon 2050, plus de 2 066 millions de mètres carrés, soit plus de trois fois le niveau de 2008 (cf. Figure 5-8). Cet accroissement rapide de la surface du parc serait corrélé à l'accroissement du nombre de logements dans le parc.

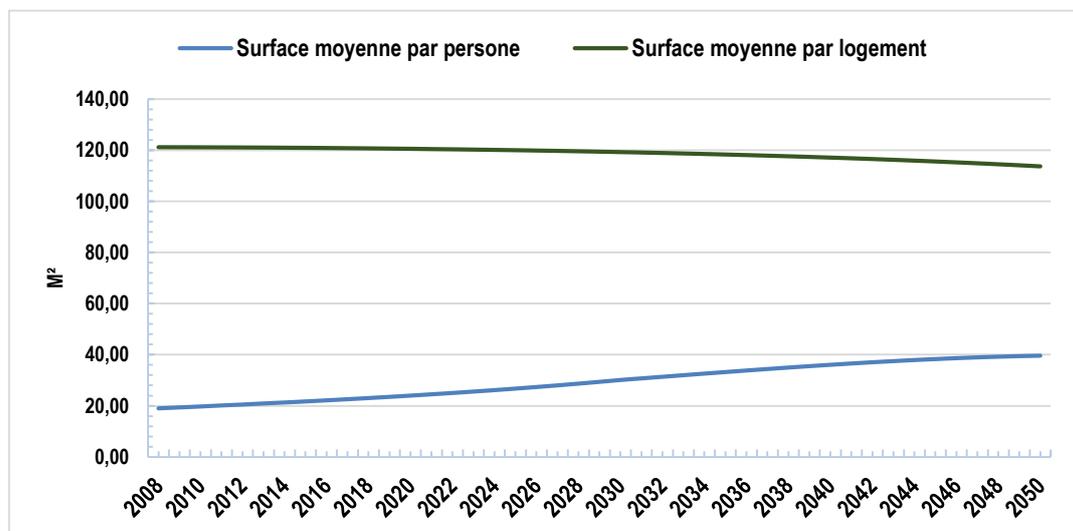
Figure 5-8 : Estimation de la surface totale du parc à l'horizon 2050



En revanche, la surface moyenne d'un logement atteindrait 113 m<sup>2</sup>, alors qu'elle était proche de 121 m<sup>2</sup> en 2008 (cf. Figure 5-9). Ceci serait lié à la dynamique typologique dans le parc. En d'autres termes, pour l'intervalle 2008-2050, la projection du nombre de logements par typologie montre une baisse de la part des maisons individuelles dans les logements neufs (SHAB = 144 m<sup>2</sup>) : 52,19 % en 2050, contre plus de 60,29 % en 2008. Cette baisse serait contrebalancée par l'accroissement des logements en IC, avec une surface habitable plus faible (SHAB = 65 m<sup>2</sup>), ce qui explique la diminution de la surface moyenne par logement.

Bien que les projections indiquent une baisse de la surface habitable par logement, la même figure montre que la surface habitable par personne continuerait à augmenter, passant de 19,05 m<sup>2</sup> en 2008 à plus de 39,55 m<sup>2</sup> à l'horizon 2050. Ceci est lié principalement à la diminution substantielle du nombre d'occupants par logement.

Figure 5-9 : Projection de la surface moyenne par personne et par logement à l'horizon 2050



## 5.2 Hypothèses relatives au scénario tendanciel

Le scénario tendanciel de calcul énergétique dans le parc consiste à prolonger les tendances observables en termes de caractéristiques de l'enveloppe bâtie, des équipements électroménagers et des besoins en énergie, sans adopter de mesures volontaristes afin de modifier l'évolution des consommations. Le recours à ce scénario a pour but de quantifier les consommations et les émissions à l'horizon 2050, en poursuivant les tendances actuelles. Il sert de scénario de référence pour mesurer les gains énergétiques induits par des scénarios volontaristes.

Les hypothèses retenues dans ce scénario s'appuient essentiellement sur deux éléments :

Dans le scénario tendanciel, on prolonge le nombre de logements en conservant les caractéristiques des systèmes constructifs actuels, relatifs à la typologie de logement dans le stock existant et celui du parc du neuf. On maintient les valeurs déperditives de l'enveloppe bâtie, pour chaque type de logement, dans le calcul des besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement. Comme nous l'avons indiqué, la construction des logements en IC est considérée comme conforme aux normes de construction, notamment à la réglementation thermique de 1997. Ici, on considère que les logements en IC neufs seront également construits conformément aux règlements en vigueur. On reprend donc les mêmes valeurs appliquées dans le parc existant. En ce qui concerne les maisons individuelles, les maisons traditionnelles et les

constructions précaires, que ce soit pour le parc existant ou celui du neuf, on reprend des valeurs identiques à celles identifiées dans le parc existant (cf. *supra*).

De manière analogue, l'estimation des besoins en énergie pour les équipements électroménagers dans le parc de logements neufs sera basée sur les caractéristiques techniques, à savoir la puissance des appareils utilisés actuellement, tout en maintenant les mêmes fréquences d'usage relatives à chaque appareil.

On a pu constater, à partir du bilan de consommation d'énergie établi dans le précédent chapitre, que les besoins en énergie induits par les équipements électroménagers représentent près de 13 % des besoins dans le secteur résidentiel, soit une consommation unitaire moyenne de 23 kWh/m<sup>2</sup>/an. Or, cette part de la consommation a tendance à s'élever significativement sous l'effet du rattrapage des ménages en équipements électroménagers. En effet, selon les enquêtes RGPH (1998 et 2008), le niveau de cet équipement est en progression. Ici, on maintient l'hypothèse selon laquelle il continuerait de progresser pour atteindre un niveau de satisfaction générale égal à 100 % à l'horizon 2050. Dans cette hypothèse, le nombre d'appareils électroménagers (par type) serait égal à celui des ménages.

### 5.3 Hypothèses relatives aux scénarios volontaristes

Dans les scénarios volontaristes, les actions sur l'enveloppe des bâtiments des logements neufs concernent l'effectif du parc de logements neufs construit après 2008. Il s'agit de tester l'amélioration des performances thermiques des logements, en augmentant l'isolation de l'enveloppe bâtie. Cet effort se traduit par le renforcement de la réglementation thermique dans les logements neufs afin de réduire les besoins en chauffage et en refroidissement. D'un point de vue technique, ces efforts sur l'enveloppe du bâtiment se traduisent par la réduction des déperditions thermiques surfaciques ( $D_t$ ). On a formulé trois hypothèses en vue d'améliorer la performance thermique dans les logements neufs, qui correspondent à trois scénarios de consommations énergétiques (cf. Tableau 5-4 et Tableau 5-3).

Tableau 5-3 : Hypothèses de renforcement de la réglementation thermique

Hypothèses	Typologie	Toiture	Plancher bas	Paroi	Porte	Porte-fenêtre
Hypothèse 1 : Application RT 97	Logement en immeuble collectif	1,1	2,4	1,2	2,5	4,5
	Maison individuelle (réglementaire)	1,1	2,4	1,2	2,5	4,5
	Maison traditionnelle	1,1	2,4	1,2	2,5	4,5
	Construction précaire	2,5	2,4	1,4	2,5	4,5
Hypothèse 2 : Application BFC	Logement en immeuble collectif	0,2	0,5	0,45	2,5	2,6
	Maison individuelle (réglementaire)	0,2	0,5	0,45	2,5	2,6
	Maison traditionnelle	0,2	0,5	0,45	2,5	2,6
	Construction précaire	2,5	2,4	1,4	2,5	4,5
Hypothèse 3 : Application BBC	Logement en immeuble collectif	0,15	0,25	0,25	2,5	2,2
	Maison individuelle (réglementaire)	0,15	0,25	0,25	2,5	2,2
	Maison traditionnelle	0,15	0,25	0,25	2,5	2,2
	Construction précaire	2,5	2,4	1,4	2,5	4,5

Tableau 5-4 : MTD retenues en logements neufs et dans la réhabilitation du parc existant (scénarios : RT97, BFC et BBC)

Parois extérieures opaques	Épaisseur isolant (m)	Conductivité (W/m.K)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> .K/W)
ITI polystyrène	0,10	0,032	3,13
ITE polystyrène extrudé + enduit	0,15	0,03	5,00
<b>Toiture</b>			
ITI combles perdus laine de roche	0,20	0,035	5,71
IT rampant laine de roche	0,18	0,035	5,14
ITE toit terrasse polyuréthane	0,15	0,03	5,00
<b>Plancher bas</b>			
Sur local non chauffé polyuréthane (cave ou vide sanitaire accessible)	0,10	0,03	3,13
Terre battue ou existant vers plancher chauffant basse température	0,08	0,032	2,50
<b>Menuiseries / vitrages</b>		<b>Coefficient U (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	
Menuiseries bois (ou PVC) à double vitrage (faible émissivité)		2,6	0,67

Les efforts de réhabilitation massive concerneraient l'ensemble du parc existant, soit 5,3 millions de logements. Les constructions précaires, du fait de leur statut illicite ainsi que de leur vétusté importante, seraient exclues de ces efforts. On privilégie, pour ce segment de parc, les opérations de renouvellement urbain (démolition/reconstruction). Les besoins d'énergie

pour le chauffage et le refroidissement dans les constructions précaires demeureront désormais identiques au scénario tendanciel.

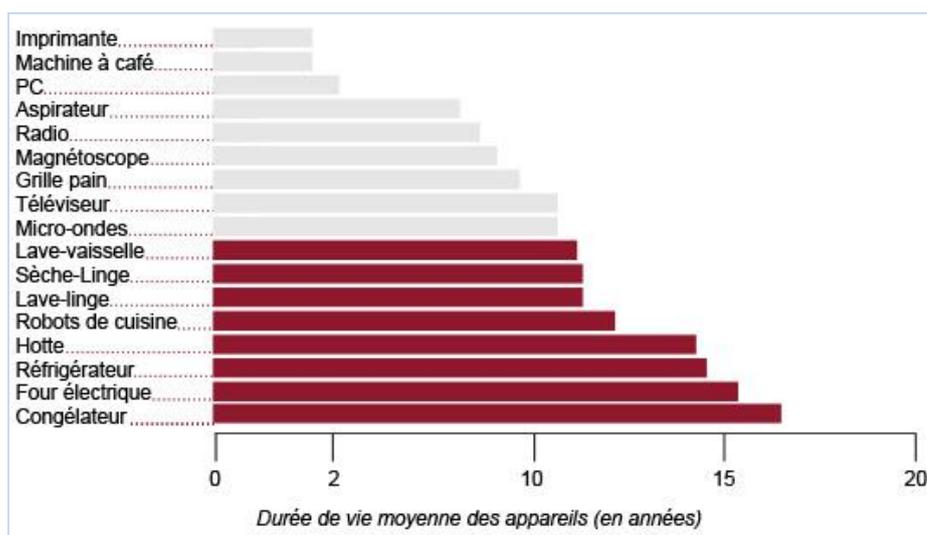
Les hypothèses d'amélioration de l'enveloppe appliquées dans la réhabilitation seront identiques à celles appliquées dans le parc des logements neufs (cf. Tableau 5-3). Dans notre modèle, la dynamique de réhabilitation énergétique est examinée à partir de deux variables d'entrée : d'une part, le mouvement de réhabilitation du bâti exprimé en nombre de logements réhabilités par an ; d'autre part, les gains énergétiques qui en découlent, en termes de consommations relatives au chauffage et au refroidissement.

Si on maintient les fréquences d'usage des appareils électroménagers, il est évident que les consommations d'énergie dépendent uniquement des puissances de ceux-ci. Les mesures d'efficacité énergétique pour ce poste seraient liées directement au choix des meilleures technologies disponibles dans le domaine des équipements électroménagers, notamment les appareils à faible consommation (cf. Tableau 5-5). La prise en compte de ce levier dans nos scénarios volontaristes se traduit par l'introduction de nouvelles technologies dans le parc de logements neufs. On suppose également un remplacement progressif des appareils dans le parc existant, selon un rythme calé sur la durée de vie relative de chaque type d'appareil (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 5-5 : Technologies utilisées dans le secteur résidentiel

Usages	Technologies existantes	Nouvelles technologies
Isolation	X	Isolation murs ITI Isolation murs ITE Isolation combles Fenêtres double vitrage VWM
ECS	Ballon électrique Chauffe-eau gaz individuel	Ballon électrique Chauffe-eau gaz individuel
Éclairage	Incandescent LBC	LBC
Froid	Réfrigérateur Combiné	Réfrigérateur A+ Réfrigérateur A++
Lavage	Lave-linge	Lave-linge A+

Figure 5-10 : Durée de vie moyenne des appareils électroménagers (en années)



Source : <http://www.neff-electromenager.com/>

## 5.4 Résultat du scénario tendanciel (référence)

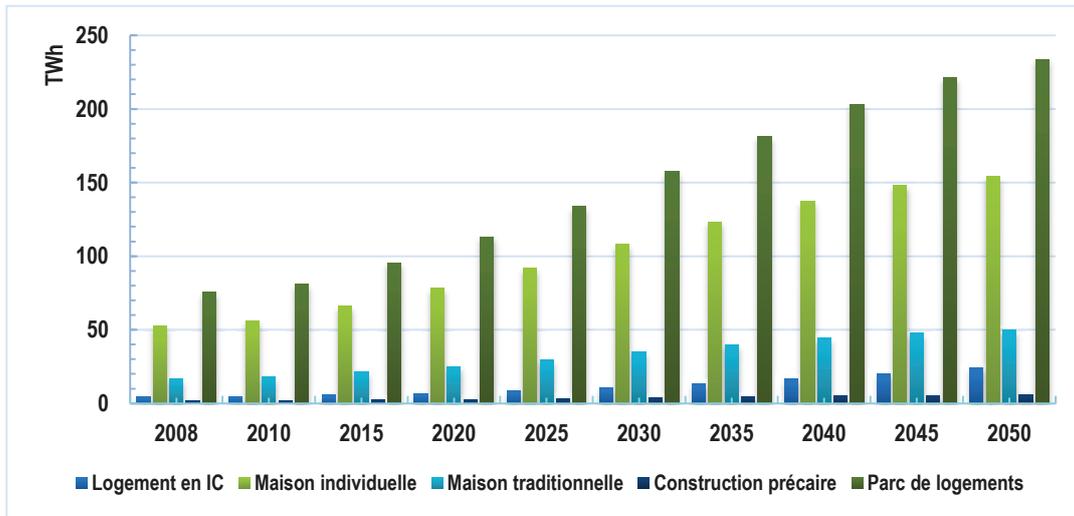
Ici, le scénario tendanciel est une projection des tendances observées (2008) des consommations d'énergie et des émissions, en se basant sur les données démographiques et du parc de logements tirées du scénario central de l'ONS. Celui-ci trace l'inévitable trajectoire de l'évolution des consommations/émissions lorsque l'on exclut toute action prospective.

Ici, le scénario tendanciel « de référence » vient étayer le fondement de la problématique de cette thèse, en guise de réponse à la question suivante : Si l'on exclut toute action sur le bâti du parc existant ou celui du neuf, et si les équipements du parc restaient identiques à ceux de 2008, quelles seraient les consommations et les émissions du parc de logements en 2050 ?

### 5.4.1 Consommation d'énergie

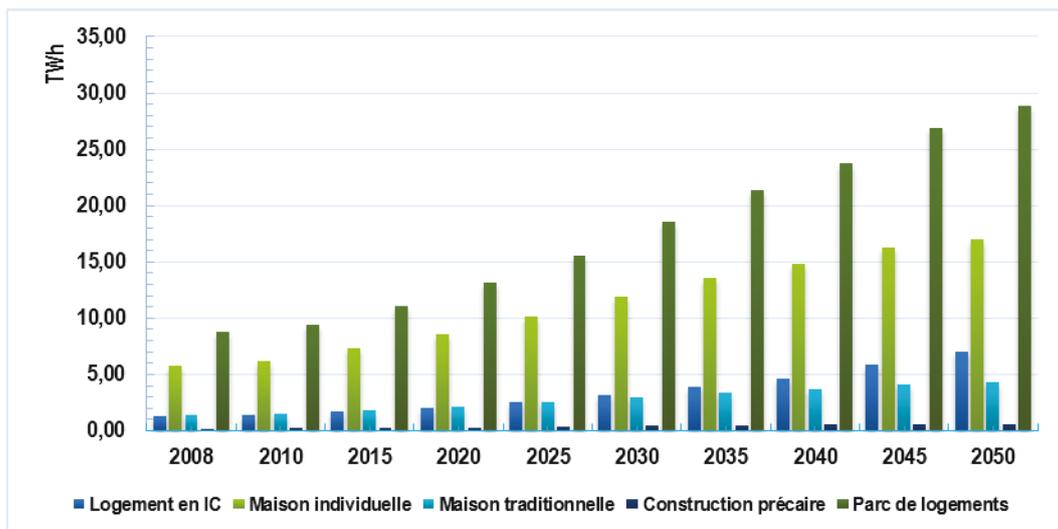
La poursuite des dynamiques de consommation dans le parc de logements, à l'image de ce scénario de référence, montre une forte augmentation de la consommation énergétique liée au chauffage. Cette consommation passerait de 75,5 TWh en 2008 à près de 233,8 TWh/an à l'horizon 2050, soit une croissance de plus de 210 %. Ceci est le résultat de la mécanique d'accroissement du nombre de logements dans le parc (cf. Figure 5-11).

Figure 5-11 : Consommation d'énergie pour le chauffage à l'horizon 2050 (sc. tendanciel)



En termes d'eau chaude sanitaire, on constate, à la Figure 5-12, une forte augmentation des besoins d'énergie pour la production de l'ECS. Pour l'intervalle 2008-2050, la consommation d'ECS passerait de 8,8 à 28,9 TWh/an, soit une croissance de l'ordre de 230 %. Cette croissance apparaît relativement lente comparée au rythme d'accroissement du nombre de logements (plus de 300 %). Ce différentiel s'explique par la baisse du nombre d'occupants par logements, qui passerait en effet, nous l'avons dit, de 5,9 en 2008 à 3,1 en 2050 (cf. *supra*) et se traduirait par une baisse de la consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire par logement.

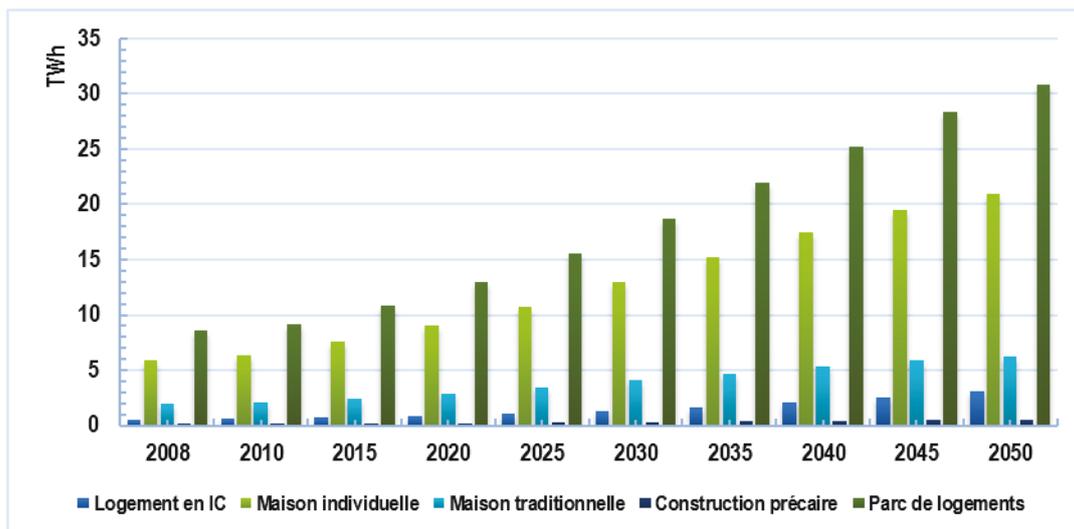
Figure 5-12 : Consommations d'énergie pour l'ECS à l'horizon 2050 (scénario tendanciel)



Les résultats du scénario tendanciel montrent également une croissance de la consommation d'énergie nécessaire pour le refroidissement, qui passerait de 8,6 TWh/an en 2008 à 30,8 TWh/an en 2050 (cf. Figure 5-13), représentant alors près de 7 % de la consommation d'énergie du parc. Elle resterait relativement faible par rapport aux besoins du parc.

Notons qu'en zone D1 et D2, les besoins en énergie pour le refroidissement sont considérés comme le poste de consommation le plus important. En revanche, le nombre de logements, relativement faible dans ces zones (faible concentration urbaine), inverserait cette tendance à l'échelle du parc. De plus, les systèmes de refroidissement pris en compte dans notre scénario bénéficieraient d'un important coefficient de performance (COP = 3), qui amortirait fortement les consommations dans les logements.

Figure 5-13 : Consommations d'énergie pour le refroidissement à l'horizon 2050 (scénario tendanciel)



Les Figure 5-14 et Figure 5-15 montrent que l'impact de l'accroissement du nombre de ménages et d'appareils électroménagers à travers l'effet de rattrapage des équipements pourrait conduire à quadrupler les besoins d'énergie pour la cuisson, les équipements électroménagers et l'éclairage à l'horizon 2050. La consommation d'énergie pour la cuisson passerait de 9,7 TWh/an en 2008 à plus de 41,7 TWh/an à l'horizon 2050. En ce qui concerne les équipements électroménagers et l'éclairage, la consommation s'élèverait à plus de 78,3 TWh/an, alors qu'elle était de 14,8 TWh/an en 2008.

Figure 5-14 : Consommations d'énergie pour la cuisson à l'horizon 2050 (scénario tendanciel)

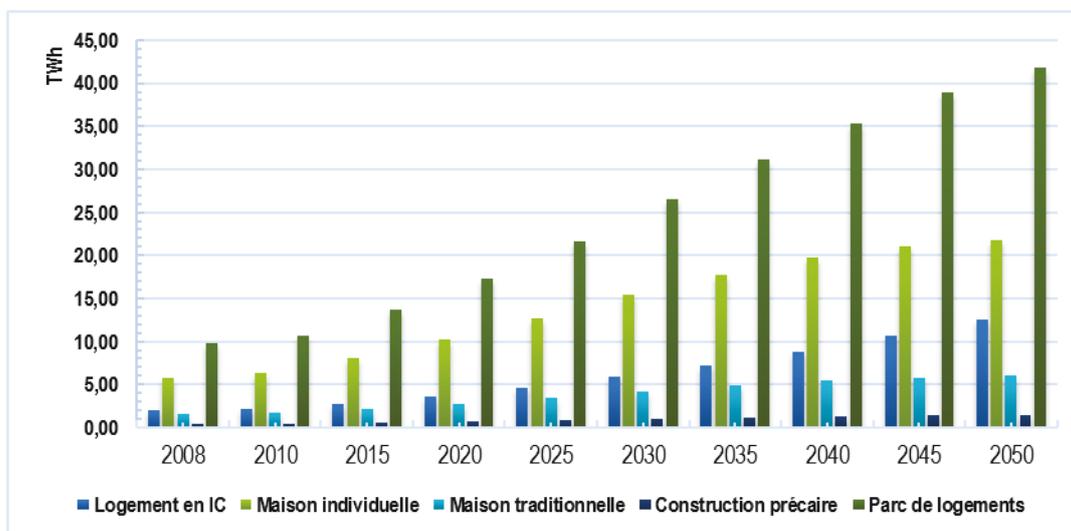
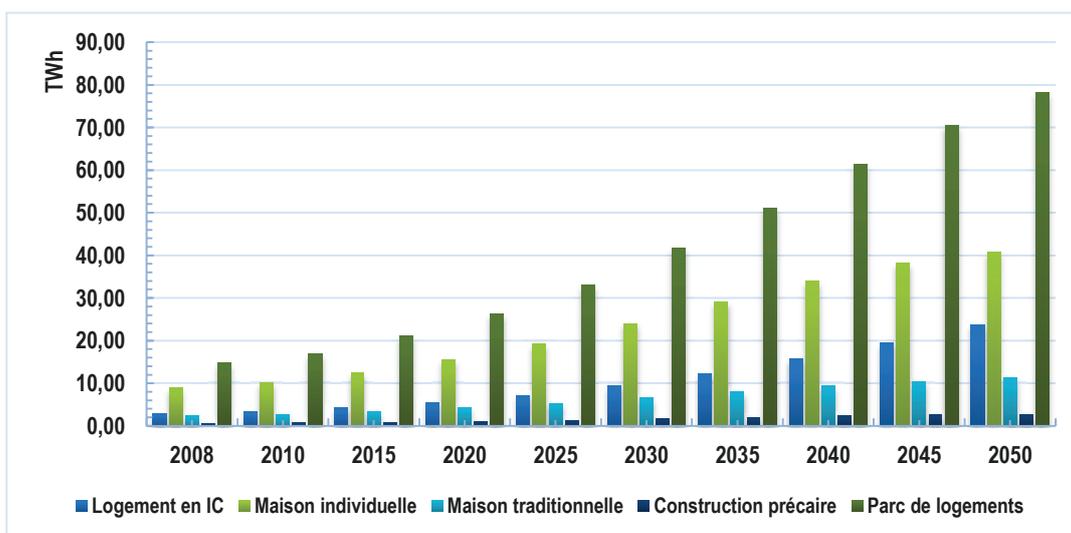


Figure 5-15 : Consommations d'énergie pour les équipements électroménagers à l'horizon 2050 (scénario tendanciel)



#### 5.4.2 Synthèse du scénario tendanciel

Compte tenu de ce qu'on a énoncé, les consommations d'énergie du secteur résidentiel dans le scénario tendanciel pourraient atteindre près de 413,4 TWh/an, alors que celles-ci sont de l'ordre de 117,4 TWh/an en 2008. Ceci correspond à un taux de croissance très élevé, de

l'ordre de 250 %. On note dans ce scénario que la part du chauffage représenterait 57 % de la consommation totale, soit 233 TWh par an, et celle des appareils électroménagers près de 19 % (78,2 TWh). À eux deux, ces postes totaliseraient plus de 75 % des besoins du parc. Les parts des autres usages resteraient relativement faibles : 7 % pour l'ECS, 7 % pour le refroidissement et 10 % pour la cuisson (cf. Figure 5-16).

On constate globalement que la part de la consommation d'énergie du segment des maisons individuelles est en décroissance au profit des logements en IC. Elle passerait en effet de 66 % en 2008 à près de 62 % en 2050. La part des logements en IC passerait quant à elle à plus de 17 %, contre seulement 9 % en 2008. Notons que la variation des parts de consommation se poursuivrait sur l'intervalle 2008-2050. Il est désormais clair que cette dynamique serait liée au mouvement de la typologie du parc, à savoir l'évolution de la part des logements en IC et de celle des maisons individuelles dans le parc (cf. § 1.5. ci-dessus).

