

Les gisements d'économie d'énergie et des émissions de CO₂ à l'horizon 2050 dans le secteur résidentiel algérien

Athmane Ouahab ¹

Laboratoire CITERES UMR 7324
35 Allée Ferdinand de Lesseps, 37200 Tours, France

(reçu le 15 Novembre 2015 – accepté le 27 Décembre 2015)

Résumé - *Le secteur résidentiel algérien consomme 25-28 % 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 efficace en matière de consommation d'énergie et d'émission de CO₂. Dans cet article, 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 CO₂ dans le secteur résidentiel. Pour cela, nous estimerons, à travers un scénario tendanciel, la consommation d'énergie du secteur résidentiel en Algérie jusqu'en 2050. Ensuite, nous élaborerons différents scénarios de réduction de la consommation en intégrant les meilleures technologies disponibles dans le parc des logements et dans le stock existant.*

Abstract - *The residential sector in Algeria consumes 25-28 % 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 CO₂ emissions. In this article, 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 CO₂ emissions in the residential sector between now and 2050. For this, we estimate, through a baseline scenario, energy consumption in the residential sector in Algeria until 2050. Then we develop different consumption reduction scenarios by integrating the best technologies available in the housing stock and in the existing stock.*

Mots-clés: Modélisation prospective - Efficacité énergétique - secteur résidentiel algérien
- Consommations d'énergie - Emissions de CO₂.

1. INTRODUCTION

Le secteur résidentiel dans le monde consomme environ 16 à 50 % de l'énergie totale comme on peut le voir sur la figure 1. Le secteur résidentiel en Algérie consomme 25 % de l'énergie finale et émet en moyenne 21 % des gaz à effet de serre (MEM, 2011) et (APRUE, 2007). Il est à ce titre considéré comme la deuxième source d'émissions de CO₂ après les transports. Les bâtiments du secteur résidentiel disposent néanmoins d'un important potentiel d'économies d'énergie. Incité par cette situation, le gouvernement algérien met en place des leviers technologiques en faveur de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel (Benoudjafer *et al.* 2012). Cependant, ces efforts risquent d'être inefficaces sans une vision prospective de l'évolution des consommations d'énergie (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire et appareils électroménagers), à savoir, l'élaboration d'un modèle de prospective énergétique. Il est alors légitime de s'interroger sur l'inefficacité rapportée ci-dessus relativement à l'efficacité des outils actuels dans la réduction des consommations et l'atténuation des émissions de CO₂.

¹ athmane.ouahab@univ-tours.fr

- 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 ?
- 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 CO₂ à l'horizon 2050 ?

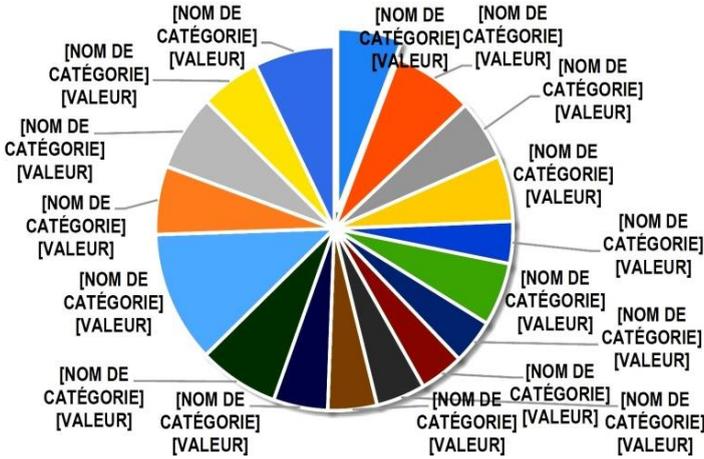


Fig. 1: La consommation mondiale d'énergie dans le secteur résidentiel en 2007
{Saidur *et al.* (2007) ; APRUE (2007) }

Etat de l'art

L'élaboration d'un modèle est donc nécessaire pour évaluer l'impact technico-économique d'une politique énergétique (Morice *et al.*, 2004). Or un examen de la littérature montre qu'il existe différentes techniques de modélisation utilisées dans la quantification des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ dans le secteur résidentiel.

Les études récentes de Swan *et al.*, (2009) identifient deux approches fondamentales de modélisation: les approches *top-down* et *bottom-up*. Chaque technique repose sur un type d'entrée d'information; la distinction entre les deux approches s'opère en fonction de l'utilisation des données et selon le niveau hiérarchique du secteur dans son ensemble (Kavgic *et al.*, 2010).

