



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
**Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés**

Equipe IPA-PE
**Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement**

Projet de Fin d'Etudes

Précarité énergétique et amélioration de l'habitat



2015-2016

Directeur de recherche

MAIZIA Mindjid

Lambert Antoine

Urios Kevin

La précarité énergétique et l'amélioration de l'habitat

MAIZIA Mindjid

LAMBERT Antoine et URIOS Kevin

2015-2016

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

FORMATION PAR LA RECHERCHE ET PROJET DE FIN D'ETUDES EN GENIE DE L'AMENAGEMENT

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'école d'ingénieur Polytech Tours et plus particulièrement du Département Aménagement et Environnement sans qui nous n'aurions pas pu réaliser cette étude.

Nous tenons à remercier notre tuteur pédagogique, Monsieur MAIZIA qui nous a permis d'évoluer tout au long de cette étude.

De la même manière, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont pu nous aider dans le traitement méthodologique et qui nous ont amené à cette réflexion.

Sommaire

INTRODUCTION.....	9
METHODE.....	10
LE SYSTEME GLOBAL	11
LE SOUS-SYSTEME DES BESOINS DE CHAUFFAGE DU LOGEMENT	12
<i>Les apports gratuits</i>	<i>13</i>
<i>Les déperditions thermiques</i>	<i>13</i>
<i>Détermination des variables leviers.....</i>	<i>14</i>
HYPOTHESES DE TRAVAIL	15
<i>Profil du ménage retenu pour le calcul.....</i>	<i>15</i>
<i>Affectation d'un type de logement.....</i>	<i>15</i>
<i>Choix de l'énergie de chauffage</i>	<i>15</i>
<i>Les ponts thermiques</i>	<i>16</i>
<i>La réhabilitation du logement.....</i>	<i>17</i>
APPLICATIONS.....	17
SITUATION DES MENAGES AVANT LA REHABILITATION THERMIQUE	17
<i>Simulation du taux d'effort énergétique sur les constructions les plus énergivores (1945-1967).....</i>	<i>18</i>
SITUATION DES MENAGES APRES LA REHABILITATION THERMIQUE	19
<i>Simulation du taux d'effort énergétique après réhabilitation sur les constructions les plus énergivores (1945-1967).....</i>	<i>19</i>
COMPARAISON DES GAINS ECONOMIQUES ENTRE DEUX SCENARIOS.....	20
DISCUSSION	21
CONCLUSION.....	21
REFERENCES	23

Table des illustrations

Figure 1 : Processus de diminution du taux d'effort ÉNERGÉtique.....	10
Figure 2 : ModÉlisation du taux d'effort ÉNERGÉtique	11
Figure 3 : ModÉlisation des besoins de chauffage du logement.....	12
Figure 4 : Besoins de chauffage annuels du logement selon la pÉriode de construction du bÂtiment (kWh/m ² /an) ...	18
Figure 5 : Comparaison des besoins de chauffage par pÉriode de construction avant et aprÈs rÉhabilitation.....	19
Figure 6 : Comparaison des factures ÉnergÉtiques (en €) du mÉnage avant et aprÈs rÉhabilitation.....	20
Tableau 1 : Variables exogÈnes relatives au systÈme global.....	12
Tableau 3 : Type de variables exogÈnes	14
Tableau 4 : Revenu disponible par mÉnage selon tranche de revenu en 2011	15
Tableau 5: Coût de l'Énergie en €/kWh (EUROstat)	16
Tableau 6 : Estimation des coûts de l'énergie de 2016 à 2020.....	16
Tableau 7 : Variables modifiées par la rÉhabilitation thermique	17
Tableau 8 : DonnÉes relatives aux parois selon la pÉriode de construction du bÂtiment – <i>ApUR, 2007</i>	18
Tableau 9 : Revenus annuels du mÉnage affectÉ au logement de la pÉriode 1945-1967	19
Tableau 10 : estimation du taux d'effort ÉnergÉtique annuel avant rÉhabilitation.....	19
Tableau 11 : Revenus annuels du mÉnage affectÉ au logement rÉhabilitÉ.....	19
Tableau 12 : estimation du taux d'effort aprÈs rÉhabilitation thermique	20
Tableau 13 : comparaison des gains Économiques selon la date de rÉhabilitation	20

Introduction

La précarité énergétique est un concept apparu au Royaume-Uni dans le début des années 1990. Une des premières définitions met en avant les ménages qui dépensent plus de 10 % de leur revenu pour le paiement de leur facture énergétique (Boardman, 1991).

C'est avec l'introduction du Grenelle 2 en 2010 qu'une définition est inscrite dans la législation française. Ainsi, « est en situation de précarité énergétique au titre de la présente loi une personne qui éprouve dans son logement des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat ». En France métropolitaine, une enquête nationale sur le logement en 2006 démontre que 3,8 millions de ménages sont touchés par ce phénomène et ont ainsi une facture énergétique dont la part est supérieure au seuil de 10 % de leurs revenus.

Près de 3,5 millions de ménages indiquent qu'ils souffrent du froid (Devalière, Briant, et Arnault 2011a), même si certains ne sont pas considérés en situation de précarité. Cela peut s'expliquer par le fait qu'ils ne peuvent pas satisfaire leurs besoins en chauffage pour atteindre leur confort thermique et vivent alors avec une température insuffisante dans leur logement.

La précarité énergétique est de plus en plus présente sur le territoire français et elle devient un enjeu non négligeable dans les discussions sociales du gouvernement. Un observatoire a ainsi été lancé en 2011 par les pouvoirs publics dans le but de trouver des solutions pérennes.

La méthode la plus répandue est celle définie précédemment, où est considéré comme précaire, un ménage qui dépense plus de 10 % de ses revenus dans sa facture énergétique. Une nouvelle approche détaillée par Hills en 2011, « *after fuel cost poverty* » utilise le revenu médian en fonction des dépenses énergétiques.

Plus récemment, « *l'approche de Hills* » propose l'utilisation d'un nouvel indicateur « *low income-high costs* » qui, en plus de la précédente approche, prend en compte une dépense énergétique médiane par rapport aux autres ménages de l'aire d'étude (Legendre et Ricci 2015a). L'étude de la précarité énergétique sera abordée dans ce travail suivant la première approche énoncée.

Le phénomène de précarité énergétique peut apparaître lors d'une combinaison de facteurs défavorables tels que le niveau de revenu des ménages, le prix de l'énergie, mais aussi les besoins de consommation du logement, potentiellement énergivore (Walker et al. 2014a; Fabbri 2015). Il est alors difficile de mesurer avec certitude les ménages touchés puisque les causes d'une telle situation sont diverses et n'agissent pas de manière constante.

Le travail qui suit s'attarde essentiellement sur la performance énergétique du logement. Nous avons décidé d'établir l'hypothèse que l'amélioration physique de l'habitat permet aux ménages de sortir de la précarité énergétique.

Cette étude se base sur le rapport réalisé par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR 2007a) qui traite des consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées aux chauffages des résidences principales parisiennes. Les résultats du rapport s'attardent sur les bâtiments d'habitations collectives et fournissent une base de travail sur les besoins de chauffage des logements parisiens.

Nous tenterons de poursuivre l'étude de l'APUR : les résultats concernant les besoins de chauffage des logements collectifs parisiens seront injectés dans un modèle qui permettra par la suite de mesurer l'impact énergétique et économique qu'une réhabilitation thermique peut engendrer. Deux périodes distinctes sont sélectionnées en tenant compte de l'évolution du prix de l'énergie :

- a) La réhabilitation thermique est effectuée en 2008, au moment de la crise économique, et les répercussions économiques sont mesurées entre 2008 et 2015
- b) La réhabilitation thermique est effectuée en 2015 dans les mêmes conditions, mais en tenant compte de l'évolution future du prix de l'énergie, pour une mesure des répercussions économiques entre 2015 et 2020.