Figure 5-16 : Parts des besoins en énergie par typologie du parc (scénario tendanciel)

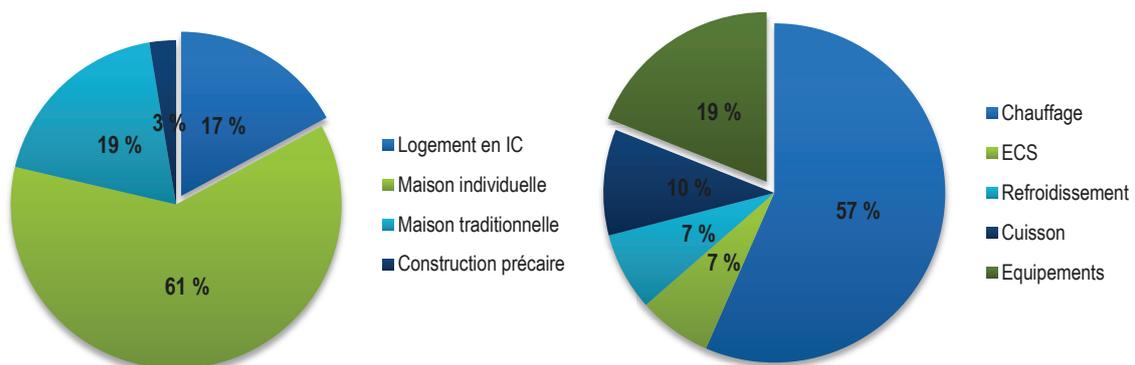
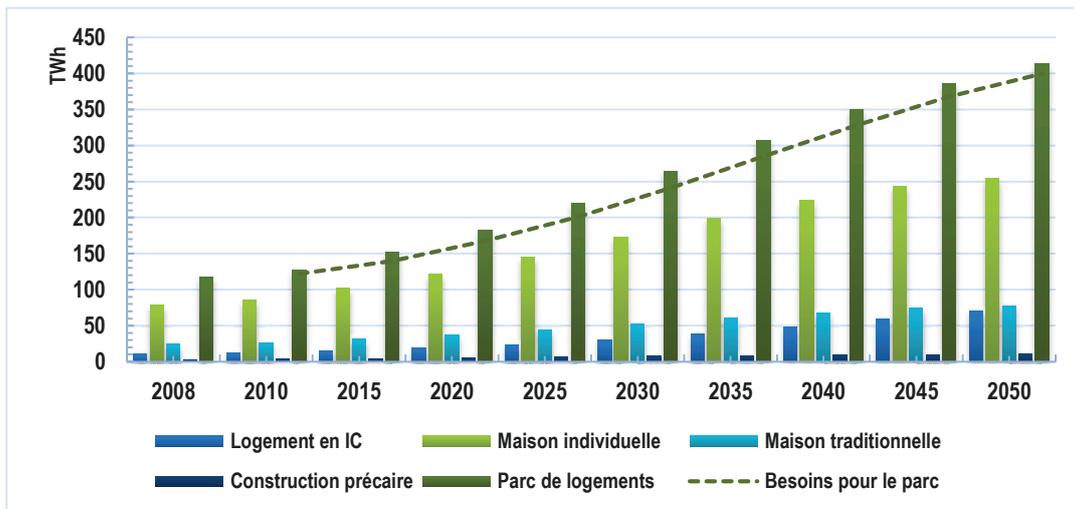


Figure 5-17 : Consommations d'énergie du parc de logements (scénario tendanciel)



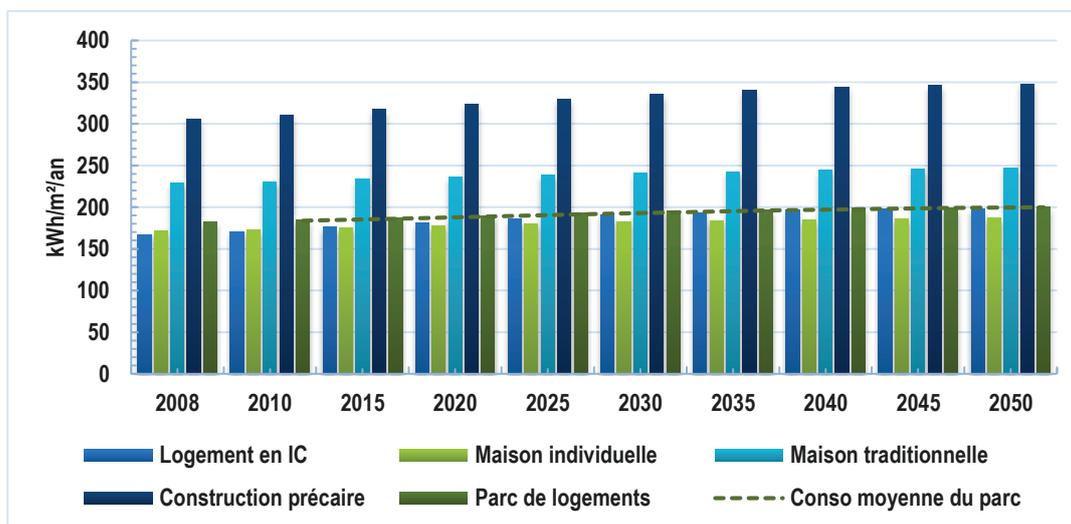
Dans un tel scénario, les consommations unitaires moyennes devraient rester stables, voire s'infléchir à l'horizon 2050. Or, la Figure 5-18 montre une légère progression des consommations unitaires. À l'échelle du parc, celles-ci passeraient de 183 kWh/m<sup>2</sup>/an en 2008 à près de 200 kWh/m<sup>2</sup>/an à l'horizon 2050. Cette croissance trouve son origine, tout d'abord, dans la pénétration d'un nombre important d'appareils électroménagers, sous l'effet du rattrapage des ménages en termes d'équipement. Ceci augmenterait significativement la part des besoins unitaires moyens d'énergie des appareils électroménagers. En effet, ces besoins s'élèveraient à 4,3 MWh/logement/an à l'horizon 2050, alors qu'ils avoisinaient 2,8 MWh/logement/an en 2008.

La ventilation des consommations unitaires par typologie montre que le segment des constructions précaires resterait le plus énergivore, de l'ordre de 348 kWh/m<sup>2</sup>/an. Pour le segment des maisons individuelles et celui des logements en IC, les consommations unitaires seraient respectivement de 187 kWh/m<sup>2</sup>/an et 198 kWh/m<sup>2</sup>/an, tandis que la consommation s'élèverait à 247 kWh/m<sup>2</sup>/an pour les maisons traditionnelles.

À l'échelle du parc, on a pu constater que la consommation unitaire moyenne serait de l'ordre de 200 kWh/m<sup>2</sup>/an. Il est intéressant de noter que ces écarts de consommation seraient alors contrebalancés par le poids des segments de logements dans le parc. En effet, le nombre important de maisons individuelles et de logements en IC (15 millions de logements), lesquels

sont relativement moins énergivores, pourrait contribuer à infléchir la consommation unitaire moyenne à l'échelle du parc.

Figure 5-18 : Consommations unitaires par typologie du parc (scénario tendanciel)



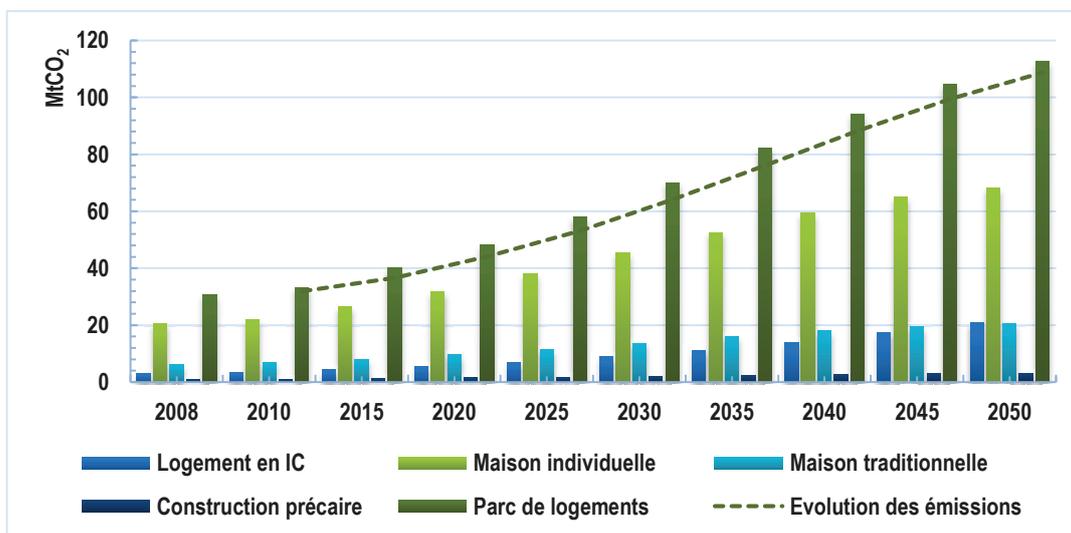
### 5.4.3 Émissions de CO<sub>2</sub> dans le scénario tendanciel

Rappelons que l'hypothèse adoptée dans ce travail admet le maintien des sources d'énergie utilisées dans le parc, en conservant leurs parts dans le mix énergétique à l'horizon 2050. Il s'agit bien entendu de l'électricité, du gaz naturel et du gaz naturel en réseau. On a préféré adopter cette hypothèse, même si cela paraît assez contestable en raison de la politique énergétique actuelle, qui consiste à élargir l'utilisation du gaz naturel dans le parc de logements. Pour étayer cette hypothèse, il nous paraît pertinent de mettre en avant les raisons suivantes : premièrement, un nombre important de logements ne seront pas raccordés au réseau de GN, notamment les constructions précaires et les logements situés en zones rurales éparses (très éloignées ou isolées) ; deuxièmement, cette hypothèse s'inscrit dans une démarche volontariste, qui consiste à élaborer des scénarios d'émissions qualifiés de « pessimistes », sachant que le facteur d'émission du gaz naturel est relativement plus faible que celui du gaz butane.

Il est donc évident que l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> dépend uniquement de la consommation d'énergie. Sur la Figure 5-20, on peut constater immédiatement que les émissions progresseraient au rythme de l'accroissement des besoins d'énergie, puisqu'elles augmenteraient de plus de 270 %, soit 112,7 MtCO<sub>2</sub>, par rapport aux émissions de 2008

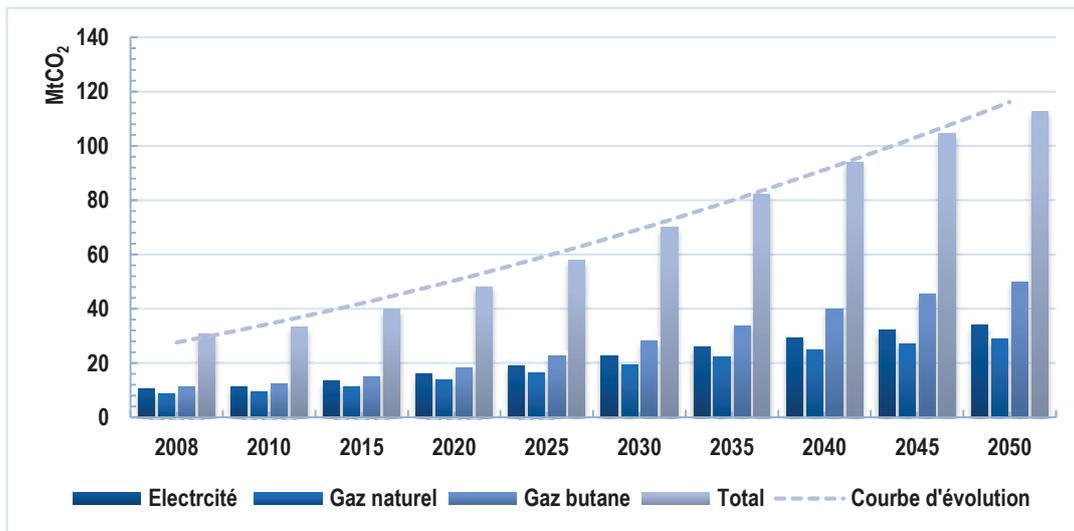
(30,6 MtCO<sub>2</sub>). Les émissions moyennes par habitant atteindraient l'équivalent de 2,1 tCO<sub>2</sub>/habitant en 2050, alors qu'elles n'étaient que de 0,9 tCO<sub>2</sub>/habitant en 2008.

Figure 5-19 : Évolution des émissions dans le parc de logements (scénario tendanciel)



On constate, sur la Figure 5-20, que la part des émissions induites par la consommation de gaz (naturel et butane) serait en baisse, au profit de celle induite par la consommation d'électricité. La part de cette dernière passerait en effet de 37 % (11,2 MtCO<sub>2</sub>) en 2008 à plus de 44 % (49,8 MtCO<sub>2</sub>) en 2050. Il est intéressant de signaler que la baisse de la part des émissions induites par la consommation de gaz ne signifie la diminution de sa consommation. Rappelons que dans un tel scénario, la part de la consommation d'électricité, notamment celle générée par l'utilisation des appareils électroménagers, connaîtrait une forte augmentation, ce qui engendrerait d'importantes émissions de CO<sub>2</sub>.

Figure 5-20 : Émissions de CO<sub>2</sub> par source d'énergie (scénario tendanciel)



## 5.5 Résultats des scénarios portant sur la réduction des consommations d'énergie

Compte tenu de ce que l'on a vu dans le scénario tendanciel, il est évident que toutes ces dynamiques de croissance des consommations et des émissions correspondent à des évolutions peu souhaitables, surtout si ces sources d'énergie sont épuisables et que les émissions de CO<sub>2</sub> sont plafonnées par les engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto.

L'examen des résultats du scénario tendanciel permet de situer l'ampleur des actions à accomplir afin de pouvoir infléchir les consommations d'énergie et les émissions dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050. L'objectif des trois scénarios proposés est de définir le potentiel de réduction du couple consommation/émissions afin d'optimiser l'efficacité énergétique dans ce secteur.

### 5.5.1 Scénario RT97

Le scénario RT97 s'appuie, dans un premier temps, sur l'application systématique des directives de la réglementation thermique algérienne actuelle (RT97), relative à l'amélioration de l'enveloppe bâtie du parc de logements. Notons ici que ces efforts ciblent uniquement les maisons individuelles et les maisons traditionnelles. Rappelons que les logements en immeubles sont considérés comme conformes aux normes de la RT97. Ce scénario fait

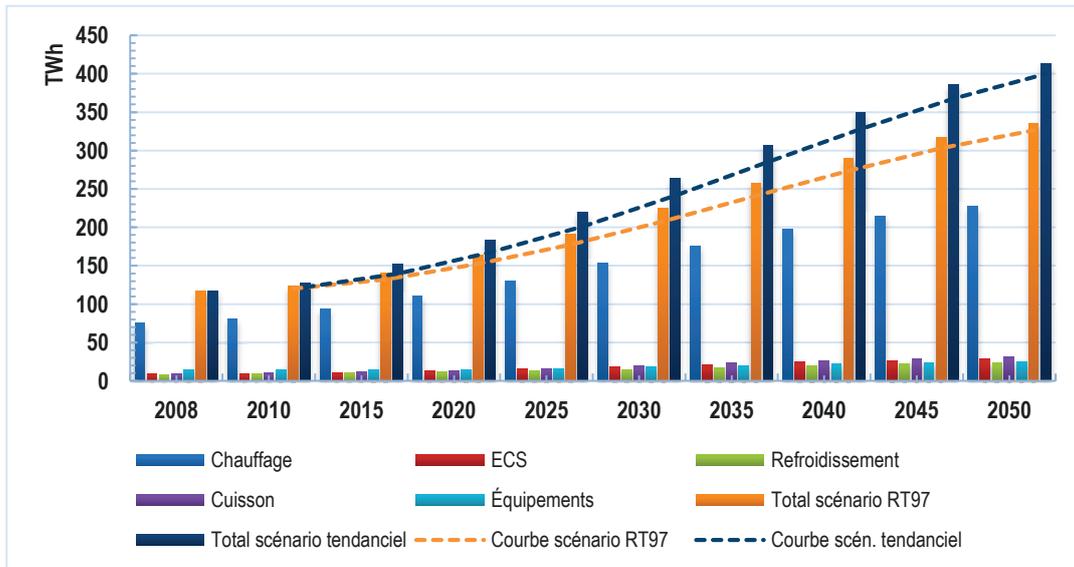
également en partie référence aux recommandations de l'agence APRUE dans le choix des meilleures technologies disponibles en ce qui concerne les équipements des ménages. Au regard de ces éléments, ce scénario est considéré comme étant à la frontière entre un scénario tendanciel (référence) et un scénario volontariste.

Ici, les efforts d'isolation de l'enveloppe du bâti conduiraient à une baisse de la consommation du chauffage, qui passerait à 227,3 TWh/an, soit une baisse de l'ordre de 3 % par rapport au scénario tendanciel. Le refroidissement diminuerait, quant à lui, de près de 24 %, soit un gain de 7,5 TWh/an (cf. Figure 5-21). Notons que ce différentiel de gain d'énergie entre le chauffage et le refroidissement serait lié aux efforts d'isolation ( $U_{\text{bât}}$ ) relatifs à chaque segment de parc (MI, MT), mais aussi aux poids de ces segments selon les zones climatiques. Par exemple, les efforts d'isolation toucheraient un nombre relativement important de maisons traditionnelles localisées dans le sud, ce qui induirait un gain de refroidissement significatif. À l'inverse, les maisons individuelles localisées en zone B seraient concernées par des efforts d'isolation destinés à réduire les besoins de chauffage ; ces efforts seraient relativement minimes comparés à ceux nécessaires pour les maisons traditionnelles.

Dans ce scénario, la contribution de nouvelles technologies dans les équipements électroménagers à faible consommation d'énergie engendrerait une importante baisse des consommations dans le parc. En effet, elle conduirait à une baisse des consommations des appareils électroménagers de l'ordre de 53,1 TWh/an, ce qui correspondrait à une baisse de 68 % par rapport au scénario tendanciel.

Grâce à ce scénario, les gains d'énergie seraient de l'ordre de 77,6 TWh/an (19 %), soit près de 17,1 TWh/an pour le gaz (naturel et butane) et 60,6 TWh/an pour l'électricité.

Figure 5-21 : Consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050 (scénario RT97)



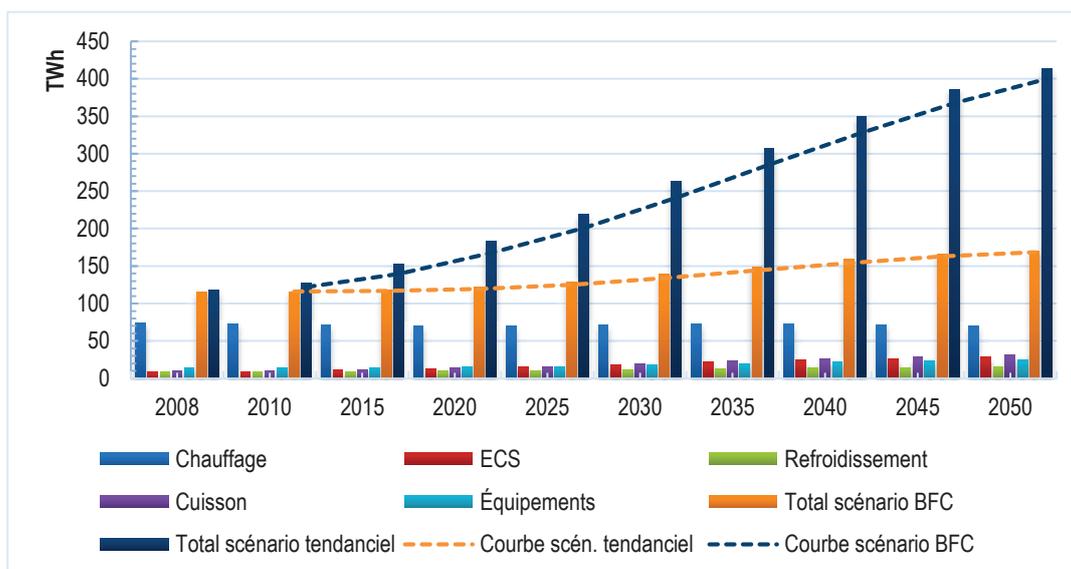
### 5.5.2 Scénario BFC

Dans le scénario BFC, on maintient les gains apportés par la contribution des appareils électroménagers à faible consommation adoptée dans le scénario précédent. En outre, on accentue les efforts d'amélioration performantielle de l'enveloppe bâtie afin de réduire les consommations de chauffage et de refroidissement. Ce scénario implique de construire des logements neufs à faible consommation d'énergie (BFC<sup>55</sup>), en plus de la réhabilitation massive, conformément à cette norme, du stock existant.

Ici, les effets de renforcement de l'isolation des bâtiments engendreraient des gains d'énergie pour le chauffage de 164,1 TWh/an (70 %), et pour le refroidissement de 15,2 TWh/an (49 %), par rapport au scénario tendanciel (cf. Figure 5-22). Ce scénario, favorable à l'amélioration de la performance de l'enveloppe des logements, générerait globalement une baisse des consommations d'énergie qui avoisinerait 243,0 TWh/an, soit plus de 59 %. Ceci représenterait un gain d'énergie de l'ordre de 174,7 TWh/an en gaz (naturel et butane) et de plus de 68,3 TWh/an en électricité.

<sup>55</sup> On applique, dans ce scénario, les mêmes valeurs de déperditions thermiques ( $\lambda$ ) dans les différents éléments constructifs du bâtiment. Ces valeurs sont préconisées par la réglementation thermique française de 2005.

Figure 5-22 : Consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050 (scénario BFC)



### 5.5.3 Scénario BBC

De façon analogue, le scénario BBC maintiendrait les efforts en matière de MTD adoptés dans les précédents scénarios. Il poursuivrait également les mesures portant sur l'amélioration de la performance de l'enveloppe des logements dans le parc. Le renforcement de l'isolation de l'enveloppe bâtie selon la norme « bâtiment basse consommation » (BBC<sup>56</sup>) permettrait d'exploiter en outre de manière plus avancée le potentiel d'énergie induit par l'amélioration de la performance de cette enveloppe.

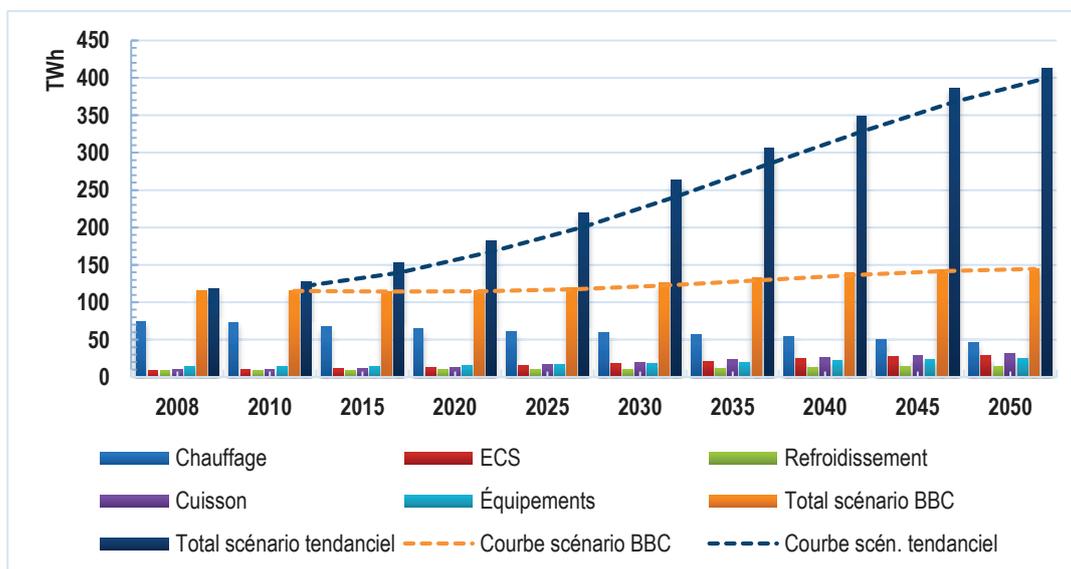
En effet, les consommations d'énergie pour le chauffage, dans ce scénario, seraient de l'ordre de 45,8 TWh/an, et de près de 14,3 TWh pour le refroidissement, alors qu'ils avoisineraient respectivement 233,8 TWh/an et 30,8 TWh/an dans le scénario tendanciel. Ceci représente une baisse de consommation de l'ordre de 188,0 TWh/an, soit 80 %, pour le chauffage, et de près de 16,5 TWh, soit 54 %, pour le refroidissement (cf. Figure 5-23).

Les efforts engagés dans ce scénario généreraient un gain de 198,6 TWh/an en gaz (74 %) et de près de 69,6 TWh/an en électricité (26 %). Ce scénario permettrait d'atteindre un niveau de

<sup>56</sup> On applique, dans ce scénario, les mêmes valeurs de déperditions thermiques ( $\lambda$ ) dans les différents éléments constructifs du bâtiment. Ces valeurs sont préconisées par la réglementation thermique française de 2012.

consommation de chauffage de l'ordre de 74,0 TWh/an en 2050, qui serait inférieur à celui du parc de logements en 2008 (75,5 TWh/an).

Figure 5-23 : Consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050 (scénario BBC)



## 5.6 Synthèse des scénarios

La Figure 5-24 et la Figure 5-25 montrent l'évolution des consommations unitaires des usages énergétiques dans le parc selon les différents scénarios envisagés. À l'échelle du parc, on constate que les efforts de renforcement de l'enveloppe et la pénétration des MTD (appareils électroménagers) amèneraient des chutes substantielles des consommations unitaires. On passerait ainsi de 200 kWh/m<sup>2</sup>/an en scénario tendanciel à une moyenne de l'ordre de 70 kWh/m<sup>2</sup>/an en scénario BBC. Ceci représenterait une baisse de plus de 260 % entre un scénario « laisser-faire » et un scénario où l'on fusionnerait des efforts portant sur différentes variables, à l'image du scénario BBC.

Bien évidemment, on peut constater également une forte disparité des consommations unitaires en lien avec la typologie de logements. Ces figures montrent que les maisons individuelles et les maisons traditionnelles afficheraient les consommations unitaires les plus faibles, respectivement de l'ordre de 63 kWh/m<sup>2</sup>/an et 68 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le scénario BBC ; elles formeraient donc les segments les plus performants dans le parc. Le segment des logements en IC consomme quant à lui en moyenne 96 kWh/m<sup>2</sup>/an. L'impact des efforts sur ce segment serait

relativement faible, car il serait contrebalancé par la faiblesse des surfaces unitaires. Par ailleurs, la consommation des constructions précaires avoisinerait les 291 kWh/m<sup>2</sup>/an. Celles-ci demeureraient donc les plus énergivores.