L'approche de modélisation *top-down* est utilisée pour déterminer les besoins d'énergie à moyen et long termes du secteur résidentiel, au regard des changements et des transitions qui peuvent l'accompagner. Swan *et al.* 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.

A l'inverse, 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 al.* 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 et, d'autre part, d'identifier les options les plus efficaces en matière de technologies disponibles pour réduire la consommation d'énergie. 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 al.*, (1997) montrent que la structure du modèle est établie à un niveau désagrégé et exige le recours à des bases de données statistiques et empiriques détaillées pour appuyer la description de chaque composant ou de chaque variable du système.

De nombreux auteurs, dans différents pays, développent et appliquent des modèles de prospective *bottom-up*. Boardman *et al.*, (1996) développent ainsi le modèle domestique de carbone (UKDCM²) pour le parc de logements au Royaume-Uni. Le but de ce modèle est de simuler la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ du stock de logements en 2050, à partir de l'année de référence 1996. 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: type de logement, classe d'âge, région, 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 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 Bredem³) *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. A l'appui de ce modèle, Boardman *et al.*, élaborent trois 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 CO₂ à horizon 2050;
- un scénario d'atténuation des émissions de CO₂ de l'ordre de 44 % au-dessous du niveau de 1990;
- un scénario d'atténuation des émissions de CO₂ de l'ordre de 25 % par rapport au niveau des émissions de 1990.

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

² United Kingdom Domestic Carbon Model (UKDCM)

³ Bredem- BRE Domestic Energy Model

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.

Shorrock *et al.*, (1997) développent le modèle 'Brehomes' pour l'évaluation de la consommation d'énergie et des émissions dans le secteur résidentiel au Royaume-Uni. 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'âge de la 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 sur 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 CO₂ dans le secteur résidentiel à l'horizon 2050. Outre les 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 CO₂ (Berge *et al.*, 2010). De plus, 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 CO₂ très faible ou nulle;
- les technologies de capture et de stockage des émissions de CO₂ liées à la combustion de combustibles fossiles.

A travers ce modèle, Shorrock *et al.* 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 de 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.

Traisnel *et al.*, (2010) développent 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 dans l'évolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ dans le parc de logements. Ce modèle dynamique est alimenté par des variables désagrégées relatives au mouvement dans le parc de logements (sortie, entrée et vacance des logements) et 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 CO₂ liées au bâtiment, pour un logement type. Il permet l'évaluation approfondie des gains d'efficacité énergétique par les opérations qui pourraient être effectuées sur le parc de logements, telles que les opérations sur le parc de logements en fonction de ses caractéristiques et du rythme nécessaire, et ce, en fonction des choix énergétiques mobilisés pour atteindre le 'facteur 4'.

Le modèle 'Betel' est enrichi d'un large éventail de variables inhérentes aux bâtiments, qui permettent d'explorer de multiples solutions techniques. Toutefois, en prenant 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 CO₂ (Raux *et al.*, 2005). Par ailleurs, ce modèle ne prend pas en considération la dimension urbaine, dans le sens où aborder les consommations et les émissions d'un point de vue spatial permet d'explorer, dans la déduction des consommations et des émissions, les formes urbaines et les types de tissu auxquels les logements sont associés.

Dans un contexte climatique plus chaud que celui des pays européens, Radhi (2009) évalue l'effet des changements climatiques et la consommation énergétique dans le secteur résidentiel aux Emirats Arabes Unis (E.A.U.). 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 CO₂ liées à la climatisation dans le parc de logement de l'émirat d'Al-Ain aux E.A.U.

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. A 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 CO₂ pouvant augmenter de l'ordre de 5.4 % au cours des prochaines décennies.

Via un jeu de scénarisation, l'auteur conclut que l'efficacité du secteur résidentiel d'Al-Ain est techniquement atteignable. La réduction des émissions pourrait atteindre 13 % et 15 % du total des émissions de CO₂ 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. Ils fourniraient une quantité considérable d'économie d'énergie, qui 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, les limitations associées à cette étude sont la dépendance à seulement deux exemples de maison individuelle neuve qui diffèrent, par la taille, la période de construction et le système constructif, des autres typologies manquantes du parc de logements d'Al-Ain. Or, le segment des maisons traditionnelles, par exemple, fortement présent dans la vieille ville, n'est pas représenté dans ce modèle.