Ce papier tente donc de modéliser les besoins énergétiques et vérifier si une amélioration physique de l'enveloppe du bâtiment permet au ménage de diminuer de manière significative sa facture énergétique. Le taux d'effort énergétique est jusqu'alors supérieur au taux admis de 10 %¹. Le chauffage, les usages électriques et l'eau chaude sanitaire seront pris en compte (Moore 2012a).

Méthode

Les études sur la définition de la précarité énergétique (Thomson et Snell 2012; Moore 2012b), la comparaison des données entre les pays européens (Thomson et Snell 2012), les conséquences sur la santé (Lacroix et Chaton 2015), ou encore la mise en place de différentes méthodes de mesures et d'indicateurs (Waddams Price, Brazier, et Wang 2011; Walker et al. 2014 b; Lawson, Williams, et Wooliscroft 2014; Legendre et Ricci 2015b; Fabbri 2015; Imbert, Nogues, et Sevenet 2016) sont nombreuses.

Néanmoins, peu d'études s'intéressent à la résolution du problème et un nombre encore plus réduit s'attache à considérer une intervention physique sur l'habitat afin de contrer la précarité énergétique.

À partir des résultats et des hypothèses émis par les études, nous avons pu mettre en place un processus de

réalisation simple pour ce travail (Figure 1). Une collecte de données relatives aux ménages, aux logements et à l'énergie, a permis de réaliser une modélisation impliquant une série de variables. Cette modélisation permet de vérifier le taux d'effort énergétique du ménage. Le travail se porte ensuite sur la diminution de ce taux d'effort, en modifiant les caractéristiques physiques du logement.

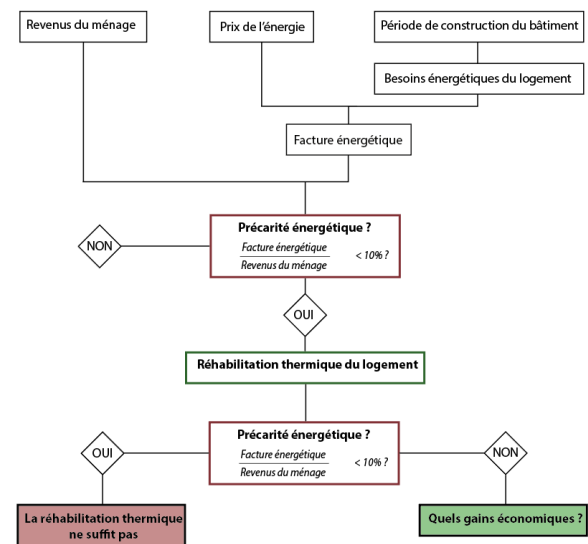


FIGURE 1 : PROCESSUS DE DIMINUTION DU TAUX D'EFFORT ÉNERGÉTIQUE

Les données d'entrées relatives aux revenus du ménage, au prix de l'énergie et aux besoins énergétiques du logement permettent d'obtenir le taux d'effort énergétique. Par la suite, les variables exogènes susceptibles d'influencer les performances énergétiques sont isolées et des scénarios possibles de réhabilitations thermiques sont réalisés.

À la suite de l'amélioration de l'habitat, si le taux d'effort passe sous le seuil de 10 %, nous tenterons de mesurer les gains économiques que représente une telle intervention, sur les deux périodes distinctes (de 2008 à 2015 et de 2015 à 2020).

¹ Le taux d'effort énergétique, note T dans cette étude, représente la part du revenu du ménage dépensé pour payer sa facture énergétique. Si ce taux est supérieur à

10 %, on considère que le ménage est en situation de précarité énergétique.

Si les usages électriques et l'eau chaude sanitaire sont pris en compte dans les calculs préliminaires, les scénarios de réhabilitation porteront sur l'enveloppe physique du logement (murs, isolants et vitrages).

Nomenclature	
A_i	Apports internes (kWh)
	Consommation électrique hors chauffage (kWh)
a_i	Apports internes unitaires (kWh/m ²)
	Consommations électriques unitaires hors chauffage (kWh/m ²)
A_p	Surface des parois opaques (m ²)
B_{ch}	Besoins de chauffage annuels (kWh/m ² /an)
B_{ecs}	Besoins en eau chaude sanitaire (kWh)
B_v	Coefficient de besoins de chauffage (kWh/K)
C_1	Coefficient d'exposition de la paroi
C_g	Prix du gaz (€/kWh)
C_e	Prix de l'électricité (€/kWh)
DH	Degrés heure de la zone géographique (°C.h)
DP	Déperditions par les parois (W/K)
DR	Déperditions par renouvellement d'air (W/K)
e_i	Épaisseur du matériau porteur (m)
e_j	Épaisseur de l'isolant (m)
F	Coefficient d'apports gratuits
Fe	Facture énergétique annuelle du ménage (€)
Fei	Facteur d'ensoleillement
F_{ts}	Facteur de transmission solaire des parois
GV	Coefficient thermique de déperditions (W/K)
h	Hauteur du logement (m)
I_v	Insolation verticale (kWh/m ²)
n	Coefficient d'inertie
Q_v	Ventilation du logement (m ³ /h)
R	Revenu annuel du ménage (€)
Sh	Surface habitable du logement (m ²)
S_{se}	Surface transparente sud équivalent (m ²)
S_{vit1}	Surface de simple vitrage du logement (m ²)
S_{vit2}	Surface de double vitrage du logement (m ²)
U_p	Conductance thermique des parois (W/m ² K)
U_{vit1}	Conductance thermique du simple vitrage (W/m ² K)
U_{vit2}	Conductance thermique du double vitrage (W/m ² K)
V_h	Volume habitable (m ³)
X	Coefficient intermédiaire d'apports gratuits

λ_i	Conductivité thermique du matériau porteur (W/m.K)
λ_j	Conductivité thermique de l'isolant (W/m.K)
ρ_e	Rendement du système de chauffage électrique
ρ_g	Rendement du système de chauffage au gaz
τ	Taux d'effort énergétique du ménage

Le système global

Le système global regroupe l'ensemble de la modélisation qui a été réalisée au cours de cet exercice. Il est question dans cette partie de mettre en avant le taux d'effort énergétique τ en fonction des consommations, du coût de l'énergie et des revenus des ménages (Figure 2). Le taux d'effort qui sera calculé permettra ainsi de déterminer si un ménage est précaire du point de vue énergétique.

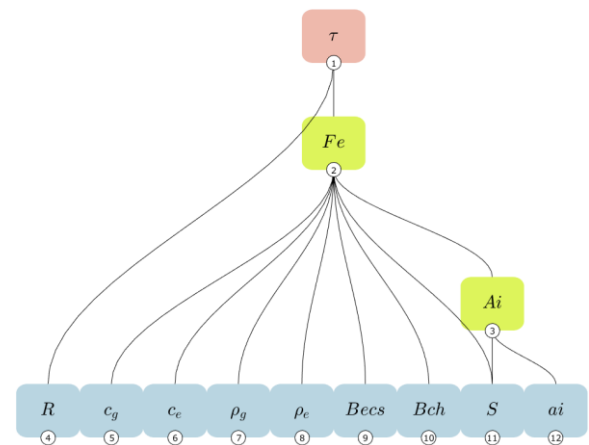


FIGURE 2 : MODÉLISATION DU TAUX D'EFFORT ÉNERGÉTIQUE

Cette modélisation permet de retranscrire la définition de la précarité énergétique qui a été présentée précédemment. Ainsi le taux d'effort énergétique du ménage représente la part de la facture énergétique Fe dans les revenus totaux du ménage R .

$$\tau = \frac{Fe}{R} \quad (1)$$

La facture énergétique du ménage Fe dépend notamment du coût de l'énergie et des consommations du logement. Les consommations étudiées dans le cadre de cette étude s'apparentent au chauffage B_{ch} , à l'eau chaude sanitaire B_{ecs} , ainsi qu'à la consommation

électrique hors chauffage Ai . Il est également nécessaire de prendre en compte le rendement de la filière de chauffage ρ qui sera aussi appliqué aux besoins en eau chaude sanitaire (on considère ici que le système de chauffage est le même pour le chauffage et pour l'eau). Les rendements diffèrent selon le système de chauffage utilisé. Dans le cas de l'électricité, le rendement est égal à 0,95 tandis que pour le système au gaz, il est de 0,7 dans les meilleurs cas pour un logement collectif (CLIP 2007). Les besoins en eau chaude sanitaire dépendent du nombre de personnes dans le logement, suivant une consommation moyenne de 750 kWh unitaires (les différents usages sont intégrés dans cette valeur).