Il semble ensuite intéressant de signaler qu'à l'échelle régionale, la ventilation des consommations unitaires pourrait montrer également une forte disparité en fonction de la localisation climatique de chaque segment de parc : par exemple, la consommation unitaire des maisons individuelles pourrait atteindre 50 kWh/m<sup>2</sup>/an en zone A, et plus de 71 kWh/m<sup>2</sup>/an en zone B.

Figure 5-24 : Performances énergétiques moyennes selon les quatre scénarios

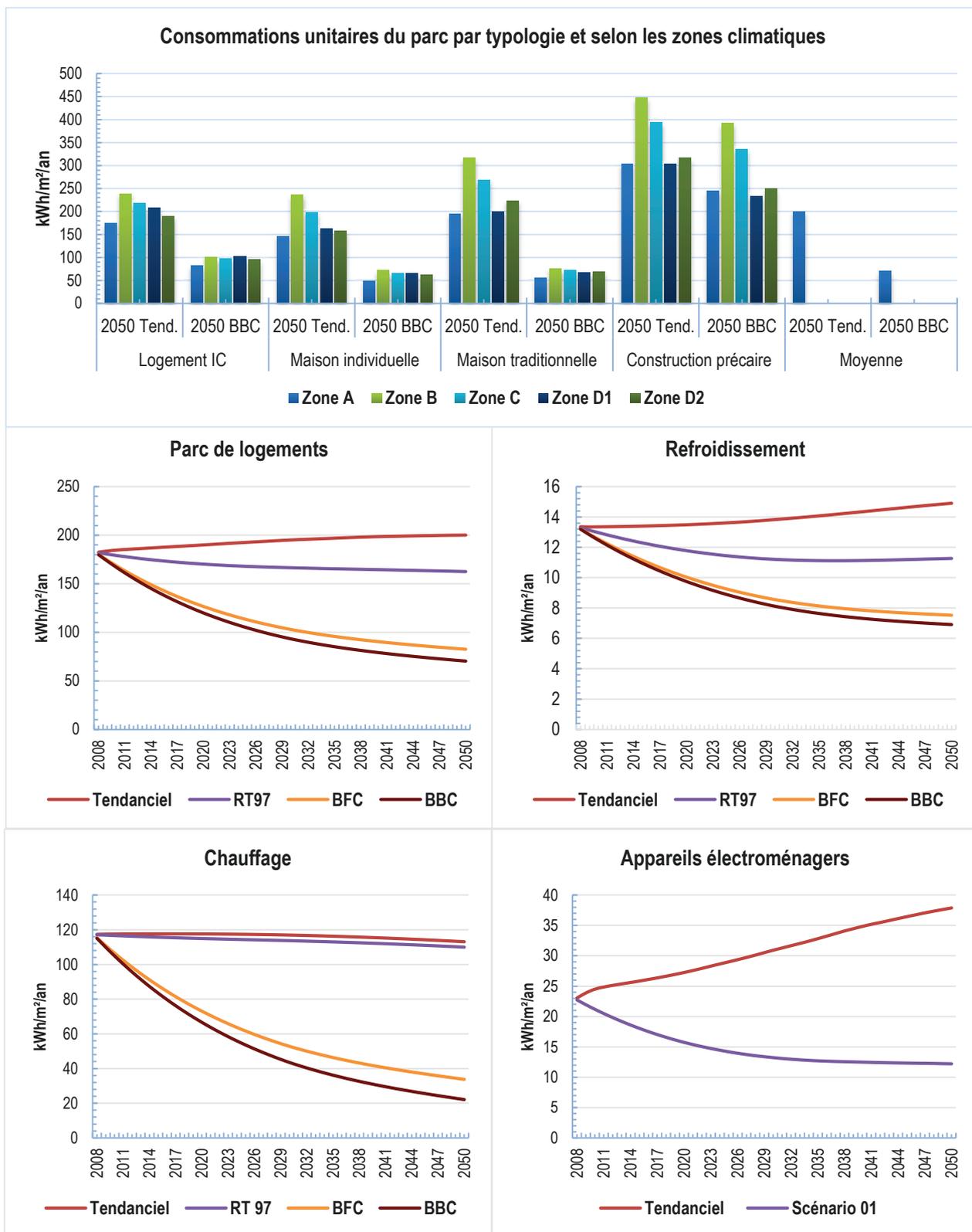
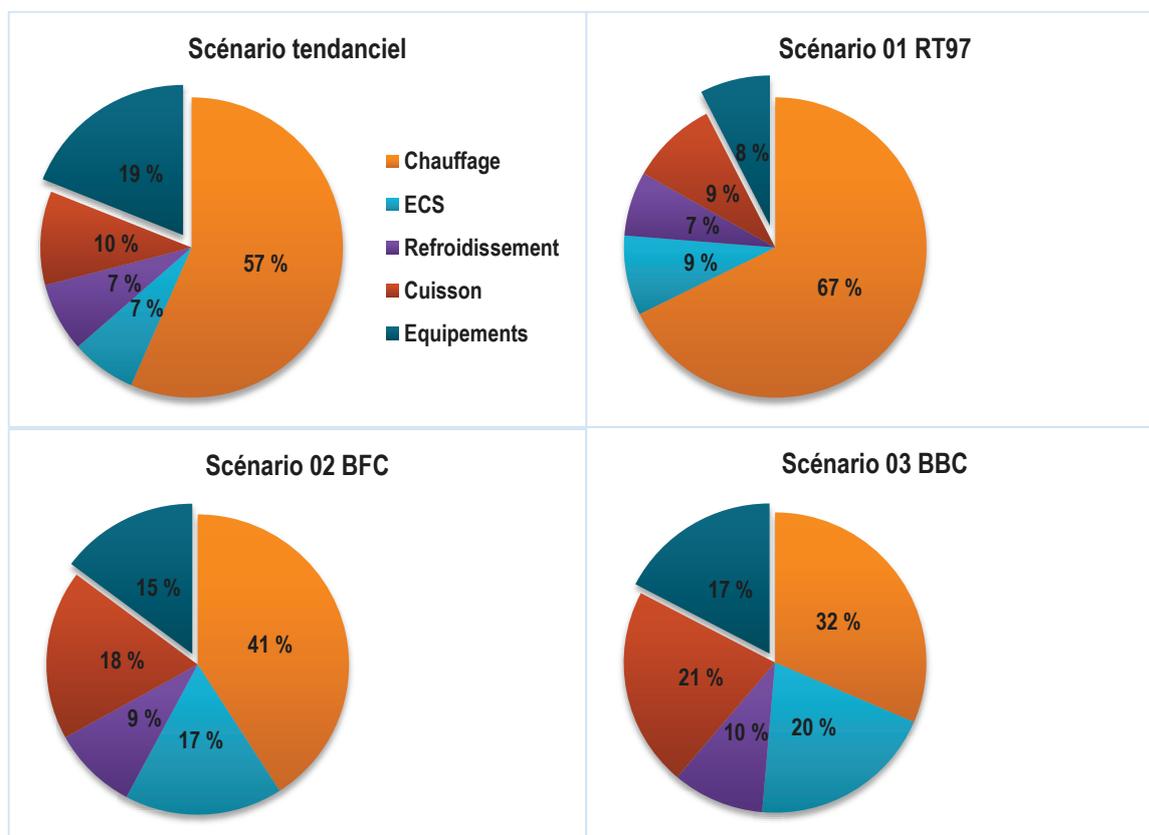


Figure 5-25 : Parts des consommations par poste selon les quatre scénarios



Rappelons que les trois hypothèses de réhabilitation du stock existant visent à atteindre une performance thermique identique à celle des logements neufs. En d'autres termes, les trois scénarios de réhabilitation conduiraient à des consommations énergétiques identiques dans l'ensemble du stock existant (excepté le segment des constructions précaires).

Trois hypothèses de réhabilitation, correspondant à trois scénarios de gains énergétiques, ont été retenues dans le parc de logements existants (cf. Tableau 5-6). Cette action admettrait un rythme moyen de 125 000 logements réhabilités par an d'ici à l'horizon 2050.

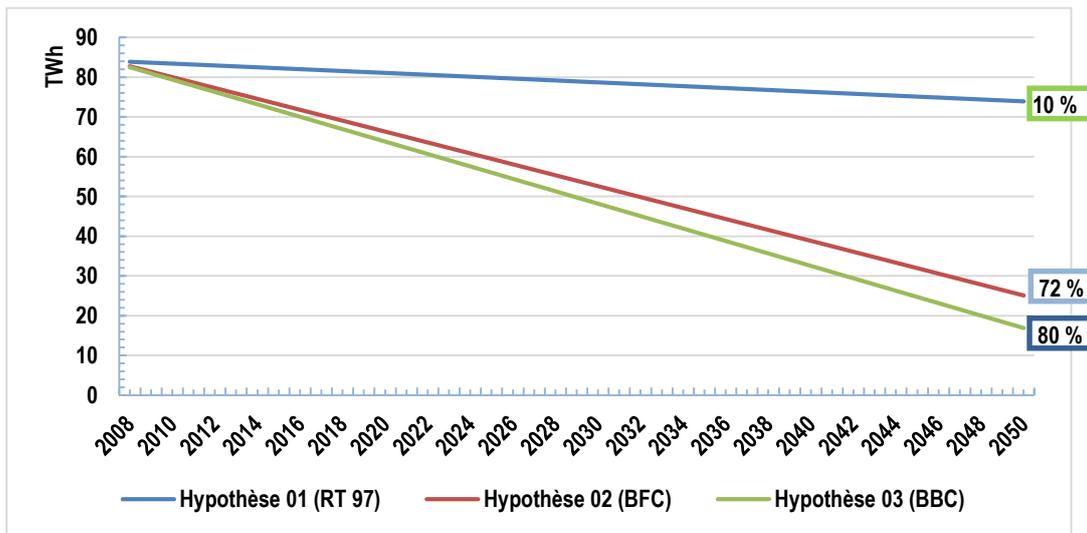
- hypothèse 1** : la réhabilitation des maisons individuelles et des maisons traditionnelles (RT97) générerait des gains d'énergie de l'ordre de 10,2 TWh (12 %) relativement aux besoins du parc existant. Ceci correspond à des économies d'énergie de 7,8 TWh/an (10 %) pour le chauffage et de 2,4 TWh/an (28 %) pour le refroidissement (cf. Figure 5-26) ;

- **hypothèse 2** : la réhabilitation du parc existant en fonction de la norme BFC engendrerait des gains d'énergie de plus de 54,7 TWh/an (72 %) pour le chauffage et de 4,4 TWh/an (51 %) pour les besoins de refroidissement.
- **hypothèse 3** : de façon analogue, la réhabilitation du stock existant en fonction de la norme BBC produirait des économies d'énergie qui avoisineraient 67,2 TWh/an, soit l'équivalent de 80 % des besoins du parc de 2008. Les besoins d'énergie pour le chauffage passeraient ainsi à 13 TWh/an, ce qui représenterait un gain d'énergie de l'ordre de 62,5 TWh/an (83 %). En ce qui concerne le refroidissement, les gains pourraient atteindre 3,9 TWh/an (55 %).

Tableau 5-6 : Synthèse des scénarios d'entrées de logements et de réhabilitation du stock existant

Scénarios		Tendanciel	RT97	BFC	BBC
<b>Réhabilitation</b> (nombre de logements/an datant d'avant 2008 jusqu'en 2050)	Logement en IC	aucun	24 000	24 000	24 000
	Maison individuelle	aucun	76 000	76 000	76 000
	Maison traditionnelle	aucun	21 000	21 000	21 000
	Construction précaire	aucun	aucun	aucun	aucun
	Total	aucun	121 000	121 000	121 000
Logements neufs (nombre de logements/an)	Logement en IC	105 000	105 000	105 000	105 000
	Maison individuelle	150 000	150 000	150 000	150 000
	Maison traditionnelle	41 000	41 000	41 000	41 000
	Construction précaire	9 600	aucun	aucun	aucun
	Total	305 000	295 000	295 000	295 000
Appareils électroménagers dans le parc existant + logements neufs	Parc de logements	Parts de marché existantes	Équipements basse conso. ++	Équipements basse conso. ++	Équipements basse conso. ++

Figure 5-26 : Gains énergétiques induits par trois hypothèses de réhabilitation du parc



## 5.7 Résultats des scénarios relatifs aux émissions de CO<sub>2</sub>

Rappelons que dans notre modèle d'émissions, les résultats des émissions générées à la suite de la mise en œuvre de l'un des trois scénarios de consommations seraient bien évidemment liés aux quantités de consommations énergétiques, mais aussi à la dynamique d'évolution des parts de consommations par source. En se basant sur ces deux variables, la Figure 5-27 trace l'évolution des quatre scénarios d'émissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel.

On constate, dans le scénario RT97, une baisse des émissions qui pourrait atteindre environ 84,5 MtCO<sub>2</sub> en 2050. Elle serait de l'ordre de 25 % par rapport au scénario tendanciel (112,7 MtCO<sub>2</sub>). Cette atténuation correspond essentiellement aux gains de consommation d'électricité induits par le renouvellement des équipements électroménagers. En outre, le facteur d'émission relativement élevé de l'électricité permettrait d'amplifier cette baisse. Selon ce scénario, les émissions de l'électricité diminueraient pour atteindre 25,5 MtCO<sub>2</sub>.

Notons que malgré ces efforts, la part du chauffage resterait majoritaire, de l'ordre de 59 % (49,6 MtCO<sub>2</sub>) des émissions dans le parc, tandis que la part des équipements électroménagers passerait à 12 %, soit 10,2 MtCO<sub>2</sub> des émissions dans le parc (cf. Figure 5-28).

Figure 5-27 : Scénarios des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel

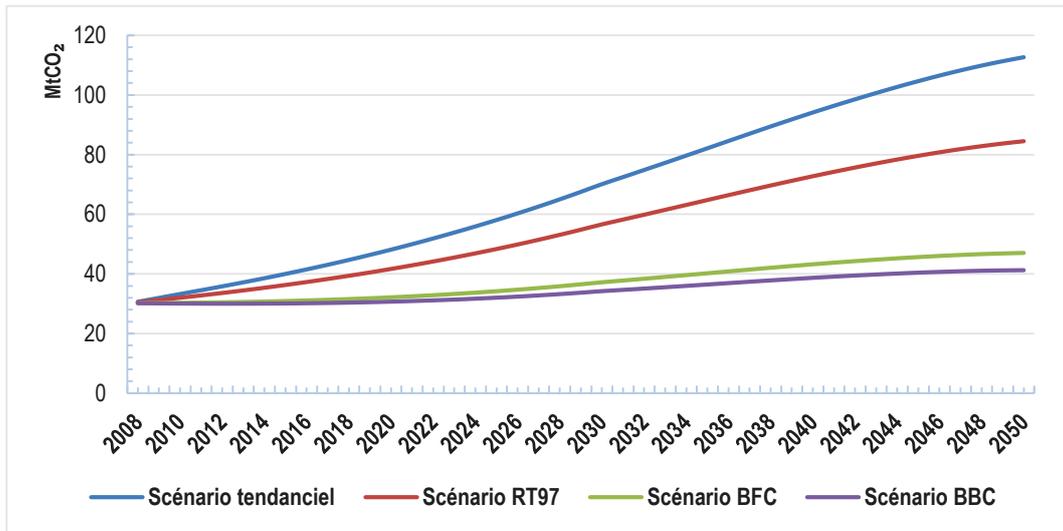
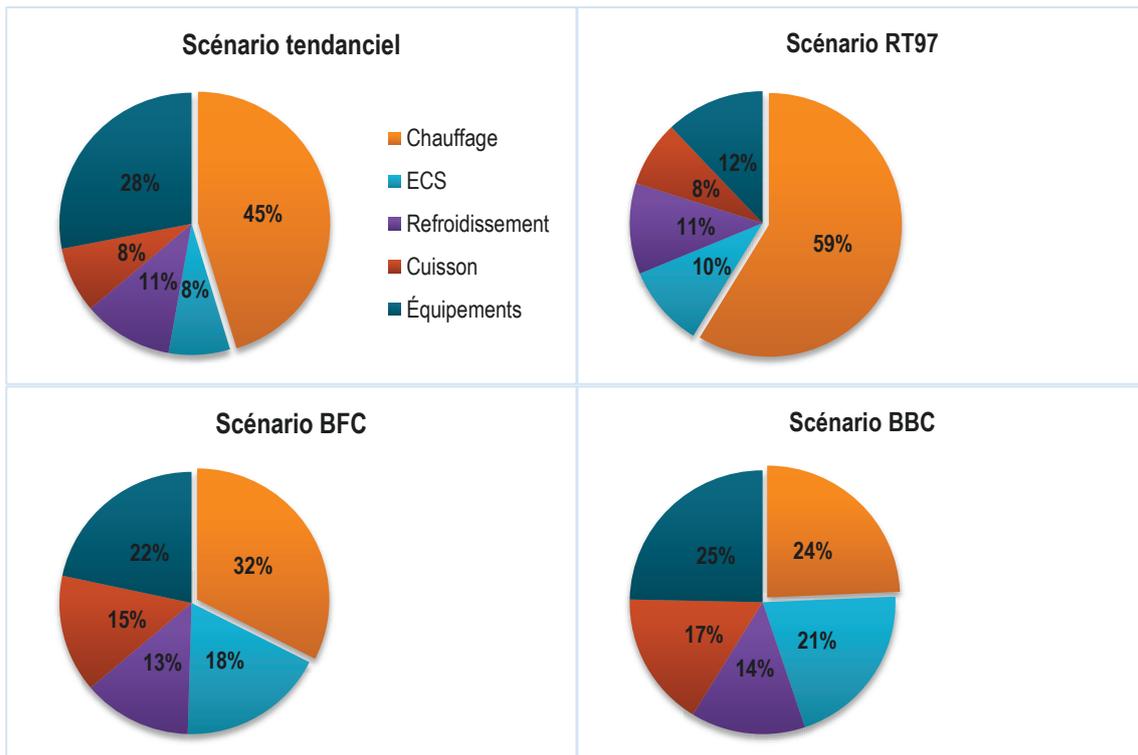


Figure 5-28 : Parts des émissions de CO<sub>2</sub> par poste selon les quatre scénarios



Les gains en électricité se feraient donc au profit de l'accroissement de la part des émissions de gaz. En effet, dans ce scénario, le gaz butane apparaît comme la principale source d'émissions

de CO<sub>2</sub> en 2050, à un niveau qui s'élèverait à 31,9 MtCO<sub>2</sub> (38 %) (cf. Figure 5-29). L'électricité et le gaz naturel atteindraient des niveaux d'émission assez proches, soit respectivement de l'ordre de 27 MtCO<sub>2</sub> (32 %) et 25 MtCO<sub>2</sub> (30 %).

De manière analogue, les gains de consommation dans les scénarios BFC et BBC conduiraient à une forte baisse des émissions puisqu'on ne compterait que 47,1 MtCO<sub>2</sub> dans le scénario BFC et 41,3 MtCO<sub>2</sub> dans le scénario BBC. Cette baisse correspond donc à un facteur de réduction respectivement de l'ordre de 2,4 et 2,7 par rapport au scénario tendanciel.

Dans le scénario BBC, les émissions induites par le chauffage seraient de l'ordre de 10,0 MtCO<sub>2</sub> (24 %). La baisse de la part des émissions du chauffage serait contrebalancée par la part des émissions des équipements, qui atteindrait un niveau plus élevé, de l'ordre de 25 %, soit 10,2 MtCO<sub>2</sub>, et ce, malgré les efforts portés sur la baisse de leur niveau de consommation.

Il est ensuite intéressant de se pencher sur ce qu'induisent ces trois scénarios sur les émissions unitaires. La Figure 5-30 montre l'évolution des quatre scénarios d'émissions unitaires. On peut constater que la part des émissions unitaires pourrait descendre à un niveau relativement bas, soit l'équivalent de 0,9 tCO<sub>2</sub> par personne dans le scénario BFC, et moins de 0,8 tCO<sub>2</sub> dans le scénario BBC (contre 2,2 tCO<sub>2</sub> dans le scénario tendanciel). Il est intéressant de noter qu'en ramenant les émissions unitaires de 0,9 tCO<sub>2</sub>, sur la base des émissions du parc en 2008, à 0,8 tCO<sub>2</sub> par personne en 2050 (scénario BBC), il serait donc possible d'atteindre l'objectif de stabiliser, voire d'infléchir les émissions unitaires à l'horizon 2050.

Figure 5-29 : Les émissions de CO<sub>2</sub> par source d'énergie

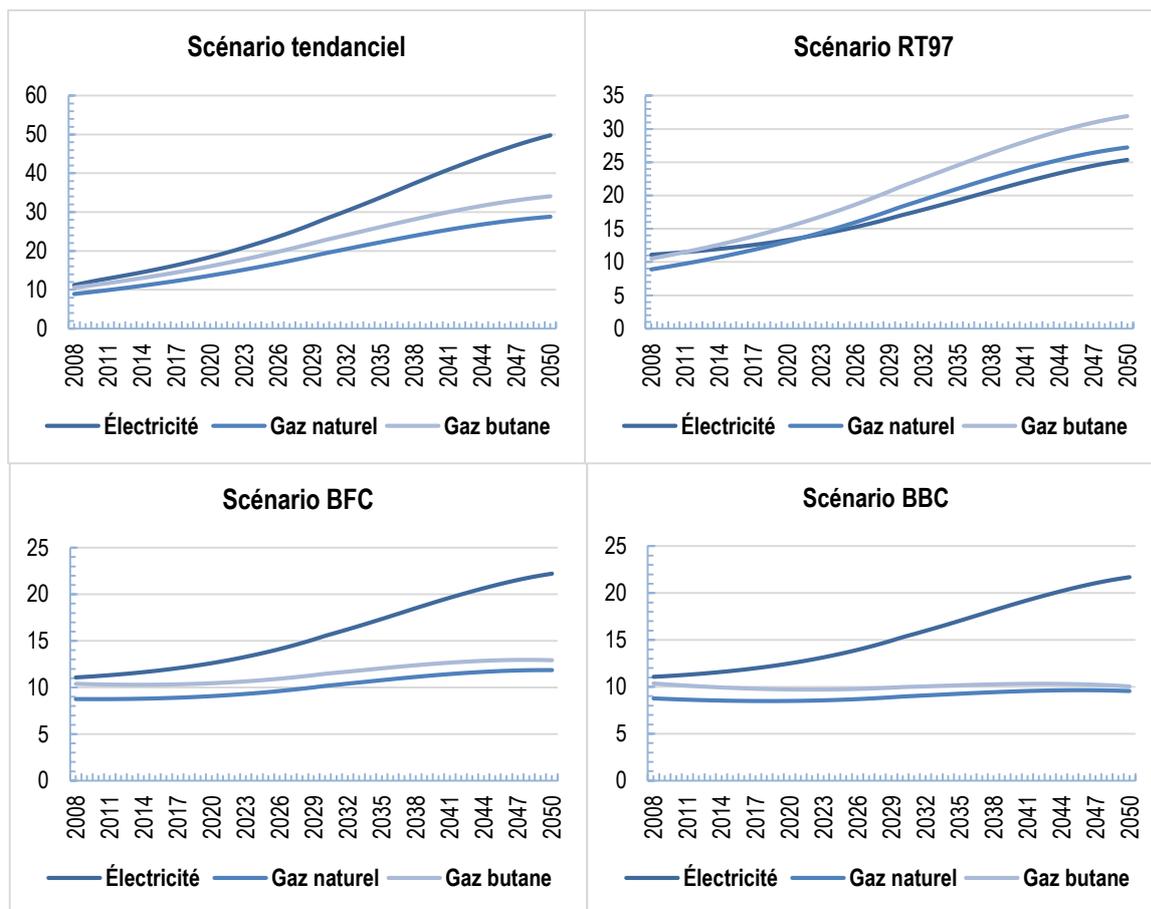


Figure 5-30 : Les quatre scénarios des émissions de CO<sub>2</sub> par personne

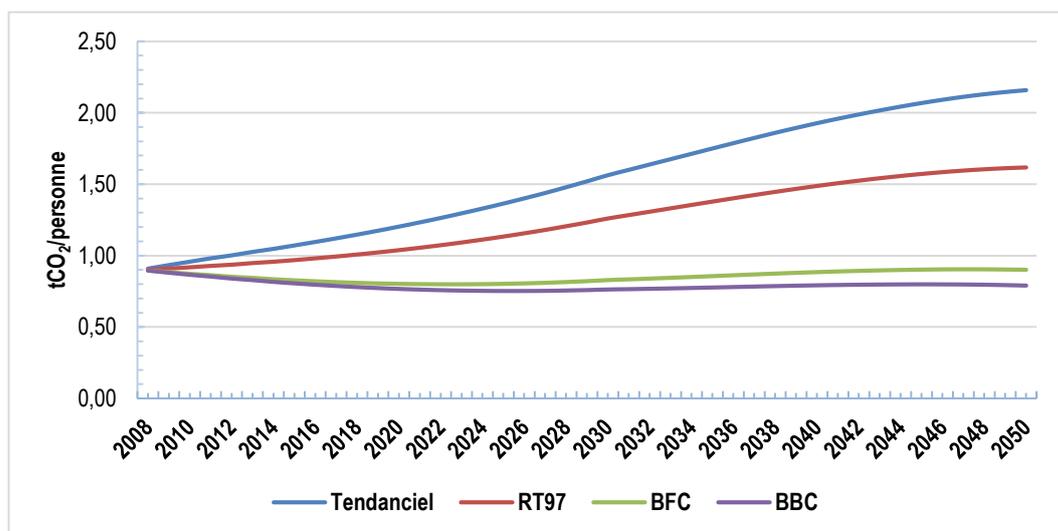


Tableau 5-7 : Synthèse des scénarios de consommations et émissions à l'horizon 2050

Scénarios		Tendanciel	RT97	BFC	BBC
Consommation totale par typologie de logement en 2050 (TWh/an)	Logement en IC	71	57	35	32
	Maison individuelle	255	212	101	83
	Maison traditionnelle	77	59	26	21
	Construction précaire	11	9	9	9
	Total	413	336	170	145
Consommations par usage énergétique (TWh/an)	Chauffage	234	227	70	46
	Eau chaude sanitaire	29	29	29	29
	Refroidissement	31	23	16	14
	Cuisson	42	31	31	31
	Électroménagers	78	25	25	25
	Total	413	336	170	145
Facteur de réduction con.	/	1,00	1,2	2,4	2,8
Consommations du parc de logements neufs (TWh/an)	Total	413	336	170	145
Consommations unitaires moyennes par typologie en 2050 (kWh/m <sup>2</sup> /an)	Logement en IC	198	159	99	90
	Maison individuelle	187	155	74	61
	Maison traditionnelle	247	187	82	67
	Construction précaire	348	281	289	289
	Moyenne	200	162	82	70
Émissions 2050 (MtCO <sub>2</sub> /an)	Total	113	85	47	41
Émissions/pers. (tCO <sub>2</sub> /an)	Moyenne	2,2	1,6	0,9	0,8
Facteur de réduction des émissions	/	1,00	1,3	2,4	2,7

## 5.8 Discussion des résultats et perspectives

Comme nous l'avons énoncé, les résultats de la modélisation prospective nous ont permis d'identifier des actions portant sur l'économie d'énergie dans le parc, mais aussi de quantifier le potentiel de celles-ci sur la réduction des consommations et des émissions à l'horizon 2050. On propose, dans cette étape, de voir comment parvenir à mettre en place réellement les leviers d'action et de poser les éventuels problèmes engendrés par l'ensemble des scénarios.