A la lumière de cette analyse bibliographique, 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 désagrégant 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.

Objectifs, formulation des hypothèses et développement d'une méthodologie

L'objectif, ici, est d'analyser l'impact de la pénétration de nouvelles technologies sur la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel. Il s'agit de développer un modèle de prospective *bottom-up* capable de simuler différents leviers d'efficacité énergétique, afin de pouvoir réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ dans le parc

de logements à l'horizon 2050. Le modèle consiste à produire différents scénarios de réduction de la consommation d'énergie des résidences principales en se basant sur des hypothèses de généralisation des meilleures technologies disponibles (MTD) et sur les données désagrégées des enquêtes de recensement général de la population et de l'habitat (RGPH 1998 et 2008).

Il s'agit ainsi :

- d'identifier les variables ayant le plus d'effet sur le couple consommation/émissions;
- de mesurer les effets de la pénétration de nouvelles technologies dans le parc de logements neufs;
- de mesurer les effets de la réhabilitation massive et progressive du stock de logements.

Ainsi une méthodologie est développée, qui aborde les questions de la manière suivantes: quels sont les facteurs clés impactant directement l'évolution de la consommation d'énergie ? Quel est le degré de maîtrise ? Quels sont les leviers d'action permettant la réduction de la consommation d'énergie dans le parc ?

Dans ce sens, on s'intéresse tout d'abord à recenser les variables impactant de manière directe l'évolution de la consommation d'énergie dans le parc de logements. Les facteurs impactants sur la performance énergétique des bâtiments devraient être identifiés et quantifiés, de sorte que ces dépendances peuvent être représentées de manière appropriée dans un modèle. Il s'agit de développer un modèle dynamique du parc de logements et des consommations d'énergie.

2. MODELE

Le modèle décrit l'évolution temporelle du parc de logements algérien et de ses consommations énergétiques (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, cuisson et appareils électroménagers). Pour simuler la consommation d'énergie et les émissions de CO₂, nous utilisons une méthode ascendante *bottom-up*. Le modèle dynamique prend en compte à la fois les variables liées au parc de logements et celles liées aux consommations d'énergie. C'est un modèle de prospective fondé sur un processus de simulation des consommations énergétiques et des émissions, qui se base sur les projections du nombre de logements et de ménages réalisées plus haut. Le modèle est mis en œuvre dans un environnement MATLAB afin de mettre en relation un large éventail de variables liées au parc de logements et aux consommations énergétiques.

Modèle dynamique de parc de logements

La demande de logements dépend d'un certain nombre de facteurs, tels que la population, les caractéristiques démographiques, le revenu, le prix des logements et ainsi de suite (Raux *et al.*, 2005). L'évolution de la taille du parc est donc liée à celle de la population ainsi qu'au taux d'occupation par logement (TOL). Dans cet article, la projection de la demande de logements à l'horizon 2050 est basée sur le scénario central du nombre de ménages de l'Office national des statistiques algérien.

Puisque les consommations d'énergie des bâtiments varient considérablement en fonction du type de logement, nous considérons que 4 types de logements représentent la typologie des logements disponibles dans le parc de logements en Algérie: les logements en immeubles collectifs, les maisons individuelles, les maisons traditionnelles et les constructions précaires. Cette typologie, fournie par l'Office national des statistiques algérien, permet d'identifier les déterminants cruciaux des bâtiments, à savoir: la surface habitable et la qualité de l'enveloppe bâtie. De plus, la ventilation du nombre de logements selon les zones climatiques permet d'examiner également la distribution spatiale du nombre de logements par typologie, ainsi que ses effets sur les besoins énergétiques du parc de logements.

La projection désagrégée de la dynamique du parc à l'échelle départementale montre une augmentation numérique des tranches de logements en immeubles collectifs. Leur nombre passerait de 1.01 millions en 2008 à près de 5.45 millions en 2050 (Figure 2). 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 %.