Les coûts énergétiques sont mesurés en fonction du type d'énergie utilisé dans le logement. La filière électrique et la filière gaz sont représentées respectivement par c_e et c_g . Ainsi dans le cas où le gaz serait utilisé pour le chauffage, la relation (2) est prise en compte, de manière à affecter le prix du gaz au chauffage et de conserver également le coût de l'électricité pour les usages associés (éclairage, cuisson, électroménager). En revanche, lorsque seule l'électricité est utilisée, nous prendrons en compte la relation (2').

$$F = ((Bch + Becs)/\rho_g) * c_g + (Ai/\rho_e * c_e) \quad (2)$$

$$F = ((Bch + Becs) + Ai)/\rho_e * c_e \quad (2')$$

Les consommations électriques hors chauffage dépendent des consommations électriques unitaires ai et de la surface du logement Sh . La consommation unitaire est définie par une valeur conventionnelle en France concernant les utilisations des équipements d'un logement et prend également en compte le comportement des occupants, selon la zone climatique. Pour Paris, on obtient une moyenne égale à 22,9 kWh/m².

$$Ai = ai * S \quad (3)$$

TABLEAU 1 : VARIABLES EXOGENES RELATIVES AU SYSTEME GLOBAL

ai	Consommations électriques unitaires hors chauffage (kWh/m²)
c_e	Coût de l'électricité (€/kWh)
c_g	Coût du gaz (€/kWh)
R	Revenu annuel du ménage (€)
S	Surface du logement (m²)

Le sous-système des besoins de chauffage du logement

Le système sectoriel des besoins de chauffage permet d'obtenir une estimation des besoins de chauffage annuels d'un logement en fonction de l'année de construction des bâtiments (Figure 3). En fonction des données spécifiques au type de bâtiment, il sera possible d'identifier la période de construction qui nécessite un effort de chauffage important.

Le calcul préliminaire, les variables et les relations mathématiques proviennent de la méthode de calcul de l'APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme) et du Diagnostic de Performance Énergétique (3CL-DPE, version 1.3) modifiée à la suite d'un arrêté du 17 octobre 2012. Les besoins de chauffage Bch en kWh/m²/an représentent la quantité de chauffage dont a besoin le logement pour maintenir une situation de confort pendant la période de chauffage.

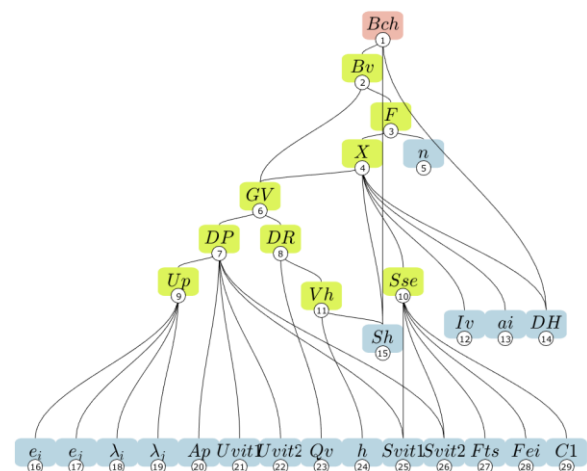


FIGURE 3 : MODÉLISATION DES BESOINS DE CHAUFFAGE DU LOGEMENT

La finalité du calcul s'obtient par la multiplication du coefficient de besoins annuels de chauffage BV et des degrés heures de chauffage DH , le tout rapporté à la surface du logement Sh . La valeur des degrés heures DH est donnée par l'intégrale de la différence de température entre l'intérieur (fixée à 19 °C) et l'extérieur (variable) pour toute la durée de la période de chauffage. À Paris, DH est estimé à $62 \cdot 10^3$ °C.h.

$$Bch = \frac{Bv \cdot DH}{Sh} \quad (1)$$

Le coefficient de besoins annuels Bv divise le système en deux branches distinctes que sont les déperditions thermiques représentées par le coefficient thermique de déperditions GV , et les apports gratuits représentés par le coefficient F . Ce dernier minore le résultat BV grâce aux apports de chaleur liés à l'insolation et à l'occupation des locaux (appareils électriques, lumières).

$$Bv = GV \cdot (1 - F) \quad (2)$$

Les apports gratuits

Le logement bénéficie d'apports thermiques gratuits qui minorent les besoins de chaleur. Ces apports thermiques sont représentés par le coefficient d'apports thermiques F , qui dépend d'une valeur intermédiaire notée X , pondérée par le coefficient d'inertie n . Le coefficient n traduit l'inertie du bâtiment, qui peut varier de légère à moyenne, lourde ou très lourde selon les caractéristiques de parois (plancher haut, plancher bas et parois verticales). La valeur X réunit quant à elle l'expression des apports gratuits matérialisés par les apports internes ou les apports solaires.

$$F = \frac{X - X^n}{1 - X^n} \quad (3)$$

Dans cette méthode, X est égale à la somme des apports internes ai et des apports solaires Iv , divisée par le produit du coefficient thermique de déperditions GV et des degrés heures DH de la zone climatique concernée.

$$X = \frac{ai \cdot Sh + Iv \cdot Sse}{GV \cdot DH} \quad (4)$$

Les consommations électriques sont prises en compte dans la facture en tant que dépenses d'énergie électrique, mais entrent également dans le système des besoins de chauffage en tant qu'apports gratuits, relatifs à l'utilisation des appareils.

Les apports liés à l'énergie solaire sont également à considérer dans le calcul et sont exprimés par le produit de l'ensoleillement Iv reçu par une paroi verticale exposée au Sud et la « surface transparente Sud équivalent » Sse , définie comme la paroi fictive exposée au Sud, totalement transparente et sans ombrage, qui provoquerait les mêmes apports solaires que la totalité des parois du logement (DPE 2012).

L'ensoleillement varie selon la localisation géographique du logement. À Paris, la valeur de Iv est égale à 410 kWh/m — (APUR, 2007).