## 5.9 Réduction des consommations à l'horizon 2050

### 1.1.1 Impact de la réglementation thermique sur la réduction des consommations

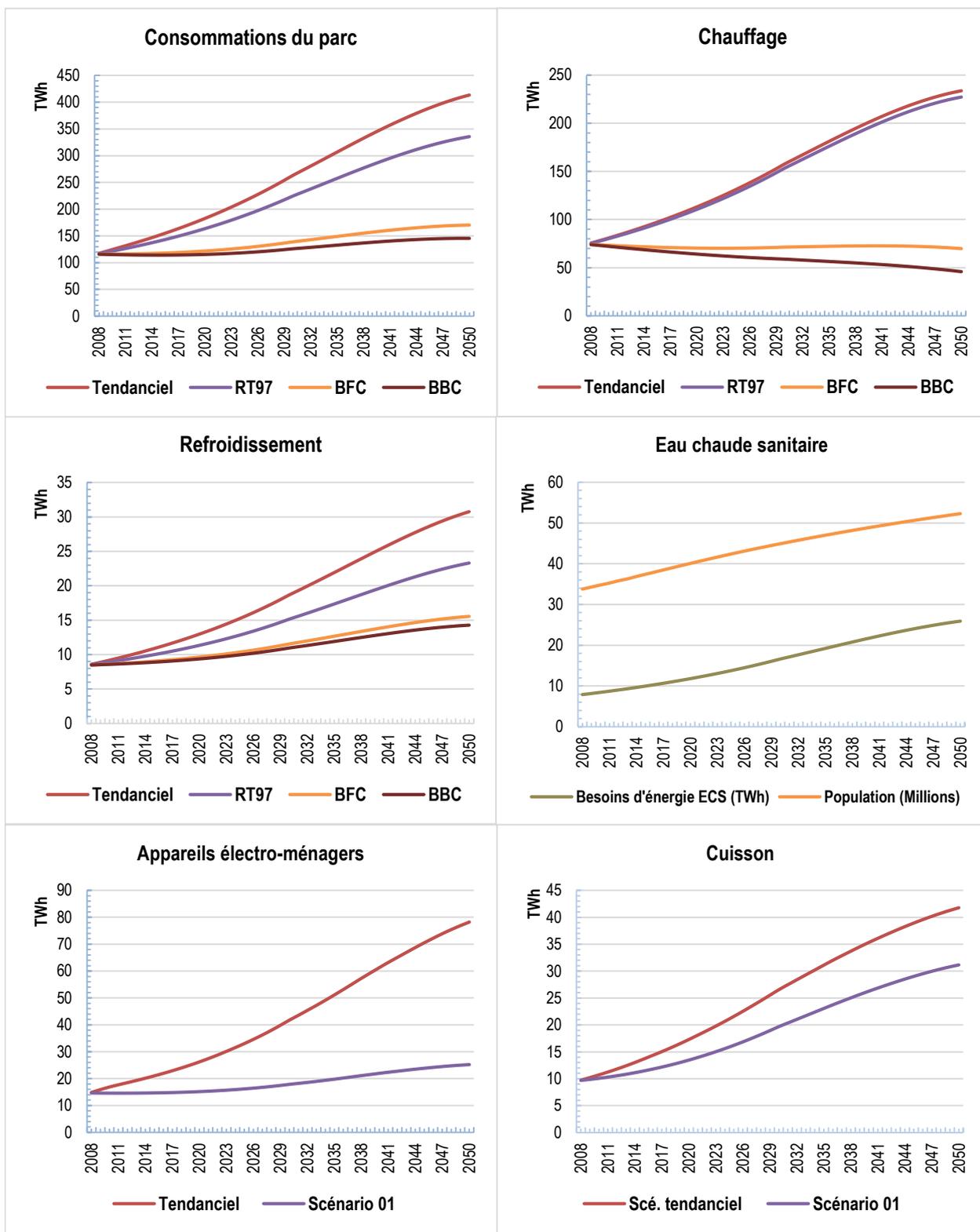
L'analyse des résultats du scénario RT97 permet de mesurer l'impact de l'application de la réglementation thermique actuelle (RT97) sur la réduction des consommations d'énergie. Il s'agit de comparer les objectifs de réduction de la consommation fixés par les pouvoirs publics et les outils réglementaires mis en application.

L'application systématique de la réglementation thermique algérienne nous permettrait de réduire la consommation de l'ordre de 19 %, ce qui générerait un gain de 77,6 TWh/an relativement au scénario tendanciel. Toutefois, si l'on examine plus en détail les résultats de ce scénario, on constate que les gains d'énergie proviennent essentiellement de la performance des appareils électroménagers, soit plus de 63,7 TWh. En d'autres termes, les gains induits par le renforcement de l'enveloppe bâtie selon la RT97 seraient très minimes, de l'ordre de 14 TWh, l'équivalent de 5 % des besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement dans le scénario tendanciel (cf. Figure 5-31).

On constate une différence notable entre le scénario RT97 et les scénarios BFC et BBC. Le premier scénario de renforcement de l'isolation (BFC) induit des gains de plus de 243 TWh/an (59 %). Dans le second scénario (BBC), les gains pourraient atteindre plus de 268,2 TWh/an (68 %), du fait du renforcement de l'isolation de l'enveloppe bâtie conformément aux normes BBC, ce qui conduirait à une baisse drastique des besoins de chauffage et de refroidissement, lesquels atteindraient respectivement 45,8 TWh/an et 14,3 TWh/an. Hormis cette différence relative au renforcement de l'isolation, on peut globalement constater que les deux derniers scénarios parviennent à un résultat relativement similaire au niveau de la nature des équipements diffusés et de la consommation d'énergie pour le secteur résidentiel.

Au final, on a pu montrer que l'application systématique de la réglementation actuelle permettrait en effet de réduire les consommations d'énergie. En revanche, les seuils  $D_{ref}$  préconisés par la RT97 ne permettraient pas d'atteindre un niveau d'efficacité énergétique optimale dans le parc de logements.

Figure 5-31 : Consommations énergétiques par poste et selon les quatre scénarios



### 1.1.2 Problèmes posés par l'ensemble des scénarios de réhabilitation envisagés

Comme énoncé dans le scénario BBC, les gains d'énergie induits par la réhabilitation du stock de logements (avant 2008) pourraient s'élever à 67,2 TWh/an (soit 80 %) pour les consommations de chauffage et de refroidissement. À ce niveau, presque la totalité des logements paraissent concernés, avec des actions de réhabilitation souvent lourdes à mettre en place pour atteindre le niveau envisagé par la norme BBC. Pour les 5,1 millions de logements du stock, cela représente un rythme de renouvellement annuel moyen de 120 000 logements d'ici à 2050.

Selon le scénario central, le nombre d'entrées de logements neufs serait en moyenne de 320 000 par an. Cette dynamique apparaît relativement élevée au regard du rythme actuel (200 000 logements/an). Or, si l'on ajoutait le nombre de réhabilitations par an, cette dynamique de construction/réhabilitation pourrait constituer un rythme très élevé. En réalité, cette forte dynamique est symptomatique de l'effet induit par le rattrapage de la demande de logements, qui peut constituer une limite pour le levier de réhabilitation.

Dans ce travail, on n'a pas traité la question du coût des travaux de réhabilitation. Cependant, plusieurs études, notamment CLIP 20, témoignent du coût élevé du marché de la réhabilitation. Ce paramètre pourrait aussi constituer une charge financière considérable pour 84 % des logements du parc (dont plus de 4 millions de maisons individuelles), qui sont des propriétés privées. En revanche, la mise en œuvre de subventions correctement ciblées sur les logements permet théoriquement d'atteindre un niveau d'efficacité optimal. En effet, il est difficile d'entrevoir une « industrialisation » de la réhabilitation, étant donné que la plupart des travaux s'effectuent sur mesure et qu'il y a des audits énergétiques en fonction de l'enveloppe de chaque logement. Quelle que soit la catégorie de logements, un programme ambitieux de réhabilitation nécessite la mise en place de mécanismes financiers appropriés, par exemple gérés par les banques avec l'appui et le contrôle de l'État.

Dans le contexte algérien, la réhabilitation est en effet un levier qui aurait un impact considérable dans la réduction des consommations. Ce serait un choix judicieux à long terme si l'on envisage de réduire significativement les consommations et les émissions à l'horizon 2050. Toutefois, entreprendre cette opération pourrait s'avérer, dans un premier temps, une tâche lourde et difficile.

### 1.1.3 Intégration des meilleures technologies d'équipements électroménagers

Dans les quatre scénarios, on constate que les consommations d'énergie liées aux appareils électroménagers constitueraient une part concurrentielle à celle des consommations liées au chauffage, part qui pourrait s'élever jusqu'à 78,3 TWh/an dans le scénario tendanciel (cf. *supra*). Les mesures d'efficacité adoptées pour ce poste de consommation permettraient en effet d'atteindre un facteur de réduction des consommations de 3,1 dans les scénarios volontaristes (25,2 TWh/an). À ce titre, l'atteinte d'un tel facteur en 2050 repose sur le recours aux meilleures technologies disponibles en matière d'équipements électroménagers à faible consommation, notamment des lampes basse consommation, des réfrigérateurs portant le label A++, .etc. En termes de *timing*, ce levier est calé en fonction de la durée de vie des appareils électroménagers. La mise en place de ce levier nécessite l'intervention des pouvoirs publics en amont du renouvellement des appareils, à travers, premièrement, la mise en œuvre d'un cadre réglementaire pour la fabrication et la vente de ce type d'appareils, et, deuxièmement, l'incitation des ménages à l'usage de ces nouvelles technologies, en vue d'une atténuation des émissions de CO<sub>2</sub>.

### 1.1.4 Rapport des efforts de réduction des consommations et des émissions

Rappelons qu'au début de ce travail, l'objectif principal était de stabiliser, voire d'infléchir l'accroissement des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050. On a vu précédemment qu'il était en effet possible d'atteindre cet objectif grâce à de lourds efforts en matière de réduction des consommations énergétiques (cf. scénario BBC). Bien entendu, ce résultat est satisfaisant au regard des objectifs énoncés au début de cette étude. Cependant, si l'on compare les efforts engagés, en termes de réduction des consommations (facteur 2,6 dans le scénario BBC), à leurs impacts sur les émissions de CO<sub>2</sub>, on constate immédiatement que le secteur résidentiel dispose d'un fort pouvoir émissif. Ceci semble évident puisqu'on admet de prolonger le mix énergétique actuel à l'horizon 2050, c'est-à-dire de continuer d'avoir un recours exclusif aux combustibles fossiles (énergie finale et primaire).

### 1.1.5 Cas particulier de la filière de production de l'électricité

Si l'on examine le rapport des consommations/émissions, on constate que, dans les quatre scénarios, l'accroissement de la part des émissions serait amplifié par la consommation

des équipements électroménagers. En effet, la part des émissions de l'électricité progresserait de plus de 53 % (21,7 MtCO<sub>2</sub>). Ceci provient essentiellement de l'origine de la filière de production d'électricité, qui est elle-même très émissive (404 gCO<sub>2</sub>/kWh). En ce qui concerne le gaz, on peut constater à l'inverse une régression de sa part d'émissions, alors même que sa part de consommation représenterait plus de 65 % des besoins d'énergie du parc.

Ce constat montre que si les efforts drastiques de réduction des consommations effectués dans le parc (scénario BBC) permettraient bien de réduire considérablement les consommations et les émissions, le contenu de CO<sub>2</sub> de l'énergie consommée – les résultats de nos modélisations le montrent dans tous les scénarios – serait en légère progression, à 273 gCO<sub>2</sub>/kWh et 284 gCO<sub>2</sub>/kWh respectivement pour les scénarios tendanciel et BBC. Ces chiffres seraient relativement élevés en comparaison avec d'autres moyens de production d'énergie, comme la production du chauffage par cogénération, estimée à 80 gCO<sub>2</sub>/kWh, ou la production d'électricité dans la filière photovoltaïque, estimée à 70 gCO<sub>2</sub>/kWh (Traisnel *et al.*, 2010).

Ce constat permet de mettre en évidence les limites de l'efficacité énergétique si l'on n'a pas, dans le même temps, un regard transversal sur les filières de production de l'énergie, notamment la filière de la production électrique.

Dans ce travail, l'hypothèse du maintien du mix actuel, quant à elle, s'inscrit aussi dans une démarche de scénario « pessimiste ». En revanche, le constat avancé peut constituer une première ébauche pour une nouvelle perspective d'atténuation des émissions, en intégrant de nouvelles énergies moins émissives à l'horizon 2050. En d'autres termes, une nouvelle piste de réflexion pourrait être développée pour améliorer la performance énergétique dans le parc, en changeant progressivement le mix énergétique actuel.

# Conclusion

Le choix de l'efficacité énergétique semble une réponse unanimement adoptée par de nombreux pays face à la question du changement climatique. Cette option est souvent liée à la problématique environnementale de l'accroissement des émissions de CO<sub>2</sub> induit par l'augmentation des consommations d'énergies fossiles. Outre cette option, l'enjeu de l'efficacité énergétique dans le contexte algérien n'est pas lié seulement au respect de ses engagements envers le protocole de Kyoto, mais il est avant tout question de la pérennité de ses ressources d'hydrocarbures et de la survie de son économie.

Alors que nous arrivons au terme de ce travail, il nous semble pertinent de tirer des conclusions de ce qui a été réalisé et d'amorcer des ouvertures sur de nouvelles perspectives.

### Contribution de la modélisation de prospective *bottom-up*

Au démarrage de cette thèse, nous étions placé face à une situation d'insatisfaction vis-à-vis des mesures d'efficacité énergétique, et particulièrement de l'absence d'une évaluation à long terme des consommations d'énergie et des émissions, notamment dans le secteur résidentiel. Notre ambition était de répondre à cette insatisfaction en développant un modèle de prospective afin d'évaluer le potentiel de réduction des consommations d'énergie dans ce secteur.

Cet exercice a permis de montrer que le développement d'un modèle de prospective à l'échelle du logement, basé sur les variables sociodémographiques, était le plus approprié pour pouvoir analyser et représenter à long terme les besoins énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel. L'approche désagrégée nous a permis, en effet, de prendre en compte la disparité typologique des logements dans le parc, ainsi que de matérialiser des liens robustes entre les besoins énergétiques et les variables exogènes, notamment les tendances lourdes. À l'inverse d'une approche agrégée, cette méthode fine permet d'analyser les besoins d'énergie, mais aussi d'identifier les potentiels d'économie d'énergie.

Le modèle a pu ensuite matérialiser l'impact de la physique du bâtiment et des attributs sociodémographiques sur les consommations d'énergie dans le parc de logements. Cet impact se traduit par une forte hétérogénéité des consommations énergétiques des logements, qui s'explique d'une part par des besoins de chauffage et de refroidissement liés à la qualité d'isolation de l'enveloppe bâtie des logements, d'autre part, par une variation des services

consommés liée à la structure des familles et à leur niveau d'équipement en appareils électroménagers.

Enfin, la ventilation des consommations par typologie de logement a permis de construire une segmentation pertinente des consommations énergétiques dans le parc. Cette segmentation a ensuite donné lieu à une modélisation prospective des besoins théoriques d'énergie dans le secteur résidentiel, en prenant en compte les caractéristiques typologiques des logements et l'hétérogénéité des consommations d'énergie.

### Principaux résultats du modèle de prospective

Le niveau de détail des consommations, à l'image du modèle *bottom-up*, lorsqu'il est couplé à un modèle dynamique de parc, permet de renforcer la robustesse de notre modèle et de limiter les incertitudes des résultats fournis en matière de besoins énergétiques et d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Le modèle dynamique de parc de logements a tout d'abord permis de visualiser que les effets mécaniques de l'accroissement du nombre des ménages et de la nucléarisation des ménages collectifs sont à la source d'un renforcement de la pression foncière. Ce double effet se traduit par un triplement de la taille du parc, soit 18 millions de logements à l'horizon 2050.

L'impact de l'accroissement de la taille du parc de logements sur la consommation d'énergie a pu être quantifié. Celui-ci se traduit par une forte augmentation des consommations énergétiques, qui serait de l'ordre de 413,4 TWh/an, l'équivalent de 200 kWh/m<sup>2</sup>/an selon le scénario tendanciel. L'augmentation des consommations s'explique, d'une part, par l'intensité du service consommé, dont l'importance serait liée à l'effet de rattrapage des ménages en équipements électroménagers (niveau de satisfaction de 100 % visé en 2050), et, d'autre part, en une amplification des besoins de chauffage et de refroidissement induite par le niveau d'isolation de l'enveloppe bâtie, notamment dans le segment des maisons individuelles.

Le modèle a permis de tester le potentiel de pénétration de nouvelles technologies sur la réduction des consommations/émissions. À ce titre, il a montré que l'atteinte de l'objectif de réduction des consommations/émissions s'appuie sur deux leviers technologiques : le renforcement de l'isolation de l'enveloppe bâtie dans le parc des logements neufs, tout en réhabilitant massivement le stock existant, ainsi que l'usage d'appareils électroménagers à

faible consommation dans le parc du neuf, en renouvelant progressivement dans le même temps les anciens appareils dans le parc existant.

Le modèle a révélé que la mise en place de ces leviers (scénario BBC) pourrait amener à réduire drastiquement les consommations et les émissions à l'horizon 2050. En effet, la fusion de ces efforts permettrait d'atteindre un facteur de presque de 2,8 pour les consommations énergétiques, qui seraient alors de l'ordre de 145,2 TWh/an. Ce niveau des consommations permettrait d'atténuer significativement les émissions, qui s'élèveraient à 41,2 MtCO<sub>2</sub> (contre 112,5 MtCO<sub>2</sub> dans le scénario tendanciel).

Il est intéressant de noter que ramener le niveau de performance moyenne de l'ensemble du parc sous la barre des 70 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le scénario BBC, en stabilisant les émissions unitaires à 0,8 tCO<sub>2</sub>/habitant dans le secteur résidentiel, constituerait un résultat qui correspond aux ambitions de ce travail.

Au final, si cette conclusion fournit un message optimiste et rassurant quant à nos possibilités technologiques de réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050, il reste à déterminer les instruments réglementaires et les modalités de mise en œuvre opérationnelle de l'ensemble des acteurs (techniques, économiques, politiques...) pour la mise en place d'une politique énergétique destinée à réaliser ces potentiels.

En effet, de tels enjeux énergétique et économique à l'échelle du secteur résidentiel nécessiteraient forcément un encadrement réglementaire et technique qui commencerait tout d'abord par une remise en question de l'efficacité de la réglementation thermique actuelle face aux enjeux énergétiques. Il semblerait ensuite indispensable de mobiliser un encadrement technique, par le biais de l'adoption de styles architecturaux bioclimatiques, ainsi que le recours à des matériaux de construction plus performants en matière de consommation d'énergie.

Bien évidemment, ces mesures impliqueraient des investissements et des charges économiques souvent lourds. À ce titre, la mise en œuvre de ces leviers nécessite l'intervention des pouvoirs politiques en amont, par exemple pour la réhabilitation, la mise en place de mécanismes financiers appropriés et gérés par les banques, avec l'appui et le contrôle de l'État, ainsi que l'incitation des ménages à l'usage d'appareils électroménagers plus performants et économiques. Ces mesures pourraient être accompagnées par l'instauration d'une taxe carbone (selon des barèmes fixés par tCO<sub>2</sub>) en 2050, conjointement à des subventions à des taux

attractifs pour l'achat de ce type d'équipements, tout en recyclant les anciens pour atteindre un taux de renouvellement de 100 % à l'horizon 2050.

### Limites de l'exercice et nouvelles perspectives de travaux futurs

L'exercice, ciblant la réduction des consommations et des émissions dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050, repose sur quelques hypothèses, dont certaines sont facilitatrices. Or, certains facteurs pourraient à l'inverse présenter des difficultés pour atteindre les objectifs ciblés. Cet exercice de modélisation montre certainement des limites, ainsi que des perspectives de réflexion qui méritent d'être abordées.

Tout d'abord, le modèle de parc se contente de segmenter le parc de logements en s'appuyant uniquement sur les enquêtes RGPH. Cette segmentation reste relativement insuffisante au regard de l'hétérogénéité des logements dans le parc. Pour alimenter les données de notre modèle, nous avons considéré que les maisons individuelles « réglementaires », par exemple, étaient réalisées conformément aux permis de construire. L'estimation des surfaces d'enveloppe et habitable est donc basée sur quelques échantillons de maisons. Or, cette méthode d'échantillonnage présente forcément des incertitudes puisqu'elle ne prend pas en compte les modifications qui ont été effectuées lors de la réalisation, et portant sur la surface habitable, la surface de l'enveloppe extérieure, etc. Ces modifications peuvent également amplifier des besoins de chauffage et de refroidissement. Pour remédier à ce problème, il semble plus approprié d'avoir recours à la méthode des archétypes, afin de lever ces incertitudes. Dans ce sens, la prise en compte de l'aménagement urbain semble aussi une piste pertinente afin de mesurer les potentialités d'économies d'énergie induites par la forme urbaine.

En prolongeant les systèmes de chauffage actuel, notre jeu de scénarisation a écarté de nombreux leviers technologiques qui pourraient avoir le potentiel de réduire significativement la consommation de chauffage. On peut penser, à ce sujet, au recours à des systèmes de chauffage groupés pour les logements en immeubles collectifs, ou à des pompes à chaleur dans les maisons individuelles, afin d'améliorer la performance des systèmes de chauffage et réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>.

La question économique présente également quelques possibilités d'amélioration, puisque les hypothèses des revenus des ménages sont considérées comme des variables exogènes. Rappelons que l'hypothèse de prolonger à terme l'accroissement des revenus des ménages

apparaît contestable en raison de la dépendance de nombreux secteurs économiques à la rente des hydrocarbures, souvent instable (cf. chapitre 1). On peut rappeler que le modèle ne permet pas de prendre en compte les variables macroscopiques du contexte économique, et les interactions de consommation liées à une hypothétique variation des revenus des ménages. Il apparaît donc pertinent d'intégrer une méthode de modélisation hybride qui prenne en compte simultanément les approches *top-down* et *bottom-up*. Le développement d'une telle méthode de modélisation apparaît très encourageant dans la mesure où celle-ci permet à la fois d'examiner les effets du contexte économique sur la variation des consommations, tout en étudiant en détail les interactions entre les revenus des ménages et le niveau de consommation, à savoir l'achat d'appareils électroménagers.

L'accroissement des revenus pourrait en effet avoir un effet rebond sur la consommation (ou s'exprimer par une baisse en période de décroissance). En revanche, notre modèle ne permet pas de visualiser la part comportementale des ménages dans la consommation d'énergie. En écartant cet effet, le modèle semble effacer un potentiel de l'économie d'énergie qui serait induit par le comportement des ménages. Or, il semble intéressant de prendre en compte l'impact de ce comportement afin de matérialiser la modification de la consommation. Cette piste peut constituer une nouvelle perspective dans l'amélioration de la performance énergétique du secteur résidentiel. Un tel niveau de sophistication nécessiterait par contre plus de données et d'études sociétales sur les différentes classes sociales des ménages.

# Bibliographie

## Ouvrages imprimés

- BERGER, G., BOURBON-BUSSET, J., MASSE P. *De la prospective : Textes fondamentaux de la prospective française (1955-1966)*. Paris : Éditions L'Harmattan, 2007.
- BERNSTEIN, D. *Traité de construction durable : principes, détails de construction*. Paris : Le Moniteur, 2007.
- BLAYO, F., VERLEYSSEN M. *Les Réseaux de neurones artificiels*. Paris : Presses universitaires de France, coll. "Que sais-je", n° 3042, 1<sup>re</sup> édition, 1996.
- CAZES, B. *Histoire des futurs*. Paris : Seghers, 1986. [en ligne :] <http://www.persee.fr>.
- DECOUFLE, A. *La Prospective*. Paris : PUF, 1972. [en ligne :] [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ahess\\_0395-2649\\_1973\\_num\\_28\\_5\\_293416\\_t1\\_1209\\_0000\\_3](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ahess_0395-2649_1973_num_28_5_293416_t1_1209_0000_3).
- GODET, M. *De l'anticipation à l'action : manuel de prospective et de stratégie*. Paris: Dunod, 1991.
- GOLDEMBERG, J. *et al. Energy for a Sustainable World*. Washington DC: Wiley World Resources Institute, Centre Policy Center, 2000.
- HATEM, F. *et al. La Prospective : pratiques et méthodes*, Paris : Éditions Economica, 1993.
- KHELLADI, M., SAFIR, T. *Présentation générale, Étude migrations, premiers résultats synthétiques*. Alger : AARDES, 1979.
- LAZAR, M., NEHAD, S. *L'Algérie aujourd'hui*. Paris : Éditions Michalon, 2014.
- MERLIN, P., TRAISNEL, J.-P. *Énergie, environnement et urbanisme durable*. Paris : Presses universitaires de France, 1996.
- MITCHELL, J.-V., ROCHEFORT, D. *L'Autre Face de la dépendance énergétique*, Paris : IFRI, coll. « Politique étrangère », 2006.
- TRYON, R.C. *Cluster Analysis : Correlation Profile and Orthometric (factor) Analysis for the Isolation of Unities in Mind and Personality*. Michigan : Edwards Brothers, Lithoprinters and Publishers, 1939.

## Rapports imprimés

Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie.  
*Consommation énergétique finale de l'Algérie. Alger, 2005.*

Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie.  
*Consommation énergétique finale de l'Algérie. Alger, 2007.*

Direction générale de l'Énergie et du Climat. *Rapport énergie 2050*. France, 2012.

Direction générale de l'Environnement. *Communication nationale initiale*. Algérie, 2001.

IPCC. *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. Suisse, 2014.

MAIZIA, M. et al. *Les Gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbains*. France, 2010. [en ligne :] <http://rp.urbanisme.equipement.gouv.fr/puca/activites/rapport-gisements-developpement-urbain-analyse-quantitative.pdf>.