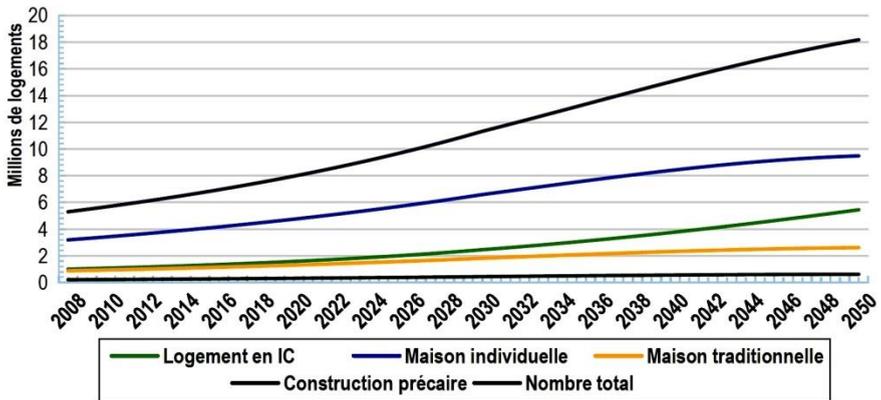


Fig. 2: Projection du nombre de logements par segment de parc

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.

$$\text{Surf } f(t+1) = \sum_{1}^{\text{dept}=48} \left(\text{Logt}_{\text{IC,MI,MT,CP}}(t, \text{dept}) \times \left(\text{SHAB}_{\text{IC,MI,MT,CP}} \right) \right)$$

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

Ici, on considère que la surface habitable moyenne par type de logements resterait stable à l'horizon 2050. 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 (figure 3). Cet accroissement rapide de la surface du parc serait corrélé à l'accroissement du nombre de logements dans le parc.

Modèle de consommation et des émissions

Dans notre modèle départemental de consommation, on considère que la consommation totale d'énergie 'Cts' est la somme de la consommation énergétique finale pour l'utilisation du chauffage 'CH_s', du refroidissement 'REs', de l'eau chaude sanitaire 'ECSs', de la cuisson 'CUs' et des équipements électroménagers 'EQs' de chacun des 4 types de logements représentatifs du parc.

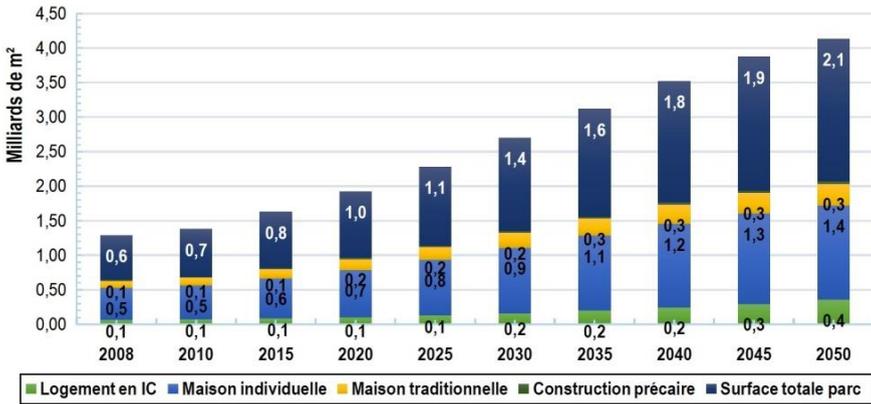


Fig. 3: Estimation de la surface totale et par segment de parc à l'horizon 2050

A l'échelle du parc, la consommation totale d'énergie pour le chauffage 'CH_s', par exemple, est la somme des consommations des quatre types de logements multipliée par le stock de logements correspond au type de logement 'NL_s'. De manière analogue, on calcule la consommation d'énergie pour le refroidissement 'RE_s', l'eau chaude sanitaire 'ECS_s', la cuisson 'CU_s' et les appareils électroménagers 'EQ_s'.

$$Cts = \sum_{1}^{dept=48} (CHs + Res + ECSs + EQs) \times (NLs(dept))$$

{dept = 1: 48}

Les estimations des émissions de CO₂ sont obtenues de manière similaire. Les émissions pour un logement en kgCO₂ sont la somme des émissions pour chaque utilisation finale.

■ Chauffage et refroidissement

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 'DTR97'. Cette méthode emploie des calculs en mode statique, ce qui signifie que les apports 'Q_p, Q_e et Q_s' et les déperditions 'D_t et D_r' 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.