La détermination de la surface Sud équivalent exige une précision importante, puisque le calcul se fait en sommant les valeurs de Sse pour chaque paroi vitrée du logement (DPE 2012). On injecte dans l'expression la surface vitrée $Svit$, le facteur de transmission solaire de la paroi Fts qui représente la proportion d'énergie solaire incidente, le facteur d'ensoleillement ou effet de masque Fei qui dépend de l'environnement dans lequel est situé le logement, et le coefficient d'exposition de la paroi $C1$.

$$Sse = (Svit1 + Svit2) \cdot Fts \cdot Fei \cdot C1 \quad (5)$$

Les déperditions thermiques

Les déperditions par les parois DP et les déperditions par renouvellement d'air DR sont les deux types de pertes de chaleur prises en compte.

$$GV = DP + DR \quad (6)$$

Les déperditions par conduction par les parois en W/K sont dépendantes de l'aire de chaque paroi et de leur coefficient de transmission thermique U exprimé en W/m²/K. On distingue les parois opaques (murs) et les parois transparentes (vitrages).

$$DP = Ap * Up + Uvit1 * Svit1 + Uvit2 * Svit2 \quad (7)$$

Les parois transparentes sont caractérisées par leur surface $Svit$, ainsi que par leur conductance thermique $Uvit$ en W/m^2K . La conductance thermique du vitrage dépend des caractéristiques de la paroi vitrée (simple, double, triple vitrage), de son épaisseur et du gaz utilisé à l'intérieur du vitrage. La conductance thermique et le pourcentage de surfaces vitrées seront donc différents pour chaque bâtiment, dépendant directement du type et de l'année de construction de l'édifice (APUR 2007a)

Les déperditions des parois opaques sont fonction de la surface Ap ainsi que de la conductance thermique de chaque paroi Up en W/m^2K . Dans la méthode de calcul utilisée, la résistance thermique (l'inverse de la conductance thermique), est préférée de façon à faire intervenir le rapport entre l'épaisseur $e_{i,j}$ et la conductivité thermique $\lambda_{i,j}$ des matériaux qui constituent la paroi opaque. Le matériau porteur et l'isolant diffèrent selon l'âge du bâtiment (APUR 2007a).

$$Up = \frac{1}{\sum \lambda} \quad (8)$$

Les déperditions thermiques par renouvellement d'air DR se forment par convection. Dans la méthode utilisée, celles-ci dépendent du volume habitable Vh en m^3 multiplié par la ventilation du logement rapporté au volume habitable Qv en $1/h$ et de la chaleur volumique de l'air (constante égale à 0,34, exprimée en $Wh/m^3/K$).

$$DR = 0.34 * Vh * Qv \quad (9)$$

Le volume habitable sera fixe pour chaque calcul, afin d'obtenir des résultats pour un volume similaire, à partir de la hauteur h en m et de la surface habitable Sh en m^2 . Un coefficient de pondération est fixé à 0,85 afin de prendre en compte le volume habitable et non le volume total du logement.

$$Vh = 0.85 * h * Sh \quad (10)$$

Détermination des variables leviers

Parmi les variables identifiées précédemment, certaines sont inhérentes à l'environnement, comme l'insolation verticale ou les degrés heure, ou indépendantes de l'enveloppe physique du bâtiment sur laquelle la réhabilitation peut intervenir, comme les apports internes, la hauteur ou la surface habitable. Certaines données intrinsèques au bâtiment seront considérées comme invariables, notamment l'épaisseur et le type du matériau porteur, dont la modification ne sera pas prise en compte dans la réhabilitation. L'ensemble de ces variables sont identifiées comme étant des contraintes. Les variables leviers sont celles sur lesquelles la réhabilitation thermique peut intervenir et modifier leur valeur.

TABLEAU 2 : TYPE DE VARIABLES EXOGÈNES

Contraintes	ai	Consommations électriques unitaires hors chauffage (kWh/m^2)
	Ap	Surface des parois opaques (m^2)
	$C1$	Coefficient d'exposition de la paroi
	DH	Degrés heure de la zone géographique ($^{\circ}C.h$)
	e_i	Épaisseur du matériau porteur (m)
	Fei	Facteur d'ensoleillement
	Fts	Facteur de transmission solaire des parois
	h	Hauteur du logement
	Iv	Insolation verticale (kWh/m^2)
	n	Coefficient d'inertie
	Qv	Ventilation du logement (m^3/h)
	Sh	Surface habitable du logement (m^2)
	λ_i	Conductivité thermique du matériau porteur ($W/m.K$)
Leviers	e_j	Épaisseur de l'isolant (m)
	$Svit1$	Surface de simple vitrage du logement (m^2)
	$Svit2$	Surface de double vitrage du logement (m^2)
	$Uvit1$	Conductance thermique du simple vitrage (W/m^2K)
	$Uvit2$	Conductance thermique du double vitrage (W/m^2K)
	λ_j	Conductivité thermique de l'isolant ($W/m.K$)

Hypothèses de travail

Des hypothèses ont été formulées pour l'application de la méthode de calcul. Nous sommes partis du postulat que la modélisation pouvait s'effectuer en considérant une situation particulièrement défavorable. De cette façon, nous pourrions vérifier si la réhabilitation thermique aura un impact significatif et assez important pour inverser la tendance.

Profil du ménage retenu pour le calcul

Selon l'approche utilisée pour mesurer la précarité énergétique, les profils touchés sont différents : avec l'approche utilisant le ratio de 10 % entre la facture et le revenu familial, certains ménages avec une situation confortable peuvent être pris en compte. Par exemple, si un ménage avec un revenu élevé occupe un logement mal isolé de surface importante, la probabilité de dépenser 10 % du revenu dans la facture énergétique est forte. Il sera alors, selon les critères de l'approche, considéré en situation de précarité énergétique.

Pour les besoins de l'étude, un profil sera donc retenu afin de concentrer les résultats sur une situation particulièrement défavorable. En France, les ménages les plus exposés au froid sont les familles monoparentales, les inactifs et les chômeurs, et environ 40 % des ménages déclarant avoir des difficultés de paiement se situent dans le premier quartile du niveau de vie (Devalière, Briant, et Arnault 2011b). Le profil retenu pour les calculs suivants sera donc une personne seule, dont le revenu sera égal à 9480 euros, correspondant au revenu annuel moyen d'une personne située dans le premier quartile des revenus (INSEE 2011). Ce ménage sera affecté à un logement collectif, dont la période de construction affiche les besoins de chauffage les plus élevés.

Affectation d'un type de logement

Un logement type sera affecté aux différentes périodes de construction afin de mesurer les différences liées

aux caractéristiques des matériaux de construction et des surfaces vitrées du logement.

TABLEAU 3 : REVENU DISPONIBLE PAR MÉNAGE SELON TRANCHE DE REVENU EN 2011

Tranche de revenu annuel	Limite supérieure de tranche en €	Revenu annuel moyen en €
Inférieur à D1	13 070	9480
De D1 à D2	16 830	15 060
De D2 à D3	20 380	18 570
De D3 à D4	24 470	22 400
De D4 à D5	29 010	26 730
De D5 à D6	34 210	31 510
De D6 à D7	40 490	37 250
De D7 à D8	48 680	44 280
De D8 à D9	62 980	54 810
Supérieur à D9		99 750

La surface habitable, le nombre de parois déperditives ainsi que les facteurs extérieurs (effet de masque, exposition des parois) seront considérés comme similaires pour chaque bâtiment, de façon à se concentrer sur les fluctuations liées aux techniques et matériaux utilisés.

Ainsi, le « logement type » soumis aux simulations des différentes époques de construction présente les caractéristiques suivantes :

- Le logement est au sein d'un bâtiment collectif, situé à un étage aléatoire. On considère que les étages supérieurs et inférieurs sont chauffés,
- Le logement présente deux parois en contact avec l'extérieur,
- La surface du logement est de 65 m², qui représente la surface moyenne des logements collectifs en France à travers les périodes de construction (INSEE 2006).

Choix de l'énergie de chauffage

Les énergies qui seront représentées ici sont l'électricité et le gaz, qui représentent respectivement 40 % et

39 % du (APUR 2007 b) des systèmes de chauffage utilisés dans l'aire d'étude.

Dans cette modélisation, le but est d'utiliser le coût de ces deux technologies pour établir la précarité des ménages étudiés en affectant l'évolution du coût chaque année d'étude. Le tableau suivant présente les différents tarifs annuels pour la période d'étude de 2008 à 2015.