Ministère de l'Aménagement du territoire, de l'Environnement et du Tourisme. *Guide de développement de Projet MDP en Algérie, Projet CD4CDM Algérie*. Algérie, 2010. [en ligne :] <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=bilan-des-realizations-2>.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan de consommation d'énergie et des émissions de CO2*. Algérie, 2002.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2002.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2003.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2004.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2005.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2006.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2007.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2008.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2009.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2010.

Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2011.

- Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan énergétique national de l'année*. Algérie, 2012.
- Ministère de l'Énergie et des Mines. *Bilan rétrospective d'énergie*. Algérie, 2010.
- Ministère de l'Énergie et des Mines. *Programme indicatif national électricité*. Algérie, 2010.
- Ministère de l'Énergie et des Mines. *Programme indicatif national gaz*. Algérie, 2010.
- Ministère de l'Habitat. *DTR32, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation : règles de calcul des déperditions calorifiques DTR C 3-2. Document technique réglementaire*. Algérie, 1997.
- Ministère de l'Habitat. *DTR34, Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments. Document technique réglementaire*. Algérie, 1998.
- MISSAOUI, R., BEN HASSINE, H., MOURTADA, A. *Indicateurs de l'efficacité énergétique dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen*. Nice, 2012. [en ligne :] [http://www.dimed.gouv.fr/sites/dimed.gouv.fr/files/plan\\_bleu\\_-\\_rapport\\_efficacite\\_energetique\\_-\\_octobre\\_2012.pdf](http://www.dimed.gouv.fr/sites/dimed.gouv.fr/files/plan_bleu_-_rapport_efficacite_energetique_-_octobre_2012.pdf).
- MORICE, N. *et al. Rapport R1 État de l'art et synthèse en matière de prospective*, Paris, 2004.
- MURE, *L'Efficacité énergétique en France*, Paris, 2012. [en ligne :] <http://www.odyssee-mure.eu/publications/profiles/france-efficacite-energetique.pdf>.
- NICOLAS, J.-P., MORICE, N. *Scénarios prospectifs pour le projet SIMBAD : Rapport intermédiaire n° 3 du projet SIMBAD*. LET, 2006.
- Programme des Nations unies pour le développement, *Seconde Communication nationale de l'Algérie sur les changements climatiques CCNUCC*. Algérie, 2010.
- RAUX, C. *et al. Analyse et modélisation des comportements transports-habitat-localisations : Rapport R3*. Paris, 2006.
- RAUX, C. *et al. Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL : Rapport R2*. Paris, 2005.

## Travaux universitaires

- AOUN, B. *Micro-cogénération pour les bâtiments résidentiels fonctionnant avec des énergies renouvelables*. Thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris, spécialité « énergétique », 13 novembre 2008.

- BERRACHED, L. *Étude prospective de la demande d'énergie finale pour l'Algérie à l'horizon 2030*. Thèse de magistère de la Faculté des sciences de l'ingénieur, université de Boumerdes (Algérie), 30 octobre 2011.
- CAYLA, J. M. *Les Ménages sous la contrainte carbone exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES*. Thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris, spécialité « économie et finance », 3 mars 2011.
- CRASSOUS, R. *Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques*. Thèse de doctorat de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), spécialité « science économique », 21 novembre 2008.
- FAURE, X. *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique*. Thèse de doctorat de l'université Joseph-Fourier (Grenoble), spécialité « mécanique énergétique », 16 novembre 2007.
- FOURA, S. *Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie*. Thèse de doctorat de l'université de Constantine (Algérie), spécialité « architecture bioclimatique », 2008.
- GRIGNON-MASSE, L. *Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine*. Thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris, spécialité « énergétique », 20 mai 2010.
- TROCME, M. *Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie*. Thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris, spécialité « énergétique », 26 novembre 2009.

## Articles de périodiques imprimés

- ARGENT, R.M. « An overview of model integration for environmental applications components, frameworks and semantics ». *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19, p. 219-234. [en ligne :] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815203001506>.
- ASIF, M., Muneer, T. « Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11 (7), p. 1388-1413. [en ligne :] <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032106000049> [consulté le 13 juillet 2014].

- BETTGENHÄUSER, « 40 % CO<sub>2</sub> saving target in the German building stock up to 2020-integrated assessment scenarios with the built environment-analysis-model BEAM ». In : *Energy efficiency first : The foundation of a low-carbon society, eceee 2011 Summer Study 2011, Presqu'île de Giens (France), 6-11 juin 2011*. Stockholm : ABA Intercopy, 2011, p. 1149-1156.
- BÖHRINGER, C., RUTHERFORD, T.F. « Combining bottom-up and top-down ». *Energy Economics*, 2008, 30 (2), p. 574-596. [en ligne :] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014098830700059X> [consulté le 1<sup>er</sup> février 2014].
- CATALINA, T., VIRGONE, J., BLANCO, E. « Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings ». *Energy and Buildings*, 2008, 40 (10), p. 1825-1832.
- CHEDID, R.B., GHAJAR, R.F. « Assessment of energy efficiency options in the building sector of Lebanon ». *Energy Policy*, 2004, 32 (5), p. 647-655. [en ligne] [http://0-ac.els-cdn.com.sso.scd.univ-tours.fr/S0301421502003282/1-s2.0-S0301421502003282-main.pdf?\\_tid=669b9a22-b140-11e4-87ef-00000aacb35d&acdnat=1423585268\\_07fb5621a549983542ffc609761a09af](http://0-ac.els-cdn.com.sso.scd.univ-tours.fr/S0301421502003282/1-s2.0-S0301421502003282-main.pdf?_tid=669b9a22-b140-11e4-87ef-00000aacb35d&acdnat=1423585268_07fb5621a549983542ffc609761a09af) [consulté le 21 janvier 2014].
- DOWLATABADI, H. « Integrated assessment models of climate change : An incomplete overview ». *Energy Policy*, 1995, 23 (4-5), p. 289-296. [en ligne :] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030142159590155Z> [consulté le 31 janvier 2014].
- FAMUYIBO, A., DUFFY, A., STRACHAN, P. « Developing archetypes for domestic dwellings—An Irish case study ». *Energy and Buildings*, 2012, 50, p. 150-157. [en ligne :] <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778812001818> [consulté le 25 janvier 2014].
- FELS, M. « Measuring Energy Savings : The Scorekeeping Approach ». *Energy and Buildings*, Special PRISM Issue, 1986, p. 5-18.
- FILIPPÍN, C., RICARD, F., FLORES LARSEN, S. « Evaluation of heating energy consumption patterns in the residential building sector using stepwise selection and multivariate analysis ». *Energy and Buildings*, 2013, 66, p. 571-581. [en ligne :] <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813004453> [consulté le 25 janvier 2014].
- GIRAUDET, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P. « Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling ». *Energy Economics*, 2012, 34 (2), p. 426-445. [en ligne :] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014098831100140X> [consulté le 1<sup>er</sup> février 2014].

- GUETTA, M., MEGDICHE, C. « Famille, urbanisation et crise du logement en Algérie ». *Sociétés contemporaines*, Alger, 1990, 3 (1), p. 95-115. [en ligne :] [http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/socco\\_1150-1944\\_1990\\_num\\_3\\_1\\_967](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/socco_1150-1944_1990_num_3_1_967).
- JOUVENEL H. « Invitation à la prospective ». *Futuribles*, coll. « Perspectives », Paris, 2004. p. 90.
- JOUVENEL, F. (de). « La Prospective des territoires urbains sensibles : la construction des scénarios et quelques autres méthodes ». *Futuribles*, guide méthodologique de la mission Prospective et Stratégie du secrétariat général du Comité interministériel des villes, Paris, 2009. [en ligne :] [http://www.ville.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE\\_PROSPECTIVE\\_SG\\_CIV.pdf](http://www.ville.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE_PROSPECTIVE_SG_CIV.pdf).
- KAVGIC, M. *et al.* « A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector ». *Building and Environment*, 2010, 45 (7), p. 1683-1697.
- LAPONCHE, B. « Prospective et enjeux énergétiques mondiaux un nouveau paradigme ». *Agence française de développement, document de travail*, 2008, n° 59, 2008. [en ligne :] <http://www.afd.fr/jahia/webdav/site/afd/shared/PUBLICATIONS/RECHERCHE/Scientifiques/Documents-de-travail/059-document-travail.pdf>.
- MAÏZIA, M. « Pompe à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur ». *Les Cahiers du CLIP*, 2007, 18, p. 1-47. [en ligne :] <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00133556> [consulté le 21 janvier 2014].
- MARESCA, B., DUJIN, A., PICARD, R. « La Consommation d'énergie dans l'habitat entre recherche de confort et impératif écologique ». *Credoc, Cahier de recherche*, 2009, n° 264. [en ligne :] <http://www.credoc.fr/pdf/Rech/C264.pdf>.
- MATA, É., SASIC KALAGASIDIS, A. & JOHNSON, F. « Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock ». *Energy Policy*, 2013, 55, p. 404-414. [en ligne :] <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512010683>.
- MCKENNA, R. *et al.* « Energy efficiency in the German residential sector : A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets ». *Building and Environment*, 2013, 62, p.77-88.
- ÖZER, B., GÖRGÜN, E., İNCECIK, S. « The scenario analysis on CO2 emission mitigation potential in the Turkish electricity sector : 2006–2030 ». *Energy*, 2013, 49, p. 395-403.

- PARSON, E.A., FISHER-VANDEN, K. « Integrated assessment models of global climate change ». *Annual Review of Energy and the Environment*, 1997, 22, p. 589-628. [en ligne :] <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.22.1.589>.
- RCEEE, « Étude documentaire- Algérie (Projet) ». *Regional Center Renewable Energy and Efficiency*, Algérie, 2010. [en ligne :] <http://www.rcreee.org/fr/content/etude-documentaire-algerie-projet>.
- SAIDUR, R., MASJUKI, H.H., JAMALUDDIN, M.-Y. « An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia ». *Energy Policy*, 2007, 35 (2), p. 1050-1063. [en ligne :] <http://0-www.sciencedirect.com.sso.scd.univ-tours.fr/science/article/pii/S0301421506000930> [consulté le 17 janvier 2012].
- SANTIAGO, I. *et al.* « Energy consumption of audiovisual devices in the residential sector : Economic impact of harmonic losses ». *Energy*, 2013, 60, p. 292–301. [en ligne :] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213006932> [consulté le 27 janvier 2014].
- SCHNEIDER, S. « Integrated assessment modeling of global climate change : Transparent rational tool for policy making or opaque screen hiding value-laden assumptions? ». *Environmental Modeling and Assessment*, 1997, 2, p. 229-249. [en ligne :] <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019090117643>.
- SCHWANITZ, V.J. « Evaluating integrated assessment models of global climate change ». *Environmental Modelling & Software*, 2013, 50, p. 120–131. [en ligne :] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815213001965> [consulté le 31 janvier 2014].
- SHIMODA, Y. *et al.* « Residential end-use energy simulation at city scale ». *Building and Environment*, 2004, 39 (8), p. 959-967. [en ligne :] <http://0-www.sciencedirect.com.sso.scd.univ-tours.fr/science/article/pii/S0360132304000319> [consulté le 25 janvier, 2014].
- SHORROCK, L., DUNSTER, J. « The physically-based model {BREHOMES} and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock ». *Energy Policy*, 1997, 25 (12), p. 1027-1037. [en ligne :] <http://0-www.sciencedirect.com.sso.scd.univ-tours.fr/science/article/pii/S0301421597001304>.
- STRACHAN, N., KANNAN, R. « Hybrid modelling of long-term carbon reduction scenarios for the UK ». *Energy Economics*, 2008, 30 (6), p. 2947-2963. [en ligne :] <http://0-www.sciencedirect.com.sso.scd.univ-tours.fr/science/article/pii/S0140988308000613>.
- SWAN, L., UGURSAL, I. « Modeling of end-use energy consumption in the residential sector : A review of modeling techniques ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13

(8), p. 1819-1835. [en ligne :] <http://0-www.sciencedirect.com.sso.scd.univ-tours.fr/science/article/pii/S1364032108001949> [consulté le 21 janvier 2014].

TRAINSEL, J.-P. *et al.* « Habitat et facteur 4, étude d'une réduction des émissions de CO2 liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050 ». *Les Cahiers du Club d'ingénierie prospective énergie et environnement*, 2010, n° 20. [en ligne :] [http://www.ddline.fr/wp-content/uploads/2012/03/Clip20\\_fr.pdf](http://www.ddline.fr/wp-content/uploads/2012/03/Clip20_fr.pdf).

TRAINSEL, J.-P., MAÏZIA, M., RODITI, D. « Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique ». *Les Cahiers du CLIP*, 2004, p. 3-46. [en ligne :] [http://www.iddri.org/Publications/Les-cahiers-du-CLIP/clip\\_16.pdf](http://www.iddri.org/Publications/Les-cahiers-du-CLIP/clip_16.pdf) [consulté le 21 janvier, 2014].

WILSON, D., SWISHER, J. « Exploring the gap : Top-down versus bottom-up analyses of the cost of mitigating global warming ». *Energy Policy*, 1993, 21 (3), p. 249-263. [en ligne :] [http://0-ac.els-cdn.com.sso.scd.univ-tours.fr/030142159390247D/1-s2.0-030142159390247D-main.pdf?\\_tid=896bee1a-b129-11e4-9d46-00000aacb361&acdnat=1423575448\\_9f124c3b55d47c3f4a971b5eb5f49ed6](http://0-ac.els-cdn.com.sso.scd.univ-tours.fr/030142159390247D/1-s2.0-030142159390247D-main.pdf?_tid=896bee1a-b129-11e4-9d46-00000aacb361&acdnat=1423575448_9f124c3b55d47c3f4a971b5eb5f49ed6).

YOUNG, D. « When do energy-efficient appliances generate energy savings? Some evidence from Canada ». *Energy Policy*, 2008, 36 (1), p. 34-46.

## Communication dans un congrès

PAREKH, A. « Development of archetypes of building characteristics libraries for simplified energy use evaluation of houses ». In : *IBPSA, 9<sup>th</sup> International Conference, Montréal (Canada)*. 2005, p. 921-928. [en ligne :] [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05\\_0921\\_928.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0921_928.pdf).

Souami, T., 2014. Quelle information pour renseigner la décision et les pratiques ? *Forum des politiques et de l'habitat privé*, pp.1-8. [en ligne :] <http://www.forumhabitatprive.org/fre/29/recherche/recherche/cherche?q=souami>.

## Sites web consultés

AIE, 2013. Agence Internationale de l'Energie (EIA) [WWW Document]. [www.eia.gov](http://www.eia.gov). URL <http://www.eia.gov/> (accessed 1.23.14).

APRUE, 2007. Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Chiffres clés 2007.

- Argent, R.M., 2004. An overview of model integration for environmental applications components , frameworks and semantics. *Environ. Model. Softw.* 19, 219–234. doi:10.1016/S1364-8152(03)00150-6
- Asif, M., Muneer, T., 2007. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11, 1388–1413. doi:10.1016/j.rser.2005.12.004
- Berger, G., Bourbon-Busset, J., Masse, P., 2007. *De la prospective: Textes fondamentaux de la prospective française (1955-1966)*, Editions L. ed. Editions L’Harmattan, Paris.
- Bettgenhäuser, 2011. 40% CO2 saving target in the German building stock up to 2020- integrated assessment scenarios with the built environment-analysis-model BEAM. *Energy Effic. first Found. alow-carbon Soc.*
- Blayo, F., Verleysen, M., 1996. *Les réseaux de neurones artificiels*, PUF. ed. Paris.
- Böhringer, C., Rutherford, T.F., 2008. Combining bottom-up and top-down. *Energy Econ.* 30, 574–596. doi:10.1016/j.eneco.2007.03.004
- Catalina, T., Virgone, J., Blanco, E., 2008. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy Build.* 40, 1825–1832.
- Cayla, J.-M., 2011. *Les menages sous la contrainte carbone. exercice de modelisation prospective des secteurs residentiel et transports avec times.* l’École nationale supérieure des mines de Paris.
- Cazes, B., 1986. Les figures de l’avenir de Saint Augustin au XXIe siècle, in: *Histoire Des Futurs.* Paris : Seghers, pp. 425–427.
- Chedid, R.B., Ghajar, R.F., 2004. Assessment of energy efficiency options in the building sector of Lebanon. *Energy Policy* 32, 647–655.
- Crassous, R., 2008. *Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques.* Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l’Environnement (Agro Paris Tech).
- De Jouvenel, F., 2009. *La prospective des territoires urbains sensibles : la construction des scénarios et quelques autres méthodes.* *Futur. un Guid. méthodologique la Mission Prospect. Strat. secrétariat général du Com. interministériel des ville,* Paris 43.
- De Jouvenel H., 2004. *Invitation à la prospective. futuribles* 90.

- Découflé, A., 1972. *La prospective*, PUF. ed. Paris.
- Dowlatabadi, H., 1995. Integrated assessment models of climate change: An incomplete overview. *Energy Policy* 23, 289–296. doi:10.1016/0301-4215(95)90155-Z
- EIU, 2013. Economist Intelligence Unit [WWW Document]. [www.eiu.com/home.aspx](http://www.eiu.com/home.aspx). URL [http://www.natixis.com/natixis/jcms/j\\_6/fr/accueil](http://www.natixis.com/natixis/jcms/j_6/fr/accueil) (accessed 1.23.14).
- Famuyibo, A., Duffy, A., Strachan, P., 2012. Developing archetypes for domestic dwellings—An Irish case study. *Energy Build.* 50, 150–157. doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.033
- Fels, M., 1986. Measuring Energy Savings: The Scorekeeping Approach," Special PRISM Issue of Energy and Buildings, sixteen papers describing background on PRISM and sample applications; primary background reference for PRISM users.
- Filippín, C., Ricard, F., Flores Larsen, S., 2013. Evaluation of heating energy consumption patterns in the residential building sector using stepwise selection and multivariate analysis. *Energy Build.* 66, 571–581. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.054
- FMI, 2013. Fonds Monétaire International [WWW Document]. [www.imf.org/external/french/](http://www.imf.org/external/french/). URL <http://www.imf.org/external/french/index.htm> (accessed 1.23.14).
- GIEC, 2013. Les éléments scientifiques, Changements climatiques 2013 Les éléments scientifiques.
- Giraudet, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P., 2012. Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling. *Energy Econ.* 34, 426–445. doi:10.1016/j.eneco.2011.07.010
- Godet, M., 1991. *De l'anticipation à l'action: manuel de prospective et de stratégie*. Paris, p. 390.
- Goldemberg, J., Thomas B., J., Amulya K. N., R., Williams, R.H., 1998. *Energy for a Sustainable World*, Wiley. ed.
- Guetta, M., Megdiche, C., 1990. Famille, urbanisation et crise du logement en Algérie. *Sociétés Contemp.* 3, 95–115. doi:10.3406/socco.1990.967
- Hatem, F., Roubelat, F. (Collaborateur), Cazes, B. (Collaborateur), Godet, M. (Préfacier), 1993. *La prospective : pratiques et méthodes*, Economica. ed. Editions Economica.
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., Djurovic-Petrovic, M., 2010. A review of bottom-up building stock models for energy

- consumption in the residential sector. *Build. Environ.* 45, 1683–1697.  
doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.021
- Khelladi, M., Safir, T., 1979. *Présentation générale, Etude migrations, premiers résultats synthétiques*, AARDES. ed. Alger.
- Laponche, B., 2008. *Prospective et enjeux énergétiques mondiaux un nouveau paradigme*. Agence Française Développement, Doc. Trav. N° 59 46.
- Lazar, M., Nehad, S., 2014. *L'Algérie aujourd'hui*, Editions M. ed. Paris.
- Maïzi, N., Assoumou, E., 2007. Exercices prospectifs via le modèle MARKAL : spécificités françaises ? *Energ. développement durable* 89–96.
- Maïzia, M., 2007. *Pompe à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de {CO2} dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur*. *Les Cah. du {CLIP}* 18, 1–47.
- Maizia, M., Houdant, N., Joliton, D., Rimmel, L., Menard, R., Berge, S., Teller, J., Viejo Garcia, P., Lacoste, G., Lerolles, H., 2010. *Les gisements du développement urbain: Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbains, Rapport final, DGALN/PUCA DGALN/PUCA*.
- Maresca, B., Dujin, A., Picard, R., 2009. *La consommation d'énergie dans l'habitat entre recherche de confort et impératif écologique*. *Cent. Rech. pour l'Étude {l'Observation} des Cond. Vie. Cah. Rech.* N°264 87.
- Mata, É., Sasic Kalagasidis, A., Johnsson, F., 2013. Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock. *Energy Policy* 55, 404–414. doi:10.1016/j.enpol.2012.12.023
- McKenna, R., Merkel, E., Fehrenbach, D., Mehne, S., Fichtner, W., 2013. Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Build. Environ.* 62, 77–88.
- MEM, 2002. *Bilan de consommation d'énergie et des émissions de CO2*, Ministère de l'Énergie et des Mines, Algérie.
- MEM, 2010. *Programme indicatif national gaz*. Alger.
- MEM, 2011. *Bilan énergétique national de l'année 2011*. Algérie.
- MEM, 2012. *Bilan énergétique national de l'année 2012*. Algérie.

- Missaoui, R., Ben Hassine, H., Mourtada, A., 2012. Indicateurs de l'efficacité énergétique dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen, Rapport régional.
- Mure, 2012. L'efficacité énergétique en France, Mure odyssee.
- Nicolas, J.-P., Morice, N., 2006a. "Scénarios prospectifs pour le projet SIMBAD" : Rapp. intermédiaire n°3 du Proj. SIMBAD Simuler les MoBilités pour une Agglomération Durable.
- Nicolas, J.-P., Morice, N., 2006b. {"Scénarios"} prospectifs pour le projet {"SIMBAD"}" : Rapp. intermédiaire n°3 du Proj. {"SIMBAD"} {"Simuler"} les {"MoBilités"} pour une Agglomération Durable.
- Özer, B., Görgün, E., İncecik, S., 2013. The scenario analysis on CO2 emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006–2030. *Energy* 49, 395–403. doi:10.1016/j.energy.2012.10.059
- Parekh, A., 2005. Development of archetypes of building characteristics libraries for simplified energy use evaluation of houses, in: IBPSA, Ninth International Conference, Montreal, Canada. pp. 921–928.
- Parson, E.A., Fisher-Vanden, Karen, 1997. Integrated assessment models of global climate change, *Annual Review of Energy and the Environment*. doi:10.1146/annurev.energy.22.1.589
- Plassard, F., 2004. Rétrospective de la prospective. *Trav. Rech. Prospect.* 123.
- RCEEE, 2010. Etude documentaire- Algérie (Projet ) [WWW Document]. Reg. Cent. Renew. Energy Effic. URL <http://www.rcreee.org/fr/content/etude-documentaire-algerie-projet>
- Saidur, R., Masjuki, H.H., Jamaluddin, M.-Y., 2007. An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia. *Energy Policy* 35, 1050–1063.
- Santiago, I., López-Rodríguez, M.A., Gil-de-Castro, A., Moreno-Munoz, A., Luna-Rodríguez, J.J., 2013. Energy consumption of audiovisual devices in the residential sector: Economic impact of harmonic losses. *Energy* 60, 292–301. doi:10.1016/j.energy.2013.08.018
- Schneider, S., 1997. Integrated assessment modeling of global climate change: Transparent rational tool for policy making or opaque screen hiding value-laden assumptions? *Environ. Model. Assess.* 2, 229–249.
- Schwanitz, V.J., 2013. Evaluating integrated assessment models of global climate change. *Environ. Model. Softw.* 50, 120–131. doi:10.1016/j.envsoft.2013.09.005

- Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., Mizuno, M., 2004. Residential end-use energy simulation at city scale. *Build. Environ.* 39, 959–967. doi:10.1016/j.buildenv.2004.01.020
- Shorrock, L., Dunster, J., 1997a. The physically-based model {BREHOMES} and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the {UK} housing stock. *Energy Policy* 25, 1027–1037. doi:10.1016/S0301-4215(97)00130-4
- Shorrock, L., Dunster, J., 1997b. The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. *Energy Policy* 25, 1027–1037. doi:10.1016/S0301-4215(97)00130-4
- Souami, T., 2014. Quelle information pour renseigner la décision et les pratiques ? *Forum des Polit. l’habitat privé* 1–8.
- Strachan, N., Kannan, R., 2008. Hybrid modelling of long-term carbon reduction scenarios for the UK. *Energy Econ.* 30, 2947–2963. doi:10.1016/j.eneco.2008.04.009
- Swan, L., Ugursal, I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1819–1835. doi:10.1016/j.rser.2008.09.033
- Traisnel, J.-P., Joliton, D., Laurent, M.-H., Caffiaux, S., Mazzenga, A., 2010. Habitat et facteur 4, étude d’une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées au confort thermique dans l’habitat à l’horizon 2050. N° 20, *Les Cah. du club d’ingénierie Prospect. énergie environnement.* 108.
- Traisnel, J.-P., Maïzia, M., Roditi, D., 2004. Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique, in: *Les Cahiers Du CLIP.* pp. 3–46.
- Tryon, R.C., 1939. Cluster Analysis: Correlation Profile and Orthometric (factor) Analysis for the Isolation of Unities in Mind and Personality, in: *Edwards Brothers. lithoprinters and publishers,* p. 122.
- Wilson, D., Swisher, J., 1993. Exploring the gap: Top-down versus bottom-up analyses of the cost of mitigating global warming. *Energy Policy* 21, 249–263.
- Young, D., 2008. When do energy-efficient appliances generate energy savings? Some evidence from Canada. *Energy Policy* 36, 34–46. doi:10.1016/j.enpol.2007.09.011