Le calcul de la consommation d'énergie pour le chauffage s'exprime de la sorte:

$$CH = 24 \times R_g \frac{DJU21 \times (D_t + D_r) - HT \times (Q_e + Q_p + Q_{ens})}{R_g \times 1000}$$

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 'Q_p, Q_r, Q_e et Q_s', afin d'estimer la puissance frigorifique ainsi que les besoins énergétiques annuels nécessaires pour le refroidissement.

$$RE = 24 \times \frac{HR \times (Q_p + Q_r + Q_e + Q_s)}{COP \times 1000}$$

Les hypothèses d'amélioration de l'enveloppe appliquées dans la réhabilitation sont identiques à celles appliquées dans le parc des logements neufs. 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 de chauffage et de refroidissement.

■ Eau chaude sanitaire

De nombreuses méthodes ont été développées pour exprimer les besoins d'énergie pour la production de l'eau chaude sanitaire (Traisnel *et al.*, 2010). 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 'T_{ef}'.

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 la formule suivante:

$$ECS = \frac{1.163 \times (470.9 \times \ln(\text{SHAB}) - 1075) \times (40 - T_{ef}) \times 48}{\text{Recs} \times 1000}$$

■ Cuisson, éclairage et appareils électroménagers

La consommation d'électricité des appareils est la somme de la consommation de chaque logement, en kWh/m²/an. Nous prenons en compte six catégories d'appareils (par exemple: réfrigérateur, lave-linge, four, télévision, ordinateurs, sèche-cheveux et fer à repasser) et une consommation supplémentaire liée à d'autres appareils (cafetière...). La consommation des appareils électroménagers est liée à la puissance des appareils 'P_{eq}' et aux fréquences d'utilisation 'F_{us}'.

La variable la plus discriminante entre les ménages est le taux de possession d'équipements. Quant au taux de possession d'appareils électroménagers, il est lié systématiquement au niveau de revenu des ménages. L'estimation des besoins d'énergie dépend donc de la puissance de chaque appareil, mais aussi de sa durée d'utilisation.

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

$$EQ = \sum_0^n P_{eq}(n) \times F_{us}(n)$$

■ Hypothèses et méthodes de calcul des émissions de CO₂ dans le bâtiment

Le modèle s'appuie sur la méthode du contenu en CO₂ du kWh pour l'estimation des émissions, en faisant référence aux valeurs adoptées par le GIEC. 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 (cf. Figure 4).

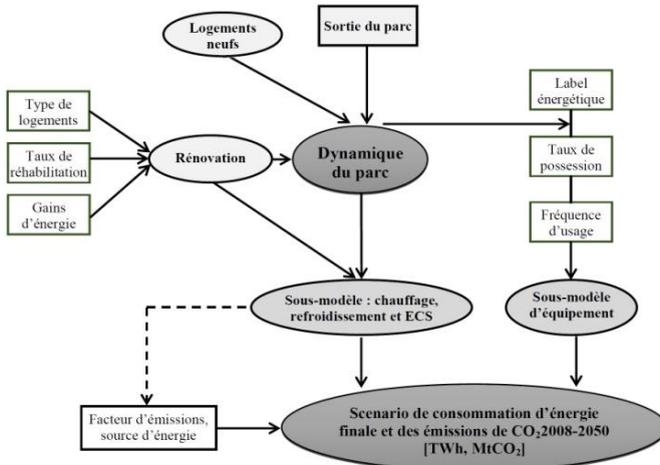


Fig. 4: Structure du modèle de consommation et d'émissions de CO₂

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Scénario tendanciel (référence)

En poursuivant les tendances actuelles à l'horizon 2050, 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). A 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 (figure 5).

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 celle des maisons individuelles dans le parc.

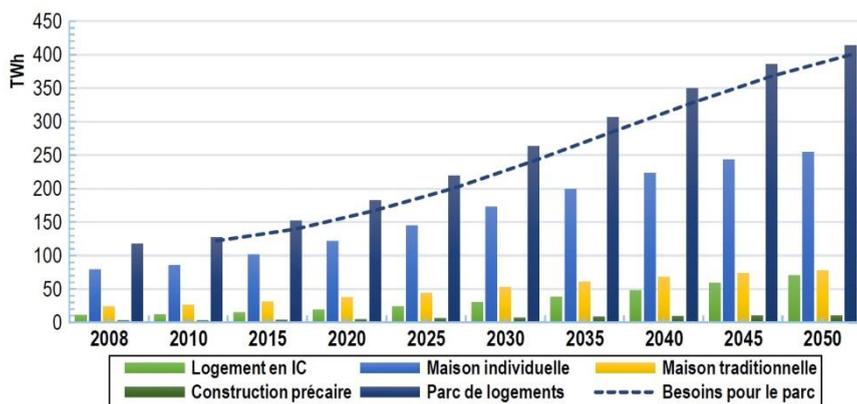


Fig. 5: Consommations d'énergie du parc de logements (scénario tendanciel)