TABEAU 4 : COUT DE L'ÉNERGIE EN €/KWH (EUROSTAT)

Année	Prix du Gaz naturel en €/kWh	Prix de l'électricité en €/kWh
2008	0,057 8	0,120 3
2009	0,058 3	0,120 7
2010	0,057 5	0,135
2011	0,064 6	0,142 3
2012	0,068 2	0,145
2013	0,072 9	0,158 9
2014	0,076 2	0,175 1
2015	0,073	0.1848

L'affectation des technologies de chauffage sera déterminée suivant l'étude réalisée par l'APUR, qui référence le mode de chauffage le plus représenté durant les différentes époques de construction.

La comparaison des gains économiques entre les deux périodes choisies nécessite de formuler des hypothèses quant à la tendance du prix de l'énergie jusqu'en 2020.

Le coût de l'électricité a tendance à augmenter depuis ces dernières années comme le montre le Tableau 4, et la Commission de Régulation de l'Énergie prévoit une hausse des prix pour les années à venir. Depuis 2013, le tarif réglementé subit une inflation de 2,5 % (CRE 2015). Nous appliquerons donc une augmentation similaire chaque année afin d'obtenir un coût électrique théorique de 2015 à 2020.

L'évolution du prix du gaz est difficilement prévisible, qui connaît actuellement une légère diminution, passant de 0.0762 €/kWh en 2014 à 0.0731 €/kWh en 2015. Malgré cela, la courbe de tendance globale depuis 2008 affiche une augmentation constante, qui nous permet de supposer l'évolution du coût du gaz.

TABEAU 5 : ESTIMATION DU COUT DE L'ÉNERGIE DE 2016 A 2020

Année	Prix du Gaz naturel en €/kWh	Prix de l'électricité en €/kWh
2016	0,079	0.1894
2017	0,082	0.1942
2018	0,085	0.1990
2019	0,088	0.2040
2020	0,090	0.2091

Les ponts thermiques

L'isolation thermique des bâtiments n'est jamais parfaite. Une partie des déperditions sont dues aux ponts thermiques présents à la jonction des différents plans (jonction plancher-mur par exemple). En France, la méthode pour déterminer le coefficient de transmission thermique linéaire appliqué dépend essentiellement du type de bâtiment (Erhorn-Kluttig et al., s. d.). En revanche, il est possible d'estimer ces besoins supplémentaires. Une étude relative aux traitements des ponts thermiques a pu identifier une baisse des besoins de chauffage estimée entre 11 et 24 % (Evola, Margani, et Marletta 2011).

D'autre part, une étude de performance énergétique en Grèce met en lumière l'impact des ponts thermiques sur la consommation énergétique, en comparant des méthodes qui intègrent ou non les déperditions par ces points faibles de l'enveloppe. Une hausse de 30 % en moyenne a été identifiée lorsque les ponts thermiques sont pris en compte sur ces logements anciens (Theodosiou et Papadopoulos 2008).

Dans cette étude, par manque de données précises (le calcul des ponts thermiques doit s'effectuer à l'échelle du logement), nous appliquerons un coefficient de majoration de 30 % sur les déperditions thermiques des bâtiments anciens, représentant les déperditions probables par les ponts thermiques. Cette valeur surévalue les besoins de chauffage du paysage bâti parisien sur certaines périodes, notamment entre 1850 et 1914, où les caractéristiques des bâtiments minimisaient les

ponts thermiques (APUR 2011). Néanmoins, cette majoration permet de ne pas sous-estimer la valeur des déperditions du logement.

La réhabilitation du logement

La modélisation précédente met en avant les variables exogènes qui correspondent à la rénovation énergétique. Les variables dites « leviers » correspondent aux variables qui peuvent être influencées et modifiées par la réhabilitation thermique. En revanche, il peut être question d'un traitement particulier en fonction des différentes typologies. Il est important de différencier ces deux techniques notamment avec la question architecturale où l'isolation extérieure n'est pas autorisée.

Le but de l'étude est de vérifier si une réhabilitation thermique permet de sortir de la précarité. Nous nous intéresserons donc à la réalisation d'une réhabilitation dite lourde, qui fournira la meilleure performance énergétique, en optant notamment pour une isolation par l'extérieur et une modification de la performance des vitrages.

(TRAISNEL et al. 2010) ont mis en avant les technologies les plus performantes pour des opérations de réhabilitations. Ainsi, le matériau utilisé pour l'isolation extérieure est du polystyrène extrudé couplé à un enduit pour une épaisseur de 0,15 mètre et une conductivité de 0,03 W/m.K. Les vitrages seront tous remplacés afin d'atteindre une conductance satisfaisante (coefficient $U=1,5$ W/m².K). Par conséquent, la surface de simple vitrage *Svit1* est égale à 0 tandis que la surface de double vitrage *Svit2* sera égale à toute la surface vitrée du logement. Ces variables sont présentées dans le Tableau 6.

TABLEAU 6 : VARIABLES MODIFIÉES PAR LA RÉHABILITATION THERMIQUE

Variable	Dénomination	Valeur
e_j	Épaisseur de l'isolant (m)	0,15
U_{vit2}	Conductance thermique du double vitrage (W/m ² .K)	1,5
λ_j	Conductivité thermique de l'isolant (W/m.K)	0,03

Applications

Situation des ménages avant la réhabilitation thermique

L'APUR a appliqué une méthode de classification des grandes périodes de construction, selon les techniques et les formes dominantes utilisées dans le paysage bâti parisien. Dix périodes de construction ont été choisies, chacune ayant des caractéristiques générales spécifiques.

Les logements les plus demandeurs ont été construits entre 1945 et 1974, avec des besoins de chauffage estimés à 212 kWh/m²/an (Figure 4). C'est pour ce type de logement que la déperdition énergétique par les parois est la plus élevée.

Les bâtiments de cette époque affichent des valeurs plus faibles pour l'épaisseur des murs porteurs, et des valeurs plus élevées pour la conductivité thermique, entraînant une conductance accrue, représentée par la relation fonctionnelle (8) du sous-système des besoins de chauffage.

La fine épaisseur du matériau porteur et de l'isolant (respectivement 0,25 m et 0.04m), ainsi que la conductivité plus élevée du matériau porteur augmentent de plus de 30 % la conductance totale des parois opaques par rapport aux constructions d'avant 1945, et le coefficient de déperdition thermique affiche logiquement une hausse (relation fonctionnelle (6)). L'augmentation du taux de vitrage pendant ces périodes influence également la valeur du coefficient de déperditions thermiques (7), qui se traduit par un accroissement des besoins de chauffage du logement. Les données relatives aux caractéristiques des parois, qui sont à l'origine des différences entre les besoins des périodes, sont résumées dans le Tableau 7.

Les caractéristiques des constructions à partir de 1975 sont établies à partir des normes de la Réglementation Thermique qui indique la conductance à atteindre pour les murs, peu importe leur composition (Tableau 7).

TABLEAU 7 : DONNÉES RELATIVES AUX PAROIS SELON LA PÉRIODE DE CONSTRUCTION DU BÂTIMENT — APUR, 2007

Lieu de l'étude : PARIS Surface affectée au logement (m²) : 65 Hauteur affectée au logement (m) : 3									
Période de construction du bâti	Avant 1800	1800 1850	1850 1914	1918 1939	1945 1967	1968 1974	1975 1981	1982 1989	Après 1990
Surface totale des façades (m²)	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5
Surface de parois opaques (m²)	44,4	38,85	38,85	33,3	33,3	27,75	27,75	33,3	33,3
Taux de vitrage	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4
Taux de double vitrage	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1	1	1
Surface de simple vitrage (m²)	7,77	11 655	11 655	15,54	15,54	19 425	0	0	0
Surface de double vitrage (m²)	3,33	4 995	4 995	6,66	6,66	8 325	27,75	22,2	22,2
Conductance thermique des parois vitrées simples (W/m²/K)	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95			
Conductance thermique des parois vitrées doubles (W/m²/K)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,8	2,8	1,2
Épaisseur du matériau porteur (m)	0,35	0,35	0,4	0,33	0,25	0,25			
Conductivité thermique du matériau porteur (W/m.K)	1,05	1,4	1,7	1,2	1,75	1,75			
Épaisseur de l'isolant (m)	0,06	0,06	0,06	0,03	0,04	0,04			
Conductivité thermique de l'isolant (W/m.K)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9			
Conductance des murs opaques (W/m²/K)	1,75	2,05	2,12	2,09	2,80	2,80	1,80	1,15	0,65

Soumis aux règlements et affichant des besoins de chauffage faibles, les constructions récentes ne seront pas prises en compte dans la suite de l'application.

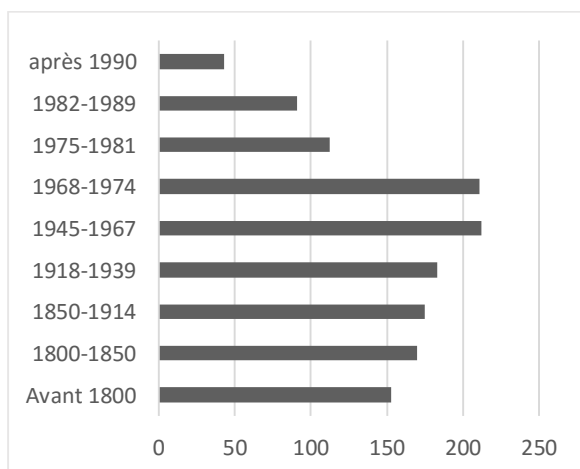


FIGURE 4 : BESOINS DE CHAUFFAGE ANNUELS DU LOGEMENT SELON LA PÉRIODE DE CONSTRUCTION DU BÂTIMENT (KWH/M²/AN)

Simulation du taux d'effort énergétique sur les constructions les plus énergivores (1945-1967)

Le taux d'effort énergétique est mesuré par rapport au logement dont les besoins de chauffage sont les plus élevés. La période de construction qui s'étale de 1945 à 1967 est majoritairement équipée de systèmes de chauffage au gaz collectif (APUR 2007a). La relation fonctionnelle (2) est donc appliquée, en entrant les valeurs du Tableau 8. La variation du coût de l'énergie résumée dans le Tableau 4 et le Tableau 5 permet d'obtenir une estimation du taux d'effort que le ménage doit fournir pour payer sa facture énergétique chaque année (Tableau 9).

TABLEAU 8 : REVENUS ANNUELS DU MÉNAGE AFFECTÉ AU LOGEMENT DE LA PÉRIODE 1945-1967

Besoins de chauffage initiaux (kWh/m ² /an)	212
Système de chauffage du logement	Gaz
Revenus annuels du ménage (€/an)	9480

TABLEAU 9 : ESTIMATION DU TAUX D'EFFORT ÉNERGÉTIQUE ANNUEL AVANT RÉHABILITATION

	Facture énergétique (€/an)	Taux d'effort
2008	1388	0,15
2009	1400	0,15
2010	1405	0,15
2011	1564	0,16
2012	1642	0,17
2013	1762	0,19
2014	1942	0,20
2015	1807	0,19
2016	1937	0,2
2017	2007	0,21
2018	2076	0,22
2019	2157	0,23
2020	2196	0,23

Sans la réhabilitation et en considérant la situation la plus défavorable, le ménage doit dépenser entre 15 % et 23 % de ses revenus pour payer sa facture énergétique chaque année. Le seuil de 10 % est donc largement dépassé.

Situation des ménages après la réhabilitation thermique

À la suite de l'intervention sur l'enveloppe des bâtiments, les besoins de chauffage du logement diminuent de manière considérable (Figure 5), grâce à la mise en place du nouvel isolant extérieur et des nouveaux vitrages.

Les variables sélectionnées agissent sur le résultat des relations fonctionnelles (8) (7) et (6). Les besoins de chauffage après l'intervention sont sept fois moins importants, avec une performance globale accrue de 85 %. Le logement le plus énergivore initialement affiche un passage de 212 kWh/m² — à moins de 30 kWh/m² — en ce qui concerne les besoins annuels.

Cela s'explique par l'isolant choisi, trente fois plus performant et quatre fois plus épais, ainsi qu'un taux de double vitrage de 100 % (contre 30 % avant la réhabilitation). L'isolation par l'extérieur permet également de diminuer, voire supprimer les ponts thermiques (APUR 2011).

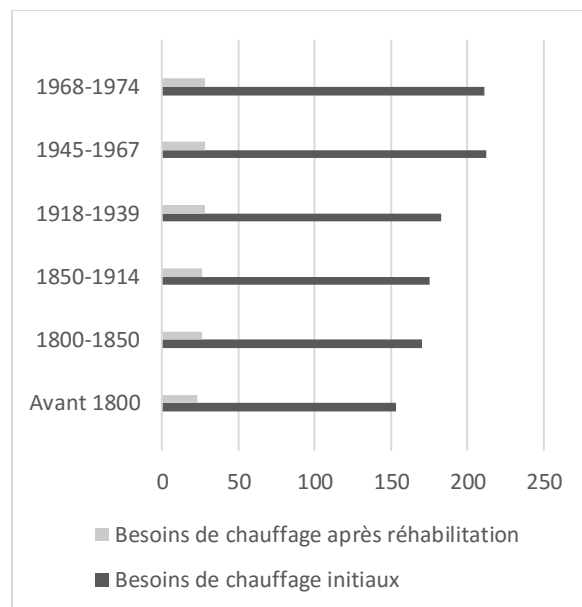


FIGURE 5 : COMPARAISON DES BESOINS DE CHAUFFAGE PAR PÉRIODE DE CONSTRUCTION AVANT ET APRÈS RÉHABILITATION

Simulation du taux d'effort énergétique après réhabilitation sur les constructions les plus énergivores (1945-1967)

La simulation permet d'obtenir le taux d'effort énergétique année par année, après la réhabilitation thermique. On considère que les revenus du ménage et le système de chauffage ne varient pas. Seuls les besoins de chauffage diminuent grâce à l'intervention sur l'enveloppe du bâtiment (Tableau 10).

TABLEAU 10 : REVENUS ANNUELS DU MÉNAGE AFFECTÉ AU LOGEMENT RÉHABILITÉ

Besoins de chauffage finaux (kWh/m ² /an)	28
Système de chauffage du logement	Gaz
Revenus annuels du ménage (€/an)	9480

TABLEAU 11 : ESTIMATION DU TAUX D'EFFORT APRÈS RÉHABILITATION THERMIQUE

	Facture énergétique (€/an)	Taux d'effort
2008	401	0,04
2009	403	0,04
2010	423	0,04
2011	460	0,05
2012	478	0,05
2013	516	0,05
2014	576	0,06
2015	558	0,06
2016	587	0,06
2017	605	0,06
2018	624	0,07
2019	685	0,07
2020	658	0,07

Les résultats du Tableau 11 montrent que le taux d'effort diminue de manière significative après les travaux de réhabilitation du logement, puisque le ménage n'est plus en situation de précarité énergétique, peu importe l'année simulée. La part du revenu consacrée à la facture énergétique est en moyenne trois fois moins élevée après la réhabilitation thermique.

Dans cette situation, l'amélioration physique de l'habitat permet à un ménage défavorisé de sortir de la précarité énergétique.

Comparaison des gains économiques entre deux scénarios

La réhabilitation thermique offre un meilleur confort économique aux ménages qui devaient dépenser une somme d'argent trop importante à cause d'un logement peu performant. Grâce aux rénovations entreprises sur l'habitat, les gains économiques sont considérables, comme le suggère la Figure 6. Ces gains sont néanmoins tributaires de l'évolution du coût de l'énergie, qui borne la réduction des coûts liés au chauffage. Ainsi, il est possible de mesurer à quel moment la réhabilitation est la plus intéressante financièrement. Ainsi deux périodes d'étude ont été sélectionnées (Tableau 12) afin de mettre en évidence l'influence du coût de l'énergie sur les économies réalisées à la suite de la rénovation du logement.

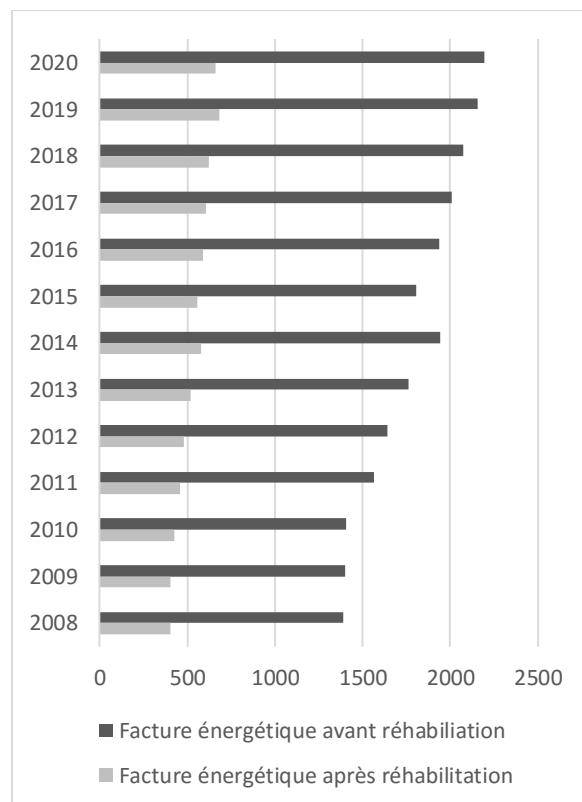


FIGURE 6 : COMPARAISON DES FACTURES ÉNERGÉTIQUES (EN €) DU MÉNAGE AVANT ET APRÈS RÉHABILITATION

En considérant que la réhabilitation thermique du logement est réalisée au début des deux périodes d'études, le gain économique est alors plus important sur la période 2015-2020. Si les factures énergétiques de cette période sont 20 % plus élevées que celles de la période 2008-2015, la différence affichée entre les coûts avant et après l'amélioration de l'habitat est également accrue. Ainsi, le ménage économise 1693€ par an sur sa facture s'il rénove son logement en 2015, et 1137€ par an s'il rénove son logement en 2008.

TABLEAU 12 : COMPARAISON DES GAINS ÉCONOMIQUES SELON LA DATE DE RÉHABILITATION

Période	Gains économiques (€)	Gains annuels (€/an)
Période d'étude 2008-2015	9095	1137
Période d'étude 2015-2020	8463	1693

Discussion

La précarité énergétique est traduite dans la littérature suivant une part des revenus d'un ménage allouée à la facture énergétique. Si cette dernière dépasse les 10 %, le ménage est considéré comme précaire. Cette étude traite de l'amélioration de l'habitat comme solution technique pour descendre en deçà de ce seuil et ne plus faire partie des ménages énergétiquement précaires.

Ce papier s'attache à retranscrire le réel sous forme d'une modélisation, cependant des limites ont pu être identifiées, notamment dues à l'imprécision d'une macro-représentation. En effet, des variables ont été traitées sous forme de coefficients constants puisqu'il n'a pas été possible de les développer. La réhabilitation thermique s'applique à l'échelle d'un bâtiment, et même si les résultats sont intéressants et prouvent une amélioration possible des conditions de vie, une étude plus localisée serait pertinente. De cette façon, les données relatives à l'environnement du logement pourraient être appliquées, et l'estimation des ponts thermiques serait plus précise. L'application de ce modèle met en place un coefficient qui majore les déperditions thermiques de façon à considérer une surconsommation plutôt qu'une sous-consommation. Cependant, chaque type de bâtiment nécessite un coefficient qui lui est propre comme l'indique la réglementation.

La surface habitable du logement a été choisie selon une moyenne nationale sur plusieurs décennies, jouant de manière significative sur les coûts de chauffage. N'ayant pas de données pertinentes sur une telle aire d'étude, les déperditions par le sol et le toit n'ont pas été modélisées.

Cette étude se base sur deux types d'énergie pour le chauffage. Même si elles représentent une grande partie des logements parisiens d'autres ressources sont présentes. C'est pourquoi il serait nécessaire d'avoir un regard sur l'ensemble des moyens de chauffage et de leurs évolutions. De même que le coût des différentes énergies, l'évolution des technologies peut s'ajouter

aux progrès réalisés grâce à la rénovation de l'enveloppe, en optant pour des systèmes de meilleurs rendements, des économiseurs d'eau, des éclairages économes, etc.

Le coût de l'énergie évolue au fil des ans cependant il est difficile d'avoir des prévisions précises sur le comportement de ce marché à l'échelle résidentielle. Dans le cadre de cette étude, des tendances ont été étudiées suivant les évolutions des précédentes années et des données de la CRE. Une recherche plus approfondie sur les prévisions énergétiques pourrait faire valoir un meilleur point de vue sur la précarité énergétique des ménages dans les prochaines années.

Dans cette étude, le temps est pris en compte suivant le cours de l'énergie. Une autre variable pourrait prendre en compte cette temporalité, les degrés heure de la zone géographique *DH* donnent les écarts de températures tout au long de l'année par rapport à la température intérieure requise pour avoir un confort adéquat. D'une année à l'autre, ces écarts peuvent différer et avoir un tout autre impact sur la facture énergétique des ménages. Il serait alors question d'avoir une valeur pour chacune des années traitées et d'avoir un calcul qui prend en compte ces changements météorologiques.

Conclusion

Dans une période où l'économie d'énergie est un objectif majeur, le secteur du bâtiment se doit d'évoluer, de façon à réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais également de soulager les ménages étouffés par des factures trop importantes.

La précarité énergétique dépend de différents facteurs comme la consommation énergétique, le coût de l'énergie et le revenu des ménages. Ce papier s'attache au premier facteur et tente de vérifier si une réhabilitation permet des économies d'énergie et d'argent considérables pour les ménages.

Les résultats de l'étude montrent que l'amélioration de l'habitat peut être un levier adéquat pour s'attaquer à la précarité énergétique. La réhabilitation lourde telle qu'une opération d'isolation thermique par l'extérieur et une modification des vitrages permet à des logements énergivores de diminuer grandement les consommations en chauffage et par conséquent la facture énergétique. Ainsi le taux d'effort énergétique passe pour l'année 2015 de 19 % à 6 % pour les logements parisiens de la période de construction 1945-1967, identifiée initialement comme la période la plus demandeuse en termes de besoins de chauffage. En revanche, cette étude s'est basée sur un type d'isolation qui comporte des contraintes au niveau de leur installation dans un tel milieu. En effet, des réglementations architecturales peuvent être en vigueur rendant difficiles les isolations extérieures. Une isolation par l'intérieur serait alors de mise, mais qui ne permettrait pas de réduire les ponts thermiques de façon significative. Un travail devra être fait dans ces cas-là pour réduire les déperditions.

Malgré la réhabilitation énergétique du logement, la hausse des prix de l'électricité mène le ménage à repasser au-delà du seuil de précarité. Ce phénomène peut s'apercevoir avec les gains économiques apportés par la réhabilitation. En effet, l'étude des deux périodes de rénovation met en avant une augmentation de près de 20 % pour la période 2015-2020.

Cette étude nous permet alors de mettre en avant que la diminution des consommations en chauffage n'est pas le seul levier sur lequel il faut jouer pour lutter la précarité énergétique sur le territoire français. Au-delà de la réhabilitation, le problème qui ressort de l'étude de la précarité énergétique n'est plus une solution technique, mais sociale qui doit traiter des coûts de l'énergie et des revenus français.

Références

- APUR. 2007a. « Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes ». Paris. <http://www.apur.org/etude/consommations-energie-emissions-gaz-effet-serre-liees-chauffage-residences-principales-parisie>.
- . 2007 b. « Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes ». Paris. <http://www.apur.org/etude/consommations-energie-emissions-gaz-effet-serre-liees-chauffage-residences-principales-parisie>.
- . 2011. « Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914 ». http://www.apur.org/sites/default/files/documents/APAPU240_03.pdf.
- CLIP. 2007. « Pompes à chaleur et habitat ». Les cahiers du CLIP. http://www.iddri.org/Publications/Les-cahiers-du-CLIP/clip_18.pdf.
- CRE. 2015. « Observatoire des marchés de l'électricité et du gaz naturel ». <http://www.cre.fr/media/fichiers/marches/consulter-l-observatoire-des-marches-de-detail-du-4e-trimestre-2015>.
- Devalière, Isolde, Pierrette Briant, et Séverine Arnault. 2011a. « La précarité énergétique : avoir froid ou dépenser trop pour se chauffer », mai. <http://www.epsilon.insee.fr:80/jspui/handle/1/2942>.
- . 2011 b. « La précarité énergétique : avoir froid ou dépenser trop pour se chauffer », mai. <http://www.epsilon.insee.fr:80/jspui/handle/1/2942>.
- DPE. 2012. « Annexe 1 — Méthode 3CL-DPE v1.3 ».
- Erhorn-Kluttig, Heike, Hans Erhorn, Marco Citterio, Manuela Cocco, Dirk Van Orshoven, et Antoine Tilmans. s. d. « Thermal Bridges in the EPBD context ». http://www.builddup.eu/sites/default/files/content/Erhorn-Kluttig_Thermal%20Bridges%20in%20the%20EPBD%20context_29_07_09.pdf.
- Evola, G., G. Margani, et L. Marletta. 2011. « Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate ». *Energy and Buildings* 43 (9): 2385- 93. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.028. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002428#bib0015?np=y>
- Fabbri, Kristian. 2015. « Building and Fuel Poverty, an Index to Measure Fuel Poverty: An Italian Case Study ». *Energy* 89 (septembre): 244- 58. doi:10.1016/j.energy.2015.07.073. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215009688>
- Imbert, Ines, Patrice Nogues, et Marie Sevenet. 2016. « Same but Different: On the Applicability of Fuel Poverty Indicators across countries—Insights from France ». *Energy Research & Social Science* 15: 75-85. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629616300305?np=y>
- INSEE. 2006. « 50 ans d'évolution des conditions des ménages ». *Données sociales, la société française*, 467-73.
- . 2011. « Insee — Distribution du revenu salarial annuel par sexe ou catégorie socioprofessionnelle sur l'ensemble des salariés en 2011 ». http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATSEF04142.
- Lacroix, E., et C. Chaton. 2015. « Fuel Poverty as a Major Determinant of Perceived Health: The Case of France ». *Public Health* 129 (5): 517-24. doi:10.1016/j.puhe.2015.02.007. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0033350615000566>
- Lawson, Rob, John Williams, et Ben Wooliscroft. 2014. « Contrasting Approaches to Fuel Poverty in New Zeland ». *Energy Policy* 81: 38-42. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515000725>

- Legendre, Bérangère, et Olivia Ricci. 2015a. « Measuring Fuel Poverty in France: Which Households Are the Most Fuel Vulnerable? » *Energy Economics* 49: 620-28. doi:10.1016/j.eneco.2015.01.022. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988315000390>
- . 2015b. « Measuring Fuel Poverty in France: Which Households Are the Most Fuel Vulnerable? » *Energy Economics* 49: 620-28. doi:10.1016/j.eneco.2015.01.022. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988315000390>
- Moore, Richard. 2012a. « Definitions of Fuel Poverty: Implications for Policy ». *Energy Policy* 49 (octobre): 19-26. doi:10.1016/j.enpol.2012.01.057. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512000833>
- . 2012b. « Definitions of Fuel Poverty: Implications for Policy ». *Energy Policy*, Special Section: Fuel Poverty Comes of Age: Commemorating 21 Years of Research and Policy, 49 (octobre): 19-26. doi:10.1016/j.enpol.2012.01.057. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512000833>
- Theodosiou, T. G., et A. M. Papadopoulos. 2008. « The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions ». *Energy and Buildings* 40 (11): 2083-89. doi:10.1016/j.enbuild.2008.06.006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808001321>
- Thomson, Harriet, et Carolyn Snell. 2012. « Quantifying the Prevalence of Fuel Poverty across the European Union ». *Energy Policy* 52: 563-72. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512008671>
- TRAISNEL, Jean-Pierre, Damien JOLITON, Marie-Hélène LAURENT, Sylvie CAFFIAUX, et Anthony MAZZENGA. 2010. « Habitat Fac-teur 4 ». 20. http://www.iddri.org/Publications/Les-cahiers-du-CLIP/Clip20_fr.pdf.
- Waddams Price, Catherine, Karl Brazier, et Wenjia Wang. 2011. « Objective and Subjective Measures of Fuel Poverty ». *Energy Policy* 49: 33-39. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512000882>
- Walker, Ryan, Paul McKenzie, Christine Liddell, et Chris Morris. 2014a. « Estimating Fuel Poverty at Household Level: An Integrated Approach ». *Energy and Buildings* 80: 469-79. doi:10.1016. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881400485X>
- . 2014b. « Estimating Fuel Poverty at Household Level: An Integrated Approach ». *Energy and Buildings* 80: 469-79. doi:10.1016. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881400485X>

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et So-
ciétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Pay-
sage,
Environnement



35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
MAIZIA Mindjid

LAMBERT Antoine
URIOS Kevin
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2015-2016

La précarité énergétique et l'amélioration de l'habitat

Résumé :

La précarité énergétique est un concept qui a été repris et défini dans le début des années 1990 au Royaume Uni. Ainsi, si un ménage dépense plus de 10 % de ses revenus annuels dans l'énergie, il est considéré comme précaire. C'est un phénomène qui touche de plus en plus de ménage français. En 2006, près de 3,8 millions de ménages sont considérés comme précaire au point de vue énergétique. Cette étude s'attarde sur la mise en place d'une solution physique pour qu'un ménage puisse sortir de la précarité énergétique.

L'étude met en place une modélisation du taux d'effort énergétique en fonction des revenus d'un ménage, des consommations du logement et du coût de l'énergie. Dans ce papier, les consommations du logement sont mesurées à partir d'une étude de l'APUR concernant les besoins de chauffage des bâtiments parisiens en fonction de leur période de construction. Une solution technique qui se traduit par une réhabilitation thermique de l'enveloppe du logement est alors envisagée, afin de mesurer l'impact d'une telle intervention sur les performances du logement et la facture énergétique du ménage. Une comparaison entre deux scénarios temporels sera effectuée de manière à savoir si la réhabilitation du logement permet au ménage de sortir de la précarité énergétique, et si la date de réhabilitation joue un rôle déterminant dans les gains économiques réalisés par le ménage.

Mots Clés : Précarité énergétique, réhabilitation thermique, besoins de chauffage