## Liste des abréviations et acronymes

**ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

**APRUE** : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Energie

**AIE** : Agence Internationale de l'Energie

**BBC** : Bâtiment Basse consommation

**BFC** : Bâtiment Faible consommation

**CP** : Construction précaire

**DPE-3CL** : Diagnostic de Performance Energétique réalisé avec la méthode 3-CL

**DJU** : Degrés Jour Unifié

**ECS** : Eau Chaude Sanitaire

**FBCF** : Formation Brute de Capital Fixe

**F4** : Facteur 4

**GES** : Gaz à Effet de Serre

**GNL** : Gaz Naturel Liquéfié

**GPL** : Gaz de Pétrole Liquéfié

**GWh** : Gigawatt Heure

**IC** : Immeuble Collectif

**LBC** : Ampoule à basse consommation

**MARKAL** : MARket ALlocation

**KWh** : Kilowatt Heure

**MDE** : Maîtrise de la Demande d'Energie

**MEM** : Ministère de l'Energie et des Mines

**MI** : Maison Individuelle

**MT** : Maison traditionnelle

**MTD** : Meilleure Technologie Disponible

**Mtep** : Millions de Tonnes d'Equivalent de Pétrole

**ONS** : Office National des Statistiques

**PAC** : Pompe à Chaleur

**RGPH** : Général de la Population et de l'Habitat

**SHAB**: Surface Habitable

**TIMES**: The Integrated Markal-Efom System

**TOL** : Taux d'occupation par Logement

**TML** : Taux de Ménage par Logement

**TOM** : Taux d'Occupation par Logement

**TWh** : Téra watt Heure

# Table des matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>2</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé en anglais .....</b>	<b>4</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre 1 Enjeux énergétiques dans le contexte algérien .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Principaux enjeux énergétiques dans le contexte algérien .....</b>	<b>17</b>
1.1.1 Panorama général du secteur énergétique en Algérie .....	18
1.1.2 Secteur énergétique comme levier économique en Algérie .....	21
1.1.3 Mix énergétique, dynamique de la production/consommation et ressources.....	24
1.1.4 Enjeux du modèle énergétique actuel.....	26
1.1.5 Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel .....	28
1.1.6 Politique d'efficacité énergétique.....	31
1.1.7 Politique énergétique et stratégie .....	31
1.1.8 Intensité énergétique, indicateur d'efficacité .....	32
<b>1.2 Enjeux environnementaux des politiques énergétiques .....</b>	<b>35</b>
1.2.1 Analyse des émissions de GES .....	37
1.2.2 Structure sectorielle des émissions de CO <sub>2</sub> .....	39
<b>1.3 Efficacité énergétique, un potentiel pour baisser les émissions de GES .....</b>	<b>42</b>
<b>Chapitre 2 État de l'art de la démarche prospective énergétique et classification des modèles existants .....</b>	<b>45</b>
<b>2.1 Objectifs de l'état de l'art .....</b>	<b>45</b>
<b>2.2 Fondement de la démarche prospective .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3 La démarche prospective .....</b>	<b>48</b>
<b>2.4 Principe de l'exercice prospectif .....</b>	<b>50</b>
<b>2.5 Prospectives et enjeux énergétiques.....</b>	<b>50</b>
<b>2.6 Méthodes prospectives dans l'analyse des besoins énergétiques .....</b>	<b>51</b>
2.6.1 Analyse structurelle.....	52
2.6.2 Consultation d'experts.....	52
2.6.3 Méthode des impacts croisés.....	53
2.6.4 Méthode d'analyse morpho-fonctionnelle .....	53

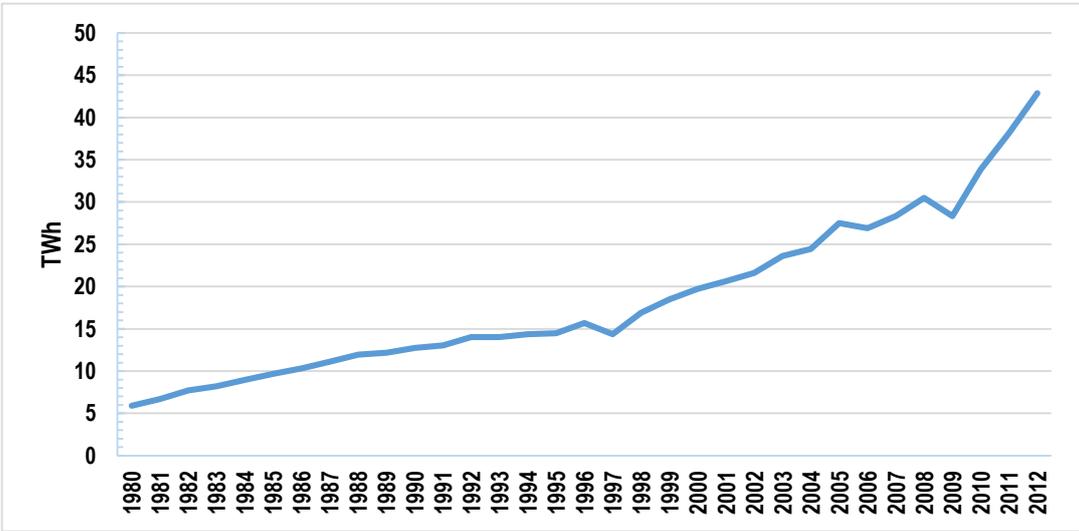
3.4.1	Hypothèses démographiques.....	98
3.4.2	Parc de logements.....	99
3.4.3	Hypothèses socio-économiques .....	99
3.4.4	Hypothèses générales du calcul énergétique à l'échelle urbaine .....	100
<b>3.5</b>	<b>Caractéristiques constructives des bâtiments.....</b>	<b>100</b>
3.5.1	Niveau d'isolation thermique des parois opaques.....	100
3.5.2	Dépense d'énergie par transmissions surfaciques .....	101
3.5.3	Dépense d'énergie par renouvellement d'air.....	103
<b>3.6</b>	<b>Apports internes et solaires .....</b>	<b>104</b>
3.6.1	Apports des occupants.....	105
3.6.2	Apports par renouvellement d'air dans le cas du refroidissement .....	106
3.6.3	Apports de l'éclairage artificiel et des appareils électroménagers .....	107
3.6.4	Apports des parois opaques et vitrées .....	108
<b>3.7</b>	<b>Hypothèses climatiques.....</b>	<b>110</b>
<b>3.8</b>	<b>Hypothèses retenues dans le modèle de prospective .....</b>	<b>112</b>
3.8.1	Population.....	113
3.8.2	Taille des ménages et nombre de logements .....	114
3.8.3	Surfaces habitables .....	116
<b>3.9</b>	<b>Hypothèses et méthodes d'estimation des besoins énergétiques .....</b>	<b>117</b>
3.9.1	Consommations d'énergie pour le chauffage.....	117
3.9.2	Eau chaude sanitaire.....	118
3.9.3	Refroidissement.....	119
3.9.4	Cuisson .....	122
3.9.5	Éclairage et équipements électroménagers.....	123
<b>3.10</b>	<b>Architecture générale du modèle prospectif.....</b>	<b>124</b>
<b>3.11</b>	<b>Hypothèses et méthodes de calcul des émissions de CO<sub>2</sub> dans le bâtiment.....</b>	<b>126</b>
<b>Chapitre 4</b>	<b>État du parc, des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub></b>	<b>129</b>
<b>4.1</b>	<b>Démographie et parc de logements.....</b>	<b>129</b>
4.1.1	Taille et nombre de ménages par logement.....	129
4.1.2	Nombre de personnes par ménage.....	131
<b>4.2</b>	<b>Effectif et dynamique territoriale du parc .....</b>	<b>132</b>
<b>4.3</b>	<b>Typologie des logements existant dans le parc .....</b>	<b>134</b>
4.3.1	Logements en immeuble collectif .....	134
2.11.1	Modèles IAM (approche climatique) .....	69
2.11.2	Structure générale des modèles d'évaluation intégrée IAM .....	73
<b>2.12</b>	<b>Famille des modèles prospectifs .....</b>	<b>74</b>
<b>2.13</b>	<b>Analyse des modèles <i>bottom-up</i> pour la consommation d'énergie dans le secteur</b>	

4.3.2	Maisons individuelles « réglementaires » .....	135
4.3.3	Maisons traditionnelles .....	136
4.3.4	Constructions précaires .....	137
<b>4.4</b>	<b>Caractéristiques techniques et matériaux de construction .....</b>	<b>138</b>
<b>4.5</b>	<b>Mouvements dans le parc .....</b>	<b>139</b>
<b>4.6</b>	<b>Constructions neuves et mouvements dans le parc .....</b>	<b>141</b>
<b>4.7</b>	<b>Surfaces habitables.....</b>	<b>142</b>
<b>4.8</b>	<b>Consommations d'énergie par poste et typologie des logements en 2008 .....</b>	<b>144</b>
4.8.1	Chauffage .....	144
4.8.2	Eau chaude sanitaire.....	146
4.8.3	Refroidissement.....	149
4.8.4	Cuisson .....	152
4.8.5	Appareils électroménagers et éclairage.....	154
<b>4.9</b>	<b>Consommations d'énergie à l'échelle du parc en 2008 .....</b>	<b>155</b>
<b>4.10</b>	<b>Émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle du parc en 2008 .....</b>	<b>159</b>
<b>Chapitre 5</b>	<b>Prospective de la demande énergétique à l'horizon 2050 .....</b>	<b>164</b>
<b>5.1</b>	<b>Démographie et parc de logements à l'horizon 2050 .....</b>	<b>165</b>
5.1.1	Population.....	165
5.1.2	Nombre de ménages .....	166
5.1.3	Taille du ménage et nombre de ménages par logement .....	167
5.1.4	Nombre de logements par typologie et par zone climatique .....	169
5.1.5	Surface du parc à l'horizon 2050 .....	172
<b>5.2</b>	<b>Hypothèses relatives au scénario tendanciel.....</b>	<b>174</b>
<b>5.3</b>	<b>Hypothèses relatives aux scénarios volontaristes .....</b>	<b>175</b>
<b>5.4</b>	<b>Résultat du scénario tendanciel (référence).....</b>	<b>178</b>
5.4.1	Consommation d'énergie .....	178
5.4.2	Synthèse du scénario tendanciel.....	181
5.4.3	Émissions de CO <sub>2</sub> dans le scénario tendanciel.....	184
<b>5.5</b>	<b>Résultats des scénarios portant sur la réduction des consommations d'énergie</b>	<b>186</b>
5.5.1	Scénario RT97.....	186
5.5.2	Scénario BFC .....	188
5.5.3	Scénario BBC.....	189

<b>5.6</b>	<b>Synthèse des scénarios .....</b>	<b>190</b>
<b>5.7</b>	<b>Résultats des scénarios relatifs aux émissions de CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>195</b>
<b>5.8</b>	<b>Discussion des résultats et perspectives.....</b>	<b>199</b>
<b>5.9</b>	<b>Réduction des consommations à l'horizon 2050.....</b>	<b>200</b>
1.1.1	Impact de la réglementation thermique sur la réduction des consommations....	200
1.1.2	Problèmes posés par l'ensemble des scénarios de réhabilitation envisagés.....	202
1.1.3	Intégration des meilleures technologies d'équipements électroménagers .....	203
1.1.4	Rapport des efforts de réduction des consommations et des émissions .....	203
1.1.5	Cas particulier de la filière de production de l'électricité .....	203
<b>Conclusion.....</b>		<b>205</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>211</b>

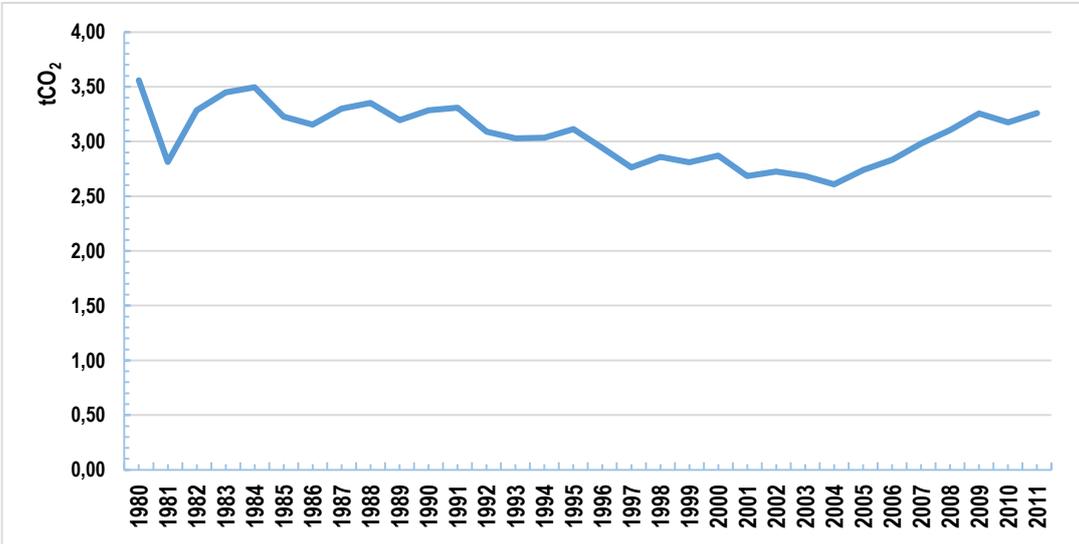
# Annexe 1: Bilan de consommation et des émissions en Algérie

Figure 32: Evolution de la consommation d'électricité entre 1980 et 2012



Source : (AIE 2014).

Figure 33: Émissions de GES dues à l'utilisation d'énergie entre 1980 et 2011



Source : (PNUD, 2010).

## Annexe 2: Caractéristiques des zones climatiques

### **Zone Climatique A**

Localisation : c'est la zone qui comprend le rivage de la mer, elle concerne toutes les villes côtières.

Caractéristiques :

- la température sèche est de 5 °C
- les vitesses des vents extrêmes ont une valeur moyenne de 13,5 m/s.

### **Zone Climatique B**

Localisation : elle regroupe la plaine derrière le rivage de la mer ainsi que les vallées entre les chaînes côtières et l'Atlas tellien et contient la vallée du Cheliff.

Caractéristique :

- la température sèche est égale à 2 °C.
- les vitesses des vents extrêmes ont une valeur moyenne de 12,5 m/s.

### **Zone Climatique C**

Localisation : elle intègre les hauts plateaux compris entre l'atlas tellien et l'atlas saharien.

Caractéristiques :

- la moyenne de la température sèche est de - 2 °C.
- les vitesses des vents extrêmes ont une valeur moyenne de 15 m/s.

### **Zone Climatique D1**

Localisation :

Elle concerne l'est et le sud-est du Sahara, de Touggourt en passant par Djanet.

Caractéristiques :

- la température sèche est en moyenne de 3 °C.
- les vitesses des vents extrêmes ont une valeur moyenne de 10,5 m/s.

### **Zone Climatique D2**

Localisation :

Comprend la partie sud-ouest du Sahara, regroupant Tindouf, Adrar et Bordj Badji Mokhtar.

Caractéristiques :

- la température sèche dans cette zone est égale à 7,5 °C.
- les vitesses des vents extrêmes ont une valeur moyenne de 8 m/s.

## Annexe 3: Architecture du modèle complet de consommation/émission

Figure 99 : Modèle de consommation d'énergie finale pour le secteur résidentiel

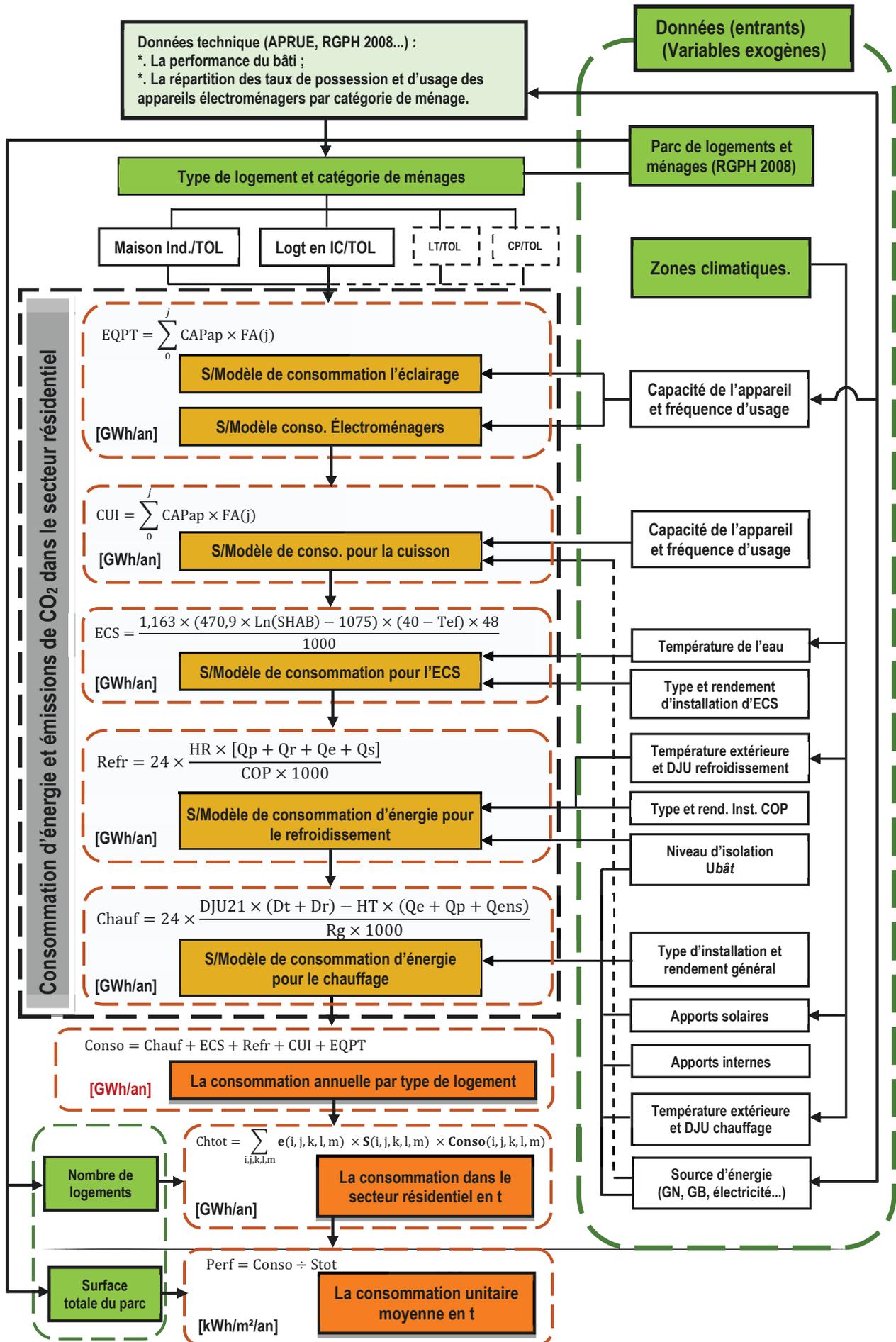


Tableau 8: Coefficient de simultanéité des gains internes

Apport	Nature des apports	Coefficient de Simultanéité CS				
		Locaux				
		Bureaux Réunions Accueil	Logement Hébergement	Vente Restauration	Artisanal Industriel	Enseignement
Occupant	Sensible Latent	0,80	0,50	0,80	0,90	1,00
Moteurs électriques	Sensible	0,60	0,50	0,85	0,85	0
Appareils électriques	Sensible Latent	0,60	0,50	0,85	0,85	0
Eclairage fluorescent non encastré	Sensible	0,70	0,35	0,90	0,85	0,90
Eclairage fluorescent encastré, éclairage incandescent non encastré	Sensible	0,70	0,35	0,90	0,85	0,90
Eclairage encastré dans un faux plafond avec plénum de reprise	Sensible	0,70	0,35	0,90	0,85	0,90
Appareil à gaz	Sensible Latent	0	0,50	0,85	0,85	0
Réservoir	Sensible Latent	0	1,00	1,00	1,00	0
Evaporation libre	Latent	0	1,00	1,00	1,00	0
Vapeur vive	Sensible Latent	0	0	1,00	1,00	0
Tuyauteries, conduits d'air	Sensible	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Source : (DTR-32, 1997).

Tableau 9: Gains calorifiques dus aux appareils électroménagers

Appareils	Gains à admettre (en W)		
	Sens.	Lat.	Total
<b>Appareils Ménagers</b>			
Four électrique	3000	610	3610
Four micro-onde	1400	-	1400
Cuisinière électrique	3000	1500	4500
Plaque chauffante ( $W_n = 500$ W)	500	280	780
Plaque chauffante ( $W_n = 1000$ W)	1000	560	1560
Télévision	150	-	150
Réfrigérateur (100 l)	100	-	100
Réfrigérateur (200 l)	175	-	175
Machine à laver (3 kg)	3000	1500	4500
Machine à laver (5 kg)	6000	3000	9000
Télévision	150	-	150

Source : (DTR-32, 1997).

Les moteurs électriques et les machines entraînées par ces moteurs constituent des sources de gains sensibles.

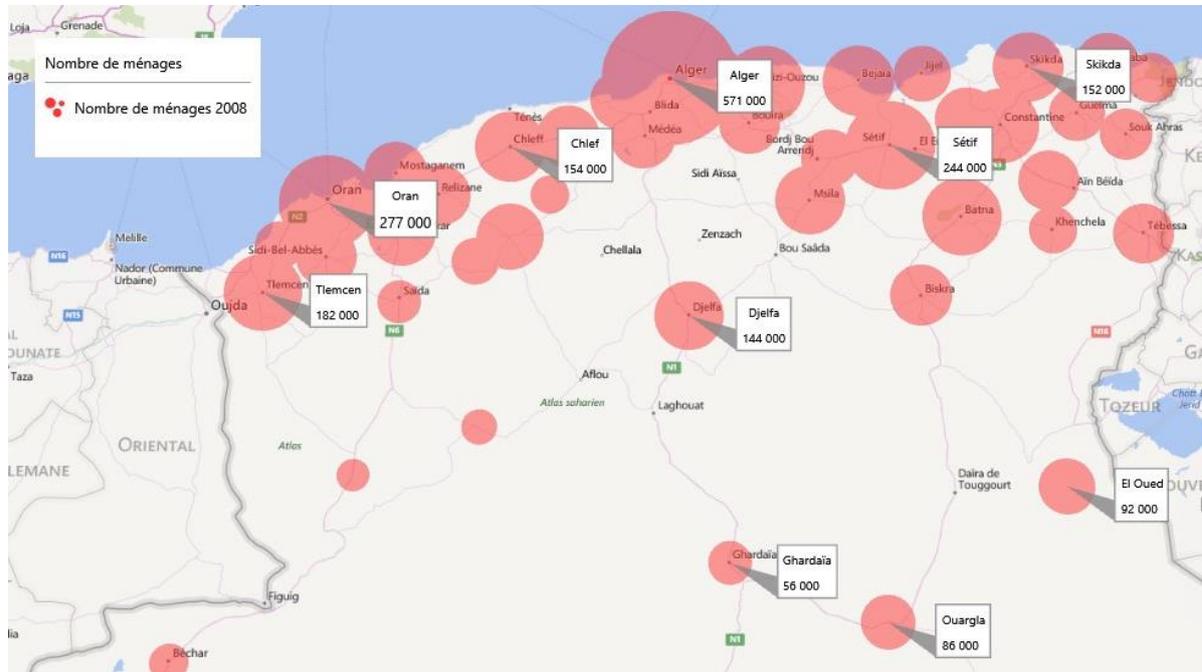
Un moteur électrique est caractérisé par :

- une puissance absorbée  $W_a$  exprimée en W ou en kW ; la puissance absorbée peut être déterminée en fonction de la nature du courant ;
- une puissance effective (ou nominale)  $W_{eff}$  exprimée en W ou en kW ; cette puissance correspond à la puissance fournie à la machine entraînée ;
- un rendement  $\eta$  qui est le rapport de la puissance fournie à la machine  $W_{eff}$  à la puissance absorbée  $W_a$  par le moteur ;
- sa position par rapport au local climatisé.

$$\eta = \frac{W_{eff}}{W_a}$$

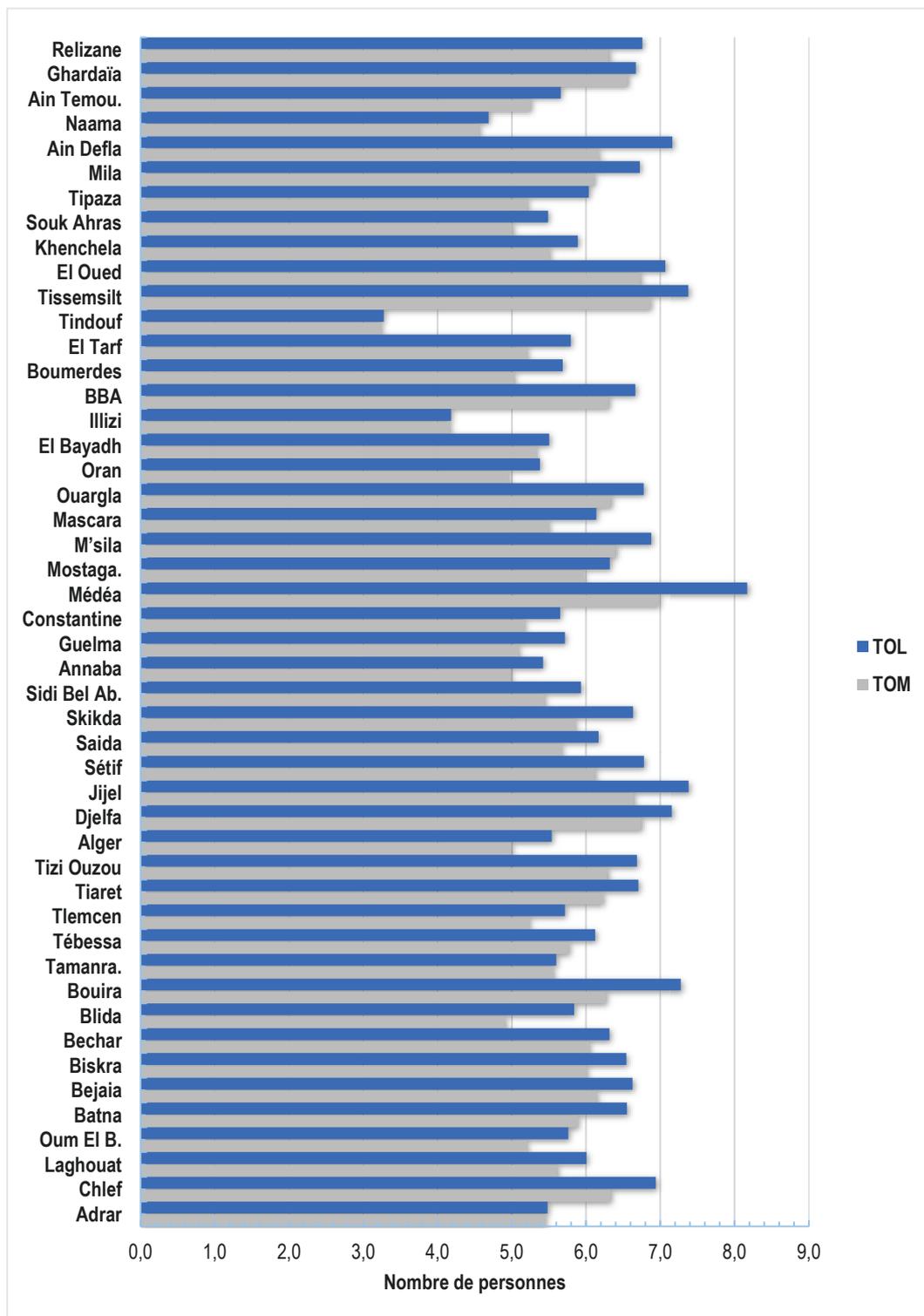
## Annexe 4: Etat du parc et des consommations en 2008

Figure 35 : Répartition du nombre de ménages par zone géographique en 2008



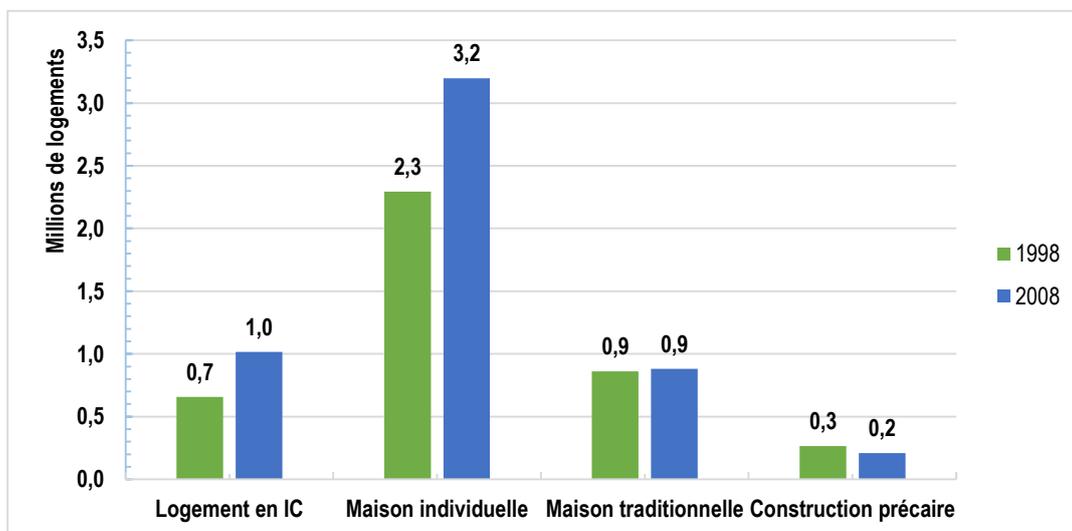
Source : (RGPH, 2008).