L'évolution des émissions de CO₂ dépend, ici, uniquement de la consommation d'énergie. Sur la figure 6, 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 MtCO₂, par rapport aux émissions de 2008 (30.6 MtCO₂). Les émissions moyennes par habitant atteindraient l'équivalent de 2,1 tCO₂/habitant en 2050, alors qu'elles n'étaient que de 0,9 tCO₂/habitant en 2008.

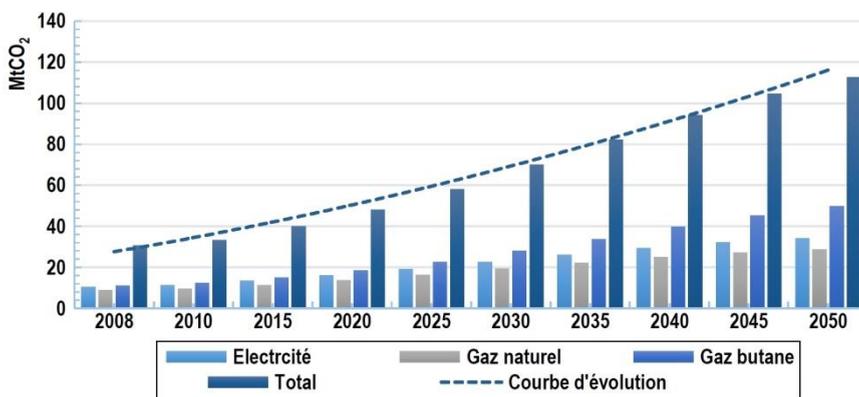


Fig. 6: Emissions de CO₂ par source d'énergie (scénario tendanciel)

Résultats des scénarios portant sur la réduction des consommations d'énergie

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.

● 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.

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. Notons que ce différentiel de gain d'énergie entre le chauffage et le refroidissement serait lié aux efforts d'isolation 'Ubât' relatifs à chaque segment de parc (MI, MT), mais aussi au poids de ces segments selon les zones climatiques.

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.

● **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 'BFC⁴' 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. 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.

● **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' (BBC⁵) 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 représenterait 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.

⁴ On applique, dans ce scénario, les mêmes valeurs de déperditions thermiques (λ) dans les différents éléments constructifs du bâtiment. Ces valeurs sont préconisées par la réglementation thermique française de 2005.

⁵ On applique, dans ce scénario, les mêmes valeurs de déperditions thermiques (λ) dans les différents éléments constructifs du bâtiment. Ces valeurs sont préconisées par la réglementation thermique française de 2012.

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 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 7).

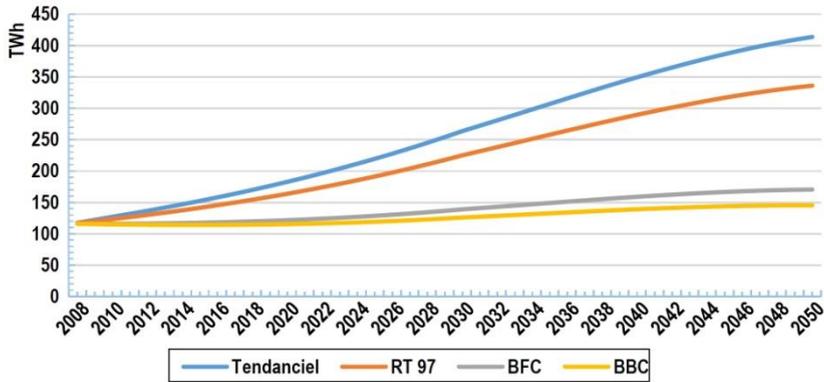


Fig. 7: Scénarios des consommations d'énergie dans le parc à l'horizon 2050

■ Résultats des scénarios relatifs aux émissions de CO₂

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 8 trace l'évolution des quatre scénarios d'émissions de CO₂ du secteur résidentiel.

On constate, dans le scénario RT97, une baisse des émissions qui pourrait atteindre environ 84,5 MtCO₂ en 2050. Elle serait de l'ordre de 25 % par rapport au scénario tendanciel (112,7 MtCO₂). 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 MtCO₂.