Figure 36 : Taux d'occupation par ménage (TOM) et par logement (TOL) en 2008



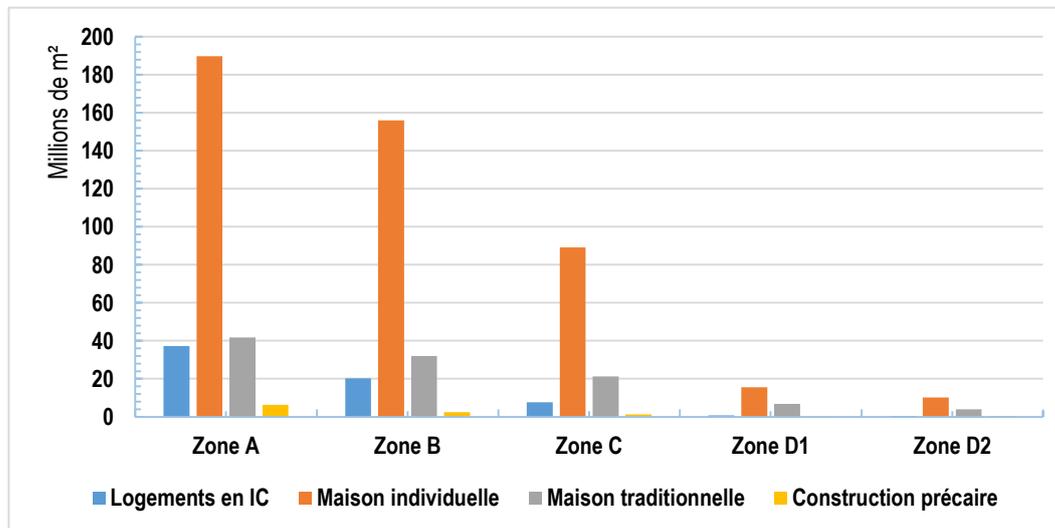
Source : (RGPH, 2008).

Figure 37 : Mouvement du parc de logements entre 1998 et 2008



Source : (RGPH, 2008).

Figure 38 : Surface habitable par zone climatique et par type de logements en 2008



Source : (RGPH, 2008).

Tableau 10: Taux de possession en appareils électroménagers des ménages en 2008

Wilaya	Téléviseur	Réfrigérateur	Cuisinière	Lave-linge	Ordinateur
Adrar	85 %	80 %	47 %	12 %	8 %
Chlef	92 %	88 %	40 %	22 %	9 %
Laghouat	86 %	78 %	61 %	24 %	13 %
Oum El Bouaghi	95 %	88 %	48 %	21 %	10 %
Batna	93 %	89 %	50 %	23 %	13 %
Bejaia	95 %	93 %	68 %	23 %	16 %
Biskra	91 %	87 %	51 %	31 %	12 %
Bechar	98 %	95 %	68 %	34 %	16 %
Blida	95 %	90 %	65 %	35 %	15 %
Bouira	93 %	88 %	55 %	17 %	11 %
Tamanrasset	85 %	71 %	57 %	23 %	9 %
Tébessa	89 %	78 %	51 %	20 %	10 %
Tlemcen	97 %	93 %	57 %	31 %	9 %
Tiaret	92 %	80 %	57 %	11 %	8 %
Tizi Ouzou	93 %	92 %	68 %	21 %	16 %
Alger	95 %	92 %	80 %	47 %	23 %
Djelfa	81 %	67 %	43 %	14 %	9 %
Jijel	91 %	87 %	54 %	14 %	10 %
Sétif	95 %	89 %	53 %	20 %	12 %
Saida	94 %	87 %	76 %	12 %	9 %
Skikda	93 %	88 %	54 %	21 %	13 %
Sidi Bel Abbess	97 %	92 %	71 %	20 %	10 %
Annaba	97 %	94 %	74 %	33 %	16 %
Guelma	94 %	92 %	48 %	18 %	10 %
Constantine	97 %	95 %	68 %	34 %	20 %
Médéa	92 %	83 %	44 %	15 %	8 %
Mostaga.	93 %	83 %	53 %	15 %	7 %
M'sila	90 %	81 %	44 %	17 %	9 %
Mascara	95 %	90 %	65 %	13 %	5 %
Ouargla	93 %	92 %	66 %	41 %	17 %
Oran	98 %	92 %	80 %	35 %	14 %
El Bayadh	89 %	83 %	59 %	16 %	9 %
Illizi	83 %	77 %	52 %	32 %	13 %
Bordj Bou Arreridj	96 %	92 %	55 %	21 %	11 %
Boumerdes	93 %	89 %	61 %	25 %	11 %
El Tarf	94 %	91 %	51 %	15 %	8 %
Tindouf	89 %	85 %	56 %	38 %	10 %
Tissemsilt	92 %	85 %	40 %	11 %	6 %
El Oued	91 %	92 %	60 %	43 %	14 %
Khenchela	92 %	87 %	44 %	20 %	10 %
Souk Ahras	94 %	89 %	48 %	13 %	7 %
Tipaza	94 %	88 %	57 %	26 %	12 %
Mila	95 %	90 %	45 %	18 %	10 %
Ain Defla	91 %	85 %	39 %	16 %	8 %
Naama	88 %	85 %	73 %	23 %	9 %
Ain Temouchenet	98 %	93 %	60 %	23 %	7 %
Ghardaia	90 %	92 %	68 %	29 %	13 %
Relizane	95 %	88 %	52 %	12 %	6 %
<b>Moyenne nationale</b>	<b>92 %</b>	<b>88 %</b>	<b>59 %</b>	<b>25 %</b>	<b>12 %</b>

Source : (APRUE, 2010).

Figure 39 : Ventilation des consommations d'énergie par département en 2008

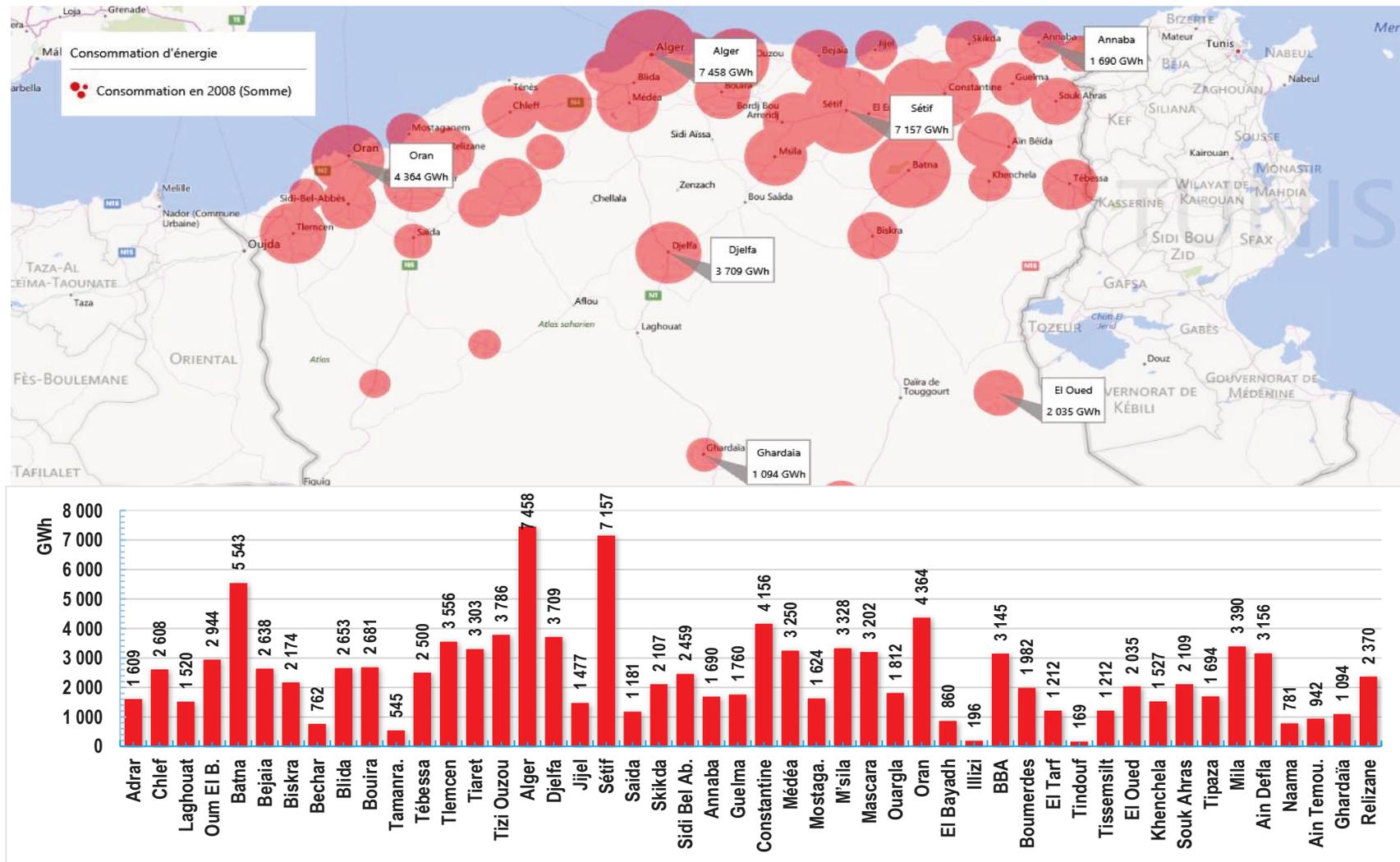


Figure 40: Ventilation des consommations par poste et par département en 2008

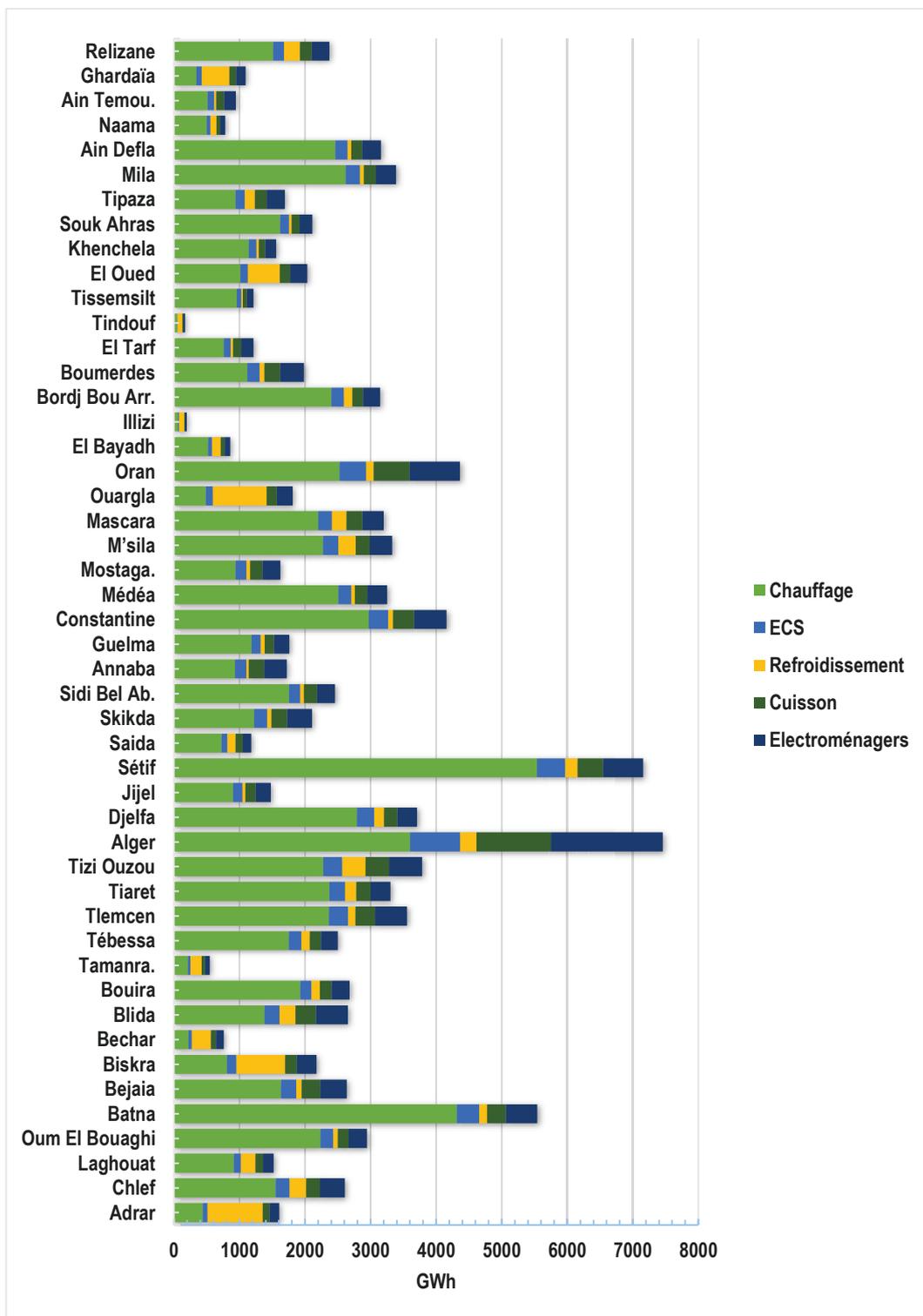


Figure 41: Consommations par source d'énergie et par département en 2008

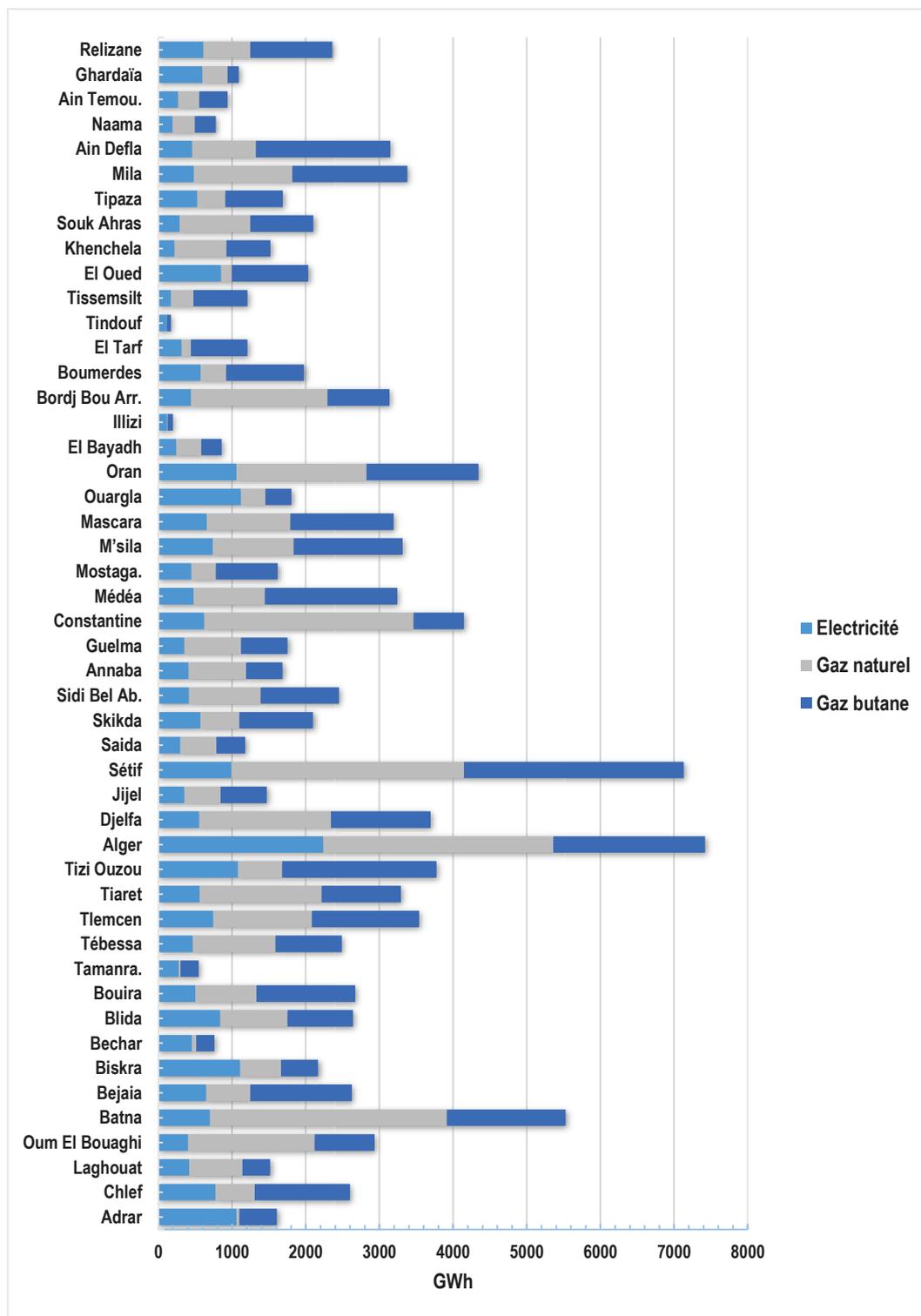


Figure 42: Ventilation des consommations unitaires moyennes par département en 2008

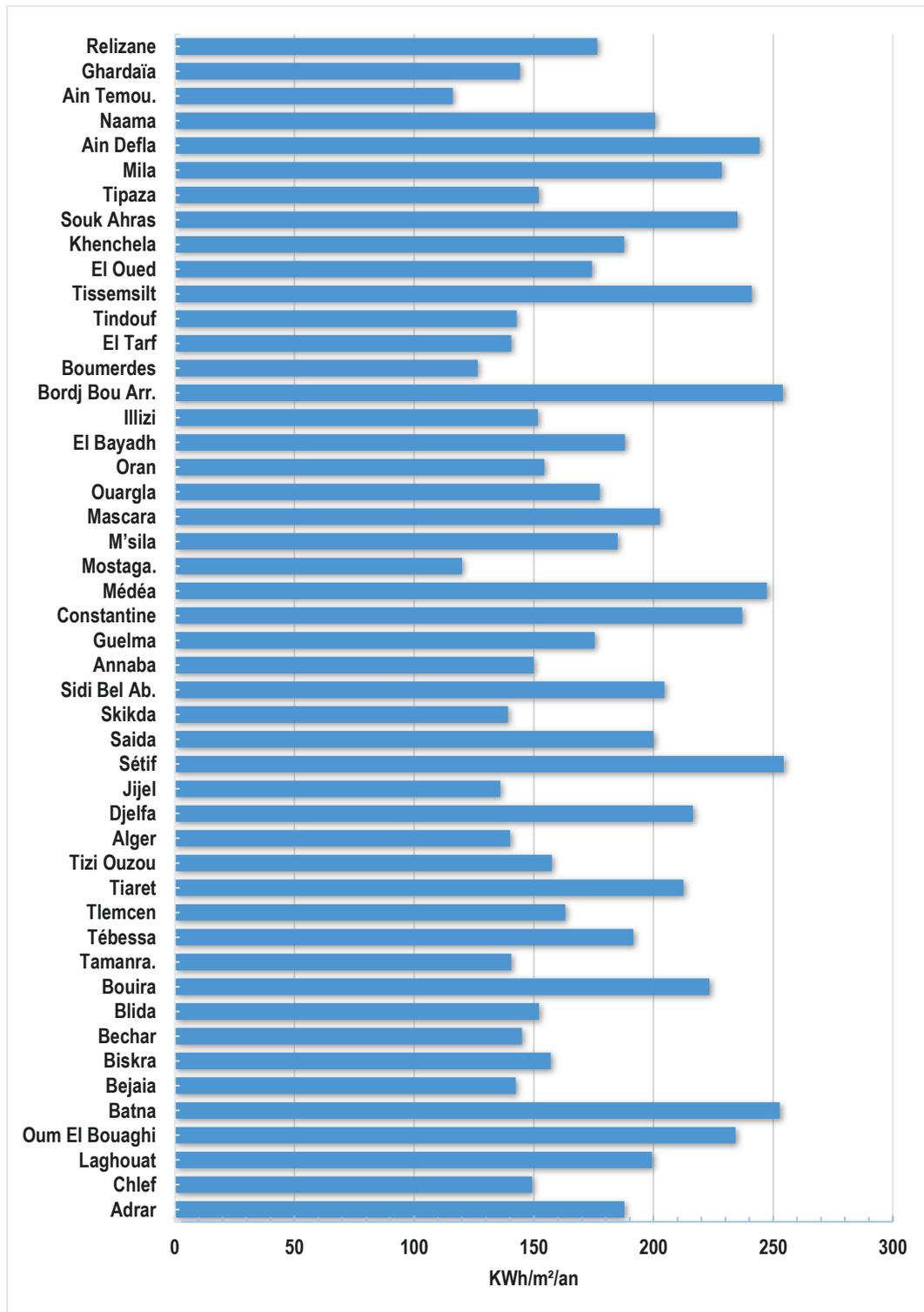
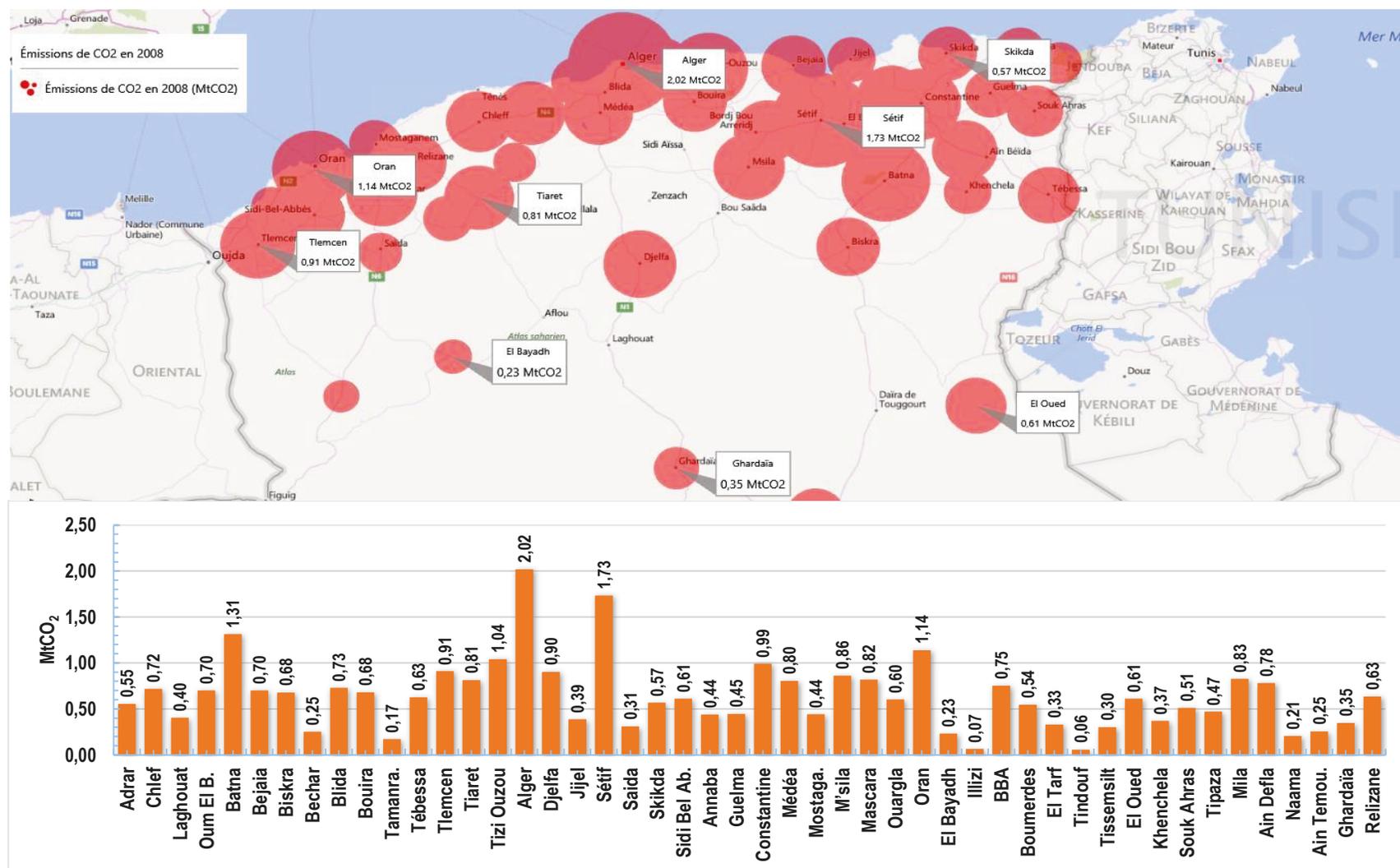
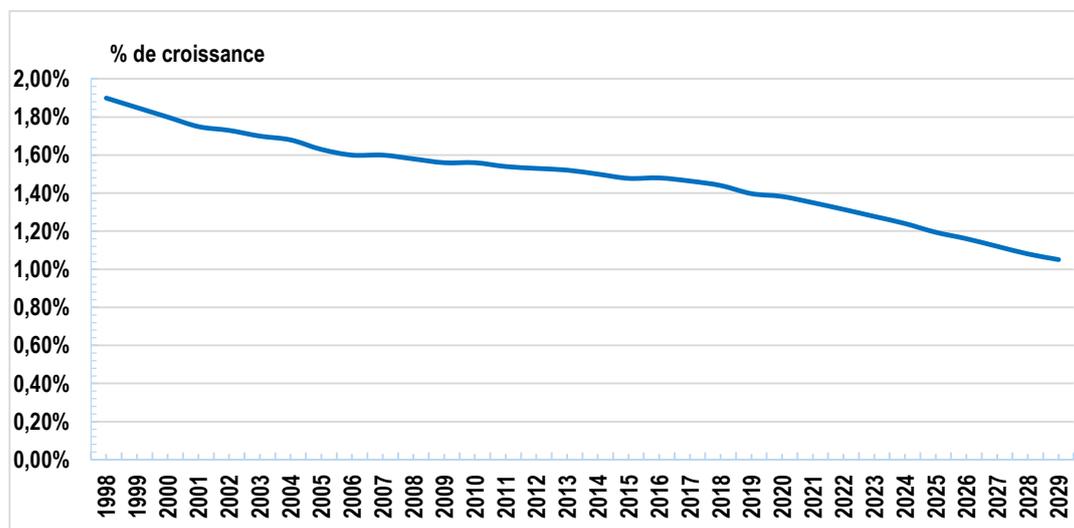


Figure 43 : Ventilation des émissions de CO<sub>2</sub> par département en 2008



## Annexe 5 : Projection et scénarisation des consommations

Figure 44 : décélération de l'accroissement annuelle de la population à l'horizon 2030



Source : (ONS, 2012).