Les gains de consommation dans les scénarios BFC et BBC conduiraient à une forte baisse des émissions puisqu'on ne compterait que 47.1 MtCO₂ dans le scénario BFC et 41,3 MtCO₂ 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.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'enjeu de l'efficacité énergétique dans le contexte algérien n'est pas lié seulement au respect des engagements de ce pays envers le protocole de Kyoto, 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.

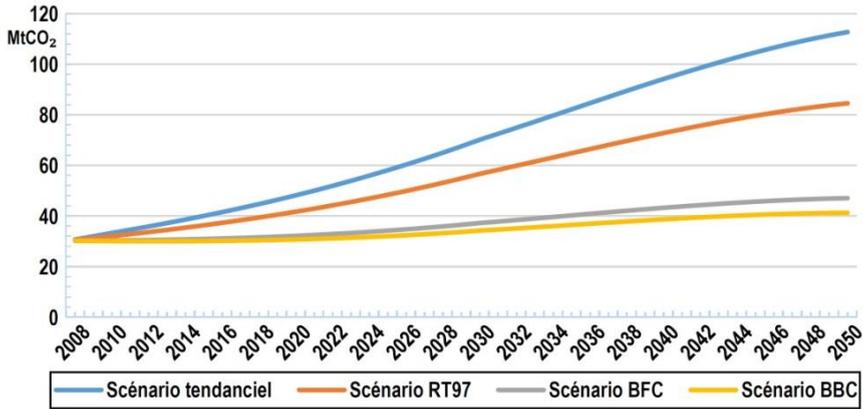


Fig. 8: Scénarios des émissions de CO₂ dans le secteur résidentiel

Contribution de la modélisation de prospective bottom-up

Au démarrage de ce travail, nous étions placé face à une situation d'insatisfaction vis-à-vis des mesures d'efficacité énergétique, et particulièrement de l'absence d'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.

Ce travail 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 CO₂ 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. A 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 CO₂.

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/m²/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. A 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 MtCO₂ (contre 112.5 MtCO₂ 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/m²/an dans le scénario BBC, en stabilisant les émissions unitaires à 0.8 tCO₂/habitant dans le secteur résidentiel, constituerait un résultat qui correspond aux ambitions de ce travail.

REFERENCES

- [1] Rapport Scientifique, '*Consommation Energétique Finale de l'Algérie*', APRUE, 2007.
- [2] B. Boardman, S. Darby, G. Killip, M. Hinnells, C.N. Jardine, J. Palmer and G. Sinden, '*40% House, Project Background Material A, United Kingdom Domestic Carbon Model, UKDCM, Description, Method and Analysis*', Environmental Change Institute, University of Oxford, pp. 1-15., 2005.
- [3] M. Kavgic, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, '*A Review of Bottom-Up Building Stock Models for Energy Consumption in the Residential Sector*', Building and Environment, Vol. 45, N°7, pp. 1683 – 1997, 2010.
- [4] Rapport Scientifique, '*Bilan Energétique Nationale de l'Année 2011*', MEM, 2011.
- [5] H. Radhi, '*Evaluating the Potential Impact of Global Warming on the UAE Residential Buildings – A Contribution to Reduce the CO₂ Emissions*', Building and Environment, Vol. 44, N°12, pp. 2451 - 2462, 2009.
- [6] C. Raux, J.P. Traisnel, J.P. Nicolas et M. Maïzia, '*Rapport R2 Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL*', Action concertée énergie, ETHEL

Énergie, Transport, Habitat, Environnement, Localisations, Rapport de Recherche, 148 p., 2005.

- [7] L. Shorrock and J. Dunster, '*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, Vol. 25, N°12, pp. 1027 - 1037, 1997.
- [8] L.G. Swan and V.I. Ugursal, '*Modeling of End-Use Energy Consumption in the Residential Sector: A Review of Modeling Techniques*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, N°8, pp. 1819 - 1835, 2009.
- [9] J.P. Traisnel, D. Joliton, M.H. Laurent, S. Caffiaux et A. Mazzenga, '*Habitat et Facteur 4- Etude d'une Réduction des Emissions de CO₂ Liées au Confort Thermique dans l'Habitat à l'Horizon 2050*', Les cahiers du Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement, N°20, pp. 9 – 40, 2010.