Tableau 11 : Évolution de la surface du parc entre 2008 et 2050 (en milliers de m<sup>2</sup>)

Zone climatique	2008				2050			
	IC	MI	MT	CP	IC	MI	MT	CP
Zone A	37 295	189 755	41 726	6 314	203 524	507 861	115 881	16 805
Zone B	20 284	156 020	32 041	2 376	95 521	405 365	81 695	5 982
Zone C	7 675	89 073	21 272	1343	46 369	322691	78 732	5261
Zone D1	697	15 460	6 727	76	4 275	59582	26 139	504
Zone D2	478	10 241	3 907	378	6 889	69737	11573	2243
Total	66 430	460 548	10 5673	10 487	356 578	1 365237	314 020	30795

Source (RGPH, 2008).

Figure 45 : Ventilation des scénarios de consommation d'énergie par département à l'horizon 2050

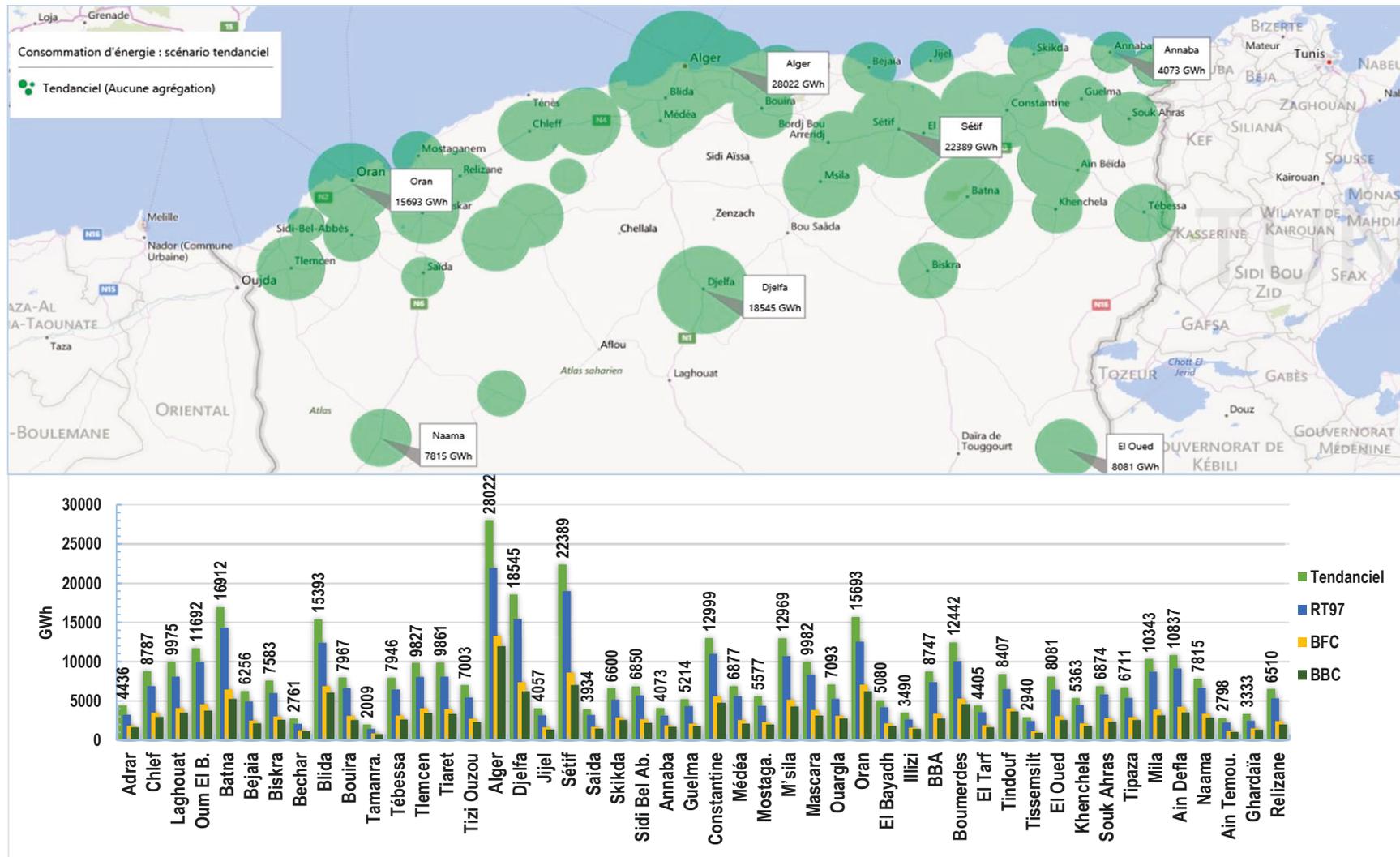


Tableau 12: Consommations d'énergie (GWh) par poste et par département (tendanciel)

ZC	N° Wilaya	Wilaya	Chauffage	ECS	Refroidissement	Cuisson	Equipements	Total tendanciel
Zone A	2	Chlef	4 662	642	700	983	1 800	8 787
	6	Bejaia	3 413	507	168	740	1 429	6 256
	9	Blida	7 234	1 256	1 171	1 955	3 777	15 393
	13	Tlemcen	5 966	753	273	1 002	1 834	9 827
	15	Tizi Ouzou	3 753	491	585	741	1 432	7 003
	16	Alger	11 400	2 738	756	4 477	8 650	28 022
	18	Jijel	2 135	352	99	515	956	4 057
	21	Skikda	3 251	569	154	895	1 730	6 600
	23	Annaba	1 746	406	78	655	1 266	4 073
	27	Mostaganem	2 739	501	143	790	1 404	5 577
	31	Oran	7 786	1 383	343	2 108	4 073	15 693
	35	Boumerdes	6 292	1 052	356	1 645	3 097	12 442
	36	El Tarf	2 445	348	100	539	973	4 405
	42	Tipaza	3 355	508	521	800	1 527	6 711
46	Ain Temouchenet	1 311	270	77	410	729	2 798	
Total zone A			67 487	11 778	5 446	18 255	34 678	137 644
Zone B	4	Oum El Bouaghi	8 154	738	230	899	1 670	11 692
	5	Batna	12 201	994	320	1 159	2 238	16 912
	10	Bouira	5 278	477	330	653	1 229	7 967
	19	Sétif	16 043	1 285	523	1 560	2 979	22 389
	22	Sidi Bel Abbes	4 431	464	124	641	1 190	6 850
	24	Guelma	3 115	381	155	547	1 015	5 214
	25	Constantine	8 230	939	204	1 236	2 389	12 999
	26	Médéa	4 844	404	105	543	980	6 877
	29	Mascara	6 416	618	619	854	1 474	9 982
	34	Bordj Bou Arr.	6 176	504	324	605	1 139	8 747
	38	Tissemsilt	2 125	169	45	226	375	2 940
	41	Souk Ahras	4 836	425	101	544	968	6 874
	43	Mila	7 362	615	166	770	1 430	10 343
	44	Ain Defla	7 846	607	155	795	1 434	10 837
48	Relizane	3 780	420	582	637	1 090	6 510	
Total zone B			100 835	9 041	3 985	11 669	21 601	147 131
Zone C	3	Laghouat	5 512	624	1 259	880	1 699	9 975
	7	Biskra	2 582	462	2 270	780	1 489	7 583
	12	Tébessa	4 988	555	358	716	1 329	7 946
	14	Tiaret	6 482	669	447	833	1 429	9 861
	17	Djelfa	12 601	1 202	612	1 459	2 671	18 545
	20	Saida	2 184	287	367	393	703	3 934
	28	M'sila	8 006	846	882	1 143	2 092	12 969
	32	El Bayadh	2 813	319	669	452	827	5 080
	39	El Oued	3 761	418	1 737	738	1 426	8 081
	40	Khenchela	3 583	392	298	486	902	5 363
45	Naama	4 674	485	807	653	1 195	7 815	
Total zone C			57 188	6 259	9 410	8 532	15 763	97 151
Zone D1	11	Tamanra.	701	122	538	229	419	2 009
	30	Ouargla	1 767	392	2 909	691	1 334	7 093
	33	Illizi	1 007	194	1 237	359	694	3 490
	47	Ghardaïa	943	227	1 145	347	671	3 333
Total zone D1			4 417	935	5 829	1 625	3 117	15 924
Zone D2	1	Adrar	1 103	179	2 075	391	689	4 436
	8	Bechar	722	179	920	321	620	2 761
	37	Tindouf	2 033	480	3 125	969	1 799	8 407
Total zone D2			3 858	838	6 121	1 680	3 107	15 604
Consommation totale du parc			233 785	28 851	30 790	41 761	78 266	413 454

Tableau 13: Consommations d'énergie (GWh) par poste et par département (Sc. RT97)

ZC	N° Wilaya	Wilaya	Chauffage	ECS	Refroidissement	Cuisson	Equipements	Total RT97
Zone A	2	Chlef	4 470	642	511	682	571	6 875
	6	Bejaia	3 350	507	117	540	421	4 934
	9	Blida	7 461	1 256	871	1 534	1 282	12 404
	13	Tlemcen	5 810	753	195	718	581	8 056
	15	Tizi Ouzou	3 578	491	442	521	389	5 421
	16	Alger	12 251	2 738	525	3 540	2 879	21 934
	18	Jijel	2 092	352	67	362	286	3 159
	21	Skikda	3 309	569	103	645	532	5 158
	23	Annaba	1 845	406	63	496	391	3 138
	27	Mostaganem	2 746	501	94	571	445	4 359
	31	Oran	7 941	1 383	230	1 661	1 328	12 543
	35	Boumerdes	6 442	1 052	241	1 282	1 051	10 070
	36	El Tarf	2 444	348	66	392	313	3 563
	42	Tipaza	3 352	508	385	599	494	5 339
46	Ain Temouchenet	1 363	270	51	299	233	2 216	
Total zone A			68 455	11 778	3 898	13 841	11 197	109 169
Zone B	4	Oum El Bouaghi	7 816	738	164	663	547	9 928
	5	Batna	11 571	994	231	827	694	14 318
	10	Bouira	5 056	477	236	472	380	6 622
	19	Sétif	15 244	1 285	390	1 130	931	18 979
	22	Sidi Bel Abbes	4 274	464	85	484	371	5 678
	24	Guelma	3 109	381	114	385	316	4 306
	25	Constantine	8 182	939	140	943	774	10 978
	26	Médéa	4 469	404	73	352	284	5 582
	29	Mascara	6 155	618	459	639	473	8 344
	34	Bordj Bou Arr.	5 847	504	233	432	352	7 369
	38	Tissemsilt	1 979	169	31	148	113	2 441
	41	Souk Ahras	4 629	425	68	390	309	5 821
	43	Mila	7 002	615	114	539	447	8 717
	44	Ain Defla	7 395	607	105	558	458	9 123
48	Relizane	3 659	420	443	448	338	5 307	
Total zone B			96 387	9 041	2 885	8 411	6 789	123 512
Zone C	3	Laghouat	5 247	624	951	689	571	8 082
	7	Biskra	2 667	462	1 802	565	474	5 971
	12	Tébessa	4 707	555	255	513	413	6 443
	14	Tiaret	6 051	669	323	605	443	8 091
	17	Djelfa	11 812	1 202	418	1 086	876	15 394
	20	Saida	2 107	287	276	306	223	3 199
	28	M'sila	7 684	846	666	825	673	10 695
	32	El Bayadh	2 724	319	512	350	279	4 184
	39	El Oued	3 618	418	1 345	556	468	6 404
	40	Khenchela	3 426	392	242	347	287	4 452
45	Naama	4 588	485	613	527	421	6 634	
Total zone C			54 631	6 259	7 160	6 369	5 130	79 549
Zone D1	11	Tamanra.	614	122	389	169	132	1 426
	30	Ouargla	1 634	392	2 272	528	439	5 265
	33	Illizi	952	194	946	289	245	2 627
	47	Ghardaïa	878	227	900	259	207	2 472
Total zone C			4 078	935	4 508	1 246	1 023	11 790
Zone D2	1	Adrar	989	179	1 596	267	205	3 235
	8	Bechar	702	179	736	245	201	2 062
	37	Tindouf	2 051	480	2 511	794	657	6 494
Total zone C			3 742	838	4 843	1 306	1 063	11 791
Consommation totale du parc			227 292	28 851	23 294	31 173	25 202	335 812

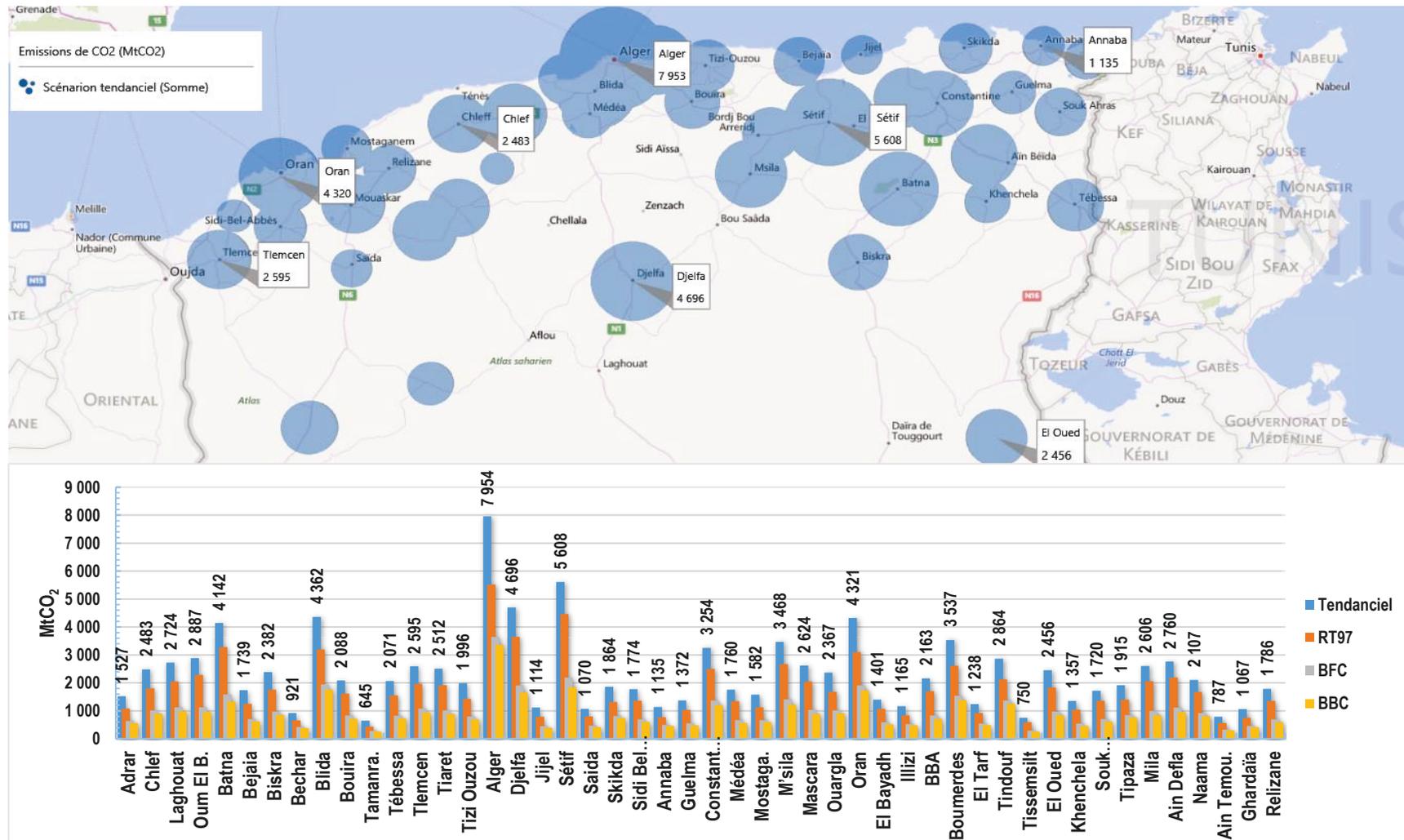
Tableau 14: Consommations d'énergie (GWh) par poste et par département (BFC)

ZC	N° Wilaya	Wilaya	Chauffage	ECS	Refroidissement	Cuisson	Equipements	Total BFC
Zone A	2	Chlef	1 216	642	365	682	571	3 474
	6	Bejaia	920	507	107	540	421	2 495
	9	Blida	2 176	1 256	631	1 534	1 282	6 879
	13	Tlemcen	1 835	753	163	718	581	4 050
	15	Tizi Ouzou	994	491	313	521	389	2 708
	16	Alger	3 663	2 738	477	3 540	2 879	13 297
	18	Jijel	544	352	67	362	286	1 611
	21	Skikda	1 052	569	103	645	532	2 902
	23	Annaba	591	406	47	496	391	1 883
	27	Mostaganem	680	501	94	571	445	2 292
	31	Oran	2 452	1 383	224	1 661	1 328	7 049
	35	Boumerdes	1 697	1 052	216	1 282	1 051	5 299
	36	El Tarf	765	348	66	392	313	1 885
	42	Tipaza	1 042	508	281	599	494	2 924
46	Ain Temouchenet	322	270	51	299	233	1 176	
Total zone A			19 948	11 778	3 158	13 841	11 197	59 922
Zone B	4	Oum El Bouaghi	2 468	738	137	663	547	4 553
	5	Batna	3 752	994	194	827	694	6 461
	10	Bouira	1 567	477	201	472	380	3 098
	19	Sétif	4 973	1 285	293	1 130	931	8 613
	22	Sidi Bel Abbes	1 258	464	81	484	371	2 659
	24	Guelma	925	381	90	385	316	2 097
	25	Constantine	2 798	939	137	943	774	5 591
	26	Médéa	1 445	404	73	352	284	2 558
	29	Mascara	1 763	618	332	639	473	3 825
	34	Bordj Bou Arr.	1 874	504	199	432	352	3 362
	38	Tissemsilt	667	169	31	148	113	1 128
	41	Souk Ahras	1 607	425	68	390	309	2 799
	43	Mila	2 176	615	111	539	447	3 888
	44	Ain Defla	2 538	607	105	558	458	4 265
48	Relizane	933	420	293	448	338	2 431	
Total zone B			30 744	9 041	2 345	8 411	6 789	57 329
Zone C	3	Laghouat	1 589	624	607	689	571	4 081
	7	Biskra	480	462	1 057	565	474	3 039
	12	Tébessa	1 429	555	223	513	413	3 134
	14	Tiaret	1 951	669	272	605	443	3 940
	17	Djelfa	3 820	1 202	409	1 086	876	7 393
	20	Saida	679	287	205	306	223	1 699
	28	M'sila	2 315	846	483	825	673	5 143
	32	El Bayadh	834	319	332	350	279	2 114
	39	El Oued	843	418	772	556	468	3 057
	40	Khenchela	1 105	392	180	347	287	2 131
45	Naama	1 495	485	424	527	421	3 352	
Total zone C			16 541	6 259	4 783	6 369	5 130	39 083
Zone D1	11	Tamanra.	183	122	246	169	132	853
	30	Ouargla	492	392	1 245	528	439	3 095
	33	Illizi	309	194	550	289	245	1 587
	47	Ghardaïa	267	227	517	259	207	1 478
Total zone C			1 251	935	2 558	1 246	1 023	7 013
Zone D2	1	Adrar	326	179	865	267	205	1 840
	8	Bechar	218	179	423	245	201	1 265
	37	Tindouf	679	480	1 429	794	657	4 039
Total zone C			1 222	838	2 716	1 306	1 063	7 144
Consommation totale du parc			69 706	28 851	15 560	31 173	25 202	170 492

Tableau 15: Consommations d'énergie (GWh) par poste et par département (BBC)

ZC	N° Wilaya	Wilaya	Chauffage	ECS	Refroidissement	Cuisson	Equipements	Total BBC
Zone A	2	Chlef	727	642	340	682	571	2 962
	6	Bejaia	542	507	106	540	421	2 115
	9	Blida	1 383	1 256	591	1 534	1 282	6 046
	13	Tlemcen	1 221	753	157	718	581	3 431
	15	Tizi Ouzou	586	491	291	521	389	2 279
	16	Alger	2 341	2 738	469	3 540	2 879	11 967
	18	Jijel	307	352	67	362	286	1 373
	21	Skikda	703	569	103	645	532	2 553
	23	Annaba	392	406	44	496	391	1 684
	27	Mostaganem	367	501	94	571	445	1 979
	31	Oran	1 611	1 383	224	1 661	1 328	6 207
	35	Boumerdes	992	1 052	212	1 282	1 051	4 590
	36	El Tarf	509	348	66	392	313	1 629
	42	Tipaza	693	508	263	599	494	2 557
46	Ain Temouchenet	162	270	51	299	233	1 015	
Total zone A			12 536	11 778	3 034	13 841	11 197	52 387
Zone B	4	Oum El Bouaghi	1 662	738	132	663	547	3 742
	5	Batna	2 556	994	188	827	694	5 259
	10	Bouira	1 034	477	196	472	380	2 559
	19	Sétif	3 404	1 285	277	1 130	931	7 028
	22	Sidi Bel Abbès	796	464	81	484	371	2 196
	24	Guelma	589	381	86	385	316	1 757
	25	Constantine	1 965	939	137	943	774	4 758
	26	Médéa	975	404	73	352	284	2 088
	29	Mascara	1 097	618	310	639	473	3 138
	34	Bordj Bou Arr.	1 264	504	193	432	352	2 746
	38	Tissemsilt	464	169	31	148	113	925
	41	Souk Ahras	1 146	425	68	390	309	2 338
	43	Mila	1 439	615	111	539	447	3 151
	44	Ain Defla	1 804	607	105	558	458	3 531
48	Relizane	517	420	268	448	338	1 991	
Total zone B			20 712	9 041	2 255	8 411	6 789	47 207
Zone C	3	Laghouat	1 055	624	550	689	571	3 489
	7	Biskra	148	462	932	565	474	2 582
	12	Tébessa	931	555	218	513	413	2 631
	14	Tiaret	1 327	669	263	605	443	3 308
	17	Djelfa	2 633	1 202	407	1 086	876	6 203
	20	Saida	461	287	193	306	223	1 470
	28	M'sila	1 502	846	452	825	673	4 299
	32	El Bayadh	553	319	302	350	279	1 804
	39	El Oued	430	418	677	556	468	2 549
	40	Khenchela	752	392	168	347	287	1 777
45	Naama	1 036	485	392	527	421	2 862	
Total zone C			10 829	6 259	4 386	6 369	5 130	32 974
Zone D1	11	Tamanra.	120	122	222	169	132	766
	30	Ouargla	322	392	1 074	528	439	2 754
	33	Illizi	216	194	484	289	245	1 428
	47	Ghardaïa	174	227	453	259	207	1 321
Total zone C			832	935	2 233	1 246	1 023	6 270
Zone D2	1	Adrar	226	179	741	267	205	1 617
	8	Bechar	144	179	370	245	201	1 139
	37	Tindouf	477	480	1 247	794	657	3 655
Total zone C			847	838	2 358	1 306	1 063	6 411
Consommation totale du parc			45 757	28 851	14 266	31 173	25 202	145 248

Figure 46 : Ventilation des scénarios des émissions de CO<sub>2</sub> par département à l'horizon 2050



**Modélisation des consommations  
d'énergie et des émissions appliquée au  
secteur résidentiel algérien**

## Résumé

Le secteur résidentiel en Algérie consomme 25 % de l'énergie finale et émet en moyenne 21 % des gaz à effet de serre. Or, il existe un important gisement d'économie d'énergie dans ce secteur. Ce constat conduit à rechercher comment rendre le secteur du logement plus efficient en matière de consommation d'énergie et d'émission de CO<sub>2</sub>.

Dans cette thèse, nous montrerons comment la pénétration des nouvelles technologies dans le parc de logements, au moyen du modèle *bottom-up*, permet, à l'horizon 2050, une approche prospective pertinente pour réduire la consommation énergétique et atténuer les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel.

L'exercice de prospective réalisé à partir de ce modèle permet d'évaluer l'impact des politiques actuelles en termes de réduction de la consommation d'énergie. Il permet également de visualiser différents scénarios pour améliorer l'efficacité énergétique du secteur résidentiel.

**Mots clés :** Modélisation prospective *bottom-up* ; efficacité énergétique ; secteur résidentiel ; consommations d'énergie ; émissions de CO<sub>2</sub>.

## Résumé en anglais

The residential sector in Algeria consumes 25% of the final energy and emits about 21% of greenhouse gas emissions. However, there is a significant potential of energy saving in this sector. This leads to looking for ways to make the sector of housing more efficient in terms of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions.

In this PhD work, we show how the penetration of new technologies in the housing stock, using the bottom-up model, allows a relevant and forward-looking approach to reducing energy consumption and diminishing CO<sub>2</sub> emissions in the residential sector between now and 2050.

The prospective exercise created from this model allows us to assess the impact current policies in terms of reducing energy consumption. It also allows us to visualize different scenarios for improving energy efficiency in the residential sector.

**Keywords:** Prospective modeling bottom-up, energy efficiency, residential, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions.