

Habiter sous contrainte carbone en 2050 :
hypothèses sur le confort

Rapport final
Edition revue et augmentée

13 MARS 2012

PROGRAMME

« Repenser les villes dans une société post-carbone »

Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

DGALN / Plan Urbanisme Construction Architecture

MAPA n° D 09.02 (0901821) du 01 juillet 2009

titulaire : Dominique Theile

Sommaire

Introduction.....	1
I/ Confort thermique et disponibilité en espace habitable.....	5
A/ La « thermo-rénovation » des murs : quelle ampleur ?.....	5
Quels logements prendre en considération ?.....	5
Délimitation par date d'achèvement et réglementation thermique afférente :.....	7
L'effectivité de l'application des réglementations thermiques :.....	10
Comportement thermique des constructions achevées avant 1969.....	13
Environ 15,7 millions de logements concernés par l'épaississement mais de fortes incertitudes.....	17
Conclusion du chapitre A :.....	20
B/ Quelle rencontre entre rénovation thermique, conditions et comportements ?.....	21
Rénovation thermique et systèmes de valeur liés aux bâtiments.....	21
« Green-value » versus perte en espace habitable :.....	25
Rénover en isolant par l'intérieur : réduire et-ou réallouer l'espace habitable.....	27
Rénover en isolant par l'extérieur : pousser les murs.....	33
Quelles inégalités des populations et territoires ?.....	36
Impact des épaisseurs d'isolant thermique sur les surfaces habitables et urbaines.....	36
La rénovation énergétique : une chausse-trappe dans les trajectoires résidentielles ?.....	40
Simulation thermique et aides à la rénovation thermique.....	44
Des incitations à ne pas isoler les murs.....	45
Rénover est peu compatible avec vendre, sauf sur les biens très valorisés.....	50
La question de l'adéquation des pratiques de travail à la rénovation thermique.....	56
Quel effort de construction et rénovation ?.....	56
Quel effort de formation ?.....	59
Artisans et effet d'opportunité : impact sur les malfaçons et les inégalités.....	62
Les évolutions des procédés d'isolation :.....	65
Conclusion de la Première Partie :.....	71

II/ Confort lié aux NTIC et consommation électrique	75
A/ Les nouvelles électrifications de l'habitat :	75
L'électrification de l'habitat :	75
Les efforts des fabricants pour diminuer les consommations électriques	79
Un déphasage entre efforts pour les bâtiments et efforts pour les équipements.....	79
Plus efficace mais pas plus sobre : illustration avec des lave- linge	82
Si ce n'est pas plus grand, c'est plus petit mais avec plus d'usages.....	85
Conclusion du chapitre A :	89
B/ Du wattmètre au paramétrage du confort : de la place pour la sobriété ?	90
De sérieuses difficultés dans la mesure, liées à un matériel pas assez précis :	90
Des résultats qui tendent à noircir le scénario ouvrant ainsi des pistes de pondération :	92
Résumé de mesures : il y a bien boîte noire donc tout est possible !	97
Où vont passer les économies de chauffage ?	100
Quelles économies de chauffage ?	100
De la destinée des économies : entre rebonds, tolérances et visibilité	103
Extérieur, intérieur : les évolutions du concept de confort.....	108
L'alimentation électrique de charges thermiques complexes.....	111
Facteur de puissance :	112
De l'effet joule dans les apports internes pour le paramétrage des besoins d'énergie	116
Des besoins d'énergie paramétrés sur des apports à charges thermiques complexes.....	119
Conclusion de la Seconde Partie :	125
Conclusion générale.....	127
Repousser l'isolation des murs au risque de ne jamais les isoler	127
Une rénovation thermique avec fort épaissement des murs est-elle pertinente ?	129
Conditionnement des comportements moyens et limites des bâtiments intelligents.....	131
Bibliographie	134
Illustrations, tableaux, encadrés, graphiques	141

INTRODUCTION

Nous proposons une prospective à 40 ans de l'interaction entre évolution du confort et urbanisation sous contrainte carbone, dans un scénario de forte action sur l'habitat et l'infrastructure sans maîtrise urbaine :

- l'éventuelle modification des exigences de confort liées à l'espace habitable sous l'effet de l'exigence réglementaire thermique ;
- l'impact de l'émergence de nouvelles exigences de confort (nouvelles technologies de l'information et de la communication) sur l'applicabilité de l'exigence réglementaire thermique.

La méthode de recherche consiste à :

- se placer dans le contexte d'une transition post-carbone de forte action sans maîtrise urbaine (famille deux des scénarii de l'appel à projet Ville post Carbone) ;
- élaborer des hypothèses catastrophe au niveau de l'impact des épaisseurs d'isolants, d'une part, de l'évolution de la consommation électrique des ménages, d'autre part ;
- établir l'éventail des possibles entre ces extrêmes au regard des probables évolutions techniques et comportementales à 40 ans ;
- cartographier les conditions favorables et défavorables à l'avènement de ces possibles.

Dans ce rapport final, nous avons poursuivi et consolidé le travail d'accumulation et d'ordonnement de données permettant de bâtir les scénarii extrêmes et l'éventail des possibles les plus probables. Le travail produit relève beaucoup plus de la quête multidirectionnelle par essais et erreurs, que du déroulement linéaire d'une méthodologie détaillée en projet initial. Et notre perception actuelle n'est plus exactement la même que celle qui a conduit l'élaboration du projet, puisqu'elle s'est nourrie entre-temps d'une masse considérable de documents, mesures et observations. Et ce que nous avons initialement bâti comme des hypothèses extrêmes ne nous apparaît plus comme vraiment extrême.

Concernant l'exigence réglementaire thermique, nous avons fait l'hypothèse que l'incapacité à recourir à l'isolation extérieure obligeait à recourir à l'isolation intérieure sur la base des performances actuelles des isolants conventionnels, ou à ne pas isoler. Or il apparaît que l'exigence réglementaire thermique, dans sa récente évolution en ce qui concerne l'existant, donne une relative possibilité de ne pas isoler.

En effet, la correction thermique, qui était plutôt connotée amateurs de vieilles pierres soucieux d'écologie, est désormais réglementairement promue, au travers de l'arrêté du 03 mai 2007 désormais applicable à l'ensemble de l'habitat existant. Cette réglementation est applicable dès lors que des travaux de rénovation sont entrepris. S'il s'agit de travaux de rénovation lourde pour plus de 1 000 m² de SHON sur un bâtiment construit après 1947 c'est la performance globale du bâtiment qui est prise en compte. Dans tous les autres cas, c'est une performance élément par élément qui est considérée : il est possible de ne pas isoler une paroi opaque (dès lors qu'on ne la rénove pas) et de compenser thermiquement par ailleurs, y compris sur d'autres parois opaques.

En rénovation, la correction thermique est peut-être en passe de devenir une alternative d'importance au regard de l'isolation par l'intérieur et de l'isolation par l'extérieur. D'un point de vue trajectoires technologiques cette tendance risque de se traduire par un moindre investissement sur l'obstacle de l'épaisseur d'isolants de paroi pour davantage investir en toiture, vitrages, chauffage... Nous aurons l'occasion de vérifier que cette tendance est vivement encouragée par les modalités actuelles d'attribution du crédit d'impôt au développement durable.

Mais n'est-ce pas déplacer le problème pour aboutir à la même impasse ? Car les épaisseurs en toiture, les vitrages, les systèmes de chauffage ont aussi leurs limites. Et le concept de bâtiment à énergie positive est fortement dépendant des conditions de rachat de l'électricité à défaut d'avancées substantielles dans les solutions de stockage électrique : quelque soit le prix des énergies, ce concept est inopérant s'il n'est pas possible d'utiliser l'énergie produite (transfert au réseau, consommation propre ou stockage).

En d'autres termes, si l'assouplissement réglementaire thermique donne plus de marges de manœuvre il augmente aussi les risques de dérapages par rapport à l'objectif facteur 4. Or dans le même temps, le scénario d'une incapacité à freiner les consommations liées à la diffusion de l'électroménager, en particulier audiovisuel-informatique-téléphonie, est devenu moins improbable.

En effet, l'INSEE a récemment publié une étude sur les consommations énergétiques des français sur 20 ans, montrant qu'en dépit des efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique, l'effort énergétique des ménages a peu varié, notamment en raison de l'augmentation de la surface des logements et de leur niveau d'équipement électrique qui génèrent une augmentation de la consommation d'énergie. L'équipement électrique des ménages s'est substantiellement étoffé au regard de ce qu'il était en 1985 et ça ne semble pas près de s'arrêter.

En France, 8,5 millions de téléviseurs ont été vendus en 2010, sachant que près de 7,5 millions se sont vendus en 2009, et que le SIMAVELEC s'attendait à encore mieux en 2011. Certes il y a un effet « *coupe du monde* » et « *passage au tout numérique* », mais ce faisant la taille moyenne des écrans augmente et donc les consommations aussi, en dépit des efforts effectués pour améliorer l'efficacité énergétique des téléviseurs. Qui plus est, de plus en plus de téléviseurs sont utilisés en association avec un abonnement « triple play ». Si on remplace un téléviseur « ancien » à écran CRT de 51 cm par le téléviseur à la meilleure notation environnementale du catalogue FNAC 2010, soit un écran LED de 102 cm, associé à une Freebox, la consommation annuelle fait plus que doubler, passant de 141 kWh à 296 kWh par an¹ !

Faut-il alors choisir entre se chauffer et regarder la télévision ? Revenons d'environ un million d'années en arrière, date estimée de l'apparition des premières habitations du genre humain : il n'y a pas de chauffage,

¹ Téléviseur CRT Saba 51 T831 et TFT Sharp LC40LE600 pour moyenne de fonctionnement de 5h39 par foyer et par jour (18h21 de veille). Sur cette base, nos mesures révèlent qu'un téléviseur Philips Z1PT5507/01 d'environ 70 cm + adaptateur TNT consomme environ 140 kWh/an, et un téléviseur Thomson (10 ans d'âge) 80 cm + adaptateur TNT + veille magnétoscope 236 kWh/an.

et pour cause, car la maîtrise du feu daterait d'il y a environ 400 000 ans. Et si un isolement géographique, suite à refroidissement climatique, semble avoir favorisé l'émergence d'une variante du genre humain en Europe (homme de Néanderthal), c'est une autre variante issue de climats plus tempérés qui s'impose sur toute la surface du globe (*homo sapiens sapiens*).

Or, il faut attendre l'épisode climatique dit du « *petit âge glaciaire* » (de 1550-1580 à environ 1850-1860) pour que la pratique du chauffage de l'habitation commence à se répandre chez *homo sapiens sapiens* : jusque là, en Europe, le principal combustible utilisé dans les habitations, le bois, est surtout utilisé pour la cuisson. Et si la pratique du chauffage se généralise peu à peu elle reste cantonnée à certaines heures et certaines pièces (flambées, bassinoires, braséros...)². Et si à l'exposition universelle de 1855 est présenté le principe du chauffage central, il n'en va pas moins que c'est bien après la fin du « *petit âge glaciaire* » que celui-ci se généralise. A vrai dire, les pratiques actuelles de chauffage en France n'ont guère plus de 50 ans.

Les approches normatives du confort qui sous-tendent la réglementation thermique française sont démenties par l'histoire et les pratiques de confort thermique : environ deux tiers de la population humaine mondiale consomme de l'énergie pour cuisiner et s'éclairer et pas ou peu pour se chauffer, et chez les Inuits le feu est réservé à l'éclairage voire peut ne pas exister [Lieberherr]. Ceci dit, quelle proportion de la population française, en dehors des « *sans domicile fixe* », pourrait durablement se passer aujourd'hui d'une télévision, d'un réfrigérateur ou d'un lave-linge ? Dont l'histoire pèse si peu dans la durée au regard de ce que représentent un couteau (trancher) ou un marteau (percuter), dans le quotidien domestique ?

Habiter sous contrainte carbone signifie ni plus ni moins que : comment atteindre un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre (division par quatre, par exemple) sans remettre en question l'autosatisfaction retirée du rapport avec l'environnement physique immédiat, par le truchement d'artefacts facilement accessibles, dès lors que l'on en a les moyens monétaires ? Autrement dit, comment « décarboner » notre confort sans le remettre en cause sachant qu'il est le moteur de l'économie de biens et services qui nous permet de vivre ?

Pour ce qui est de l'habitat la réponse est la réglementation thermique, par l'amélioration concomitante du comportement thermique de l'enveloppe et du rendement énergétique des équipements. Sauf que les comportements réels des occupants sont loin d'être similaires aux ratios utilisés dans les calculs réglementaires, tels que chauffer à 19° C le jour et 16° C la nuit. Et plus les objectifs seront ambitieux, dans la transition vers des villes énergétiquement sobres, plus la réglementation thermique devra réduire au plus tôt l'écart avec les comportements des habitants. Le présent travail est donc une contribution à une réduction entre la réglementation et les usages : prise en compte des comportements au regard de l'espace habitable et des stratégies d'investissement afférentes ; prise en compte des sollicitations en provenance des marchands d'artefacts (achats d'appareils électriques et comportements afférents).

² Sur la base d'une conversation avec Mme Andrée Corvol-Dessert, spécialiste en histoire du boisement.

Encadré n° 1 : réglementation thermique pour l'existant et correction thermique

Par l'entremise d'une série de décrets publiés en 2007 et 2008, le code de la construction impose le respect d'une réglementation thermique à la quasi-totalité des bâtiments existants³, tout au moins résidentiels et en France métropolitaine, dès lors que des travaux de rénovation sont entrepris. Cette réglementation impose une performance énergétique globale pour les bâtiments de plus de 1 000 m² SHON, à date d'achèvement de construction postérieure au 01 janvier 1948, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants (coût des travaux sur l'enveloppe, équipements de chauffage, ECS, refroidissement, ventilation, éclairage ou équipements à énergie renouvelable, dépassant 25% de la valeur du bâtiment). Dans tous les autres cas, c'est une réglementation éléments par éléments qui s'impose, à savoir que dès lors qu'un élément est installé ou remplacé il doit être conforme à des caractéristiques thermiques et énergétiques minimales (seulement pour l'enveloppe, le chauffage, l'ECS, le refroidissement, l'utilisation d'énergies renouvelables, la ventilation et l'éclairage).

La correction thermique consiste à faiblement isoler voire ne pas isoler du tout certaines parois et à tenter de compenser en surinvestissant sur d'autres postes conditionnant la performance énergétique du bâtiment existant : vitrages, toiture, chauffage... A mesure que la réglementation thermique se renforçait cette pratique devenait impossible là où s'appliquait la réglementation thermique (le permis de construire), et devenait donc une pratique hors réglementation thermique. La réglementation thermique sur l'existant l'intègre donc, tout en limitant ses possibilités.

Certes, pour du résidentiel, le recours à la correction thermique est impossible en réglementation globale, où les parois verticales opaques doivent être au minimum conformes à la RT 2005 (R de 2,5 à 2,8 selon l'altitude). De même, en réglementation éléments par éléments, s'il y a rénovation des parois verticales opaques celles-ci doivent respecter un R d'au moins 2,3 m²K/W. Toutefois il y a des dérogations qui autorisent le recours à des valeurs qui s'approchent de la correction thermique en réglementation éléments par éléments : la résistance thermique minimale peut être réduite à 2 m²K/W dans le sud de la France (zone H3 à moins de 800 mètres), ou lorsque le système constructif est une double peau métallique, ou, et c'est important, lorsque « *les travaux d'isolation entraînent une diminution de la surface habitable des locaux concernés supérieure à 5 % en raison de l'épaisseur de l'isolant* »⁴.

Et surtout, en réglementation en élément par élément, dès lors que l'on ne touche pas aux parois opaques, il y a totale liberté d'effectuer de la correction thermique, au sens d'une recherche d'une performance énergétique la plus élevée possible sur les autres postes pour tenter de compenser les insuffisances de l'isolation des parois opaques. Bien plus, il est possible d'isoler la toiture sans devoir toucher aux parois verticales, et peut-être même possible d'isoler un mur sans isoler les murs adjacents⁵.

Il est à noter qu'avec cette évolution réglementaire thermique, le code de la construction ne se limite plus seulement aux travaux soumis à permis ou autorisation, mais s'applique désormais à tous les travaux affectant l'efficacité énergétique, les dates de prise d'effet s'appuyant sur les acceptations de devis ou les factures d'acquisition. Ainsi, la réglementation thermique élargi considérablement son champ d'action (tous travaux affectant l'efficacité énergétique générant des factures), mais ce faisant assoupli sa doctrine en n'associant plus systématiquement respect de la réglementation thermique et augmentation des résistances des parois verticales opaques (et donc de leur épaisseur).

Nonobstant, le DPE (diagnostic de performance énergétique) peut sembler limiter fortement le recours à la correction thermique. Mais ce n'est possible qu'à partir du moment où le DPE est une incitation à fortement isoler l'enveloppe, ce qui, pour le moment, est très loin d'être le cas. Qui plus est rénover en isolant fortement l'enveloppe est augmenter la probabilité de recours à la correction thermique sur le geste de rénovation suivant, étant donné que les gains d'efficacité énergétique par pose d'isolant thermique sont beaucoup plus important sur des parois non isolées que sur des parois fortement isolées.

³ Il semblerait que les bâtiments indépendants de surface hors œuvre brute de moins de 50 m² ne sont pas concernés.

⁴ Article 3 de l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants (JO du 17/05/2007). Soit un Ubat (coefficient de déperdition thermique, l'inverse de R) de 0,5 W/m²K, très proche de l'exemple de 0,49 W/m²K d'une correction thermique associant 6 cm d'isolant par l'extérieur à 6 cm d'isolant par l'intérieur figurant dans [Oliva & Courgey p. 159]. Ces exemples, ibid., de correction thermiques ne sont donc pas conformes à la réglementation sur l'existant pour de l'usage résidentiel.

⁵ C'est l'interprétation qui semble possible de l'article 3 de l'arrêté du 3 mai 2007 cité, qui raisonne paroi par paroi.

I/ CONFORT THERMIQUE ET DISPONIBILITE EN ESPACE HABITABLE

A/ La « thermo-rénovation » des murs : quelle ampleur ?

Pour pouvoir déterminer l'éventuel impact de la rénovation thermique sur la surface habitable de logements encore faut-il savoir quels sont les logements concernés par une rénovation thermique, d'une part, et quel peut être l'impact de cette rénovation sur l'enveloppe, d'autre part. Donc mettre en relation la date d'achèvement du logement avec la réglementation thermique en vigueur à l'époque d'achèvement. Mais aussi s'intéresser aux aides publiques susceptibles d'inciter à renforcer thermiquement l'enveloppe.

5

Dans l'absolu, il serait possible, avec des données longue série sur les dates de livraison de logement neufs et l'histoire de l'art constructif du patrimoine bâti, d'avoir une estimation fine, y compris au niveau local, de l'effort d'isolation à effectuer, par année d'achèvement du logement. Dans les faits, accéder aux données longue série est plus compliqué que prévu. Autant il est aisé d'accéder à des données récentes, sur le site Internet INSEE, autant il est compliqué d'obtenir des données longue série sur les labels HPE ou les livraisons de chantiers, même pour des données globales au niveau de la France métropolitaine.

Quels logements prendre en considération ?

La réglementation thermique n'est applicable qu'à la France Métropolitaine (96 départements). Certes une réglementation spécifique, la RTAA DOM, a été promulguée en 2009, mais elle ne serait applicable qu'aux projets de construction à demande de permis de construire, ou à déclaration préalable, déposée après le 1^{er} mai 2010. Qui plus est, concernant l'isolation thermique la seule obligation est d'être sous une valeur du « Facteur Solaire » : norme qui, pour les murs, est facilement respectée avec un mur en parpaing standard de 20 cm d'épaisseur pour peu qu'il soit peint avec une couleur claire. Les départements d'outre-mer ne sont donc pas du tout concernés par un éventuel impact de la réglementation thermique sur la surface habitable, du moins pas dans une optique de renforcement de l'épaisseur d'isolant thermique.

Pour cette raison, nous ne retenons que les données relatives aux logements de la France Métropolitaine. Sur la base des données INSEE 2006 on aurait plus de 31 millions de logements. Si on agrège les logements mis en chantier de 2006 à 2009, soit 1,6 millions de logements (données SOeS), on aurait près de 32,7 millions de logements. Mais nous avons eu des problèmes d'accès aux données sur la construction de logements⁶. Nous avons donc choisi de nous centrer sur les chiffres 2006 de l'INSEE.

La rénovation thermique ne se traduit pas nécessairement par un épaississement des parois opaques. En effet, les aides à la rénovation thermique sont centrées sur le binôme enveloppe + équipements de

⁶ Le site <http://sitadel.application.equipement.gouv.fr> pratique la maintenance perpétuelle. Il y a des données qui précisent la destination (résidence principale...) des logements mis en chantier sur le site INSEE, mais elles s'arrêtent à 2007.

production et/ou conversion d'énergie. Un bâtiment peut se concevoir, dans le contexte de l'archétype architectural dominant en France métropolitaine, comme une combinaison de parois opaques et de parois non opaques. Celles-ci se répartissent entre parois verticales (murs, cloisons, huisseries...) et parois horizontales (toitures, planchers, huisseries...). Les aides sur les parois ne concernent que l'enveloppe, à savoir que les parois en contact avec l'extérieur (murs, toitures, huisseries...) ou supposées telles (planchers de combles perdus, plancher bas sur sous-sol...). On peut donc rénover sans toucher aux parois verticales (toiture, équipements de production et/ou conversion d'énergie, calorifugeage afférent...). Nous cherchons donc ici les segments du parc de logement susceptibles de rénovation thermique des murs.

Le crédit d'impôt en faveur du développement durable (CIDD) s'applique à des résidences principales, ou prévues pour être louées comme telles, achevées depuis plus de deux ans. Le crédit était majoré pour les logements achevés avant le premier janvier 1977, mais ce n'est plus le cas depuis 2010. Quant à l'éco-prêt à taux zéro, il ne peut être accordé que pour des résidences principales achevées avant le premier janvier 1990. Et pour ce qui est de l'éco-subsidation de l'ANAH, la résidence principale doit avoir été achevée depuis au moins 15 ans, ce qui nous ramène au premier janvier 1997 à l'heure où nous écrivons ces lignes.

On peut postuler que les logements qui requièrent les travaux d'isolation thermique les plus importants donnent droit à au moins deux des trois aides évoquées. Le plus petit dénominateur commun est donc 1997. Mais l'éco-prêt à taux zéro étant censé être la pièce maîtresse du dispositif d'incitation à la rénovation énergétique, il faut donc retenir uniquement les résidences principales achevées avant le premier janvier 1990. On peut donc se caler sur les statistiques disponibles des logements achevés avant 2004 : 21,9 millions de logements (résidences principales) sont éligibles à l'éco-prêt à taux zéro.

Tableau 1 : Nombre de logements en 2004 par catégorie d'occupation et époque d'achèvement d'immeuble

Epoque d'achèvement	Catégorie de logement				
	Résidences principales	Logements occasionnels	Résidences secondaires	Logements vacants	Ensemble
Avant 1949	7 907 848	90 738	1 053 415	1 017 578	10 069 579
De 1949 à 1974	7 741 685	48 573	577 813	496 431	8 864 504
De 1975 à 1981	3 371 513	19 299	394 209	143 006	3 928 026
De 1982 à 1989	2 554 922	13 963	348 846	89 224	3 006 955
De 1990 à 1998	2 431 166	18 543	293 882	97 926	2 841 516
De 1999 à 2003	1 359 189	8 364	118 962	47 053	1 533 568
Ensemble	25 366 323	199 480	2 787 126	1 891 218	30 244 148

Source : Insee, RP2006 exploitation principale.

Soulignons que les principales aides à la rénovation thermique (crédit d'impôt, éco-subsidation, éco-prêt à taux zéro) ne valent que pour la résidence principale. Ce qui tend à exclure du champ de la rénovation thermique les autres logements non vacants (logements occasionnels, résidences secondaires), alors même qu'ils participent aux émissions de gaz à effet de serre et à la raréfaction des ressources. Se pose alors la question suivante : peut-on faire abstraction de l'impact d'un logement mitoyen non isolé, de type vacant, occasionnel ou résidence secondaire ?

En effet, le principal problème technique que pose la rénovation thermique est celui de la condensation sur ou dans les parois froides, laquelle provoque une dégradation plus ou moins importante des dites parois et donc du bâtiment. Lorsque la ventilation compense le surcroît d'isolation du logement ce problème ne se pose pas. En revanche, il peut se poser pour les logements mitoyens non isolés dont la relation condensation / ventilation peut se trouver modifiée.

Se pose également la question de l'incidence des mitoyens sur les consommations énergétiques d'un logement. En effet, nous avons plusieurs fois entendu affirmer qu'il n'y a pas besoin d'isoler les parois mitoyennes. Pourtant la mitoyenneté permet de générer jusqu'à 50% d'économies de chauffage [Traisnel p. 17]. Mais ces économies dépendent de l'écart de température : le transfert de chaleur au travers de la paroi mitoyenne n'est pas le même quand on a en mitoyen un logement occupé chauffé à 19° C, un logement occupé chauffé à 16° C, et un logement vacant non chauffé avec une température de 10° C. Autrement dit, ces économies se basent sur une modification du diagramme de température moyenne de l'autre côté de la paroi : au lieu d'avoir 6° C de température moyenne en saison de chauffe, vous avez 10°, 16° ou 19°C, par exemple. Or la température extérieure est plus ou moins connue, sur la base des degrés-jour unifiés moyens sur 30 ans (DJU). Par contre, la vacance est tout sauf un phénomène maîtrisé.

Délimitation par date d'achèvement et réglementation thermique afférente :

Les principaux moments de l'apparition et du renforcement de la réglementation thermique sont : 1^{er} mai 1974 (coefficient G), 1980 (label Haute Isolation), 1982 (coefficient B, relèvement au niveau label Haute Isolation), 1983 (label HPE), 1^{er} janvier 1989 (coefficient C), 1^{er} juin 2001 (RT 2000), 1^{er} septembre 2006 (RT 2005). L'éco-prêt à taux zéro cible donc essentiellement les logements antérieurs à la réglementation thermique applicable au 1^{er} janvier 1989.

Le taux de remplacement de constructions anciennes par des constructions neuves est inférieur à 1% par an⁷ : il faudra donc beaucoup plus d'un siècle pour remplacer le parc existant sachant que, sauf catastrophe majeure, une quantité importante du parc ancien actuel sera encore utilisée dans un siècle en raison de sa valeur immobilière. Par ailleurs, le rythme moyen de mises en chantier de construction neuves s'est établi à 347 500 résidences principales par an (de 1991 à 2007). Sur ce rythme moyen il faudra donc 73 ans pour que le parc des résidences principales à venir soit aussi important que celui d'avant 2004. Délai réductible à 44 ans si on intègre le taux de remplacement, mais dans tous les cas le parc des résidences principales construites avant 2004 sera majoritaire dans le parc total de résidences principales jusqu'à au moins 2050.

⁷ [Traisnel et al 2010 p. 15] considèrent un taux de sortie du parc (destruction, fusion...) de 0,1%, soit 22 000 logements par an mais soulignent que ce taux a été plus important par le passé. Sur la base de notre tableau 5 le taux de destruction moyen entre 1872 et 1982 s'est établi à 42 326 logements par an. Cette moyenne de destruction s'est établie toutefois à 82 384 par an entre 1982 et 1990 : le taux de destruction est donc susceptible de passer au dessus de 1%, à certaines époques, puisqu'il s'agit du nombre de logement qui disparaissent rapporté au nombre total de logements. Sachant que le taux d'entrée (dû essentiellement à la construction neuve) est d'environ 1%, et généralement supérieur au taux de destruction (sauf pendant les guerres), ce dernier donne le taux de remplacement même si, sur le terrain, un logement qui disparaît n'est pas nécessairement remplacé par un nouveau logement.

Autrement dit, l'éco-prêt à taux zéro attribue un rôle important à la rénovation du parc construit avant 1990 pour atteindre l'objectif du facteur 4 à l'horizon 2050 : les performances thermiques de l'ensemble des constructions à venir ne seront pas suffisantes pour hisser l'ensemble du parc au niveau du facteur 4.

Nous avons tenté de rapprocher date d'achèvement de la résidence principale et réglementation thermique, afin de tenter d'estimer le comportement thermique des constructions, tout au moins théorique, et ainsi évaluer l'effort d'isolation thermique et l'impact sur la surface habitable.

Tableau 2 : résidences principales concernées par les réglementations thermiques successives

réglementation	exigence énergétique	R paroi	consommation	nb résidences princ.
aucune, hors incendie, sécurité...	aucune thermique		±300 kWhep/m ² /an	13 049 533
1969 : chauffage + acoustique	aucune thermique		300 kWhep/m ² /an	2 600 000
1 ^{er} mai 1974	- 25%	0,96 ?	±225 kWhep/m ² /an	1 362 121
juillet 1977	modification coefficient G		225 kWhep/m ² /an	2 533 912
17 novembre 1980	label HoT	1,25		140 000
27 mars 1982 à 1 ^{er} janvier 1985	- 30%	1,25 ?	170 kWhep/m ² /an	1 850 402
1983	label HPE	1,59 ?		40 000 (1983-1987 ?)
1 ^{er} janvier 1989	- 25% ?	1,59	155 kWhep/m ² /an	3 560 001
1989	labels HPE 1988			
1 ^{er} juin 2001	- 25% ?	2,65	130 kWhep/m ² /an	1 640 627
18 décembre 2002	labels HPE 2000	2,8 à 3,10 ?		45 171
1 ^{er} septembre 2006	- 15%	2,8	90 kWhep/m ² /an	1 290 953
2007	label BBC 2005	6,67	50 kWhep/m ² /an	1 700
29 septembre 2009	HPE rénovation	5 ?	80 kWhep/m ² /an	achevés après 1947
TOTAL				28 114 420

Compilé à partir de différentes sources : INSEE, CSTB magazine, Ademe, [Aussourd et al.] ; kWhep/m²/an théoriques ; le chauffage est inclus dans tous les cas, par contre eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage, et auxiliaires ne sont pas systématiquement pris en compte avant 2007 ; ces consommations seraient donc à pondérer par les postes manquants.

La première difficulté est que les dates de recensement et les dates de réglementation thermique ne coïncident pas. Cette difficulté pourrait être levée avec les données sur les dates d'achèvement des constructions neuves. Hélas, nous avons des difficultés pour y accéder de même que pour les données sur le total des labels HPE attribuées, ordonnés par types de labels et par années. Et, effet pervers de l'informatisation, les graphiques se sont substitués aux tableaux dans la littérature existante, contribuant à une perte de mémoire des données brutes. Une autre difficulté, et non des moindres, est que les évolutions de la réglementation thermique n'ont pas nécessairement un impact sur l'épaisseur d'isolation thermique : ainsi il semblerait que les labels HPE portaient sur les performances des équipements de chauffage et non pas sur le comportement thermique des parois ; et nous ne sommes pas parvenus à identifier si la réglementation thermique de 1977 impactait ou pas l'épaisseur des parois⁸.

⁸ Et quand on sait qu'elles impactent l'épaisseur des paroi il peut être difficile d'identifier les épaisseurs réglementaires d'isolants (cas de la RT 1974). Lors de la formation Ademe en audit énergétique, les formateurs de Sunsquare soulignaient avoir vainement tenté de retrouver les calculs réglementaires de la RT 1974 ; d'où conseil de ne pas jeter les documentations thermiques, notamment notices de matériaux isolants, équipements de chauffage, climatisation et autres, qui seront précieux pour effectuer des audits en 2020, 2030, 2040...

Il n'est pas absurde de considérer que la réglementation acoustique de 1969 (arrêté du 14 juin 1969) se soit traduite par un renforcement, même minime, de l'inertie thermique des logements. De 1964 à 1974 plus de 5,2 millions de logements auraient été construits [Bridel]. Sous réserve d'accéder à des statistiques fines, 2,6 millions de logements pourraient avoir été impactés par la réglementation acoustique de 1969. Ce sont donc 13,05 millions de logements qui sont vierges de toute réglementation à incidence thermique.

Autrement dit, 46% à 51% des résidences principales, selon que l'on se base sur le recensement de 2004 (tableau 1) ou l'estimation (à améliorer) de 32,7 millions de logements (parc actuel et en cours d'achèvement), sont censées n'être conformes à aucune réglementation thermique, voire vierges de toute isolation thermique. Nous prenons ce chiffre de 13 millions de logements comme hypothèse minimum de rénovation : les logements pour lesquels l'impact de la rénovation thermique sur la surface habitable, par le biais du renforcement de l'isolation thermique, est susceptible d'être maximal.

Le tableau 2 permet également d'examiner le rattrapage à effectuer en fonction des performances induites par les réglementations thermiques successives. Nous reviendrons sur ce point un peu plus loin, sachant que les résistances de paroi sont théoriques de même que les consommations de chauffage (estimations).

Soulignons que l'éco-prêt à taux zéro n'est applicable qu'aux résidences principales achevées entre 1948 et 1989 si l'on choisit l'option « performance énergétique globale ». En effet, cette option exige l'intervention d'un bureau d'étude thermique, lequel est obligé d'utiliser la méthode de calcul « Th-C-E Ex », laquelle est réputée ne pas être applicable à un logement achevé avant 1948 ! Certes, cette bizarrerie peut-être contournée dès lors que le logement d'avant 1948 a fait l'objet d'une rénovation après 1947. Et surtout, la preuve de la date d'achèvement du logement repose... sur l'attestation sur l'honneur du propriétaire ! Néanmoins il convient de cerner ce qui fonde cette décision.

Car elle contribue à faire considérer que seuls les logements de 1948 à 1989, soit plus de 13,7 millions de résidences principales, requièrent des travaux d'isolation thermique. En effet, pour un logement d'après 1947, pour avoir le montant maximal de prêt, il « suffit » de choisir l'option « performance énergétique globale », ce qui tend à favoriser des travaux d'isolation (selon la sensibilité du thermicien ou si l'on touche aux parois). Et pour un logement avant 1948, il faut choisir un bouquet d'au moins trois travaux, mais sans qu'il y ait obligation qu'un des travaux relèvent de l'isolation thermique.

Rapporter cette décision optionnelle au tableau 2 à pour effet suivant : si l'on prend la tranche 1948 à 1989 et que l'on retire tout ce qui a échappé aux réglementations acoustique et thermique, le problème de l'impact de la rénovation thermique sur l'espace habitable serait susceptible de concerner moins de 5,5 millions de résidences principales (logement achevés après 1947 et avant la réglementation 1969).

Curieusement, le rythme de croisière souhaité serait de 400 000 attributions par an d'éco-prêts à taux zéro, mais nous avons entendu à diverses reprises citer le chiffre de 17 millions de logements à rénover, soit le

solde des logements à rénover, étant acquis que 2 millions l'auraient déjà été. D'où viennent ces 19 millions ? Sur la base du tableau 2, la quantité de résidences principales éligibles à l'éco-prêt à taux zéro est de 21,6 millions. Mais le nombre de résidences principales achevées avant 1975 est de 18,9 millions. La cible de l'éco-prêt à taux zéro serait donc les résidences principales achevées avant 1975, donc avant l'application de la première réglementation thermique, mais avec une tendance à n'inciter au renforcement thermique de l'enveloppe que pour les résidences achevées entre 1948 et 1974, soit entre 7 et 8 millions de logements en tentant de recouper avec le tableau 1.

Nous avons pris l'éco-prêt à taux zéro comme base pour délimiter le champ de notre terrain : les logements concernés par une rénovation thermique, et plus particulièrement ceux pour lesquels une rénovation thermique est susceptible d'avoir la plus forte incidence sur la surface habitable. Toutefois, sur la base des conditions d'octroi de ce prêt (avance remboursable sans intérêt), notre terrain d'étude se limiterait à seulement 7 à 8 millions de logements. Pourtant la loi Grenelle 1 affiche un objectif de rénovation de 400 000 logements par an, et l'éco-prêt à taux zéro apparaît comme le principal outil pour atteindre ledit objectif, quand bien même ses décrets d'application sont antérieurs (mars 2009) à la Loi Grenelle 1 (août 2009). Certes la rénovation de 400 000 logements est un moyen pour atteindre un objectif fixé à 2020, mais dans un objectif plus général fixé à 2050. On peut ainsi poser qu'il y a un objectif de rénover 400 000 logements par an d'ici 2050, soit 15,2 millions de logements.

A vrai dire, pour l'heure, le crédit d'impôt au développement durable aurait beaucoup plus de succès que l'éco-prêt à taux zéro. Le CIDD n'a pas nécessairement un impact sur les épaisseurs d'isolants thermiques, il s'applique à un parc de logement beaucoup plus vaste que l'éco-prêt à taux zéro, mais il peut se recouper avec ce dernier car cumulable, tout au moins pour certaines années. Les conditions d'octroi des aides publiques n'étant pas un critère opératoire fiable, délimiter notre terrain aux 13,05 millions de logements construits avant 1969, soit avant toute réglementation à incidence thermique, apparaît donc comme le meilleur choix, à ce stade de notre réflexion.

L'effectivité de l'application des réglementations thermiques :

La rénovation thermique ne se traduit pas nécessairement par un important renforcement thermique de l'enveloppe d'un bâtiment résidentiel. Dans notre quête des logements pour lesquels une rénovation thermique est susceptible de se traduire par d'importantes épaisseurs d'isolant thermique, nous avons retenu les 13,05 millions de logements vierges de toute réglementation à incidence thermique. C'est une hypothèse qui suppose qu'il n'y a pas recours à la correction thermique, donc une hypothèse contestable (voir encadré n° 1). Qui plus est, elle se fonde sur le présupposé que la réglementation thermique est intégralement respectée, et donc fait abstraction des non conformités.

Or, on peut douter que les réglementations de 1969 relatives au chauffage et à l'acoustique aient impacté le comportement thermique de l'ensemble des chantiers commencés entre 1969 et mai 1974. Bien plus, on peut douter que les réglementations thermiques successives n'aient pas donné lieu à des non conformités plus ou moins importantes. Et on ne peut pas faire abstraction de l'effectivité de l'application des réglementations : c'est bien un scénario catastrophe que nous cherchons à explorer.

La stratégie adoptée en France pour atteindre l'objectif d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre passe, en ce qui concerne les bâtiments, par une addition de performances de bâtiments : les bâtiments les plus performants compensent les bâtiments les moins performants. Si on s'appuie sur une approche erronée de la réalité du respect de la réglementation thermique, le risque que la stratégie n'atteigne pas l'objectif dans les délais impartis (2050) est élevé. Certes, notre objectif n'est pas d'évaluer les chances d'atteindre le facteur 4, mais de tester une hypothèse radicale (non recours à l'isolation par l'extérieur), même si la vérification de celle-ci obérerait les chances d'atteindre le facteur 4. Mais ce faisant, on ne peut pas faire l'impasse sur les facteurs susceptibles d'accentuer le poids de notre hypothèse.

Qui plus est, et pour la première fois, un contrôle généralisé du comportement thermique a été institué : le diagnostic de performance énergétique (DPE). Même si ses modalités d'application sont critiquées, en ce qui concerne la rigueur des contrôles, tôt ou tard la face cachée de la réglementation thermique, les non-conformités, va émerger. Pouvant se traduire, en fonction de l'importance ou pas à venir de l'impact du DPE sur les transactions immobilières, par des travaux de renforcement thermique. Et par conséquent, d'accroître l'importance du parc de logements susceptible de ne pas recourir à l'isolation par l'extérieur.

En 1975, moins de 20% des 250 000 maisons individuelles construites étaient censées avoir été produites en conformité avec les calculs complexes de détermination du coefficient G, car produites en série (modèles). Pour le reste, les éléments de calcul du coefficient G n'étaient généralement pas fournis lors du dépôt du permis, la seule obligation étant de pouvoir produire ces éléments dans le cas d'un éventuel contrôle a posteriori [Debomy]. En ce qui concerne la RT 1989, si le taux de respect était évalué à 90% dans le collectif social et à 80% dans le collectif privé, il chutait à 30% dans l'individuel isolé [Orselli].

Pour la RT 2000, il existe une évaluation du Conseil Général des Pont et Chaussées. Celle-ci évoque à mot couverts l'ampleur de sa non application : sur 170 000 maisons individuelles (chiffre de 2005), 71% ont été construites par un constructeur (loi du 19 décembre 1990) ou avec un architecte, et donc le plus souvent avec un recours à un BET ; par contre, pour les 29% restantes (50 000 unités) il y aurait ignorance de « *l'existence même de la réglementation thermique* » [Aussourd et al. p. 7]. Et concernant les contrôles « *la plupart des interlocuteurs rencontrés insistent sur l'insuffisance quantitative des contrôles, tant les contrôles de réception par le maître d'ouvrage que les contrôles réglementaires* » [ibid p. 8].

Bien plus, concernant le contrôle du respect du Code de la Construction, [Aussourd et al.] soulignent que plus de la moitié des constructions neuves (maison individuelle diffuse) y échappent, et que les contrôles

portent très peu sur la performance thermique. Enfin, concernant le label Promotelec, bien qu'il s'agisse d'une démarche volontaire, dans 20% à 30% des cas il n'y avait pas conformité à la RT 2000 au niveau de la conception ; et en ce qui concerne la réalisation, le plus souvent il y avait des non conformités en raison d'erreurs ou de changement de produits.

Par ailleurs, en 2006 aucune évaluation de consommation de bâtiments RT 2000 n'avait pu encore être conclue, en raison d'anticipations sur la RT 2000 (très nombreux dépôt de permis de construire avant le 1^{er} juin 2001, pour éviter d'être soumis à la RT 2000) : les premiers logements soumis à la RT 2000 ont été livrés en 2003 [Aussourd et al.]. Ce qui signifie que la plupart des 1,36 millions de résidences principales achevées entre 1999 et 2003 relèveraient non pas de la RT 2000 mais de la réglementation de 1988 !

La réglementation thermique 2005 instaure une obligation pour le maître d'ouvrage de tenir à disposition une synthèse d'étude thermique pour un éventuel contrôle, par la DDE, la DRE ou la mairie. Ce document peut être exigé pendant les deux années qui suivent l'achèvement des travaux. Le maire peut, en outre, lors du dépôt du permis de construire, exiger un engagement du maître d'ouvrage à respecter la RT 2005. Seule la responsabilité du maître d'ouvrage est engagée, et le risque encouru est de sanctions en cas de contrôle. Donc une fois le délai de deux ans passés, il n'y a plus de risque de contrôle ni de sanctions. Et surtout, les professionnels n'ont aucune obligation.

Or, le chiffre suivant nous a été avancé : pour 220 mille maisons individuelles livrées en 2008, seulement 80 000 synthèses d'étude thermique ont été réalisées ! À peine le tiers des maisons individuelles satisfait à l'obligation de tenir à disposition un document en cas de contrôle, contrôle qui est très hypothétique, pour des travaux réalisés par des professionnels dont la responsabilité n'est pas engagée ! Et à voir les débats sur le contrôle de l'application de la réglementation thermique, son application aurait toujours été limitée⁹.

Pour la RT 2005 nous avons également entendu des professionnels évoquer une moyenne de 100 000 non conformités par an. Et, sur la base des consommations d'énergie, on évaluerait à 70% dans la construction de maisons individuelles¹⁰ la non conformité à la RT 2005.

Faut-il pour autant prendre les données des dates d'achèvement, ventilées entre collectif et individuel, et retirer 70% des maisons individuelles ? En effet, on n'a pas d'idée précise sur les non conformités. Les thermiciens qui s'expriment sur ce sujet parlent plutôt d'écarts peu importants.

Mais quelle est la réalité de la pratique constructive, en particulier artisanale ? Dans les années 1990, lorsque nous effectuions des entretiens avec des maîtres d'ouvrage [Theile 2004], tous soulignaient qu'il était impossible de conduire un chantier sans connaître au moins un dépôt de bilan d'entreprise. La

⁹ <http://www.promotelec.com/forum/Discussion-1527.aspx>

http://www.forum.gouv.fr/article_forum_archive.php3?id_article=228&id_forum=62157&id_thread=62137

¹⁰ <http://www.fvalabreguecommunication.com/dotclear/index.php?2009/03/05/20-la-rt-2005-en-12-questions-article-paru-dans-maison-magazine-septembre-2008>

situation a-t-elle radicalement changé à cet égard aujourd'hui ? En maison individuelle, combien de bâtiments avec seulement trois ou quatre centimètres d'isolant là où l'artisan était censé, selon une réglementation thermique qu'il ne maîtrise pas nécessairement, en poser huit ou dix ? Et pourquoi un artisan ne serait-il pas tenté de faire des économies alors qu'il est en difficulté, quand les revendeurs lui donnent le choix entre différentes épaisseurs d'isolants thermiques ?

Certes la résistance thermique (R) figure obligatoirement en évidence sur le matériau isolant. Ce qui n'empêche pas les achats d'isolants réflecteurs minces, non reconnus par la réglementation thermique. Certes, si on feuillette certains catalogues de grandes surfaces de bricolage, la résistance thermique à respecter est indiquée. Mais qui lit ces catalogues ? Catalogues qui plus est uniquement distribués dans les boîtes aux lettres des zones pavillonnaires, donc auxquels n'aura accès le commanditaire d'une maison individuelle qu'une fois qu'il aura emménagé, pour peu qu'il ait toujours habité en collectif...

En synthèse, 80% des maisons individuelles soumises à la RT 1974 n'y seraient pas conformes. Le taux de non conformité est de 70% pour la RT 1989, 29% pour la RT 2000, 70% pour la RT 2005, toujours pour la maison individuelle. Que recouvre la non-conformité : absence totale d'isolation thermique ? défauts d'isolation rendant l'isolation thermique inopérante ? résistances thermiques insuffisantes ? Vu l'importance que prend la construction de maison individuelle à partir de 1974, on peut dire qu'au moins un ou deux millions de logements sont concernés par la non-conformité et susceptibles de devoir procéder à un renforcement thermique conséquent des parois opaques.

Comportement thermique des constructions achevées avant 1969

Nous continuons donc à avancer que les quelques 13 millions de logements achevés avant 1969 sont susceptibles de recourir à des épaisseurs d'isolants telles qu'elles donnent corps à nos hypothèses catastrophe. En fait, une partie non négligeable aurait procédé à une isolation thermique avant ou après 1969, essentiellement au niveau de la toiture : mais les matériaux isolants étaient généralement moins performants qu'aujourd'hui, et s'étant de plus dégradés avec le temps (30 ans ou plus), c'est comme s'il n'y avait aucune isolation lorsque l'on rénove puisqu'il faut les retirer et les traiter en déchets.

Mais comment convaincre un ménage qui a fait poser une isolation thermique qu'elle est bonne à jeter ? Et comment convaincre un ménage dont le logement est conforme à la RT 1974, par exemple, qu'il est temps de s'engager dans une rénovation thermique ? Nous avons pu observer de fortes résistances à cet égard. En tous cas, la réponse à ces questions dépendra de l'évolution du DPE et du succès des campagnes à venir d'incitation à la « thermo-rénovation ».

Tôt ou tard n’importe quelle résidence principale sera amenée à être rénovée. La question de base semble donc être : quelles sont les résistances thermiques de l’enveloppe ? la rénovation doit-elle obligatoirement passer par un renforcement des résistances thermiques des parois opaques verticales (murs) ?

Si la question de la résistance thermique se pose pour les bâtiments comportant une isolation thermique au niveau des parois, elle semble ne pas se poser pour les bâtiments sans aucune isolation thermique à savoir tous ceux construits avant 1969, la plupart de ceux construits avant mai 1974, et même une proportion (à évaluer) de ceux construits après cette date. En effet, la réglementation thermique ne prend pas en compte l’inertie thermique : la propension à tout traiter de la même façon serait d’autant plus forte que la construction de logements depuis les années 1960 s’est traduite par une généralisation de l’emploi du parpaing et du béton banché, aux résistances thermiques assez proches. Alors que dans les faits, les logements ne sont pas tous « égaux » devant la réglementation thermique (tableau 3).

Tableau 3 : nature de la paroi et épaisseur d’isolant requise en fonction de la performance visée¹¹

nature et épaisseur de la paroi	R	RT 2005	BBC 2005	passivhaus
		R = 2,8	R = 6,67	R = 11
mur béton armé banché (20 cm + enduit)	0,30	2+10	3+21	3+35
mur 24 cm parpaing enduit (parpaing 20 cm + enduit)	0,39	2+9	3+21	3+34
mur 24 cm brique enduit (brique 20 cm + enduit)	0,62	2+9	3+20	3+34
mur 50 cm pierre calcaire apparente	0,61	2+9	3+20	3+34
mur 45 cm pisé apparent	0,63	2+9	3+20	3+34
mur 60 cm pierre calcaire dure (> 2350 kg/m3) apparente	0,46	2+9	3+20	3+34
mur 60 cm pierre calcaire ferme (1840 à 2340 kg/m3) apparente	0,63	2+9	3+20	3+34
mur 60 cm moellons apparents	0,67	2+8	3+20	3+34
mur 13cm pan de bois fini avec remplissage briques	0,40	2+9	3+21	3+34
mur 18cm pan de bois fini avec remplissage briques	0,44	2+9	3+20	3+34
mur 13cm pan de bois fini avec remplissage torchis	0,46	2+9	3+20	3+34
mur 18cm pan de bois fini avec remplissage torchis	0,55	2+9	3+20	3+34

Compilé ou converti, et calculé à partir de : [Lelu], [Oliva], [Oliva & Courgey] ; épaisseurs en centimètres¹² ; R en m²K/W

Certes le tableau 3 soutien l’inverse de notre affirmation : on est dans l’idéal égalitaire, car en donnant à tous exactement le même produit on les met tous à niveau. Dès lors, le concept de « épave thermique » n’a pratiquement pas d’application concrète : une épaisseur d’isolant suffit pour une mise en conformité. Et plus le niveau d’exigence thermique s’élèvera plus les bâtiments seront uniformément traités. Le rêve d’une pratique industrielle du Bâtiment enfin réalisé ?

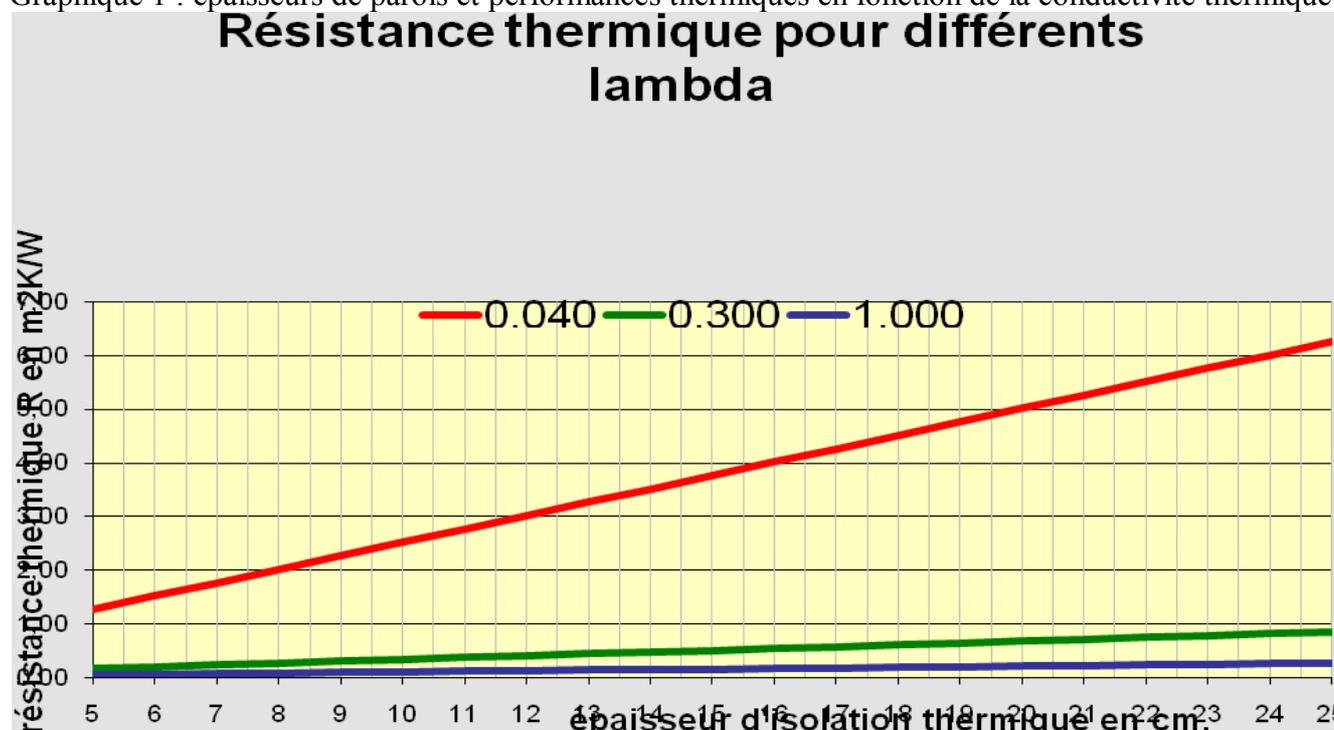
¹¹ Nous nous sommes basé sur diverses brochures de fabricants et [CTB 2008]. Nous ne tenons pas compte des zone climatiques, à savoir que nous retenons les valeurs à respecter dans la zone la plus élevée et la plus froide. En consultant [Oliva & Courgey] nous constatons que la valeur U (l’inverse de R) utilisée pour les parois va de 0,18 à 0,30 pour le BBC (soit R de 5,6 à 3,3) et est de 0,12 pour le passif (soit R de 8,33). Nonobstant [Oliva & Courgey p. 32] donnent des épaisseurs de 15 à 25 cm d’isolant pour le BBC et supérieures à 35 cm pour le passif, ce qui est plutôt cohérent avec notre tableau.

¹² Nous nous basons sur les produits censés être disponibles sur le marché français en 2010. Pour la colonne RT 2005 il s’agit de polystyrène TH38. Pour le reste, il s’agit de laine de verre (Isover GR32). Il se peut que l’épaisseur de la lame d’air et/ou de plâtre ne soit pas prise en compte. Toutefois, au cas où elle serait avérée, cette non prise en compte n’affecte au pire les résultats que de 1 à 2 centimètres d’épaisseur en moins, et pas dans tous les cas en raison des effets de seuil des références disponibles.

Mais dans quelle mesure cette mise à niveau ne s'effectue-t-elle pas au détriment de la prise en compte de l'inertie thermique ? Et que vous habitiez une merveille de l'architecture paysanne bretonne ou un pavillon de banlieue en parpaing, il faut et il suffit d'une même épaisseur d'isolant pour que ces deux bâtiments aient la même valeur sur le marché du strict point de vue du diagnostic de performance énergétique ?

Sur la base du tableau 3, du point de vue de l'épaisseur d'isolant à mettre pour une mise en conformité thermique, actuelle ou à venir, la plupart des bâtiments construits en France, tout au moins avant 1969, n'ont aucune valeur thermique. Une autre façon de le montrer est illustrée par le graphique 1 : contrairement à une idée reçue extrêmement courante, les épaisseurs de parois de maçonnerie pèsent de moins en moins face aux épaisseurs d'isolants à mesure que les réglementations thermiques deviennent de plus en plus exigeantes (et sont basées sur la mesure de la conductivité thermique).

Graphique 1 : épaisseurs de parois et performances thermiques en fonction de la conductivité thermique



Documentation Jean-Pierre Moya ; valeurs de R (résistance thermique) de 0 à 7 m²K/W, épaisseurs de parois de 5 à 25 cm, conductivité thermique (lambda) en W/mK. L'essentiel des matériaux de maçonnerie se trouve sous la ligne verte et même sous la ligne bleue, l'essentiel des isolants thermiques se trouve au même niveau ou au dessus de la ligne rouge.

Force est alors de convenir que raser des immeubles haussmanniens dans le cadre de la rénovation énergétique, comme le proposait un professionnel de la maîtrise d'ouvrage, n'est pas absurde. Pourtant, nous avons entendu un professionnel de la thermique du Bâtiment, soutenir que les ponts thermiques au niveau de la jonction planchers-façade des immeubles haussmanniens pouvaient être moindres que ce qu'il était possible d'obtenir avec la plupart des rupteurs thermiques actuels. Le point commun entre les deux positions passe par considérer qu'il n'est pas possible d'isoler de l'haussmannien par l'extérieur.

Notre tableau 3 sert davantage à démontrer que l'épaisseur originelle des murs importe peu avec le coefficient R qu'à donner des épaisseurs exactes et valables dans tous les cas de figure : en effet nous ne prenons pas en compte les autres paramètres intervenant dans le comportement global du bâtiment. Plus exactement, nous nous situons, pour l'instant, dans la perspective très minimaliste de respect des valeurs réglementaires éléments par éléments et non pas dans une optique de calcul de performance globale.

Rappelons que les conditions d'attribution de l'éco-prêt à taux zéro peuvent donner à entendre que le comportement thermique des logements achevés après 1947 serait plus préoccupant que celui des logements achevés avant 1948. Ses concepteurs se sont apparemment basés sur le tableau 4 : ils se seraient basés sur les écarts à la moyenne pour le logement collectif.

Tableau 4 : consommations de chauffage par année d'achèvement des bâtiments en Île-de-France

	Collectif	Individuel
	(kWh/m ² /an)	(kWh/m ² /an)
Avant 1915	114	198
1916-1948	120	217
1949-1967	149	215
1968-1975	171	244
1976-1981	131	125
1982-1989	86	91
1990-1999	63	83
Moyenne totale	125	174

Source : Énergies Demain – IAURIF cité dans [Leroi p. 61] ; kWh en énergie finale, m² en surface habitable.

Aussi bien en individuel qu'en collectif, les logements avant 1915 consomment moins que les logements construits entre 1916 et 1975, en particulier que ceux de la période 1968-1975 qui sont les plus énergivores. On peut toutefois s'interroger sur l'effet de la mitoyenneté, donc d'une certaine façon de la densité du bâti, sur ces chiffres, étant donné que la mitoyenneté peut générer à elle seule, en théorie du moins, des économies de consommation de chauffage pouvant aller jusqu'à près de 50% [Traisnel p. 17].

Si on compare les tableaux 2 et 4 on voit que l'impact des normes de 1969 en chauffage et acoustique est nul, sous réserve de l'effet de mitoyenneté. La réglementation thermique de 1974 tarde à avoir de l'effet, ce qui se comprend lorsque l'on sait qu'elle n'a été obligatoire pour tout permis de construire qu'à dater du 1er juillet 1975 et pour toute déclaration d'achèvement de travaux qu'à dater du 31 décembre 1978 [Bleuler]. Il n'y a que pour les réglementations 1982 et surtout 1989 que l'impact est nettement visible, bien qu'il faudrait s'assurer que ces chiffres ont bien été calculés sur des données de consommations globales effectives.

Environ 15,7 millions de logements concernés par l'épaississement mais de fortes incertitudes

En première conséquence, le tableau 4 nous conduit non pas à modifier notre hypothèse basse, mais au moins à poser que c'est 15,7 millions de logements, et non pas 13,05 millions, qui sont vierges de toute réglementation à incidence thermique. N'avons nous pas compliqué l'analyse pour rien ? Peut-on se contenter de dire qu'avant 1974 il n'y a rien et que les initiatives d'isolation thermique d'avant 1974 comptent pour du beurre, puisqu'il faut enlever les isolants lorsque l'on rénove, car généralement dégradés sinon dépassés ? Le tableau 4 tend pourtant à montrer qu'en collectif, on ne retrouve les niveaux de consommation d'avant 1948 qu'après 1981... Et nous préférons mettre le plus grand nombre de données à plat afin de produire l'estimation la plus fine possible, quitte à perdre du temps sur d'apparentes évidences.

17

En seconde conséquence, le tableau 4 conforte la démarche de s'intéresser aux dates d'achèvement, et à l'histoire des pratiques constructives aussi bien générale que locale. Parce qu'une quantité, à déterminer mais qui semble importante, de logements pourrons difficilement s'accommoder d'épaisseurs de 37 cm, de 23 cm, voire même pas de 11 cm d'isolant sans réaménagement complet des étages. Parce que, selon les époques, les lieux et les catégories d'immeubles, les distributions des pièces, la localisation et la taille des cuisines, par exemple, ne sont pas nécessairement les mêmes. Mais aussi parce que 70% du territoire français est protégé à un titre ou un autre (zones de protection, secteurs sauvegardés, sites classés, espaces sensibles...) [Bachoud]. On ne pourra pas conduire la rénovation thermique en plaçant partout 37 cm, 23 ni même 11 cm de systèmes isolants : selon les contextes, il faudra peut-être se contenter des performances thermiques originelles des parois, quitte à davantage travailler les autres postes (chauffage, ouvertures...).

Si on prend l'immeuble collectif de style haussmannien : le style proprement dit date de 1853-1870, suivi du post-haussmannien et le néo-haussmannien, le début de la première guerre mondiale mettant fin à ce style. Sur Paris, et quelques autres villes grandes ou moyennes mais guère plus, on peut dire que les données relatives aux immeubles à dates d'achèvement comprises entre 1871 et 1914 relèvent surtout du style haussmannien, et donc de caractéristiques thermiques plus ou moins connues.

Tableau 5 : logements construits (avant 1949) par date d'achèvement et année de recensement

	1872	1982	1990	2006
mai 1872	7 419 604			
avant 1871		2 763 760		
1871 à 1914		3 036 500	5 162 804	
1915 à 1948		2 820 840	2 799 228	7 907 848
total	7 419 604	8 621 100	7 962 032	7 907 848
« perte »		4 655 844	659 068	54 184

Source : recensements de la population française, INSEE

Le tableau 5 montre que l'on peut, en se donnant la peine de reprendre tous les recensements effectués, obtenir par soustractions successives un niveau de détail plus fin du bâti ancien que celui du tableau 2. Il

tend également à montrer qu'un nombre important de logements ont disparu : effets de la première guerre mondiale ; près de 500 000 logements détruits et près de un million endommagés lors de la seconde guerre mondiale ; 120 000 logements démolis par des procédures de rénovation urbaine... Autrement dit, les logements les plus anciens encore debout aujourd'hui ont résisté à un processus sélectif, alliant deux guerres mondiales et des décennies de spéculation immobilière. Seuls les éléments les plus « robustes » et/ou les mieux entretenus sont parvenus jusqu'à nous ce qui contribue aussi sans doute à expliquer en partie pourquoi les logements d'avant 1915 auraient un meilleur comportement thermique (tableau 4)¹³.

Il peut paraître étonnant qu'en huit ans (1983-1990) aient été démolis douze fois plus de logements qu'en 16 ans (1991-2006). Ce phénomène a en tous cas très probablement contribué à élever la moyenne du comportement thermique de ceux qui restaient.

Il ne s'agit peut-être pas que de démolitions mais aussi d'une modification des modalités de recensement de l'INSEE, ou tout au moins d'agrégation de données différentes. En effet, selon [Aïdi] en 1992 il y avait 15,871 millions de résidences principales construites avant 1975, alors qu'en 2004 (tableau 1) ce chiffre s'élève à près de 19 millions ! Nous devons donc revenir sur la nature des données INSEE à agréger.

Les données qui nous intéressent sont collectées lors du recensement de la population, lequel consiste à dénombrer les logements, d'une part, les populations, d'autre part. Toutefois, le recensement de population s'appuie sur un répertoire d'immeubles (d'adresses en fait) et non pas de logements [Godinot]. Un logement est défini comme un local séparé et indépendant. Mais les maisons de retraite, les chambres meublées, les habitations précaires ou de fortune sont aussi considérés comme des logements. A priori, à une adresse est censé correspondre un local séparé et indépendant, exception faite des chambres meublées et des maisons de retraite. Ceci étant, les données du recensement se basent sur les déclarations des ménages et non pas sur des contrôles qui seraient systématiquement effectués par les enquêteurs. Par conséquent, on ne connaît pas le nombre exact et réel de logements. Nous n'avons pas cherché à savoir si l'INSEE avait une idée de la marge d'erreur, par exemple en procédant à des recoupements.

Par définition, l'INSEE associe un ménage à une résidence principale. Le nombre de résidences principales est donc le nombre de « ménages ordinaires » et non pas le nombre réel de logements occupés à titre principal. Les personnes vivant en communauté (pensionnats, casernes, maisons de retraite...), dans des habitations mobiles, les marinières et les sans-abri ne sont pas pris en compte, étant considérés comme vivant hors ménage. Et jusqu'en 2005 l'INSEE considérait qu'il n'était pas possible qu'une même résidence principale puisse être occupée par plus d'un ménage. Depuis 2005 « *une résidence principale peut comporter plusieurs ménages si ceux-ci ont des budgets séparés* ». Nous ne savons pas quelle est l'incidence de cette modification sur la règle d'égalité entre le nombre des ménages et le nombre de résidences principales.

¹³ Une étude thermographique réalisée sur Paris montrerait que ce sont les bâtiments d'avant 1850 (25% des bâtiments parisiens) qui seraient les moins énergivores (20 Minutes 23 octobre 2009 p. 3).

On a donc un premier paramètre susceptible de varier dans le temps (entre 1801 et 2006) : le nombre d'adresses. Celles-ci peuvent évoluer, par exemple, par division ou regroupement de logements. Sur cette première variable se greffe une seconde variable, la catégorie de logement : résidence principale, résidence secondaire, logement occasionnel, logement vacant. Ainsi donc, d'un recensement à un autre on a déplacement du parc de résidences principales sur le parc de logements réels dans des proportions qu'on ne connaît pas. Ce glissement est sans doute léger, mais en 135 ans, soit la période mesurée dans le tableau 5, on peut avoir un brouillage en ce qui concerne la caractérisation du parc réel par les dates de construction, par déplacements entre les différentes catégories, qu'on ne connaît pas exactement.

Qui plus est, les définitions des époques relatives à l'année d'achèvement du logement sont régulièrement modifiées. En effet, pour le recensement 2006, on peut distinguer entre «avant 1915 » et « 1915 à 1948». Or le recensement est désormais (2012) basé sur une distinction «avant 1919 » et « 1919 à 1945». A chaque changement de ce type on a une perte de précision. Perte de précision d'autant plus importante, que ce sont les déclarations des ménages qui sont recueillies. Le nouvel occupant n'est pas nécessairement au courant ni de la date d'achèvement du logement, ni de sa superficie. Des erreurs et des déclarations fantaisistes peuvent se glisser d'un recensement à l'autre, sans qu'on ne sache si l'INSEE effectue systématiquement des vérifications de cohérence sur les dates entre les occupants d'un même immeuble, par exemple. Qui plus est, précision importante concernant la date d'achèvement de l'immeuble / maison : *« si les différentes parties ne sont pas de la même époque, indiquez l'année d'achèvement de la partie habitée la plus importante »* (feuille de logement, recensement 2012).

En synthèse, on ne connaît pas exactement le parc de logements en France, et encore moins ses caractéristiques thermiques. On sait seulement qu'il vaudrait mieux rénover systématiquement toute résidence principale dont la date d'achèvement est antérieure à 1974. Ce qui donne 15,6 millions de logements à rénover, et même 19 millions si l'on veut tenir compte des logements non réglementaires postérieurs à 1974 et /ou prévenir les conséquences d'une éventuelle modification massive des logements vacants et résidences secondaires d'avant 1974 en résidences principales.

La façon la plus efficace de conduire la « thermo-rénovation » serait de placer 11 cm, 23 cm voire même 37 cm de systèmes isolants au niveau des enveloppes des bâtiments relatifs à ces 15,6 à 19 millions de résidences principales. Mais ce serait faire fi des caractéristiques des bâtiments, des contraintes d'urbanisme ainsi que des prétentions de confort spatial des occupants de ces logements. Et une approche plus fine butte sur l'absence de données statistiques sur les caractéristiques des logements. Certes, Energies Demain propose des données, mais ce ne sont que des estimations. Certes, la Mairie de Paris a fait établir une carte par thermographie aérienne, mais ça ne donne qu'une idée très générale qui plus est sujette à erreurs. On peut faire l'économie d'un recensement systématique des caractéristiques thermiques du parc de logements. Mais il nous semble qu'il faut alors pratiquer une rénovation « uniforme ». Nous examinons les conséquences spatiales de la dite rénovation au vu des technologies d'isolation actuelles.

Conclusion du chapitre A :

Dans le contexte réglementaire actuel, la rénovation thermique ne se traduit pas nécessairement par un épaississement des murs extérieurs de l'enveloppe d'un bâtiment résidentiel. Les bâtiments pour lesquels une rénovation thermique est la plus susceptible de se traduire par la pose d'une épaisseur conséquente d'isolant thermique, sont les bâtiments vierges de toute réglementation thermique, à savoir dont la date d'achèvement est antérieure à 1969. Toutefois, encore faut-il convaincre leurs propriétaires d'isoler la totalité, ou une partie importante, des murs donnant sur l'extérieur du local / bâtiment.

Pour le moment, la seule contrainte à cet égard est le recours à l'éco-prêt à taux zéro qui impose d'isoler au moins 50% des murs donnant sur l'extérieur pour une résistance thermique supérieure ou égale à 2,8 m²K/W, soit la RT 2005 (tableau 3). Sous réserve des décrets d'application, les critères d'octroi du CIDD imposent une résistance thermique supérieure ou égale à 2,8 m²K/W, si le propriétaire choisi d'isoler les murs, mais sans obligation de surface relative à isoler. Quant à la réglementation thermique sur l'existant, dès lors que l'on ne recourt pas à la réglementation globale, elle n'impose pas d'isoler la totalité des murs extérieurs si l'on touche à un seul d'entre eux (voir encadré n° 1). Qui plus est, son article 3 permet de descendre à 2 m²K/W si l'isolation impacte la surface habitable. Comment convaincre d'isoler les murs, alors que maximiser le ratio aide / investissement requiert de ne pas isoler les murs, ou à isoler hors aide ?

Nous avons fini par poser qu'environ 15,7 millions de résidences principales sont susceptibles d'être concernées par les épaississements de parois décrits dans le tableau 3¹⁴. Dans l'absolu, il s'agit de toutes les résidences principales dont la date d'achèvement est antérieure à 1974, soit antérieure à la première réglementation thermique. Certes, un nombre, à évaluer, de logements de cette époque a sans doute fait l'objet d'une rénovation thermique et/ou comporte des caractéristiques thermiques qui font que le tableau 3 ne leur est pas applicable. Toutefois, un nombre, à évaluer mais sans doute tout aussi important que le précédent, de logements postérieurs à 1974 ont été construits hors réglementation thermique et le tableau 3 leur serait donc applicable.

Nous sommes donc en mesure de donner un ordre de grandeur, mais incapables de le corrélérer à un segment précis du parc de logements, puisqu'il y a sans doute un transfert de un ou deux millions de logements à effectuer entre avant 1974 et après 1974, sans que l'on ne sache trop où sur le territoire. A part, sans doute, que l'individuel isolé tend à être plus énergivore que le collectif. Mais la marge de manœuvre en termes d'espace est susceptible d'être plus importante en individuel isolé qu'en collectif...

L'autre obstacle, pour l'identification des segments de parc susceptibles d'être fortement concernés par une perte d'espace habitable conséquente à un important épaississement des murs, réside dans la

¹⁴ Nous ne tenons pas compte des 180 000 éco-PTZ alloués ni des 6,2 millions de logements censés avoir bénéficié du CIDD depuis 2005. En effet, les demandes de labellisation Effinergie BBC rénovation ont porté sur seulement 31 458 logements entre mai 2010 et septembre 2011. Par conséquent, et au vu du montant moyen estimé des CIDD (1 957 €), ces données de rénovation ne modifient pas nos conclusions, basées sur l'hypothèse que l'atteinte du facteur 4 en 2050 passe par un renforcement considérable de la résistance thermique des murs.

connaissance statistique du parc de logements. En effet, nous travaillons sur les résidences principales mais on ne connaît pas, ou très mal, les fréquences et l'ampleur des transferts entre résidences principales, logements vacants, résidences secondaires, et logements « hors ménage ». Enfin, les statistiques sur les dates d'achèvement s'appuient sur les déclarations des occupants, et nous n'avons pas connaissance de contrôles et/ou recoupements avec les archives notariales. Et il n'y a aucun élément statistique sur les comportements thermiques des logements : la statistique nationale et l'évaluation immobilière sont deux mondes qui, pour le moment, s'ignorent.

B/ Quelle rencontre entre rénovation thermique, conditions et comportements ?

Rénovation thermique et systèmes de valeur liés aux bâtiments

En raison de la faible conductivité thermique, et donc de la résistance thermique élevée, des matériaux isolants, on peut prétendre isoler de façon uniforme tous les logements aux quatre coins de la France, en dépit de la relative variété de climats et de constructions qui caractérise ce pays. À partir d'une certaine épaisseur d'isolant, 60 centimètres de pierre taillée ont la même valeur de marché que 24 centimètres de parpaing enduit, en ce qui concerne le diagnostic de performance énergétique (DPE).

Cette simplification est extrême : le niveau d'isolation des parois n'est qu'un élément, parmi tous ceux qui jouent sur l'établissement du DPE. Qui plus est, ce niveau d'isolation ne joue que de façon indirecte, le diagnostiqueur n'étant pas amené à sonder la paroi pour établir la performance exacte de l'isolation.

Toutefois, l'objectif du DPE est bien de compléter l'incitation réglementaire (réglementation thermique) et les incitations financières (crédit d'impôt, éco-subsidation, éco-prêt à taux zéro...), à la rénovation thermique, par une incitation par le marché : le DPE se veut un élément de valorisation ou de dépréciation du bien immobilier objet de la transaction, à savoir facteur de plus-value ou moins-value immobilière.

Autrement dit, une tentative d'incitation par un impact sur la valeur vénale des logements. La valeur vénale étant définie comme une extrapolation de la valeur de marché par le processus de l'évaluation (transmission, expropriation...)¹⁵.

Si l'on prend le tableau 6, la tentative du DPE est d'être un élément de plus-value ou de moins-value au niveau du poste vétusté / état d'entretien. En termes de coût, la rénovation thermique, sur la base de l'effort d'isolation est celui d'une épaisseur d'isolant, la même pour tout le monde, pondérée par la surface d'enveloppe à isoler. Bien sûr, il y a le coût de la main d'œuvre et des adaptations au cas par cas, et la

¹⁵ " La valeur vénale d'un immeuble donné est l'intervalle de prix, déterminé à partir d'une série significative de mutations relatives à des droits comparables et constatés sur le marché, qui est susceptible de réunir le plus grand nombre d'acquéreurs et de vendeurs." [Francis Lefebvre p. 26].

rénovation thermique n'est pas réductible à la seule isolation thermique, loin de là. Mais les conditions de crédit (crédit d'impôt, éco-prêt à taux zéro, prêts...) réduisent d'éventuelles tensions à cet égard.

Tableau 6 : facteurs de détermination de la valeur vénale d'un logement

Facteurs physiques	situation et emplacement
	nature et qualité des matériaux, architecture
	taille du bâtiment
	ancienneté, vétusté, état d'entretien, charges
	distribution intérieure, possibilités d'utilisation, éléments d'équipement
Facteurs juridiques	état d'occupation, régime de propriété applicable
	réglementation d'urbanisme
	servitudes
Facteurs financiers	conditions de crédit

Bien plus, pour le moment, s'il y a désormais obligation de produire un DPE lors de toute transaction immobilière (mutation y compris successorale, location), il n'y a pas obligation, pour le propriétaire, d'effectuer les travaux avant la transaction : il est possible de s'arranger pour que les travaux soient effectués par la suite ou par le nouvel acquéreur. Sachant que ces travaux sont non seulement financièrement aidés mais sont susceptibles de procurer un retour sur investissement plus ou moins important, au travers des économies de charges de fonctionnement (énergie), il est plus intéressant d'effectuer les travaux après la transaction qu'avant la transaction. En effet, sans maturité du marché de la rénovation énergétique ni engagements sur résultats, il est difficile, sinon impossible, de trouver un acquéreur acceptant de compenser l'intégralité de la somme investissement + économies sur charge, sauf peut-être sur des montants modestes. Ce qui tend plutôt à minimiser la moins-value induite par un DPE à faibles notations (D et moins).

Le prix est le résultat d'une confrontation entre une offre et une demande. Il s'assimile plus ou moins à la valeur d'échange, à savoir la médiation sociale des valeurs particulières, dans une économie d'échange monétarisé. Mais la valeur d'échange est distincte du prix, ne serait-ce parce qu'il y a aussi médiation sociale des valeurs particulières en ce qui concerne les économies de troc, de partage et de don. Dans cette valeur d'échange, ici la valeur vénale d'un logement, le DPE tente d'introduire une montée en puissance de la prise en compte du « patrimoine » environnemental dans les valeurs particulières. Des rumeurs font état de l'apparition d'une « green-value » dans la formation des prix sur certains marchés immobiliers américains. Elles se fondent sur quelques études américaines (voir Miller et al. plus loin).

L'impact sur les prix de marchés immobiliers d'une plus-value ou moins-value liée au DPE est pour le moment invisible et de toute façon ne semble pas pouvoir dépasser les coûts des travaux de mise à niveau, amortis par le système d'incitation financière (éco-prêt...) et les économies de charges¹⁶, hypothétiques tant qu'il n'y a pas engagement sur résultats. En revanche, le système d'incitation à la rénovation

¹⁶ Avec un baril constant à 55€, 205 Md€ de travaux génèreraient 145 Md€ d'économies d'énergie cumulées [Nicklaus]. Par extrapolation, un baril constant à 100 € génèrerait sans doute le double d'économies mais le coût des travaux serait plus élevé.

énergétique sous-jacent au DPE risque de se situer en porte à faux avec certains paramètres de la valeur vénale : qualité des matériaux, qualité architecturale, distribution intérieure, possibilités d'utilisation...

Tableau 7 : épaisseur d'isolant et pertes en surface habitable (pour des logements de 30, 49 et 100 m²)

isolant	30 m ²	coût en €	49 m ²	coût en €	100 m ²	coût en €
2 + 9 cm	2,37 m ²	3 557 < x > 9 486	3,03 m ²	4 547 < x > 12 126	5,45 m ²	8 177 < x > 21 806
3 + 20 cm	4,85 m ²	7 273 < x > 19 394	6,23 m ²	9 343 < x > 24 914	11,29 m ²	16 933 < x > 45 154
3 + 34 cm	7,59 m ²	11 389 < x > 30 370	9,81 m ²	14 719 < x > 39 250	17,95 m ²	26 929 < x > 71 810
PIV 1 + 3 cm	0,87 m ²	1 310 < x > 3 494	1,11 m ²	1 670 < x > 4 454	1,99 m ²	2 990 < x > 7 974

calculé sur des données transactions enregistrées par les chambres notariales en 2004

Une épaisseur d'isolant, en masquant une paroi, tend à réduire sa valeur sur le plan de la qualité des matériaux, et de l'esthétique architecturale (immeuble de « caractère »). Bien plus, elle affecte la surface habitable et donc la distribution intérieure et les possibilités d'utilisation qui en découle. Pire, elle peut avoir un impact en termes de moins-value qui peut dépasser largement le montant maximal de l'éco-prêt à taux zéro (30 000 euros). Et encore nos prix ne sont pas actualisés (2004), et il s'agit seulement de la valeur du m² habitable. Et on ne prend pas en compte les éventuelles moins-values en termes d'impact sur les possibilités de distribution et d'utilisation.

Nous avons pris des exemples simplistes de rectangles et carrés, ce qui ne correspond pas vraiment à la réalité des plans de bâtiments. Or, les pertes en surface habitable résultant d'une réduction du périmètre sont sensibles à la forme du périmètre : les exemples 30 m² et 100 m² sont des rectangles, alors que l'exemple 49 m² est un carré, forme susceptible d'avoir estompé sa perte en superficie. En effet, le 100 m² a ici été calculé dans une configuration 20x5. Or, si on prend le 100 m² dans une configuration 10x10, on réalise une économie en surface habitable de... 3,7 m² pour la plus forte épaisseur d'isolant ¹⁷!

Sous réserve que nous ne sommes pas trompés dans nos calculs, on peut perdre, dans les exemples donnés, entre 2,37 m² et 17,95 m² habitables, soit des moins-values qui s'échelonnent entre 3 557 € et 71 810 €. Il s'agit de prix pour la Région Parisienne en 2004. Si on prend le prix médian du m² par arrondissement pour les appartements à Paris (3^{ème} trimestre 2008, Notaires d'Île-de-France) on obtient : pour l'arrondissement le moins cher (XIX^o), une fourchette du 30m² au 100 m² entre 12 514 et 94 776 euros ; pour l'arrondissement le plus cher (VI^o), une fourchette entre 24 660 et 186 770 euros. Malgré son épaisseur réduite, le panneau à isolation sous vide (PIV) générerait des moins-values comprises entre 4 594 et 10 507 euros dans le XIX^o arrondissement, et 9 052 et 20 706 euros dans le VI^o arrondissement.

¹⁷ Soit un écart de près de 21%. Selon [Traisnel et al 2001] le facteur de forme, défini comme la surface d'enveloppe extérieure par unité de surface habitable, ce qui ne semble pas très éloigné du rapport entre périmètre et surface habitable, varierait rarement à plus de 20%.

Encadré n° 2 : patrimoine, environnement et confort

Étymologiquement, patrimoine désignait les biens et droits hérités du père par opposition à matriloin, désignant ceux hérités de la mère, mais cette distinction s'est perdue et patrimoine désigne aujourd'hui « *l'ensemble des biens hérités des ascendants ou réunis et conservés pour être transmis aux descendants* »¹⁸. Mais il a également le sens de « *ensemble des biens et des obligations d'une personne (physique ou morale) ou d'un groupe de personnes, appréciables en argent, et dans lequel entrent les actifs (valeurs, créances) et les passifs (dettes, engagements)* ». On pressent que cette dernière définition émerge de la nécessité pour les créanciers d'avoir des garanties, donc résulte d'une démarche d'expansion des activités économiques, lesquelles sont fortement dépendantes des conditions de crédit.

C'est essentiellement cette dernière dimension, fiscale et financière, de patrimoine, qui a suscité l'émergence et la vogue de termes tels que gestion de patrimoine, conseil en patrimoine et même valeur patrimoniale. Pourtant ce dernier terme est vide de sens : « *Il n'existe pas de "valeur patrimoniale". Sans doute peut-on acquérir un bien dans une optique patrimoniale, c'est-à-dire comme une immobilisation que l'on conservera dans son patrimoine, ou dans une optique spéculative ou de marchand de biens, c'est-à-dire d'acheter en vue de la revente, mais il n'y aura jamais qu'une valeur d'échange, médiation sociale des valeurs particulières.* » [Francis Lefebvre p. 28].

Et même d'un point de vue statistique les contours de la notion de patrimoine sont imprécis : « *Patrimoine : il s'agit ici du patrimoine brut car l'endettement du ménage n'est pas déduit ; ce patrimoine brut inclus la résidence principale, la résidence secondaire, l'immobilier de rapport - c'est-à-dire rapportant un revenu foncier -, les actifs financiers du ménage, et les actifs professionnels lorsque le ménage a une activité d'indépendant à titre principal ou secondaire. Il n'inclut ni les biens durables, ni les bijoux ni les œuvres d'art (...) A noter que les revenus du patrimoine ne sont que partiellement couverts dans la déclaration fiscale : plusieurs types de revenus du patrimoine sont en effet exonérés d'impôts (épargne réglementée notamment) ou en partie seulement appréhendés dans les déclarations...* » [INSEE].

La politique fiscaliste de l'État joue un rôle important dans cette montée en importance, dans le quotidien des ménages, de la notion de patrimoine ; en entretenant d'ailleurs une confusion avec la dimension de transmission intergénérationnelle (donation comme outil fiscal...). Et l'arsenal issu du grenelle de l'environnement pour inciter à la rénovation thermique contribue à promouvoir la notion de patrimoine : crédit d'impôt, éco-subsidiation, éco-prêt à taux zéro, diagnostic de performance énergétique...

Plus exactement, la rénovation énergétique se fait au nom de la préservation du patrimoine environnemental, en appelant à la fois au concept de patrimoine de l'humanité (héritage collectif), d'enrichissement personnel et de transmission intergénérationnelle de biens. Bref, l'État joue ainsi sur la totalité du registre de la définition de la notion de patrimoine : transmission de biens et charges privés, constitution de garantie pour les créanciers, transmission de biens et charges collectifs.

Mais curieusement, au nom de la propriété collective (patrimoine de l'humanité, legs aux générations futures) on risque de remettre en question la propriété privée (surface habitable) afin de maintenir une définition collective d'un comportement individuel (le confort thermique)¹⁹. N'y aurait-il pas là une apparente cacophonie découlant de la mise en présence de différentes acceptions de différentes époques ?

En effet, on peut trouver une base hygiéniste aux définitions d'espace habitable et de confort thermique. Mais ces termes ont également une acception consumériste, étant donné que le logement est devenu un support majeur de consommation suite aux révolutions industrielles. Et l'évolution de la notion de patrimoine participe à une évolution de la notion de confort : posséder un patrimoine participe à la notion de bien-être matériel et donc de confort. Mais est-ce réellement nouveau ? La nouveauté n'est-elle pas une incorporation de l'environnement dans la notion de patrimoine et donc de confort ?

¹⁸ <http://www.cnrtl.fr/definition/>

¹⁹ On observerait tout de même des distributions de type courbe de Gauss dans les écarts à la moyenne en fonction des climats, cultures, générations, revenus, genres...

« Green-value » versus perte en espace habitable :

L'argument qu'une "green-value" compensant l'investissement à consentir en rénovation thermique existerait, est parfois avancé. Des études sur l'immobilier de bureau, et comparant des immeubles « verts » (certification Leed, Energy Star...) à des immeubles plus communs, auraient mis en évidence des loyers et des prix de revente plus élevés pour les immeubles « verts » : [Miller et al], [Fuerst & McAllister 2008, 2009], [Pivo & Fisher], [Eichholtz et al]. Déjà, il s'agit de tertiaire et non pas de résidentiel. Ensuite, la certification « verte » est la cerise sur le gâteau d'opérations haut de gamme et il est difficile de dissocier l'effet « vert » de l'effet haut de gamme. Or, la mise en évidence d'un effet vert varie sensiblement d'un auteur, et même d'une étude, à l'autre : 3% [Eichholtz et al], 5,8% à 10% [Miller et al], 13,5% [Pivo & Fisher], 25% à 26% [Fuerst & McAllister 2008], 31% à 35% [Fuerst & McAllister 2009], en plus-value de vente. Et, surtout, le problème de perdre de la surface utile ne se pose pas ou peu, et n'est en tous cas pas pris en considération. Nous avons effectué des calculs (tableau 8), pour vérifier quelle valorisation sur le marché immobilier permettrait de compenser la perte en espace habitable plus le coût des travaux.

Tableau 8 : hausse de prix immobilier requise pour amortir perte espace habitable + travaux

	plus-value pour un 30 m ²			plus-value pour un 49 m ²			plus-value pour un 100 m ²		
	Paris 17	Marseille 15	Mulhouse	Paris 17	Marseille 15	Mulhouse	Paris 17	Marseille 15	Mulhouse
base 2009	-31%	-64%	-77%	-21%	-40%	-48%	-14%	-22%	-27%
+ 10%	-29%	-65%	-77%	-19%	-40%	-48%	-12%	-23%	-26%
+ 20%	-19%	-55%	-67%	-9%	-30%	-38%	-2%	-13%	-16%
+ 30%	-9%	-45%	-57%	1%	-20%	-28%	8%	-3%	-6%
+ 40%	1%	-35%	-47%	11%	-10%	-18%	18%	7%	4%
+ 50%	11%	-25%	-37%	21%	0%	-8%	28%	17%	14%
+ 60%	21%	-15%	-27%	31%	10%	2%	38%	27%	24%
+ 70%	31%	-5%	-17%	41%	20%	12%	48%	37%	34%
+ 80%	41%	5%	-7%	51%	30%	22%	58%	47%	44%
+ 90%	51%	15%	3%	61%	40%	32%	68%	57%	54%
+ 100%	61%	25%	13%	71%	50%	42%	78%	67%	64%

sur la base des prix de vente des logements anciens, chambres des notaires, 2009 ; épaisseur isolant : 3 + 34 cm ; 30 000 euros de travaux sans emprunt et/ou avec crédit à 0%

Pour que l'investissement soit financièrement acceptable pour le propriétaire d'un 49 m², qu'il soit à Paris, Marseille ou Mulhouse, il faudrait que le prix du logement rénové connaisse une valorisation supérieure à 60% de la valeur vénale d'un logement similaire non rénové. Et plus le logement est exigü plus l'incidence de la "green value" doit être élevée. Valorisations requises très au-dessus des valeurs observées pour l'effet « vert » aux Etats-Unis : à 30% de hausse, soit un peu moins que le maximum de la "green value" observée sur les données CoStar (35% sur des opérations LEED et 31% sur des opérations Energy Star pour [Fuerst & McAllister 2009]), on se trouve encore « dans le rouge » dans la plupart des cas.

Il n'est pas improbable que les prix immobiliers connaissent des hausses telles qu'elles induisent un effet d'estompement des coûts induits par la rénovation thermique, lorsqu'il y a recours à l'isolation par l'intérieur. Mais le tableau 8 met en évidence des inégalités entre marchés locaux. Selon l'étude annuelle Century 21,

en 2010 les prix moyens du résidentiel auraient battu des records de cherté, avec toutefois d'importantes disparités, les prix les plus élevés s'observant à Paris. Dès lors, en 2050 il se pourrait que la géographie des prix moyen du mètre carré ne soit plus la même qu'en 2010, sans pour autant remettre en cause le tableau 8 : on aurait juste un déplacement des disparités, avec peut-être quelques atténuations ou accentuations.

La difficulté avec les relevés des prix immobiliers c'est qu'il s'agit de valeurs censée être moyennes et donc homogènes, alors qu'elles portent sur des logements à caractéristiques de valeur vénale souvent très hétérogènes (tableau 6). En outre, les transactions portent sur des logements et non pas des mètres carrés, et donc raisonner sur des prix moyens au mètre carré revêt un caractère encore plus artificiel. Le constat d'une moins-value ne peut se faire que lorsqu'il y a effectivement vente, et nos chiffres ne sont donc que des ordres de grandeur ; c'est d'ailleurs pour cela qu'il ne nous est pas paru important d'homogénéiser nos chiffres (données 2004 pour le tableau 7, 2009 pour le tableau 8).

Par ailleurs, on peut questionner qu'une perte d'espace habitable se traduise nécessairement par une moins-value. En doctrine fiscale les plus ou moins-values se calculent sur la différence entre prix d'acquisition et prix de vente et une pondération par la surface habitable est très loin d'être acquise. D'un point de vue économique, si l'on vend une moindre quantité pour une plus grande valeur, inflation déduite, on réalise non pas une moins-value mais une plus-value (tableau 9).

Tableau 9 : moindre quantité pour même valeur monétaire égale plus-value ?

	Surface habitable m ²	Prix de vente	Prix au mètre carré	Gain relatif au m ²
Maison non isolée	125,78	228 500	1 816,66	
Idem ITI BBC	119,43	228 500	1 913,25	+ 5,3%
Idem ITI PASSIF	112,32	228 500	2 034,37	+ 12,0%

Maison ouvrière (voir Schéma 2 plus loin) ; prix moyen secteur de Lille pour une maison 6 pièces sur la base des transactions réelles (chambres des notaires) du 01/08/2010 au 31/07/2011 = 228 500 euros ; ITI = Isolation Thermique par l'Intérieur

Même si une réduction de surface peut faciliter les transactions dans certains cas (logements à très grandes surfaces), il est peu probable que le point de vue illustré par le tableau 9 soit répandu chez les vendeurs de logement. Au contraire, c'est plus sur la valeur des mètres carrés non vendus (surface habitable perdue) que sur la valeur des mètres carrés vendus, que risque de se porter l'attention des vendeurs.

Tableau 10 : quelle moins-value monétaire pour une perte en surface habitable ?

m ² achetés	m ² vendus	m ² perdus	Perte m ² ach	-value V1	-value esc1	Perte m ² ven	-value V2	-value esc2
125,78	119,43	-6,35	- 11 535,82 €	-5,0%	-4,8%	- 12 149,17 €	-5,3%	-5,0%
125,78	112,32	-13,46	- 24 452,30 €	-10,7%	-9,7%	- 27 382,57 €	-12,0%	-10,7%

Perte m²ach = valeur des m² perdu sur la base « j'ai vendu ce que j'ai acheté à tant » soit 228 500/125,78 = 1 816,66 € / m²
 -value V1 = Perte m²ach rapportée au prix de vente (228 500 €)
 -value esc1 = Perte m²ach rapportée à la somme (Perte m²ach + prix de vente)
 Perte m²ven = valeur des m² perdu sur la base surface habitable au moment de la vente soit 1 913,25 € et 2 034,37 € / m²
 -value esc2 = Perte m²ven rapportée à la somme (Perte m²ven + prix de vente)

Cette valeur est certes « théorique » mais sujette à interprétation. Or les écarts d'interprétation augmentent en fonction de l'épaisseur d'isolation et des surfaces à isoler. Sachant que les propriétaires se focaliseront probablement moins sur la quantification précise des moins-values, que sur l'impression d'avoir vendu à 228 500 euros un logement qui aurait pu rapporter 240 649 euros (hypothèse rénovation BBC) ou 255 883 euros (hypothèse rénovation label passif), s'ils avaient fait le choix d'isoler par l'extérieur. Il est peut-être même difficile d'échapper à la tentation de se dire qu'en ne rénovant pas du tout, ou juste avec un peu de peinture et un bon nettoyage, il aurait peut-être été possible de vendre à 228 500 euros...

En tout état de cause, 11 536 euros de « manque à gagner » ce n'est pas rien, ni économiquement ni psychologiquement, pour de nombreux ménages de la région lilloise... Sachant que pour un couple avec 3 enfants non émancipés le plafond du crédit d'impôt au développement durable est actuellement de 17 200 euros, il est tentant de se dire que l'aide effective est de $17\,200 - 11\,536 =$ seulement 5 664 euros... Alors que dans le même temps l'aide effective à un célibataire avec un manque à gagner de 2,37 m² sur la vente d'un 30 m² (tableau 7), serait de $8\,000 - 4\,305 =$ 3 695 euros (sur la base de 1 816,66 € / m²). Le crédit d'impôt au développement durable ne creuserait-il pas les inégalités sociales, et même territoriales, dans les contextes de recours à l'isolation thermique par l'intérieur ?

Certes... mais nous ne prenons pas en compte la valeur des travaux déduite des aides publiques rapportées aux économies de fonctionnement dans un contexte de hausse du prix du baril de pétrole. Nous reviendrons un peu plus loin sur ce point. Examinons maintenant l'impact sur l'habitabilité, pour ne pas dire le confort, d'une réduction ou d'une réallocation de l'espace habitable.

Rénover en isolant par l'intérieur : réduire et/ou réallouer l'espace habitable

La diminution de l'espace habitable d'un espace déjà occupé, suite à épaissement de l'isolation intérieure, peut avoir de nombreuses conséquences :

- impact sur le mobilier possédé (changer la disposition, changer de meubles, démolir les placards intégrés...);
- impact sur les équipements (décaler les radiateurs pour ceux qui en possèdent...);
- impact sur les huisseries (ergonomie d'ouverture, luminosité);
- accès sur les accès réseaux techniques en façade;
- impact sur les cheminées à foyers, inserts...
- impact sur le garage, rejet éventuel des véhicules en extérieur et impacts subséquents (places de stationnement, vol, réduction durée de vie véhicule...)
- impact sur les industries du meuble et de l'électroménager (modularité, dimensions);
- impact sur la valorisation du bien immobilier (coût foncier, cote énergétique);
- résolution des contraintes de rénovation thermique en intérieur en logement occupé;
- etc....

Le schéma 1 permet d'imaginer l'impact d'un épaissement de 23 à 37 cm de 3 des 4 parois d'un logement (il est mitoyen sur une paroi) : escalier moins large ou à déplacer, WC plus exigus ou à déplacer, perte en éclairage naturel, éléments de cuisine à déplacer...

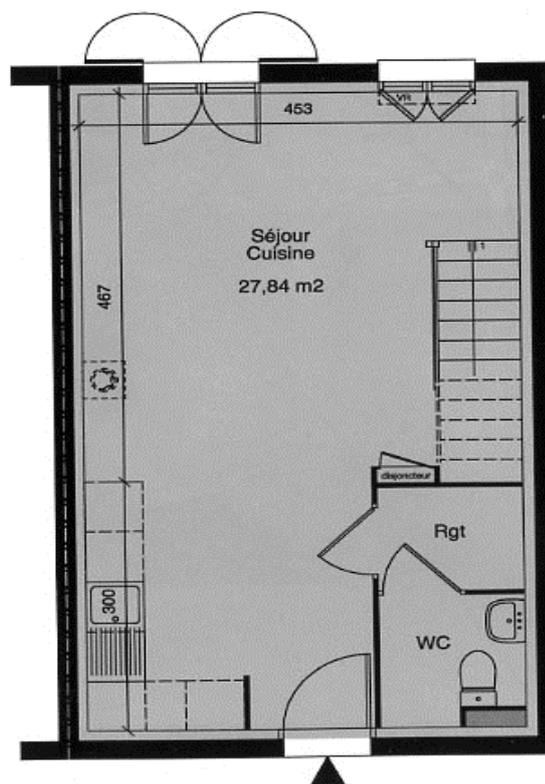


Schéma 1 : impact de l'isolation par l'intérieur

En ce qui concerne les impacts huisseries, équipements, accès réseaux, cheminées, les contraintes d'intervention en espace occupé... l'artisan et/ou le maître d'œuvre en charge de la rénovation thermique est le plus à même d'intégrer, de préférence en amont du chantier, ces paramètres et proposer des solutions satisfaisantes. Et ce d'autant plus qu'il y a concurrence entre systèmes d'isolation, et que l'isolation par l'intérieur doit être optimisée pour être compétitive face à l'isolation par l'extérieur.

Pour ce qui est des industries du meuble et de l'électroménager, la problématique de rénovation thermique sera tôt ou tard intégrée. Certains professionnels du meuble réfléchissent déjà à la question.

Nous avons travaillé sur l'impact sur l'espace habitable, à savoir le problème auquel sera confronté l'occupant d'une opération de rénovation thermique avec isolation par l'intérieur, qui pour l'heure est une question assez peu évoquée pour laquelle il n'existe, pour le moment, aucune démarche de sensibilisation.

Qui plus est, hors logement social, la problématique du réaménagement de l'espace habitable est généralement à la charge de l'occupant plus ou moins aidé par les installateurs et/ou les fournisseurs. En effet, le recours à un architecte d'intérieur ou un décorateur est assez peu répandu et nécessite un certain budget. Dans l'ameublement, Ikéa (généraliste) ou Aviva (cuisine) proposent un service d'aménagement de l'espace avec gratuité téléchargeable. Les grandes surfaces de bricolage proposent parfois les conseils d'un architecte. Les logiciels de type Architecte 3D et ses déclinaisons connaissent un succès non

négligeable auprès des ménages²⁰.

Nous avons initialement utilisé le « Ikea Home Planner ». Mais si ce logiciel se révèle très pratique pour disposer du mobilier Ikea sur une surface, il est très éloigné d'une représentation architectonique. Et surtout, on ne peut pas déplacer, étirer, faire bouger les murs... s'agissant d'un simple logiciel de dessin, avec cotations et bibliothèque d'icônes (mobilier), malgré une option 3D. Nous lui avons donc préféré le très populaire « architecte 3D », qui présente l'avantage d'intégrer des plans, pour lesquels il est possible (non sans difficultés) de faire varier les murs.

Nous ne nous sommes pas basés sur les épaisseurs du tableau 3, qui ne prennent en compte que la valeur de R à respecter pour la paroi, sans prise en compte des performances réalisées sur les autres postes permettant éventuellement de moindres épaisseurs. Une étude de B. Jarno [Oliva & Courgey p. 35] donne, en intégrant un chauffage performant, des épaisseurs moyennes autour de 15 cm (polystyrène, laine de verre) pour le BBC et autour de 30 cm pour le Passif (passivhaus). Ce sont donc ces épaisseurs que nous avons retenues, bien que ce soit plutôt une situation de chantier avec intervention en amont d'un thermicien et calcul relativement fin de la performance globale, ce qui ne sera pas nécessairement le cas le plus courant même avec l'essor de logiciels mettant les approches globales à la portée du plus grand nombre de chantiers.

Avant rénovation, cette maison comporte une surface habitable de près de 126 m² (74 en RDC, 52 à l'étage s'agissant de combles occupés). Nous avons fait l'impasse sur la toiture (une isolation par l'extérieur de la toiture avec isolation par l'intérieur des murs est cependant plausible). Pour une rénovation de type BBC, la surface habitable tombe à moins de 120 m² (69 RDC, 50 R+1), soit une perte de plus de 6 m². Pour une rénovation de type Passif, la surface habitable tombe autour de 112 m² (64 RDC, 48 R+1), soit une perte de plus de 13 m² par rapport à la situation d'origine²¹. Pour le moment, on retiendra surtout les problèmes d'utilisation de l'espace et de rééquipement mobilier.

Le problème est patent avec le WC, l'entrée et la cuisine au RDC et la salle de bains à l'étage. Il y a déjà problème avec la porte du WC en version BBC, et en version Passif il semble impossible de conserver le WC : il faut abattre la cloison le séparant de la salle de bain, abolissant le caractère privatif de celle-ci, et repositionner. Ou si l'on veut conserver les caractéristiques anthropologiques du rez-de-chaussée (accueil des visiteurs, l'étage étant privatif du moins dans le Nord), il faut sensiblement modifier la salle de bain (enlever le lavabo, découper pour déplacer une porte, remettre une cloison...). Dans tous les cas il est impossible de conserver l'ensemble de type Cuisinella, sauf à le démonter et l'amputer d'une partie au remontage. Il faut refaire les points d'eau de la cuisine ainsi que pour la salle de bain à l'étage. Il y a également une baisse de la luminosité naturelle qui risque de ne pas être sans incidence sur l'éclairage, sauf à faire des traitements en biseau des jonctions huisseries...

²⁰ Architecte 3D est censé être le logiciel d'architecture 3D grand public le plus vendu au monde depuis 2004.

²¹ Il y a peut-être problème de calcul de surface en étage, l'effet combles n'expliquant éventuellement pas les écarts entre R+0 et R+1.

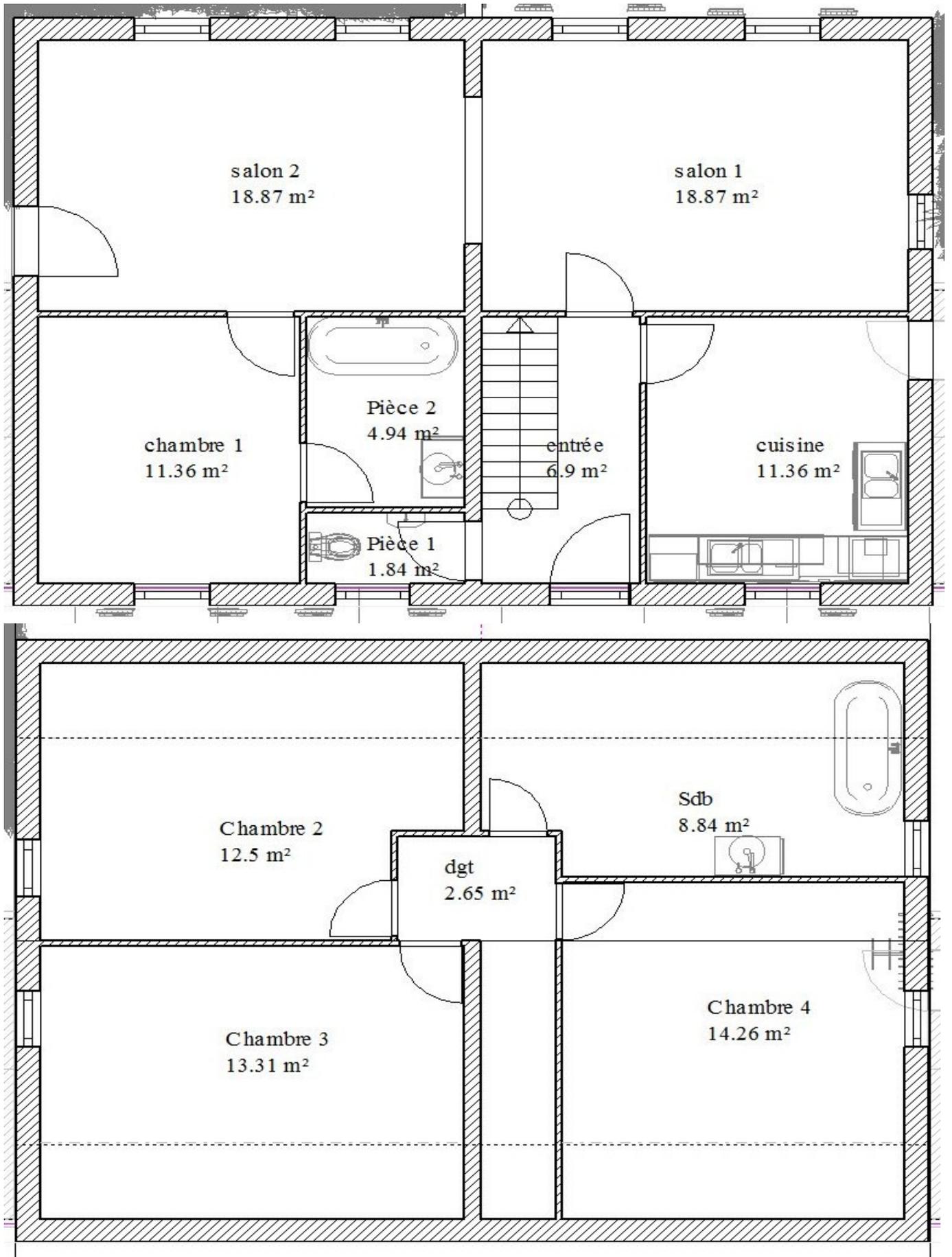


Schéma 2 : maison ouvrière (Nord) sans isolation (RDC et R+1)

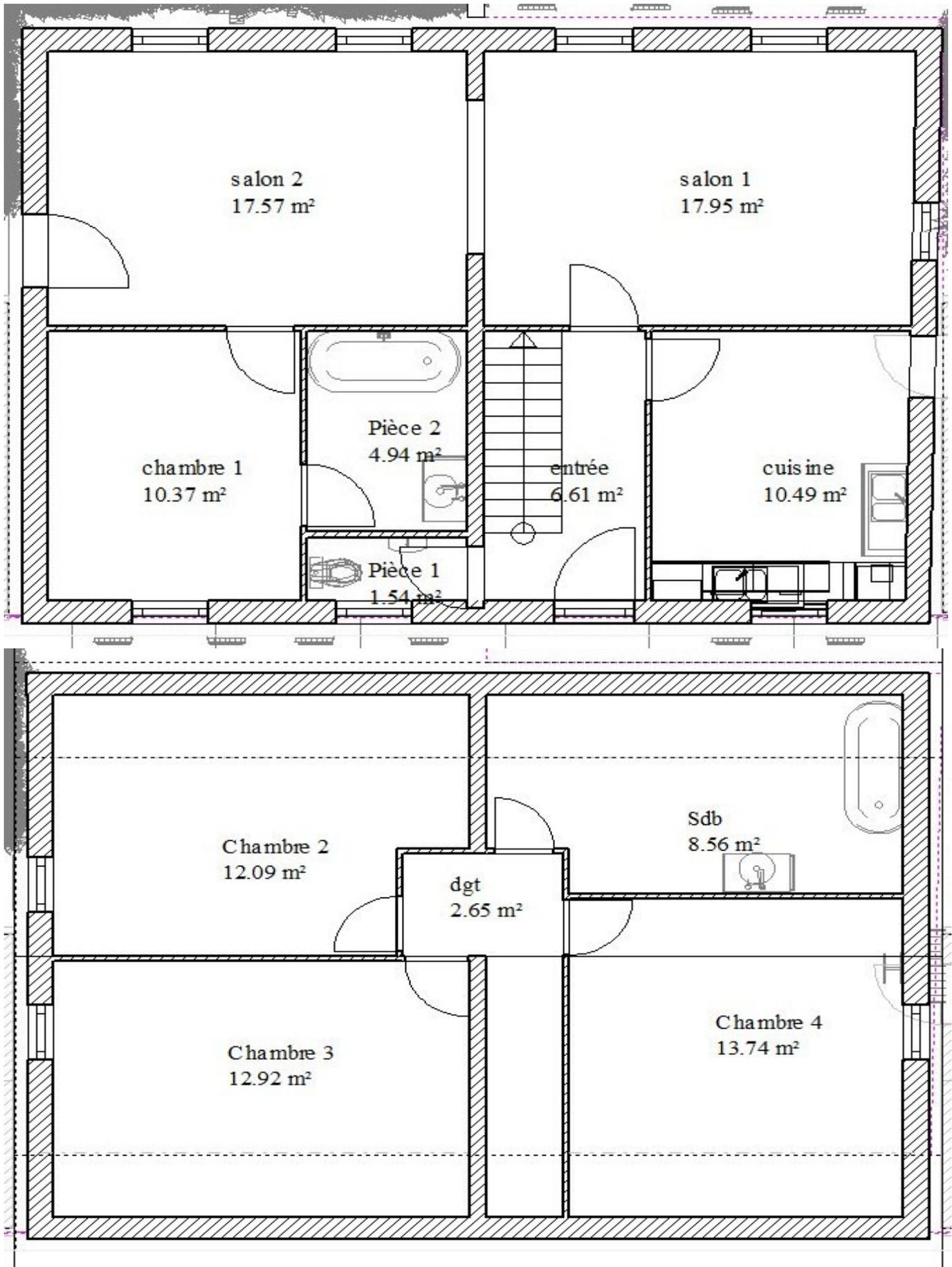


Schéma 3 : maison ouvrière (Nord) de type BBC (15 cm d'isolant ; RDC et R+1)

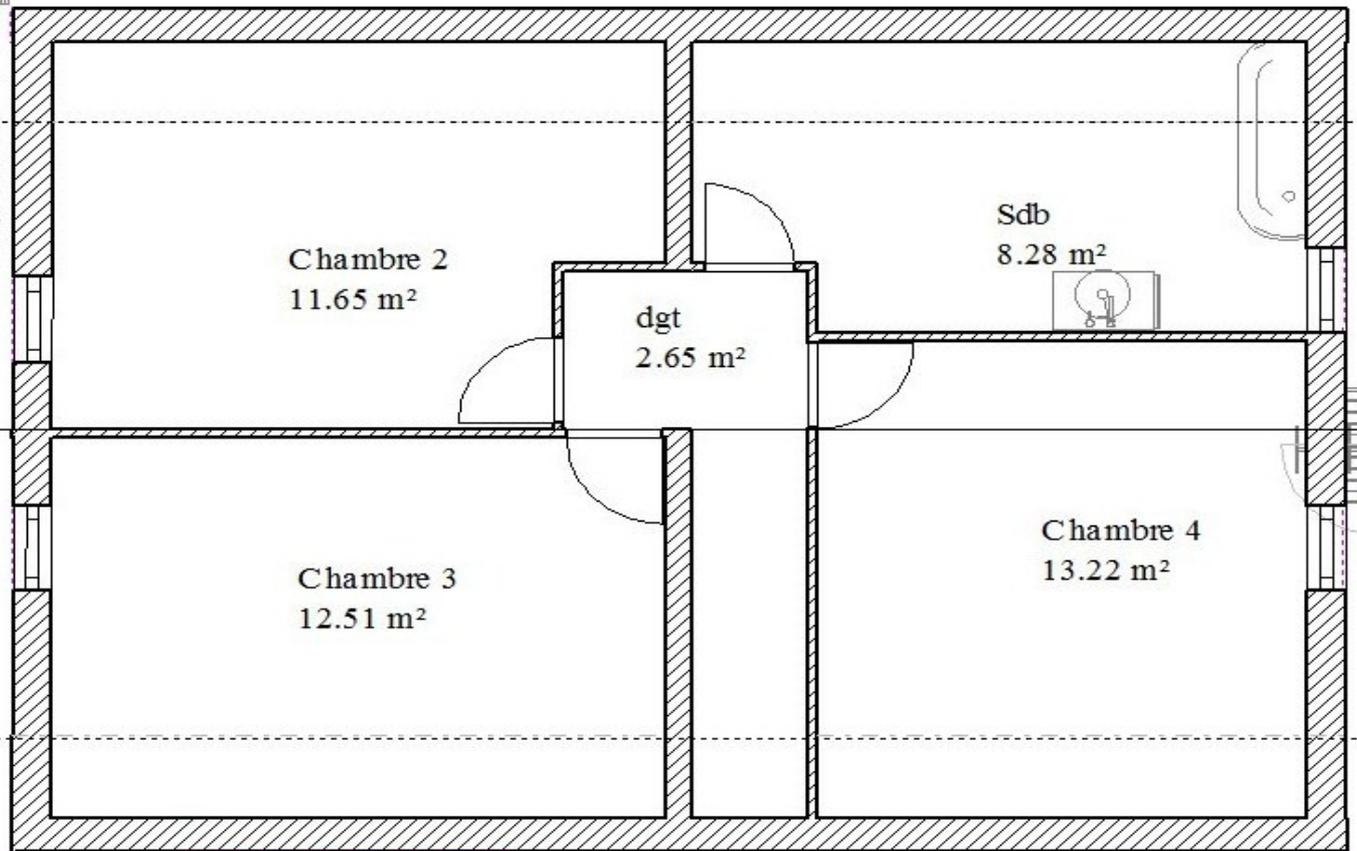
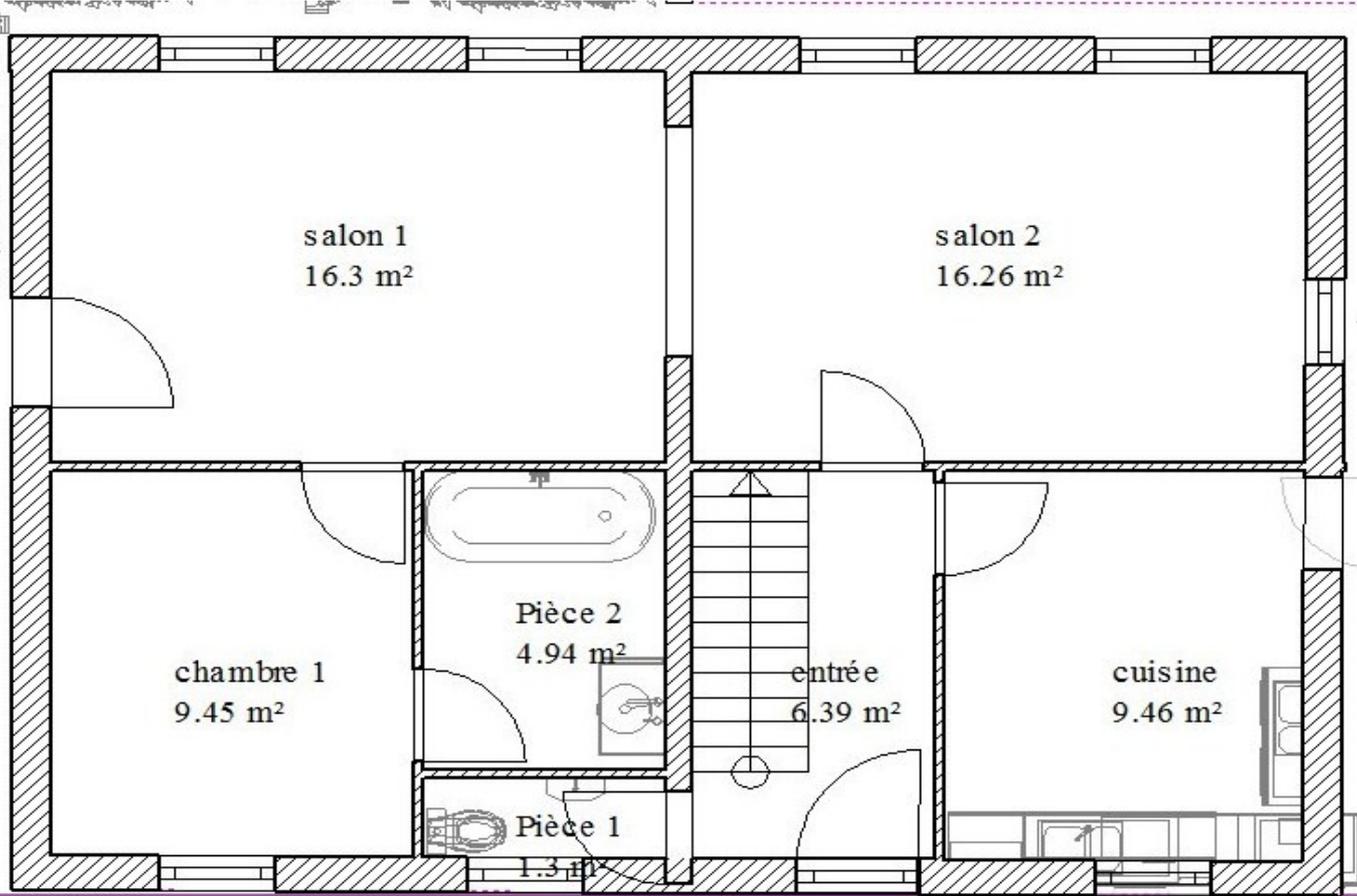


Schéma 4 : maison ouvrière (Nord) de type Passif (30 cm d'isolant ; RDC et R+1)

Et nous n'avons pas visualisé ici les impacts sur les éventuels radiateurs, ou les cheminées, la présence d'un garage ou d'un cellier accolés, ni considéré les problématiques de handicap, vieillissement... Notons que si dans le cas présent l'entrée tend à être réduite à un escalier, la situation est moins dramatique que dans le schéma 1, où il faut nécessairement déplacer l'escalier si l'on souhaite conserver une accessibilité personne âgée voire mettre aux normes handicapés (la toilette et le sommeil s'effectuant à l'étage).

Cet exercice démontre également qu'il n'est pas très compliqué pour un particulier d'examiner l'impact d'une augmentation d'épaisseur d'isolant par l'intérieur. Du moins pour une estimation, car le logiciel n'est pas très adapté à des déplacements des parois : il tente de respecter les proportions ouvertures/parois, au lieu de garder les dimensions des ouvertures constantes (ou alors nous sommes passé à côté de certaines possibilités de paramétrage), et va même parfois jusqu'à supprimer les ouvertures. Il y a des différences de quelques centimètres entre les surfaces affichées sur plan et celles figurant sur la feuille des coûts. Le calcul de la surface habitable semble pêcher en ce qui concerne les pièces avec escalier, et il y a de toute évidence un problème avec le couloir à l'étage. Mais si l'on s'en donne la peine et le temps le logiciel Architecte 3D est un support qui permet à un particulier d'intégrer l'impact en surface d'une rénovation thermique. Surtout si une mise à jour venait opportunément le rendre beaucoup plus adapté pour ce faire.

Rénover en isolant par l'intérieur est un défi considérable à la conception en termes d'anticipations et de créativité. Il faut minimiser le plus possible la perte d'espace habitable, variable selon les configurations, et donc trouver des astuces, thermiques, spatiales, fonctionnelles... Il faut également optimiser les réaménagements. Et, en particulier, saisir l'opportunité pour approfondir les réflexions concernant le vieillissement de la population, l'obligation d'accessibilité... L'association des ménages à cette démarche nous paraît fondamentale. Le développement de logiciels grand public est une piste. Notons également que le mobilier est susceptible de réduire les pertes en surface habitable et même de participer à l'isolation thermique : les anticipations et innovations des professionnels de l'ameublement sont aussi une piste.

Rénover en isolant par l'extérieur : pousser les murs

Nous avons posé qu'il y aurait entre 13 à 15,7 millions de résidences principales ne satisfaisant à aucune réglementation thermique, ou comportant un isolant qu'il faut remplacer. On est donc à l'aube d'une redéfinition d'ampleur de l'espace habité, soit en allant chercher l'espace nécessaire à l'isolant thermique sur les espaces extérieurs pour ne pas modifier les surfaces habitables (isolation par l'extérieur), soit en diminuant les surfaces habitables (isolation par l'intérieur), soit en panachant expansion extérieure et intérieure de l'enveloppe des bâtiments et/ou pratiquant la correction thermique.

Pour l'isolation par l'extérieur, se pose d'abord la question de la disponibilité en espaces extérieurs. En tissu urbain lâche, la question se pose peu, sauf peut-être en terrain boisé ou accidenté. En revanche, en tissu urbain très dense la question peut se traduire par des problèmes d'emprise sur la voirie, d'alignement,

de prospect, de mitoyenneté... Se pose ensuite la question de la cohésion fonctionnelle et esthétique de cette enveloppe expansée : raccords et débords de toiture, balcons, terrasses, vérandas, descentes des eaux pluviales, gaines techniques, appuis de fenêtres, accès à la lumière naturelle...

Se pose également la question de l'éventuel changement de la nature, couleur et qualité des matériaux (façades, pignons, toiture...), interpellant les réglementations d'urbanisme, la compatibilité avec le goût architectural voire la valeur de marché du bâtiment. Question délicate alors que, par exemple, le goût pour une architecture de caractère tend à vouloir rendre apparents des matériaux et assemblages souvent enduits dans la pratique vernaculaire, donc à assujettir certaines pratiques vernaculaires au goût contemporain quand dans le même temps ce goût contemporain interdit de retoucher les façades haussmanniennes.

Rénover thermiquement, aussi bien par l'intérieur que par l'extérieur, est désormais soumis à la réglementation thermique sur l'existant. Par ce biais, et par ce biais seulement, le code de la construction s'applique à tous travaux de rénovation thermique, qu'ils soient soumis ou pas à autorisation (permis de construire ou déclaration). Or, à la différence de l'isolation par l'intérieur, l'isolation par l'extérieur est nécessairement soumise à déclaration de travaux. Or, la réglementation thermique sur l'existant stipule, via les décrets d'applications des articles R 131-26 (performance globale) et R 131-28 (performance éléments par éléments) du code de la construction, que l'isolation par l'extérieur doit respecter les obligations de préservation (ZPPAUP, secteurs sauvegardés, site protégé ou dans un rayon de 500 mètres autour d'un monument historique, espaces sensibles...) ²² ; sachant que 70% du territoire français est protégé à un titre ou un autre [Bachoud]. Par conséquent, isoler par l'extérieur est susceptible d'être soumis à avis, en particulier celui d'un architecte des Bâtiments de France.

Les architectes des Bâtiments de France exercent au sein du Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine (SDAP) dont chaque département français est doté. Le Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine émet un avis sur tout projet soumis à autorisation d'urbanisme se trouvant dans les dites zone protégées. Toutefois, dans ces zones, tout travail susceptible d'impacter durablement l'aspect extérieur des bâtiments est en fait soumis à avis du SDAP, comme, par exemple, repeindre ses volets ou remplacer des tuiles sur la toiture, dès lors qu'il y a changement d'aspect (couleur...).

Les décisions des Architectes des Bâtiments de France, quand bien même il s'agit de fonctionnaires, ne vont pas nécessairement dans le sens des mesures gouvernementales destinées à diminuer les émissions de

²² « Les travaux d'isolation des murs par l'extérieur ne doivent pas entraîner de modifications de l'aspect de la construction en contradiction avec les protections prévues pour les secteurs sauvegardés, les zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager, les abords des monuments historiques, les sites inscrits et classés, les sites inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'humanité de l'UNESCO ou tout autre préservation édictée par les collectivités territoriales, ainsi que pour les immeubles bénéficiant du label patrimoine du XXe siècle et les immeubles désignés par l'alinéa 7 de l'article L. 123-1 du code de l'urbanisme » article 6 de l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants (JO du 17/05/2007). L'article 45 de l'arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants (JO du 08/08/2008), commence par « les travaux d'isolation des parois opaques », le reste étant inchangé. En outre, l'article R 131-25 exclus du champ d'application de la réglementation thermique les monuments historiques classés ou inscrits à l'inventaire lorsque celle-ci a pour effet de « modifier leur caractère ou leur apparence de manière inacceptable ».

gaz à effet de serre. Par exemple, une installation photovoltaïque sur le toit, quand bien même il s'agirait de photovoltaïque intégré, peut recevoir un avis favorable dans une commune de la Région Parisienne et un avis défavorable dans une commune du Var : tout dépend, par exemple, de la situation au regard du monument historique protégé par le SDAP compétent.

Prenons l'exemple des maisons à pan de bois : dès lors que l'Architecte des Bâtiments de France a à se prononcer, on n'aura pas nécessairement le même avis d'un architecte à un autre. En effet, dans le cas d'Auxerre, pour lutter contre les incendies dès le moyen-âge les autorités de la ville avaient imposé d'enduire les façades à pan de bois. Mais la mesure n'a pas été systématiquement adoptée et respectée. En fonction de sa sensibilité à la question et de sa connaissance de l'histoire des pans de bois à Auxerre, un Architecte des Bâtiments de France pourra tolérer sous certaines conditions une isolation extérieure faisant disparaître un pan de bois apparent là où son collègue ne le tolérera pas. Et si l'enduit sur pan de bois a pu être largement pratiqué à Auxerre ou en Picardie, ce n'est pas nécessairement le cas dans d'autres régions.

Photo 1 : enduit vernaculaire et esthétique contemporaine de mise à nu (Essonne)



Crédit photo : Dominique Theile

Cette question d'enduire ou non des façades à pan de bois, de pierre ou autre matériau, est assez complexe, car relevant d'appréciations devant se fonder sur une connaissance très fine de l'histoire du patrimoine local. Or, avec un effectif national d'environ 170 Architectes des Bâtiments de France, et un recrutement qui varie en moyenne entre quatre et huit architectes par an, un Architecte des Bâtiments de France ne peut pas toujours être extrêmement pointu concernant l'histoire du patrimoine local quelle que soit la localité où il est amené à se prononcer.

Au vu de leur nombre, des évolutions du goût contemporain, des dynamiques immobilières, et des politiques d'amélioration liées à l'atteinte de l'objectif facteur 4, on peut s'attendre à de substantielles évolutions et matière à débat. D'ailleurs, suite au Grenelle 1, concernant les près de 600 ZPPAUP en France, un récent amendement a introduit plus de souplesse en soumettant les autorisations d'urbanisme à un avis simple d'un Architecte des Bâtiments de France, et non plus à un avis conforme. Ce qui a donné lieu à contestation, conduisant à l'annulation de la mesure, rétablie par la suite dans le cadre du Grenelle 2. Compétences des Architectes des Bâtiments de France contestées, donc, sachant en outre qu'il est assez fréquent que les clôtures et les volets soient repeints par les ménages sans respecter les teintes originelles et sans en référer auprès du SDAP compétent, et ce sans que les contrevenants ne soient jamais inquiétés.

Quelles inégalités des populations et territoires ?

IMPACT DES EPAISSEURS D'ISOLANT THERMIQUE SUR LES SURFACES HABITABLES ET URBAINES

Nous nous sommes risqués à tenter d'estimer un impact en surface (habitable ou urbaine) de la rénovation énergétique de 15 649 533 résidences principales (voir tableau 2). Exercice délicat étant donné qu'on ne connaît pas l'impact logement par logement (isolation par l'intérieur) ou bâtiment par bâtiment (isolation par l'extérieur) étant donné la très grande variété de situations, de distributions intérieures, de configurations des périmètres des murs, de mitoyennetés. Il paraît néanmoins possible de bâtir un modèle simple, en s'appuyant sur les statistiques issues de l'enquête logement INSEE, et, d'autre part, sur les mètres d'impact d'épaisseur d'isolant sur des familles de configurations de logements et de bâtiments.

Faute d'un tel travail, on peut néanmoins risquer des hypothèses sur la perte moyenne, étant donné qu'il y a une régularité dans le rapport entre épaisseur supplémentaire et superficie du logement (tableau 7). Dans le tableau 11, nous avons fait des regroupements par catégorie de surface et attribué des valeurs moyennes relativement proches de celles trouvées pour les exemples du tableau 7. Une première difficulté est que nous n'avons pas le détail de la ventilation (appartements, maisons, surfaces) des 15 649 533 résidences principales à rénover. Une seconde difficulté est, pour l'isolation extérieure, qu'il faut procéder à une ventilation par étages. Nous avons procédé à des hypothèses simplistes : nous avons posé que la répartition type de logements et surfaces était identique pour les logements à rénover à celle valable pour la totalité du parc de résidences principales ; nous avons posé, pour les maisons, que jusqu'à 3 pièces il s'agit de R+0 et qu'au delà c'est du R+1 ; nous avons posé, pour les appartements, que la moyenne nationale était de R+7 (soit 8 niveaux) de façon à intégrer l'effet des grands ensembles, et celui des immeubles disposant d'espaces extérieurs n'empiétant pas sur la voirie et les espaces publics. Quant aux maisons, nous avons considéré que seulement 10% avaient façade sur voirie / espace public.

L'impact d'une rénovation thermique exclusivement menée avec 23 cm d'isolant (BBC 2005 tableau 3) côté intérieur, se traduirait par une perte cumulée d'espace habitable d'environ 128 millions de mètres

carrés. La même rénovation thermique menée côté extérieur aurait dix fois moins d'impact, avec seulement 12,5 millions de m² prélevés sur l'espace public, et encore ce chiffre est-il peut-être surestimé.

Tableau 11 : pertes globales en surface selon mode d'isolation (hypothèse BBC tableau 7 : 23 cm)

catégorie	Isolation par l'intérieur			Isolation par l'extérieur			
	total	m ²	perte Surf Hab	appartement	perte S publique	maison	perte S publique
moins de 40 m ²	2 227 085	5	8 801 389	1 591 903	994 939	635 182	317 591
de 40 à 99 m ²	11 945 064	7	66 424 188	5 320 169	4 655 148	6 624 895	4 637 427
plus de 99 m ²	1 477 384	12	52 801 026	514 486	771 728	962 899	1 155 478
total	15 649 534		128 026 603	7 426 557	6 421 816	8 222 976	6 110 496

calculs effectués sur la base du nombre de résidences principales ventilé par surface et catégorie de logement (INSEE)

Sur la base de la surface moyenne des résidences principales en 2006 (91 m²) ces 128 millions de mètres carrés représentent l'équivalent de plus de 1,4 millions de logements, soit une perte de surface équivalent à 35 172 logements par an d'ici 2050. Soit l'équivalent d'un taux de sortie passant de 0,12% à 0,27% (30 000 à 65 000). Quelles seront les conséquences d'un tel scénario sur le marché immobilier sachant qu'il prend à contre-pied la période 1985-2006 où la surface moyenne est passée de 83 à 91 m² ?

Autrement dit, alors qu'en vingt ans la surface moyenne augmente de 9 m² en quarante ans la surface moyenne baissera de 8 m². Certes cette baisse moyenne de 8 m² sera limitée à 60% du parc de résidences principales actuel (chiffres de 2006), soit 44% du parc de résidences principales de 2050 (hypothèse [Traisnel et al. 2010]). Mais, si l'on entre dans le détail, la surface moyenne varie entre le « ville-centre » (78 m²) et le « périurbain » (110 m²). Qui plus est, entre 1985 et 2006, la surface moyenne en « ville-centre » baisse (de 79 à 78 m²). Et l'augmentation de la surface moyenne s'est fait en parallèle d'une augmentation du prix moyen au mètre carré, sur la même période.

Il faudrait une discussion approfondie sur la relation entre variation de la taille moyenne des logements et évolution des marchés immobiliers. Et même nourrir des modèles de marchés immobiliers avec des hypothèses sur l'impact des épaisseurs d'isolant sur la variation de la taille moyenne des logements. Il semble toutefois difficile d'écarter qu'il n'y ait pas des tensions sur les marchés entraînant des hausses.

Pour en revenir au tableau 8, il serait alors loin d'être improbable qu'un 30 m² acquis à Mulhouse en 2009 et rénové à la norme Passivhaus (37 cm d'épaisseur) puisse être revendu avec une plus-value de 3%²³. Mais ce serait tout sauf une « green-value ». Ce serait une résultante d'un emballement des marchés sous effet de la diminution de la taille moyenne des logements résultant de la rénovation thermique. Avec probablement accentuation de certains phénomènes de « gentrification ».

On aurait ainsi des ménages « vertueux » alimentant, en finançant des travaux de rénovation, la hausse des prix immobiliers et donc les plus values de ménages « moins vertueux » (revendant sans réaliser de

²³ Il y a problème d'harmonisation : il faudrait établir le tableau 8 sur une base BBC ou le tableau 11 sur une base Passivhaus.

rénovation thermique). Qui plus est, il y aurait des laissés pour compte : il est probable que les ménages sur les marchés de moindre tension ne pourrions pas amortir, par une plus-value de marché, leurs travaux de rénovation, en particulier dans les zones rurales.

Pour ce qui est de l'hypothèse « tout ITE », il ne semble pas y avoir risque d'un emballement des marchés immobiliers sous effet de diminution de la surface moyenne des logements. En revanche on peut se poser la question de l'impact de la perte d'espaces publics. Supprimer environ 1,25 km² reviendrait à rayer de la carte la commune des Lilas (une des communes jouxtant le 19^{ème} arrondissement de Paris) ou un peu plus que la totalité du 3^{ème} arrondissement de Paris. Répartis entre les 36 000 communes françaises cela ne ferait que 348 m² par commune (environ 27 places de stationnement), ou encore 131 919 m² par département (environ 10 148 places de stationnement).

Le problème est que la répartition de cette perte d'espace ne sera pas homogène, et est donc susceptible d'inégalités de territoires : elle affectera essentiellement les zones urbaines à forte densité composées d'immeubles à façades sur rues, en particulier les centre-ville anciens, donc là où se posent déjà d'importants problèmes de stationnement et de gestion des espaces publics. La rénovation thermique devra donc être accompagnée d'un réaménagement des réglementations d'urbanisme (prospect, alignement, COS...), et être coordonnée avec les politiques de stationnement et de transports. Sans quoi, des effets pervers risquent de se produire non seulement en termes de coûts et temps de transports de certains ménages, mais également en termes d'impact sur les activités économiques (impact commercial de l'accessibilité aux centres urbains...), et/ou sur les relations entre riverains, usagers, et collectivités (places et horaires de livraison, pistes cyclables, végétalisation...).

[Traisnel et al. 2010] est une prospective sur l'évolution de la performance énergétique du parc de résidences principales en métropole et les chances d'atteindre l'objectif « facteur 4 » en 2050. L'hypothèse de rénovation retenue est de ne pas effectuer le même effort d'isolation, l'effort le plus important étant effectué en isolation par l'extérieur (10 cm en ITI contre 15 cm en ITE). Soit dans tous les cas, un effort moins intense que l'hypothèse d'une rénovation à la norme BBC 2005 (tableau 11). Ce qui tiens à ce que [Traisnel et al. 2010] intègrent l'hypothèse d'une amélioration des performances énergétiques des systèmes de chauffage et ECS, et l'utilisation d'énergies moins émissives en CO₂, ce que le présent travail n'intègre pas du tout. Nous avons donc tenté le même exercice que le tableau 11 avec les hypothèses de 10 cm en ITI et 15 cm en ITE (tableau 12).

Une rénovation exclusive par l'intérieur avec 10 cm se traduirait par une perte en espace habitable de l'ordre de 61 millions de mètres carrés. Soit, en rapportant cette surface à la surface moyenne actuelle des

logements, l'équivalent de 16 885 logements détruits par an jusqu'en 2050²⁴, ou encore une surface moyenne chutant de 91 m² en 2010 à 87 m² pour 44% des logements existants en 2050.

Tableau 12 : pertes globales en surface selon mode d'isolation (hypothèse ITI 10 cm, ITE 15 cm)

catégorie	isolation par l'intérieur (10 cm)			isolation par l'extérieur (15 cm)				
	total	m ²	perte Surf Hab	m ²	appartement	perte S publique	maison	perte S publique
moins de 40 m ²	2 227 085	2,3	4 048 639	3,3	1 591 903	656 660	635 182	209 610
de 40 à 99 m ²	11 945 064	3,5	33 212 094	5	5 320 169	3 325 106	6 624 895	3 312 448
plus de 99 m ²	1 477 384	5,5	24 200 470	7,5	514 486	482 330	962 899	722 174
total	15 649 534		61 461 203		7 426 557	4 464 096	8 222 976	4 244 232

calculs effectués sur la base du nombre de résidences principales ventilé par surface et catégorie de logement (INSEE)

Une rénovation thermique exclusivement en extérieur avec 15 cm se traduirait par 8,7 millions de m² prélevés sur l'espace public. Sur les 36 000 communes françaises cela représenterait 242 m² par commune (19 places de stationnement), ou encore 91 667 m² par département (7 051 places de stationnement).

Le tableau 11 est fondé sur une hypothèse de 15 649 533 résidences principales à 50 kWh/m²/an en 2050, alors que le tableau 12 est basé sur une hypothèse de ces mêmes résidences principales consommant autour de 80 kWh/m²/an en 2050 (90 en individuel 50 en collectif). Autrement dit, même avec un effort moins important en isolation thermique il y a encore un problème non négligeable de disponibilités en espace, et donc de risque de tensions sur les marchés immobiliers : la pression sur les disponibilités en espace est réduite à 50% du tout ITI en BBC et à 70% du tout ITE en BBC (tableau 11).

Certes, les deux tableaux sont difficilement comparables, car dans [Traisnel et al. 2010] ITI et ITE ne sont pas exclusifs, car les performances des bâtiments isolés en ITE sont censées compenser les insuffisances des bâtiments isolés en ITI. Qui plus est nos calculs sont très éloignés des caractéristiques réelles de la configuration des logements. Mais cet exercice montre qu'en travaillant sur les bases de données disponibles, par exemple Énerter-Résidentiel pour tenter d'estimer l'impact des épaisissements d'isolants sur les surfaces habitables²⁵, et PERVAL pour tenter d'approcher l'impact des pertes en surface sur la structuration des prix immobiliers, il semble possible de procéder à une évaluation territoriale du risque. Avec la réserve émise plus haut concernant l'absence de statistiques sur la valeur thermique des logements.

Enfin, il faut prendre en compte la problématique de décision de rénovation thermique. D'une part, toutes choses égales d'ailleurs, les surfaces à recouvrir d'isolant sont moins importantes en isolation par l'intérieur qu'en isolation par l'extérieur. D'autre part, la mitoyenneté génère des économies, mais complexifie les interventions.

²⁴ Cette relation peut paraître abusive, étant donné qu'il s'agit avant tout d'une perte de confort. Toutefois, une telle réduction de surface habitable ne serait pas sans impact sur l'offre en chambres meublées, cohabitations, filles au pair... Par ailleurs, dans de nombreux contextes, la crise du logement se résout par la répartition de l'espace habitable disponible, à savoir plusieurs ménages dans un logement.

²⁵ Bien que nous ayons cherché à obtenir des données fines sur la caractérisation du parc de logements existants, nous n'avons appris que trop tardivement le travail effectué par [Traisnel et al. 2010]. Ce qui est dommage, car nos travaux auraient pu être complémentaires, ou tout au moins nous aurions pu baser les tableaux 11 et 12 sur des chiffres moins approximatifs.

Notons que plus l'épaisseur avant rénovation des murs est importante, plus élevé est le coût d'isoler par l'extérieur, en dépit de la différence au niveau de l'inertie thermique : un 50 m² derrière des parois de 60 cm de granit coûte plus cher à isoler qu'un 50 m² derrière des parois de 13 cm pan de bois + torchis, en raison de la différence de périmètre. Un réflexe courant est de se dire que des murs épais sont source d'économies d'isolant : le tableau 3 balaie cette idée « fausse » (le coefficient de résistance thermique ne prenant pas en compte l'inertie). Dans quelle mesure ce paramètre des coûts d'isolation est-il susceptible d'affecter les marchés immobiliers et les trajectoires résidentielles ?

On a peut-être là encore matière à inégalité de territoire : dans certaines régions, les constructions vernaculaires ont des épaisseurs de paroi plus importantes (granit en Bretagne) que dans d'autres (pan de bois en Lorraine)²⁶. Mais on a aussi, et sans doute surtout, matière à inégalité de population, voire ségrégation : en effet, à part peut-être dans le nord, en milieu urbain l'habitat vernaculaire est souvent valorisé et la vente à plus fortuné est une possibilité de sortie ; en milieu rural, il est plus difficile voire impossible de trouver une sortie acceptable par le marché immobilier. En milieu rural, c'est d'ailleurs plus des problèmes d'importance et de vétusté des bâtiments que d'épaisseur des parois qui se posent.

La mitoyenneté (horizontale comme verticale) génère des économies parce qu'il y a moins de parois en contact direct avec l'extérieur (au regard d'un bâtiment isolé) : en théorie, moins il y a de surfaces d'échange moins il y a de surfaces à isoler. Ceci est vrai pour une mitoyenneté verticale totalement contrôlée (occupant unique) : le propriétaire de 100 m² répartis sur plus d'un niveau, au regard du propriétaire de 100 m² de plain pied. En revanche, lorsque la mitoyenneté est à plusieurs occupants, le diagramme de température de l'autre côté de la paroi mitoyenne est plus incertain, et donc les retours sur investissements plus aléatoires : vol de calories, vacance...

En d'autres termes, si la mitoyenneté est source d'économies d'investissement en isolant, les économies de fonctionnement sont conditionnées par les comportements des voisins. Qui plus est, les travaux d'isolation dépendent des relations de mitoyenneté, ce qui est particulièrement vrai dans la copropriété. Il y a des éléments susceptibles de favoriser des reports décisionnels, accentuer des inégalités...

En individuel isolé, le propriétaire est censé être le moins contraint pour décider. Mais il est probable que l'effort d'isolation pousse à recourir à l'isolation par l'intérieur, dès lors qu'il est important (effort financier) et tant que l'isolation par l'intérieur est moins chère, du point de vue investissement (coût des travaux), que l'isolation par l'extérieur. Ceci pourrait être particulièrement vrai pour les populations paupérisées habitant de l'individuel à surfaces relativement importantes (héritage, milieu rural...). Dès lors

²⁶ A Troyes, différentes opérations de réhabilitation de bâtiments à pan de bois ont été entreprises en remplaçant le torchis par du béton de chanvre. Pour ce faire il faut entièrement mettre à nu la structure en bois, ce qui entraîne des coûts bien plus élevés qu'en isolation thermique par l'intérieur ou l'extérieur, mais oblige également à reloger les occupants lorsqu'il y en a. Politique sans doute louable mais qui présente des limites pour ne pas déséquilibrer les comptes des collectivités locales ni accroître les inégalités sociales (gentrification).

qu'elles choisiraient d'agir plutôt que de différer, elles pourraient être tentées par les solutions les moins chères avec des risques de contre-performances fonction des volumes, de la nature du bâti à isoler et des compétences des artisans impliqués.

Le cas du collectif isolé est peut-être le moins complexe. Certes, dans le contexte de la copropriété, surtout paupérisée, les décisions collectives sont difficiles à être prises, voire ne sont jamais prises. Mais il nous semble que le choix va être assez simple : ne rien faire ; recourir à l'isolation par l'extérieur. En effet, même si l'isolation par l'extérieur est plus chère que l'isolation par l'intérieur, la pondération par les millièmes la rend plus abordable que dans le cas de l'individuel isolé.

Le cas du collectif mitoyen apparaît dès lors plus complexe. En effet, le partage des frais entre copropriétaires est contrebalancé par le degré et la configuration de la mitoyenneté qui peut rendre le recours à l'isolation par l'extérieur plus délicat. L'individuel mitoyen paraît dans une situation encore plus complexe, puisque davantage affecté par la température des locaux attenants que le collectif mitoyen, avec une moindre capacité de pression.

Une dernière chose, mais peut-être pas la moindre, est que la disposition en hauteur est moins coûteuse en énergie que l'étalement, mais elle est plus coûteuse en surface habitable dans le cas de l'isolation par l'intérieur. Il y a là quelque chose susceptible de favoriser le recours à l'isolation par l'extérieur en bâtiment en hauteur isolé (collectif, maison R+1...) et le recours à l'isolation par l'intérieur en bâtiment étalé (individuel isolé, individuel mitoyen...) tout au moins au-delà d'une certaine surface, à déterminer.

Soulignons que c'est la SHON (surface hors œuvre nette), et non pas la surface habitable (SHAB), qui est retenue pour le calcul de la consommation d'énergie maximale admissible (exprimée en kWh d'énergie primaire consommée par an rapportée au mètre carré). Ce qui signifie que l'effort de performance énergétique est moindre : dans l'exemple du schéma 2, on obtient une consommation de 50 kWh/m²/an avec une consommation annuelle de 7 633 kWhep si on se base sur la SHON (152,7 m²) alors qu'il faut abaisser la consommation à 6 289 kWhep pour respecter 50 kWh/m²/an sur la base de la SHAB.

Or, paradoxalement (hors œuvre), la SHON inclus les murs : l'isolation par l'extérieur augmente la SHON, alors que l'isolation par l'intérieur la laisse inchangée. Par conséquent, à même épaisseur d'isolant et toutes choses égales d'ailleurs, la performance au m² SHON de l'ITE sera systématiquement meilleure que celle de l'ITI. Le décret n°2009-1247 du 16 octobre 2009, paru au Journal Officiel du 18 octobre 2009 a modifié l'article R 112-2 du Code de l'Urbanisme de façon à ce qu'une augmentation de l'épaisseur d'isolant ne modifie pas le calcul de la SHON²⁷.

²⁷ Il est précisé que « les surfaces de plancher supplémentaires nécessaires à l'aménagement d'une construction existante en vue d'améliorer son isolation thermique ou acoustique ne sont pas incluses dans la surface de plancher développée hors œuvre brute de cette construction », sachant que c'est à partir de la surface hors œuvre brute qu'est calculée la SHON.

Depuis ce décret, l'ITI n'est pas désavantagée face à l'ITE lorsque l'on rapporte la consommation du bâtiment au m² de SHON. Toutefois, l'ordonnance n° 2011-1539 du 16 novembre 2011 relative à la définition des surfaces de plancher prises en compte dans le droit de l'urbanisme, publiée au Journal Officiel du 17 novembre 2011 et devant entrer en application à partir du 1^{er} mars 2012, remplace la SHON par « surface de plancher ». Or celle-ci se calculerait à partir du « *nu intérieur des façades du bâtiment, déduction faite des vides et des trémies* »²⁸. Ce qui semble pénaliser la rénovation par isolation par l'intérieur qui réduit le périmètre du « *nu intérieur des façades* » ; sauf si le nu intérieur est compris comme la face donnant vers l'intérieur du gros œuvre (donc éventuelle épaisseur d'isolation exclue). Bref, la situation ne nous paraît pas pour le moment claire, sachant qu'en outre une « SHON RT » est en vigueur depuis fin octobre 2011 comme base de calcul à l'application de la réglementation thermique...

En revanche, le calcul du diagnostic de performance énergétique est lui effectué sur la surface habitable et non pas sur la surface hors œuvre nette²⁹. Et il y a là désavantage à rénover en isolant par l'intérieur au regard d'une rénovation par isolation par l'extérieur. En reprenant notre exemple de maison (schémas 2 à 4) si on parviens à réduire la consommation globale d'énergie à 6 289 kWhep en augmentant les épaisseurs d'isolant de 30 centimètres, on obtiens des résultats différents : en isolation par l'extérieur, la surface habitable est inchangée, donc 6 289 kWhep / 125,78 m² donnent 50 kWhep/m²/an soit l'étiquette énergie classe A ; en isolation par l'intérieur la surface habitable diminue soit 6 289 kWhep / 112,32 m² qui donnent 56 kWhep/m²/an, à savoir l'étiquette énergie classe B et non pas A !

La rénovation énergétique s'avère donc comme une nouvelle chausse-trappe dans les trajectoires résidentielles. Cette chausse-trappe sera facilement évitable pour les ménages ayant les moyens d'être bien informés. En revanche, elle fera des victimes chez les ménages n'ayant pas les moyens d'être bien informés, en particulier chez les personnes âgées. Accéder à l'information par Internet et/ou auprès de revendeurs et/ou auprès de conseillers en énergie, et/ou trouver un maître d'œuvre bien informé, avoir le réflexe de faire effectuer plusieurs devis, être capable de comprendre et saisir des opportunités, savoir démarcher les banques, être capable d'utiliser Architecte 3D ou équivalent... Propriétaires occupants paupérisés, propriétaires occupants âgés, habitant plutôt en individuel ou en copropriété à problèmes, paraissent être les plus susceptibles d'être victimes de ladite chausse-trappe.

En France 600 000 logements seraient considérés comme indignes (Fondation Abbé-Pierre). Environ 120 000 seraient occupés par des personnes âgées, dont une bonne partie seraient engagées dans un processus de « clochardisation à domicile », en particulier en milieu rural. Mais plus généralement, les personnes âgées offrent une importante résistance au changement : on ne change plus ou peu le mobilier et la décoration, l'idée de confort n'évolue plus ou peu, comme si on avait atteint un apogée dans sa définition

²⁸ C'est sur l'article L 331-10 du Code de l'Urbanisme que s'appuierait la définition de la surface de plancher.

²⁹ Il est souvent avancé que la SHAB représente autour de 80% de la SHON. Le Secrétaire d'Etat au Logement en présentant la réforme du calcul de surfaces, avançait que la surface de plancher dégageait un bonus de constructibilité de 10%. Nous ne savons pas si on peut dire que la SHAB représente plus ou moins 90% de la surface de plancher, mais il semble certain qu'elle représente plus que 80%.

et qu'on s'y maintenait³⁰ ; on va même jusqu'à remplacer un équipement en fin d'usage par le même modèle, ou similaire, lorsqu'il est encore fabriqué (photo 2).

On peut ainsi citer l'exemple d'un couple pionnier en isolation thermique, puisqu'ils avaient eu le souci d'isoler thermiquement leur maison peu avant la première réglementation thermique. Aujourd'hui, pourtant, ils sont persuadés que leur maison est bien isolée thermiquement et ne se sentent pas concernés par la rénovation thermique. Se chauffant au fioul, ils ne sont pas inquiets de l'évolution des prix, confiants dans leur capacité à négocier et/ou regrouper leurs achats avec des voisins/amis (stratégie encouragée par certaines grandes surfaces). Egalement pionniers en leur temps de la conception assistée par ordinateur, Internet et l'ordinateur personnel ne fait pourtant pas partie de leur quotidien de retraités, artefacts complètement étrangers à leur culture informatique, ainsi qu'à leurs activités relationnelles, culturelles et de loisirs basées notamment sur une passion : le jardinage.

Photo 2 : chauffage avec cuisinière au fioul



Crédit photo : Dominique Theile

Avec les réserves relatives à la Comptabilité Nationale, [Merceron & Theulière] mettent en valeur que si la part moyenne du budget des ménages de métropole, consacrée à l'énergie, passe de 8% en 1970 à 12% en 1985, puis redescend, elle ne sort plus d'une oscillation entre 8 et 9% en dépit des efforts en économies d'énergie. Avec d'importantes disparités : ce sont surtout les ménages aisés qui ont profité des progrès en efficacité énergétique, la différence se manifestant surtout en dépenses d'énergie pour le logement (3,9% du budget pour les 20% les plus riches contre 6,2% pour les 20% les plus pauvres). La part de budget énergie (logement) est la plus élevée chez : les plus de 70 ans (8,1%), le fioul en individuel (8,5%), et les espaces à dominante rurale (6,9%). Entre 1975 et 2006 le rapport à la moyenne, sur le taux d'effort énergétique pour le logement, s'améliore plutôt si on est en centre de grande agglomération, si on est riche ou si on est relativement jeune. En revanche il se dégrade en zone à dominante rurale (de 121 à 144%), pour les 20% les plus pauvres (de 118 à 129%), et les plus de 70 ans (de 161 à 169%).

³⁰ L'Institut de promotion et d'étude de l'ameublement a effectué, en mai 2010, une enquête par téléphone, auprès de 800 acheteurs récents de mobilier domestique : il faudrait en moyenne 23 ans pour changer une cuisine, 19 ans une table de séjour, 15 ans un canapé... Qui plus est 47% donneraient ou réutiliseraient leurs meubles plutôt que de les jeter. Il ne s'agit pas de convictions écologiques mais bien d'un attachement à certains éléments de mobilier, contexte général dans lequel il faut placer la particulière résistance des personnes âgées.

De façon générale, il y a un important hiatus entre les politiques d'incitation à la rénovation thermique et les comportements des ménages. Il y a des effets d'opportunité (fenêtres, chaudières, solaire photovoltaïque...) pour les ménages fortement sensibles à la dimension fiscale et financière, de la notion de patrimoine. En revanche les travaux d'isolation thermique suscitent moins d'engouement, en particulier lorsque l'épaisseur (supposée ou réelle) des murs donne corps à la croyance que « *murs épais égalent logement bien isolé* ».

Cette « croyance », alliée aux subtilités de surfaces pour les calculs de performance énergétique, est susceptible de déconvenues. Un ménage breton, diffère sa rénovation convaincu de la bonne résistance thermique de 60 centimètres de granit. Il finit par se décider par rénover par l'intérieur... En termes de valorisation immobilière, la stratégie de ce ménage s'avèrera catastrophique, au regard d'un ménage ayant acquis la même surface et la même configuration avec des murs de 13 centimètres d'épaisseur...

Rappelons (tableau 8) que plus le logement est grand, plus est important l'effet d'estompage d'une hausse importante des prix immobiliers, sur les coûts induits par la rénovation thermique. Toutefois, plus un logement est grand plus le crédit d'impôt « effectif » (CIDD – valeur perte éventuelle en surface habitable) est faible. Or il y a plus de probabilité qu'une petite surface soit occupée par un célibataire que par un couple avec des enfants. Et concernant les couples avec enfants, ceux qui s'entassent dans des petites surfaces auront un CIDD effectif plus important, mais l'effet d'estompage d'une hausse des prix sera plus long. Mais le problème principal des ménages à faibles revenus est bien la capacité à dégager une trésorerie pour financer les travaux. Le CIDD n'est pas un réducteur d'inégalités, il risque même d'être un accentuateur d'inégalités si l'on prend en compte les éventuelles pertes en surface habitable.

Simulation thermique et aides à la rénovation thermique

Ayant eu l'opportunité de suivre une formation Ademe³¹, nous avons effectué une simulation thermique sur la base du logiciel Mediademe³². Selon les formateurs (BET Sunsquare) ce logiciel n'est pas adapté à une simulation thermique en individuel, où les consommations sont trop variables, alors qu'en logement collectif le nombre d'occupants tend à induire une compensation entre écarts permettant de réduire la marge d'erreur à moins de 10%. Selon Hubert Despretz, coordonateur Ademe, Mediademe n'est pas un logiciel de simulation. Nous avons néanmoins utilisé Mediademe pour ajouter un niveau supplémentaire à

³¹ Réaliser un audit énergétique de qualité dans le bâtiment.

³² Mediademe utilise la méthode HK, censée être équivalente à la méthode TH-C-E. Avec Mediademe $BN = U \times HK - AUT$ sachant que $BB = U \times HK$. Avec la méthode TH-C-E : $BN = BB \times f (XAG)$ avec $f = 1 - F$. Il y a une différence dans la prise en compte des apports gratuits mais qui semble compensée en résultat final. BN = besoins nets [kWh/an] ; BB = besoins bruts [kWh/an] ; U = coefficient de déperditions [W/K] ; HK = coefficient (kilodegrés-heures par an) représentant l'influence sur l'ensemble de la saison de chauffage des écarts de température, entre l'intérieur et l'extérieur ; AUT = apports gratuits utiles [kWh/an] ; XAG = apports gratuits totaux / besoins bruts ; F = valeur donnée dans les règles en fonction de XAG. Synthèse faite à partir du guide d'audit énergétique Ademe / Costic 1999.

notre approche : ne pas seulement considérer les résistances thermiques (tableau 3), mais intégrer aussi les déperditions thermiques par les parois d'un local contenant des équipements de chauffage³³.

DES INCITATIONS A NE PAS ISOLER LES MURS

Sur la base de nos calculs, Mediademe a estimé la consommation chauffage de la maison du schéma 2 (126 m², un couple avec 3 enfants) à 7 126 litres de fioul domestique par an, soit un budget de 6 556 euros par an (prix du fioul décembre 2011). Cette consommation est réduite à 264 litres dans l'option de plus forte réduction des consommations qui est également la plus coûteuse en investissement. Sachant qu'une facture de 6 556 euros par an de chauffage met en situation de précarité énergétique plus de 90% des ménages français (aides non incluses, INSEE base 2009³⁴), il est fortement probable, surtout dans la région lilloise, que pour ce type de logement des stratégies d'économies sont mises en place : achats de fioul groupés, ne pas chauffer la nuit, chauffer moins certaines pièces, démarrer plus tard la saison de chauffe, l'arrêter plus tôt³⁵... Ce qui signifie que les prévisions de retour sur investissement ci-dessous sont plutôt optimistes, puisque ce retour n'est effectif que rapporté à des sommes qui ne sont effectivement plus dépensées.

Nous avons noté un problème sur Mediademe : le logiciel utilise le même métrage de parois (132 m²) tant pour l'isolation par l'intérieur que pour l'isolation par l'extérieur. En effet, profilé pour des calculs de déperditions de parois, le logiciel se contente de calculer les surfaces de parois déduites des ouvertures. Or, par commodité, il est conseillé de fournir les cotes horizontales à l'extérieur et les cotes verticales à l'intérieur. Il y a donc sous-estimation des prix des travaux en ITE (épaisseurs de planchers et épaisseur supplémentaires d'isolant non pris en compte) et surestimation des prix des travaux en ITI (épaisseur des murs). Il y a environ 5 m² de travaux comptabilisés en trop en ITI, soit 600 (BBC) à 950 (passif) euros, contre environ 12 m² de travaux non comptabilisés en ITE, soit 4 320 (BBC) à 5 400 (passif) euros. Notre chiffrage de travaux étant très approximatif, car non basé sur des devis correspondant au bâtiment dont il est question, et qui plus est pour des épaisseurs d'isolants pour l'heure peu usuelles, et l'objectif n'étant ici que de fournir des ordres de grandeur, il ne nous semble pas que ces erreurs bouleversent notre analyse.

Concernant la température de chauffage, elle est de 19°C au niveau de la sonde de régulation lorsque le logement est occupé de jour, et de 16° C en période de sommeil des occupants, ou d'inoccupation. Soit une augmentation du confort thermique en admettant que l'on était en situation de précarité énergétique,

³³ Pour l'isolation intérieure [Oliva & Courgey p. 151] insistent sur la nécessité d'assurer la continuité capillaire entre le mur et l'isolant, donc pas de lame d'air. Un fabricant comme Knauf (catalogue 2010 p. 86) insiste sur l'importance d'une lame d'air pour assurer l'équilibre hygrothermique du mur... Nos calculs Mediademe incluent donc 1 cm de plâtre (0,30 W/mK) et 1 cm de lame d'air (0,13 W/mK) dans les épaisseurs ajoutées, soit $U = 0,24$ W/m²K pour 15 cm et $U = 0,11$ pour 30 cm ce qui permet d'atteindre ou dépasser les valeurs U paroi pour le BBC (0,23) et le passif (0,12) quelques soient les parois répertoriées dans le tableau 3. Le coût des travaux d'isolation est basé sur [Traisnel et al. 2010], croisé avec des relevés personnels. Par exemple, en ITI nous avons retenu 120 euros TTC/m² en 15 cm d'épaisseur et 190 euros TTC/m² en 30 cm d'épaisseur, contre 360 euros du m² pour l'ITE 15 cm et 450 euros du m² pour l'ITE 30 cm.

³⁴ France métropolitaine, personnes vivant dans un ménage dont le revenu déclaré au fisc est positif ou nul et dont la personne de référence n'est pas étudiante

³⁵ Nous avons fait démarrer la saison de chauffe au 1^{er} octobre, celle-ci prenant fin au 31 mai. [Boudour et al. p.44] met en valeur une baisse des consommations à climat constant et l'attribue en partie à une réduction des consommations suite à hausses de prix de l'énergie.

mais une perte relative de confort si l'on était en situation de chauffage à plus de 19°C (ce qui semble peu probable, ou alors seulement dans certaines pièces, au vu des factures de fioul).

Tableau 13 : coûts d'isolation de parois et problématique d'intégration de perte d'espace habitable

Nature	Perte de surface non intégrée					Perte de surface intégrée				
	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA
ITI 15	15 841,46	22 975,32	2 145,92	7,38	6,28	27 377,28	22 975,32	2 145,92	12,76	9,87
ITE toit	23 125,00	28 335,73	2 646,59	8,74	7,25	23 125,00	28 335,73	2 646,59	8,74	7,25
ITI 30	25 082,32	24 324,84	2 271,96	11,04	8,79	49 534,62	24 324,84	2 271,96	21,80	14,74
plancher	15 000,00	9 103,49	850,28	17,64	12,65	15 000,00	9 103,49	850,28	17,64	12,65
ITE 15	47 524,39	22 705,27	2 120,70	22,41	15,03	47 524,39	22 705,27	2 120,70	22,41	15,03
ITE 30	59 405,49	24 199,87	2 260,29	26,28	16,78	59 405,49	24 199,87	2 260,29	26,28	16,78
portes	3 307,50	766,73	71,61	46,19	23,94	3 307,50	766,73	71,61	46,19	23,94
baies	7 150,50	1 557,88	145,51	49,14	24,81	7 150,50	1 557,88	145,51	49,14	24,81

Nous avons fait figurer le temps de retour sur investissement actualisé, avec une hausse des prix des énergies de 5% par an, défini ici comme le temps de retour brut sur investissement (investissement total divisé par économie annuelle) pondéré par la hausse des prix des énergies. Mais cette actualisation ne signifie pas grand-chose car nous n'avons pas pris en compte l'entretien et l'usure des matériaux et équipements. Et surtout, un retour sur investissement est effectif seulement sur des dépenses que l'on ne fait plus. Autrement dit, si la famille dont il est question décide de ne pas réaliser de travaux et que dans dix ans ses 7 126 litres de fioul domestique par an coûtent non pas 6 556 euros mais 15 000 euros par an, il est assez probable qu'elle dépensera 8 000 ou 10 000 euros, mais pas 15 000³⁶. Accélérer le temps de retour sur investissement en intégrant des hausses des prix de l'énergie revient à postuler que les ménages sont incapables de modifier leurs comportements, point de vue auquel nous n'adhérons pas.

Curieusement, les solutions isolation par l'intérieur sont celles qui permettent les plus fortes économies. L'écart n'est pas considérable (120 à 270 kWh par an), mais comme l'écart en investissement est très important, du seul point de vue efficacité énergétique l'isolation par l'extérieur semble sans intérêt dans cet exemple de maison individuelle. Au vu de ce que nous avons pu lire (Oliva, Courgey...) ou entendre (Cardonnel, Pouget...) l'isolation par l'extérieur en rénovation résout plus facilement que l'isolation par l'intérieur les ponts thermiques, en particulier pour les planchers (du moins en l'absence de balcons). Cet écart a donc pour origine le problème évoqué plus haut avec Mediademe, lié à la façon d'entrer les longueurs et hauteurs de parois, sachant que le logiciel ne prend pas en compte les épaisseurs de parois

³⁶ En valeur pondérée par la hausse moyenne des salaires pas en valeur nominale. Autrement dit, même s'il y a une marge de manœuvre dans les réallocations des répartitions des postes dans les budgets (la relative inefficacité de la hausse des prix du tabac pour réduire la consommation le démontre), à partir d'un certain seuil, variable selon les ménages, ces derniers modifient leurs consommations.

(bien qu'elles lui soient données) dans les calculs de surfaces à isoler³⁷.

Tableau 14 : tentative de pondération du tableau 13 au vu de l'erreur sur les surfaces à isoler

Nature	Perte de surface non intégrée					Perte de surface intégrée				
	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA
ITI 15	15 241,40	22 105,04	2 064,63	7,38	6,28	26 777,22	22 105,04	2 064,63	12,97	10,00
ITI 30	24 132,23	23 403,44	2 185,91	11,04	8,79	48 584,53	23 403,44	2 185,91	22,23	14,95
ITE 15	51 772,78	24 734,98	2 310,27	22,41	15,03	47 524,39	24 734,98	2 310,27	22,41	15,03
ITE 30	64 715,98	26 363,19	2 462,35	26,28	16,78	59 405,49	26 363,19	2 462,35	26,28	16,78

On peut tenter de compenser, en soustrayant / ajoutant des surfaces d'épaisseurs d'isolant, sauf que cela donne des résultats qui nous semblent incongrus (ITE 15 plus efficace que ITI 30), car les économies d'énergies ne sont pas une simple corrélation au linéaire de surfaces d'isolants. Cela confirme tout de même qu'il y a intérêt à : correctement évaluer les coûts posés des différents systèmes d'isolation en rénovation ; correctement évaluer les coûts éventuels de perte d'espace habitable, non seulement en valeur du bien immobilier mais également en éventuel coût de rééquipement mobilier et confort de vie (spatial, organisationnel, relationnel...). Faute de quoi on risque de s'orienter vers des erreurs dramatiques, du moins en maison individuelle et en copropriété, susceptibles de dissuader tout effort d'isolation tout au moins en paroi verticale, au regard du coût en investissement de l'ITE et du coût en « fonctionnement » (conséquences des pertes en surface habitable) de l'ITI. On semble être dans une problématique similaire à celle des convecteurs électriques ou du crédit revolving (effort d'achat versus effort de fonctionnement).

Tableau 15 : problématique d'intégration de perte d'espace habitable : intégration du CIDD

Nature	CIDD inclus + perte de surface non intégrée					CIDD inclus + perte de surface intégrée				
	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA
ITI 15	11 881,10	22 975,32	2 145,92	5,54	4,89	23 077,28	22 975,32	2 145,92	10,75	8,61
ITE toit	18 825,00	28 335,73	2 646,59	7,11	6,09	18 825,00	28 335,73	2 646,59	7,11	6,09
ITI 30	20 782,32	24 324,84	2 271,96	9,15	7,53	45 234,62	24 324,84	2 271,96	19,91	13,82
plancher	11 250,00	9 103,49	850,28	13,23	10,15	11 250,00	9 103,49	850,28	13,23	10,15
ITE 15	43 224,39	22 705,27	2 120,70	20,38	14,05	43 224,39	22 705,27	2 120,70	20,38	14,05
ITE 30	55 105,49	24 199,87	2 260,29	24,38	15,94	55 105,49	24 199,87	2 260,29	24,38	15,94
portes	2 961,38	766,73	71,61	41,35	22,42	2 961,38	766,73	71,61	41,35	22,42
baies	6 460,43	1 557,88	145,51	44,40	23,39	6 460,43	1 557,88	145,51	44,40	23,39

CIDD : conditions en vigueur pour des dépenses réalisées en 2010 ; nous n'intégrons pas les changements à compter de 2011.

³⁷ Le problème pourrait se contourner en dupliquant le fichier : un affecté aux cotations ITI, l'autre aux cotations ITE. Et il faudrait indiquer au logiciel d'isoler le plancher situé entre le R et le R+1 uniquement au niveau des parois incluses ; pour la version ITE, si on se dispense de rupteurs en ITI. Mais on augmente le temps de travail, avec de deux fichiers distincts à regrouper dans un seul tableur. Nous comprenons mieux la remarque d'un auditeur qui, bien qu'ayant été chargé d'un rapport pour l'Ademe sur l'audit énergétique en tertiaire, trouvait que les logiciels d'audit énergétique perdaient du temps et qu'il était préférable d'utiliser des tableurs de type Excel. Hubert Desprez précise que Mediademe n'est ni un logiciel de simulation, ni de calcul réglementaire et encore moins de métré. Néanmoins, une version ultérieure devrait intégrer la possibilité de distinguer ITE et ITI d'un point de vue inertie thermique.

Si l'on introduit maintenant les aides telles que le crédit d'impôt au développement durable régime 2010 (non cumulable avec l'éco-prêt à taux zéro)³⁸ le problème de l'intégration du coût de la perte en surface habitable devient beaucoup plus flagrant. En effet, le coût de l'isolation par l'extérieur paraît encore inabordable au regard du coût de l'isolation par l'intérieur (partie gauche du tableau). En revanche, si on intègre la moins-value immobilière (partie droite du tableau), il y a un net effet de rattrapage pour l'isolation thermique par l'extérieur, surtout dans l'option passif (30 cm).

Tableau 16 : problématique d'intégration de perte d'espace habitable : intégration des bouquets de travaux

Nature	Perte de surface non intégrée					Perte de surface intégrée				
	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA
toit ECS	32 125,00	36 168,06	3 056,41	10,51	8,45	32 125,00	36 168,06	3 056,41	10,51	8,45
tt ITI 15	81 924,47	74 624,39	6 648,27	12,32	9,60	93 460,29	74 624,39	6 648,27	14,06	10,65
tt sf paroi	66 083,00	56 439,91	4 949,82	13,35	10,23	66 083,00	56 439,91	4 949,82	13,35	10,23
tt ITI 30	91 165,32	75 425,98	6 723,14	13,56	10,35	115 617,62	75 425,98	6 723,14	17,20	12,41
tt ITE 15	113 607,39	74 455,16	6 632,47	17,13	12,37	113 607,39	74 455,16	6 632,47	17,13	12,37
tt ITE 30	125 488,49	75 353,78	6 716,40	18,68	13,19	125 488,49	75 353,78	6 716,40	18,68	13,19

toit ECS = toiture isolée par l'extérieur + chauffe eau solaire ; tous les autres bouquets incluent cette solution ; tt sf paroi = tout sauf isolation des parois verticales opaques ; ainsi tt ITI 30 = ITE toiture + ECS solaire + ITI 30 cm + isolation plancher sur terre plein + fenêtres argon + portes d'entrée isolées + chaudière fioul condensation tout éligible au CIDD

Ceci dit, c'est sur un choix de bouquets d'interventions qu'un propriétaire (ou une assemblée de copropriétaires) doit se prononcer, tout au moins si les travaux qui lui sont proposés ont pour souci d'obtenir la plus grande efficacité énergétique au vu du budget disponible. On remarque alors que les écarts en termes de retour sur investissement tendent à se resserrer (tableau 16).

Tableau 17 : problématique d'intégration de perte d'espace habitable : bouquets de travaux et CIDD

Nature	CIDD inclus + perte de surface non intégrée					CIDD inclus + perte de surface intégrée				
	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA	Prix total	Eco an kWh	Eco an €	TRB	TRA
toit ECS	24 825,00	36 168,06	3 056,41	8,12	6,82	24 825,00	36 168,06	3 056,41	8,12	6,82
tt ITI 15	65 477,90	74 624,39	6 648,27	9,85	8,01	77 013,72	74 624,39	6 648,27	11,58	9,14
tt sf paroi	53 596,80	56 439,91	4 949,82	10,83	8,65	53 596,80	56 439,91	4 949,82	10,83	8,65
tt ITI 30	74 379,12	75 425,98	6 723,14	11,06	8,81	98 831,42	75 425,98	6 723,14	14,70	11,02
tt ITE 15	96 821,19	74 455,16	6 632,47	14,60	10,96	96 821,19	74 455,16	6 632,47	14,60	10,96
tt ITE 30	108 702,29	75 353,78	6 716,40	16,18	11,86	108 702,29	75 353,78	6 716,40	16,18	11,86

Le crédit d'impôt au développement durable est une aide appréciable pour réduire les temps de retour sur investissement, mais comme il est plafonné (17 200 euros ici), il ne réduit pas le désavantage de l'isolation

³⁸ En fait c'est en 2011 que le CIDD et l'éco-PTZ n'ont pas été cumulables. Mais le site impot.gouv.fr n'étant pas à jour, il se trouve que nous avons utilisé les conditions d'octroi du CIDD de 2010. Ce qui n'invalide pas notre raisonnement : nous avons tout simplement utilisé des conditions plus avantageuses que ce qu'elles n'ont été en 2011 et seront en 2012 (sous réserve des décrets d'application).

thermique par l'extérieur en termes de coût initial d'investissement, à savoir de trésorerie à avancer, de crédit à rechercher... En revanche, intégrer l'éventuelle moins-value foncière liée à la perte d'espace réduit encore plus le handicap de l'isolation par l'extérieur : en passif l'écart est assez réduit. Certes, déboursier 10 000 euros supplémentaires donne à réfléchir, mais, pour peu que les entreprises parviennent à réduire substantiellement les coûts des travaux, l'isolation par l'extérieur apparaîtra comme plus avantageuse.

Le tableau 17 met également en valeur un autre problème : au vu des montants d'investissements requis en isolation des murs, il pourrait exister une forte tentation à ne pas isoler les murs. C'est ce que confirme le tableau 18, où nous mettons en rapport montant du crédit d'impôt, montant des travaux et moins value théorique liée à la perte en espace habitable (dans le cas de l'isolation par l'intérieur).

Tableau 18 : taux d'aide CIDD sans et avec prise en compte de la perte en surface habitable

	toit ECS	tt sf paroi	tt ITI 15	tt ITE 15	tt ITI 30	tt ITE 30
montant CIDD	7 300,00	12 486,20	16 446,58	16 786,20	16 786,20	16 786,20
coût travaux	32 125,00	66 083,00	81 924,47	113 607,39	91 165,32	125 488,49
taux d'aide	23%	19%	20%	15%	18%	13%
travaux + -value	32 125,00	66 083,00	93 460,29	113 607,39	115 617,62	125 488,49
taux d'aide	23%	19%	18%	15%	15%	13%

Nous n'avons pas cherché à trouver des solutions pour obtenir le plus de crédit d'impôt avec le moins d'investissement possible, le montant maximal possible (17 200 euros) n'étant atteint dans aucun cas. L'investissement le plus aidé est l'option isolation de toiture plus remplacement de la chaudière. Il est fort probable qu'il est possible d'avoir un taux d'aide plus élevé. En effet, nous avons un exemple de travaux chaudière bois + ECS solaire thermique, sans aucune isolation thermique, pour un coût total de 29 000 euros, avec un taux d'aide de 39% (conditions d'octroi de 2010). Dans le tableau 18, les solutions avec isolation des murs ont un taux d'aide moins important au vu des montants des travaux et des conditions d'aide : l'isolation par l'extérieur étant plus pénalisée que l'isolation par l'intérieur, l'écart se resserrant toutefois si l'on inclut la moins value théorique liée à la perte en espace habitable.

Il est donc probable qu'on assistera à des choix de bouquets consistant à n'isoler que la toiture, en association avec des équipements économes en énergie. Ou même à ne pas isoler du tout les parois opaques, en se centrant sur les équipements de production/utilisation d'énergie les plus aidés. Hypothèse d'autant plus probable que les taux d'aide ont baissé en 2011 et 2012. Si rien n'est fait pour substantiellement réduire les coûts des travaux d'isolation concernant les murs, les efforts pour inciter à isoler substantiellement les murs en rénovation risquent de rester vains.

Nous avons donc là confirmation de ce que nous évoquions en introduction de ce rapport (encadré n° 1) : avec la réglementation thermique sur l'existant, il n'y a plus obligation d'associer systématiquement respect de la réglementation thermique et augmentation de l'épaisseur des parois verticales opaques. En quelque sorte, le crédit d'impôt au développement durable est une incitation à de la correction thermique associée à des énergies renouvelables. C'est là où l'effort d'investissement est le moins coûteux, du moins

au regard de l'aide apportée. Les simulations de [Energies et Avenir] tendent à confirmer cet effet, puisqu'elles concluent que l'investissement isolation de toiture associé à un investissement en équipement de chauffage eau chaude est le bouquet le plus « rentable ». La fiche conseil diffusée par le COSTIC et l'Association Chauffage Fioul, suggère de procéder à la rénovation en plusieurs étapes, en commençant par le bouquet « chaudière à condensation + isolation des combles » [COSTIC & ACF p. 3].

RENOVER EST PEU COMPATIBLE AVEC VENDRE, SAUF SUR LES BIENS TRES VALORISES

Avec le tableau 19, nous effectuons un travail de même type qu'avec le tableau 8, en prenant en compte cette fois la valeur des travaux déduite des aides publiques, rapportées aux économies de fonctionnement dans un contexte de hausse du prix du baril de pétrole (taux de retour sur investissement actualisé avec une hausse moyenne annuelle des prix des énergies de 5%). La différence est manifeste, à ceci près que la simulation porte sur un 126 m², soit plus grand que la surface moyenne en individuel (110 m² en 2006). Le tableau 19 confirme le tableau 8, lequel montre que plus un logement est grand plus l'effet d'estompage des coûts d'une rénovation énergétique par une hausse des prix immobilier est important. Il permet même de visualiser que cet effet d'estompage est général, qu'il y ait perte d'espace habitable ou pas.

Tableau 19 : hausse de prix immobilier requise (Lille) pour amortir une rénovation un an après livraison

	val travaux	24 825,00	53 596,80	77 013,72	96 821,19	98 831,42	108 702,29
	val CIDD	7 300,00	12 486,20	16 446,58	16 786,20	16 786,20	16 786,20
prix immobilier	vente	toit ECS	tt sf paroi	tt ITI 15	tt ITE 15	tt ITI 30	tt ITE 30
0%	228 500	-10%	-21%	-31%	-39%	-40%	-45%
10%	251 350	0%	-11%	-21%	-29%	-31%	-35%
20%	274 200	10%	-1%	-12%	-19%	-22%	-25%
30%	297 050	20%	9%	-2%	-9%	-14%	-15%
40%	319 900	30%	19%	7%	1%	-5%	-5%
50%	342 750	40%	29%	17%	11%	4%	5%
60%	365 600	50%	39%	26%	21%	13%	15%
70%	388 450	60%	49%	36%	31%	22%	25%
80%	411 300	70%	59%	45%	41%	31%	35%
90%	434 150	80%	69%	55%	51%	40%	45%
100%	457 000	90%	79%	64%	61%	49%	55%
taux retour brut		8,12	10,83	11,58	14,60	14,70	16,18
taux retour actualisé		6,82	8,65	9,14	10,96	11,02	11,86
% économies	0%	-47%	-73%	-96%	-96%	-97%	-97%
DPE	G	F*	D	A	A	A	A
kWh/m ² shab	618,23	330,68	169,51	26,27	26,29	20,79	19,14
kWh/m ² shab	713,38	330,68	169,51	26,27	26,29	20,79	19,14
kWh/m ² shab bois		200,46	103,76				
DPE		D	C				

Maison ouvrière (Schéma 2), prix de départ (0%) base prix moyen secteur de Lille 2010-2011 (Tableau 9) ; val = valeur ; val travaux = coût effectif des travaux CIDD déduit et perte espace habitable intégrée ; ce dernier est déduit du prix de vente augmenté d'un an d'économies de charges ; F* : l'arrondi place toit+ECS en étiquette DPE F (> 330 kWh/m² shab).

Mais surtout, le tableau 19 tend à confirmer qu'il est plus avantageux d'effectuer les travaux de rénovation

énergétique après l'achat et non avant la vente. Le tableau 19 tend donc à tuer tout espoir d'émergence d'une « green value » liée à la rénovation énergétique en résidentiel. En effet, pour un coût de 25 000 euros on peut espérer vendre avec une plus-value « réelle » de 10%, dans le cas d'un marché où les prix auraient augmenté de 20%. Il semble donc permis d'espérer vendre 10% au dessus du prix de marché et donc finalement réaliser une plus-value « réelle » de 20%. Sauf que cette opération fait passer le DPE de G à F, voire E au mieux. Et même en bénéficiant d'une conversion bois (0,6 pour la conversion en énergie primaire), on ne parviendrait pas à mieux que D. Le DPE tend donc à contrebalancer les effets pervers du CIDD (focalisation sur les investissements les plus opportunistes), mais ce faisant dissuade toute tentative d'effectuer une rénovation dans l'objectif de vendre avec une « green value ».

Ainsi, le tableau 19 montre, sur la base du bâtiment et des hypothèses de simulation thermique retenus³⁹, que seuls les acheteurs (futurs propriétaires occupants ou bailleurs) ont intérêt à effectuer des travaux de rénovation énergétique : pour profiter eux-mêmes des économies directes (indirectes si location) d'énergie.

Le tableau 19 montre en fait la marge de sécurité en cas d'obligation de vente un an après la réalisation des travaux, donc avant amortissement complet par le biais des économies d'énergie : dans le cas de l'investissement le moins élevé (32 125 euros avant CIDD) une hausse de 10% est suffisante pour vendre le bien immobilier sans perte ; dans le cas de l'investissement le plus lourd (125 488 euros avant CIDD pour une isolation de type passif, soit près de 50% de la valeur de la maison), il faut une hausse de près de 50% pour vendre sans perte.

Tableau 20 : hausse de prix immobilier requise pour amortir une rénovation un an après livraison

	plus-value pour toit ECS			plus-value pour tt sf paroi			plus-value pour tt ITI 15		
	Paris 17	Marseille 15	Mulhouse	Paris 17	Marseille 15	Mulhouse	Paris 17	Marseille 15	Mulhouse
base 2011	-2%	-6%	-12%	-4%	-14%	-27%	-10%	-22%	-37%
+ 10%	8%	4%	-2%	6%	-4%	-17%	-1%	-12%	-28%
+ 20%	18%	14%	8%	16%	6%	-7%	9%	-3%	-18%
+ 30%	28%	24%	18%	26%	16%	3%	18%	7%	-9%
+ 40%	38%	34%	28%	36%	26%	13%	28%	16%	1%
+ 50%	48%	44%	38%	46%	36%	23%	37%	26%	10%
+ 60%	58%	54%	48%	56%	46%	33%	47%	35%	20%
+ 70%	68%	64%	58%	66%	56%	43%	56%	45%	29%
+ 80%	78%	74%	68%	76%	66%	53%	66%	54%	39%
+ 90%	88%	84%	78%	86%	76%	63%	75%	64%	48%
+ 100%	98%	94%	88%	96%	86%	73%	85%	73%	58%

sur la base des prix de vente des logements anciens, chambres des notaires, base BIEN, 3^{ème} trimestre 2011

En fait, pour revenir sur la difficulté à dissocier effet « green value » et effet haut de gamme, nos résultats tendraient à montrer qu'un effet green value n'est possible que lorsque l'investissement permettant

³⁹ Il y a problème avec le chauffe eau solaire (solaire thermique), Mediademe donnant un montant de kWh économisés plus élevé que ce que consomme le ballon d'eau chaude électrique classique remplacé et n'indiquant pas la consommation électrique lorsque le temps ne permet pas d'utiliser à 100% l'ECS solaire. Du coup, nous n'avons pu effectuer une pondération sur les consommations d'énergie primaire. Néanmoins, malgré ce défaut il semblerait que l'on reste en étiquette A pour chacun des quatre cas d'isolation des murs.

d'obtenir le label « vert » (ici l'étiquette DPE A) est faible au regard de la valeur du bien immobilier. C'est ce qui ressort du tableau 20 où nous avons rapporté les valeurs à investir (CIDD et moins value liée à la perte en espace habitable déduits) à des marchés distincts de celui de notre maison ouvrière lilloise.

Il s'agit d'un exercice assez théorique puisque seuls les prix au m² changent, et que nous utilisons donc le même bâtiment et les mêmes valeurs de travaux, sur le même mode de fonctionnement que le tableau 19 (une année d'économies de charges incluse). Sachant qu'il est beaucoup plus facile de trouver une maison de 126 m² à Mulhouse, que dans le 15^{ème} arrondissement de Marseille ou le 17^{ème} arrondissement de Paris. La valeur du bien est multipliée par 4,91 à Paris 17^{ème}, multipliée par 1,53 à Marseille 15^{ème}, divisée par 1,25 à Mulhouse au regard de la valeur retenue pour Lille. En somme, multiplier la valeur du bien par six permet de gagner près de 27 points (écart entre Mulhouse et Paris 17 sur le tout ITI 15) en ce qui concerne l'effet d'estompage par une hausse des prix immobiliers d'un effort d'investissement de 81 924 euros (se traduisant par un coût effectif de 77 014 euros).

Ainsi il semble possible de rénover dans l'intention de vendre dans le 17^{ème} arrondissement de Paris, avec une « green value ». Mais à condition d'optimiser l'investissement « tout ITI 15 », notamment en substituant le bois au fioul, de façon à abaisser le coût des travaux sans sortir de l'étiquette DPE A. Et encore y a-t-il concurrence de la solution la moins lourde en investissement (toit + ECS) qui semble la plus accessible pour vendre au dessus du prix du marché, même avec un DPE F (éventuellement améliorable en D). En revanche ça semble plus difficile d'envisager de rénover pour vendre dans le cas du 15^{ème} arrondissement de Marseille et impossible dans le cas de Mulhouse.

Si l'on revient aux facteurs de détermination de la valeur d'un bien immobilier (tableau 6), la rénovation thermique jouerait essentiellement au niveau des facteurs physiques, du moins tant qu'elle n'est pas corrélée à des mesures d'urbanisme. Ce faisant, elle permet de réduire la vétusté, les charges, et améliorer l'état d'entretien, et donc améliorer l'attractivité des bâtiments existants. Elle est également censée apporter de la valeur au niveau des possibilités d'utilisation (confort thermique, respect de l'environnement...) et des éléments d'équipement (énergies renouvelables, gestion technique de bâtiment...). Cependant le recours à l'isolation par l'intérieur tend à pénaliser la distribution intérieure, et donc les possibilités d'utilisation, et donc constituer un élément de dévalorisation des bâtiments existants. De même, le recours à l'isolation par l'extérieur tend à dévaloriser la nature et la qualité des matériaux apparents (façades, pignons, balcons...) et l'architecture (esthétique). Sous ces contraintes, une « green value » n'aurait tendance à émerger que comme un effet de bonus au niveau des facteurs physiques uniquement sur les biens immobiliers à très forte valorisation. Sur ces marchés on pourrait voir le mécanisme rénover pour vendre s'enclencher

En revanche, sur les marchés de biens immobiliers à moyennes et faibles valorisations, il n'y aurait pas apparition de green value et les conditions de crédit (CIDD, éco-prêt à taux zéro, livret développement durable...) inciteraient à privilégier la rénovation pour ne pas vendre, voire même à stimuler l'intérêt pour

les biens non rénovés, intérêt d'autant plus élevé que, pour le moment, les inconnues sur le comportement énergétique des biens thermiquement rénovés sont très élevées (marché non mature).

Il faudrait approfondir par une démarche plus complexe que celle entreprise ici. D'une part, en intégrant la variabilité entre villes, voire entre types de biens, dans les variations de prix immobiliers. En effet, pour Paris 17^{ème} (Batignolles) la hausse des prix était de 23% sur un an et près de 49% sur 5 ans. En revanche, sur Marseille elle était de 7% sur un an et 10% sur 5 ans, contre 7% sur un an et 5,5% à Mulhouse. Ces deux derniers marchés ayant connu des baisses de l'ordre de 7% dans l'intervalle. Ce qui tend à confirmer que la rénovation énergétique est plus intéressante pour un bien que l'on conserve que pour un bien que l'on cherche à vendre.

D'autre part, il faudrait intégrer un vrai calcul d'amortissement, pour chacune des solutions techniques et chacun des marchés immobiliers. On aurait ainsi des résultats évoluant en fonction du temps d'amortissement des investissements restant à courir au regard du prix des énergies, d'une part, et des économies déjà réalisées. Et ce pour une série de bâtiments résidentiels beaucoup plus variée, notamment en taille, distribution, et en intégrant les zones climatiques (les économies du tableau 20 sont basées sur les degrés jours unifiés de Lille, et non pas de Paris, Marseille et Mulhouse).

Il faudrait aussi prendre en compte une importante question : la perte en espace habitable est constante, alors qu'une économie d'énergie, à prix d'énergie constant, est dégressive. En effet, la performance des équipements est dégressive avec le temps, et l'efficacité des isolants tend également à décroître avec le temps. On a des temps de retour brut sur investissement qui s'échelonnent entre 8 ans et 16 ans. Certes en intégrant la hausse des prix des énergies on peut abaisser ce temps de retour. Mais même avec des temps de retour sur investissement abaissés, entre 7 ans et 12 ans, on commence à sentir les effets de la vétusté sur les économies de charge. Et encore faut-il que la hausse des prix de l'énergie reste supérieure au taux de baisse de performance des équipements et matériaux qui, tôt ou tard, sont à renouveler.

Bien que l'immeuble dit « maison de Nicolas Flamel » à Paris est réputé avoir plus de 600 ans, le plus gros du parc de logements a moins de 100 ans et une isolation thermique, au bout de 30 ans, a généralement perdu une partie appréciable de son efficacité. Par conséquent, la seule donnée durable est la perte en surface habitable, sachant que les économies tendent à se réduire au fil des ans en raison de l'usure des équipements et matériaux. Nous nous sommes alors intéressés à la possibilité de vendre une fois le retour sur investissement effectué, pour les solutions BBC et Passif en isolation par l'intérieur (tableau 21).

Il ressort du tableau 21 que les économies sur charges ne compensent jamais la moins-value liée à la perte en espace habitable pour un bien fortement valorisé, sauf à vendre en contexte de crash immobilier. En revanche, en solution isolation par l'intérieur BBC, les économies d'énergie compensent, dans une large fourchette de variation de prix immobiliers, la moins-value liée à la perte en espace habitable pour les biens moyennement à faiblement valorisés. Toutefois, plus la hausse des prix immobiliers est importante moins

les économies d'énergie peuvent constituer un argument de vente, sauf si la hausse des prix de l'énergie est supérieure à la hausse des prix immobiliers. Les résultats, pour la variante isolation par l'intérieur Passif, tendent à montrer que plus la perte en espace habitable est importante, moins les économies d'énergie peuvent compenser la moins-value liée à cette perte, ou tout au moins plus la valeur du bien doit être faible pour pouvoir compenser cette perte. En d'autres termes, la hausse des prix de l'énergie doit être largement supérieure à la hausse des prix immobiliers pour pouvoir constituer un argument intéressant de vente. Toutefois, en contexte de marché immobilier déprimé l'attentisme est souvent le réflexe le plus répandu...

Tableau 21 : perte en espace et économies de charges rapportées à la valeur du bien par variantes et villes

var prix	variante tout ITI 15					variante tout ITI 30				
	var shab	Paris 17	Marseille	Lille	Mulhouse	var shab	Paris 17	Marseille	Lille	Mulhouse
0%	-5,05%	3,56%	11,40%	17,46%	21,92%	-10,70%	2,40%	7,68%	11,77%	14,78%
10%	-5,05%	3,23%	10,36%	15,87%	19,92%	-10,70%	2,18%	6,99%	10,70%	13,43%
20%	-5,05%	2,96%	9,50%	14,55%	18,26%	-10,70%	2,00%	6,40%	9,81%	12,31%
30%	-5,05%	2,73%	8,77%	13,43%	16,86%	-10,70%	1,84%	5,91%	9,05%	11,37%
40%	-5,05%	2,54%	8,14%	12,47%	15,66%	-10,70%	1,71%	5,49%	8,41%	10,55%
50%	-5,05%	2,37%	7,60%	11,64%	14,61%	-10,70%	1,60%	5,12%	7,85%	9,85%
60%	-5,05%	2,22%	7,12%	10,91%	13,70%	-10,70%	1,50%	4,80%	7,36%	9,24%
70%	-5,05%	2,09%	6,70%	10,27%	12,89%	-10,70%	1,41%	4,52%	6,92%	8,69%
80%	-5,05%	1,98%	6,33%	9,70%	12,18%	-10,70%	1,33%	4,27%	6,54%	8,21%
90%	-5,05%	1,87%	6,00%	9,19%	11,54%	-10,70%	1,26%	4,04%	6,19%	7,78%
100%	-5,05%	1,78%	5,70%	8,73%	10,96%	-10,70%	1,20%	3,84%	5,88%	7,39%

6 ans d'économies d'énergie en variante tout ITI 15, 4 ans d'économies d'énergie en variante tout ITI 30 ; hypothèse d'investissements amortis après 9 (tt ITI 15) et 12 ans (tt ITI 30), et d'une durée de vie moyenne de chaudière de 15 ans. Lecture : 6 ans d'économies d'énergie en ITI 15 égalent 1,87% de la valeur d'un bien s'étant apprécié de 90% à Paris 17.

Il est à noter que les économies d'énergie obtenues grâce à la rénovation thermique sont assez proches dans les quatre cas d'isolation des murs (tableau 17). Le tableau 21 est donc généralisable pour ce qui est du poids des économies de fonctionnement, au regard de la valeur du bien immobilier. A notre sens, il permet de mieux appréhender la nature de la « green value », définie ici comme la plus value générée par une rénovation thermique au regard d'une rénovation non thermique.

Là où une « green value » peut éventuellement apparaître, sur les biens réputés pouvoir générer des transactions à des prix très élevés, elle pourra éventuellement représenter plus que la valeur relative des économies d'énergie. En revanche, là où elle peut plus difficilement apparaître, sur les transactions de moyennes et faibles valeurs, l'éventuelle « green value » sera toujours inférieure à la valeur relative des économies d'énergie. Certes, cela dépend du nombre d'années d'économies d'énergie que l'on parvient à vendre lors de la transaction et du prix des énergies fondant le prix des économies afférentes.

Le tableau 22 met en valeur qu'une hausse de 100% par an des prix des énergies est suffisante pour que les économies potentielles annuelles cumulées représentent la valeur du bien en moins de 4 ans à Mulhouse et en à peine 6 ans pour un bien équivalent situé à Paris 17^{ème}. La partie supérieure de ce tableau pourrait constituer une formidable incitation à investir au moins dans le BBC rénovation. Mais la seconde partie du

tableau met en valeur que la hausse des prix immobiliers amorti l'impact de la hausse des prix des énergies. Certes avec une inflation des prix des énergies de 100% par an, l'impact est assez faible. En revanche, il suffit d'une hausse des prix immobiliers de 100% à Mulhouse, pour anéantir l'impact que pourrait avoir une inflation annuelle de 5% des prix des énergies pour tenter de vendre des économies d'énergie, lors d'une tentative de vente de bien immobilier.

Tableau 22 : valeur des économies annuelles d'énergie rapportée à la valeur du bien, exprimé en années

	localisation	valeur du bien	économie an	Temps d'amortissement du bien avec économies annuelles				
				0%/an	5%/an	20%/an	50%/an	100%/an
valeur du bien varie de 0%	Paris 17	1 121 958	6 632,47	169,1	44,9	18,5	10,0	6,3
	Marseille 15	350 000	6 632,47	52,8	25,8	12,5	7,2	4,8
	Lille	228 500	6 632,47	34,5	20,0	10,4	6,2	4,2
	Mulhouse	182 000	6 632,47	27,4	17,3	9,4	5,7	3,6
valeur du bien varie de 100%	Paris 17	2 243 916	6 632,47	338,3	57,7	22,2	11,6	7,3
	Marseille 15	700 000	6 632,47	105,5	36,7	16,0	8,8	5,7
	Lille	457 000	6 632,47	68,9	29,8	13,8	7,8	5,1
	Mulhouse	364 000	6 632,47	54,9	26,4	12,8	7,3	4,8

Lecture : 10 ans d'économies d'énergie représentent la valeur du bien à Paris 17 à 0% de hausse des prix immobiliers sur la période cumulé à une inflation des prix des énergies de 50% par an

En caricaturant à peine, une hausse de 100% des prix de l'immobilier suffit à rendre presque invisible l'impact des dépenses d'énergie au regard de la valeur d'un bien (décalage signalé en couleur tableau 22). Plus généralement, la hausse des prix des énergies tend à conforter le raisonnement que nous développons ici. En effet, si les prix des énergies augmentent les prix des travaux de rénovation thermique augmentent ainsi que les prix immobiliers. Avec probablement une accentuation de la dichotomie entre marchés de biens immobiliers à valeur élevée, où il est éventuellement possible d'effectuer des travaux pour vendre avec une « green value », et les autres marchés où il n'est pas possible de dégager une « green-value ».

Les travaux plus accessibles pour obtenir l'étiquette DPE A demandent un investissement de 81 925 euros (tableau 16), soit 45% de la valeur du bien sis à Mulhouse contre seulement 7 % pour un bien équivalent à Paris 17^{ème} (valeur 3^{ème} trimestre 2011) ! Abstraction faite de la perte en surface habitable, il suffit au propriétaire du bien sis à Paris 17^{ème} de vendre 10% au dessus du prix du marché pour récupérer son investissement, vendre près de six ans d'économies de charge, et obtenir un crédit d'impôt de 16 445 euros. Si on ne fait pas abstraction de la perte en espace habitable, ce même propriétaire essuie une perte de 1%, mais se débarrasse définitivement de la perte d'espace habitable. Et s'il vend à 20% au dessus du prix du marché, il réalise une « green value » d'environ 9% (tableau 20).

Le propriétaire du bien de 126 m² sis à Paris 17^{ème} aura vraisemblablement bien moins de difficultés qu'un propriétaire du même bien à Mulhouse de mobiliser de 81 925 euros auprès d'établissements de crédit, ces derniers sachant qu'à Paris il est assez facile de vendre le bien et récupérer la mise. Le propriétaire à Mulhouse aura beaucoup plus de difficultés à mobiliser des crédits, ou devra disposer d'un apport personnel plus conséquent. Une autre solution à Mulhouse peut être de vendre son bien tel quel, pour

acheter un bien moins cher, vraisemblablement plus petit et le rénover thermiquement pour y vivre. Ou alors, s'il dispose d'une résidence secondaire, la vendre afin de pouvoir rénover sa résidence principale.

Par conséquent, sauf à abaisser radicalement les coûts d'isolation et rénovation thermique, modifier les conditions de crédit pour la rénovation thermique et trouver des mécanismes financiers pour encourager l'acquisition de logements anciens avec étiquette DPE A ou B, on s'oriente vers une rénovation thermique à petit pas, avec de grosses différences selon le pouvoir d'achat. L'émergence d'une « green value » sera limitée aux biens de valeur élevée, et l'impact du DPE sur les transactions sera également limité, puisqu'il sera intéressant d'acquérir un bien non rénové pour le rénover et bénéficier soi-même des économies d'énergie. Il se peut même que le rythme des transactions de logements anciens fléchisse de façon importante, la priorité étant à la rénovation pour se prémunir des hausses des prix des énergies.

56

De toute évidence, et faute de modifications radicales dans les politiques d'incitation à la rénovation thermique et des conditions d'accès au crédit, on s'oriente vers des gestes de rénovation thermique n'incluant pas ou peu l'isolation thermique des murs. Par conséquent, l'objectif du Grenelle 1, réduire de 38% les consommations d'énergie du parc de bâtiment existants à l'horizon 2020 ne sera pas atteint, sauf révolution en matière d'équipement en chaudière bois, panneaux photovoltaïques, solaire thermique et éolien avec modifications sur les coefficients de conversion en énergie primaire. C'est après 2020, sous pression des prix des énergies, que les ménages s'engageront dans l'isolation thermique des parois, pour ceux qui en auront les moyens, les autres modifiant leurs critères de confort thermique (vie sans ou peu de chauffage). Mais, d'une part, les prix des énergies se seront répercutés sur les coûts d'isolation thermique et, d'autre part, les ménages se prendront de plein fouet le problème de l'impact de l'isolation thermique par l'intérieur sur les surfaces habitables, d'autant plus que le marché de l'isolation thermique par l'extérieur ayant végété, les entreprises ne pourront pas répondre à la demande. Sauf si l'industrie de la fabrication et pose d'isolants thermiques connaît une révolution. On semble loin d'en prendre le chemin.

La question de l'adéquation des pratiques de travail à la rénovation thermique

QUEL EFFORT DE CONSTRUCTION ET RENOVATION ?

Atteindre l'objectif du facteur 4 d'ici 2050 signifie avoir divisé d'ici là par quatre les émissions de gaz à effet de serre, telles quelles avaient été quantifiées en 1990. Si l'on applique tel quel cet objectif aux bâtiments résidentiels, cela signifie transposer du tableau 2 les consommations des bâtiments achevés avant le 1 janvier 1989, et les diviser par quatre. Soit une consommation maximale de 126 TWh en 2050 pour l'ensemble des résidences principales, sous réserve que les autres résidences ne consomment rien lorsqu'inoccupées, et que diviser par quatre des consommations d'énergie équivaut à diviser par quatre des

émissions GES⁴⁰. Or plus la surface totale de résidences principales augmente, par augmentation du nombre de logements et/ou augmentation de leur surface, plus la performance énergétique de l'ensemble du parc doit être élevée. En d'autres termes, plus on aura de mètres carrés à alimenter en énergie, plus la consommation d'énergie rapportée au mètre carré alimenté en énergie devra être basse.

Le scénario de gel est un scénario dans lequel le nombre de résidences principales en 2050 est égal à celui de 2004. Dans le scénario de continuité, le rythme de croissance du nombre de résidences principales correspond à la moyenne annuelle 1990-2004 (288 847 livraisons par an). Dans les deux cas, on se place dans l'hypothèse que la rénovation thermique démarre dès 2013 avec 400 000 logements par an rénovés à la norme 80 kWhep/m²/an. Par déduction, on obtient ce qu'il reste de logements et donc la performance énergétique à viser : respectivement 13 et 6 kWhep/m²/an, soit plus performant que la norme passivhaus.

Tableau 23 : scénarios de construction et rénovation pour atteindre le facteur 4 en 2050

	logements	kWhep/m ² /an
scénario de gel		
résidences principales en 2050	28 114 420	49
à soustraire	15 200 000	80
il reste	12 914 420	13
à 1% renouvellement	10 683 472	-26
reste	2 230 948	200
scénario de continuité		
résidences principales en 2050	41 112 541	34
à soustraire	15 200 000	80
il reste	25 912 541	6
à 1% renouvellement	15 622 750	-30
reste	10 289 791	62
scénario [Traisnel et al. 2010]		
résidences principales en 2050	35 505 000	39
à soustraire	15 200 000	80
il reste	20 305 000	8
à 1% renouvellement	13 491 900	-29
reste	6 813 100	81

Mode de lecture : le nombre de résidences principales fixe le kWhep/m²/an moyen pour atteindre le facteur 4 ; on en déduit 400 000 logements par an rénovés à 80 kWhep/m²/an ; il reste donc une quantité de logements ce qui fixe leur kWhep/m²/an moyen pour le facteur 4 ; on fait l'hypothèse de 1% de renouvellement, constructions qui portent le plus gros effort de performance ; le solde est constitué de 2,2 millions de logements non isolables (caractère architectural) plus 18 ans de construction neuve norme 50 kWhep/m²/an (2013-2030) et 20 ans de construction neuve norme 0 kWhep/m²/an (2031-2050). Dans le scénario gel, il n'y a pas de construction neuve hors renouvellement ; il y a 8,1 millions de logements supplémentaires en scénario continuité, et 4,6 millions en « Traisnel », avec 47% « norme 50 » et 53% « norme zéro ».

⁴⁰ Ce qui dépend de : l'évolution de la répartition entre énergies consommées ; la définition de leurs émissions de GES ; la définition des ratios de conversion de l'énergie finale en énergie primaire. Sur la base d'une répartition pas trop éloignée de l'actuelle (50% hydrocarbures à 200 g/kWh de CO₂, 30% électricité à 100, 20% bois et autres ENR à 0), diviser par quatre les consommations d'énergie primaire revient à diviser par quatre les consommations de CO₂. Par contre, si on passe à 20% hydrocarbures, 30% électricité, et 50% bois et autres ENR, avec les mêmes définitions, il suffit de diviser par 2,16 les consommations d'énergie pour diviser par 4 le CO₂.

Dans le scénario de gel, il faut que dès 2013 toute construction neuve soit au standard « bâtiment à énergie positive » avec une performance que personne n'est capable d'atteindre pour l'heure (sauf peut-être en laboratoire). Dans le scénario de continuité, la barre est fixée encore plus haut, étant donné que la surface construite augmente pour un objectif d'émissions global qui reste inchangé. Nous nous plaçons dans l'hypothèse où, pour atteindre le facteur 4, seules les compensations intra-branches sont possibles, les compensations interbranches étant impossibles (ou tout au moins que le secteur de la construction résidentielle ne peut pas faire autrement qu'atteindre le facteur 4).

Certes, ce qui conditionne ces scénarii est le comportement du « reste » : dans le scénario gel c'est tous les logements construits entre 1974 et 2004 et ne seront pas démolis, plus les 500 000 logements construits avant 1974 qui ne seront pas rénovés car le rythme de 400 000 rénovations par an ne le permet pas et/ou des immeubles impossibles à rénover sans sacrifier leur valeur esthétique. Ils sont inclus dans le scénario continuité, aux côtés de logements qui seront construits à la norme BBC (50 kWhep/m²/an) de 2013 à 2030 et de logements qui seront construits au ratio « 0 kWhep/m²/an » dès 2031⁴¹.

Autrement dit, le scénario de continuité implique de rénover 400 000 logements par et d'en construire 600 000 par an ! On peut tenter plein d'autres configurations mais, sauf à réduire le nombre de résidences principales, il n'y a pas d'autres moyens que de rénover en cherchant à descendre bien en dessous de 80 kWhep/m²/an. Bref il faut une véritable révolution technique, sociale et organisationnelle.

Nous avons inclus l'hypothèse de 35,5 millions de résidences principales en 2050 de [Traisnel et al. 2010], qui est aussi un scénario tendanciel mais basé sur la croissance de la population (alors que notre scénario tendanciel est basé sur le rythme de construction). C'est la seule chose que nous ayons intégré, pour le reste leur démarche étant assez différente de la nôtre.

En effet, leur objectif du facteur 4 est basé sur une évolution du rapport entre émissions des gaz à effet de serre et consommations d'énergie et non pas, comme nous, sur les consommations d'énergie de 1990 à diviser par quatre. [Traisnel et al. 2010] intègrent ainsi des possibilités d'amélioration des coefficients d'émissions des systèmes de chauffage et eau chaude sanitaire. Enfin, ils n'intègrent pas l'éventualité de 2,2 millions de logements consommant encore 200 kWhep/m²/an en 2050. Avec des logements rénovés à 80 kWhep/m²/an et le reste du parc se répartissant entre BBC et BEPOS, l'hypothèse de [Traisnel et al. 2010] atteint ou dépasse le facteur 4.

Le facteur 4 est ainsi atteint ou dépassé en s'appuyant sur l'amélioration attendue des systèmes de production de chaleur, en particulier les pompes à chaleur. [Traisnel et al. 2010] n'en conditionnent pas moins l'atteinte de ces performances à un très important effort de rénovation thermique, basé

⁴¹ C'est le bâtiment à énergie positive (BEPOS) qui est censé prendre le relais du BBC. Mais sa consommation doit être le plus proche possible de 0 kWhep/m²/an pour que l'énergie qu'il produit serve surtout à compenser les bâtiments à énergie « négative » et non pas à masquer ses propres consommations. Nous calons donc sur 0 kWhep/m²/an ce qui fait apparaître les besoins en énergie « positive ».

principalement sur le recours à l'isolation par l'extérieur. Hélas, on ne semble pas en prendre le chemin. En effet, début 2010, sur un marché français l'isolation thermique d'environ 1,3 milliards d'euros, l'isolation thermique par l'extérieur représentait seulement 7%. Et l'effort de formation actuel en isolation par l'extérieur ne semble pas en mesure de contribuer à une augmentation substantielle et rapide des parts de marché de l'isolation thermique par l'extérieur.

QUEL EFFORT DE FORMATION ?

Entre 2006 et 2008 les entreprises de plâtre et/ou isolation étaient environ 15 000, soit entre 45 000 (données Capeb) et 50 000 (données INSEE) actifs. Sur la base de l'offre actuelle en formation continue (tableau 24) il faudrait 9 à 12 ans pour obtenir une offre en isolation extérieure aussi importante que celle qui est censée exister aujourd'hui en isolation intérieure. Le problème est qu'il s'agit de formations courtes et même très courtes. En 1 ou 2 jours ce n'est pas de la formation : c'est de la sensibilisation. Si on se risque à admettre qu'en 10 à 15 jours on puisse convenablement former à l'ITE, on obtient une capacité de formation inférieure à 1 000 diplômés par an. Et encore, avons-nous des sessions plutôt surchargées.

Tableau 24 : estimation des capacités de formation en isolation par l'extérieur⁴²

organisme	mode ITE	durée formation	total sessions	capacité cumulée
Afortech	divers	15 jours	8	200
AFPA	enduit	10 jours	18	450
AFPA	divers	5 jours	65	1600
GPPF	divers	15 jours	nd	250 ?
Compagnons Devoir	divers	5 jours	5	125
Capebs	divers	4 à 5 jours	12	300
Parexlanko	enduit	2 jours	12	300
CSTB	divers	2 jours	3	50
Le Moniteur	divers	2 jours	6	120
Artefab	enduit	2 jours	3	75
Zolpan	enduit	2 jours	26	650
Isover	divers	1 jour	6	150
Total				4 270 ?

Notons que les formations de GPPF, Parexlanko et Zolpan s'adressent plutôt à des peintres du bâtiment spécialisés dans le ravalement de façade : s'ils sont à l'aise avec les enduits ils ne sont pas du tout familiers avec l'isolation thermique. Quant aux professionnels de plâtre et/ou isolation, s'ils sont généralement à l'aise avec l'isolation ils sont beaucoup moins familiers des travaux en extérieur, à part peut-être les entreprises d'isolation intervenant en façade (mur-rideau). Pire : en consultant le catalogue du Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du bâtiment et des travaux publics (CCA-BTP), la

⁴² Enquête effectuée uniquement par requêtes Internet (sites Web des organismes formateurs). Il est donc possible que nous soyons passés à côté d'une partie de l'offre de formation, dont les offres de FEE-BAT ainsi que des sections locales CAPEB. Toutefois lorsqu'elle est précisée, l'offre CAPEB est en fait une offre AFPA. Il y a donc peut-être une surestimation de l'offre (AFPA). Par ailleurs, nous effectuons le calcul de capacité sur 25 participants par sessions alors que certains organismes accueillent 15 participants par session et d'autres 30.

formation initiale en plâtrier-plaquiste pas plus que celle de peintre ne paraissent avoir changé, à savoir ne paraissent pas intégrer l'ITE.

Photo 3 : isolant fixé avec matériau conducteur



Liège (0,04 W/mK) fixé sur de la pierre (1,5 W/mK) par vis acier (50 W/mK) traitée cuivre (380 W/mK)
Crédit photo : Dominique Theile

Par ailleurs, les entreprises de plâtre et/ou isolation connaissent des difficultés de recrutement, en particulier de jeunes, et sont confrontées à un vieillissement de leurs actifs et dirigeants. Certes, les maçons familiers de l'isolation thermique sont loin d'être rares. Mais ils ne constituent pas une solution aux goulets d'étranglement en formation continue et au désintérêt des jeunes pour la formation initiale : en 2005 le taux d'évaporation dans la formation initiale était estimé supérieur à 50% [Parent]. Une solution pourrait être l'association de compétences (maçon, plaquiste, peintre...) par le biais de groupements. Mais l'éco-prêt à taux zéro et le crédit d'impôt développement durable créent plutôt un effet d'opportunité et donc d'exacerbation de l'offre. Sachant qu'il y a en outre un problème de formation des formateurs, étant donné que la France n'a pas de tradition en isolation par l'extérieur.

Soulignons que dans le cadre des certificats d'économie d'énergie, EDF s'est lancé dans le financement de formations, pour obtenir des certificats en kWh cumac (opération n° BAR-SE-01). C'est ainsi que s'est monté le dispositif de formation FEE-BAT, en partenariat avec la FFB et la CAPEB : EDF finance, via les organismes paritaires collecteurs agréés, jusqu'à 95% de la formation des membres des entreprises adhérentes, 5% restant à la charge de l'entreprise. Démarré en 2008, l'objectif du dispositif était d'avoir formé 120 000 professionnels du bâtiment à l'efficacité énergétique à fin 2012 : début novembre 2011 seulement 40 000 professionnels avaient été formés, et il n'est pas certain que le dispositif soit reconduit après 2012⁴³. Un des modules FEEBAT (n° 3) comporterait un sous-module axé sur l'isolation par l'extérieur, mais nous ne sommes parvenus à identifier ni le contenu ni le nombre de stagiaires formés.

La CAPEB estime que 200 000 professionnels sont concernés par la rénovation. Sachant que FEEBAT a formé 40 000 professionnels, soit une capacité de former 10 à 12 000 professionnels par an, il faudrait

⁴³ Conférence « Face aux besoins de rénovation énergétique globale, quelles démarches et formations mettre en place dans son entreprise pour répondre efficacement à ses clients », donnée par Patrick Bayle, EDF, 10 novembre 2011, salon Bâtimat.

encore 13 à 16 ans pour former les 160 000 professionnels restants, à supposer qu'ils en éprouvent la nécessité.

Ces chiffres témoignent de l'importance des obstacles à lever en matière de formation : même des formations financées jusqu'à 95% ont un succès mitigé, notamment parce que se former c'est ne pas être sur le chantier donc perdre de l'argent... Le CGARP (Centre de Gestion Agréé de la Région Parisienne), qui regroupe 19 400 commerçants, artisans et professionnels libéraux, avait programmé en décembre 2011 une formation gratuite d'une journée intitulée « *Bâtiment : connaître et conseiller les produits d'éco-construction* » : elle a dû être annulée faute de participants.

ARTISANS ET EFFET D'OPPORTUNITE : IMPACT SUR LES MALFAÇONS ET LES INEGALITES

La théorie de cycle de vie du produit de Raymond Vernon⁴⁴, bien que datée, fonde les approches marketing contemporaines les plus usitées concernant le comportement des acteurs et des marchés au regard des cycles de vie des produits. Le cycle de vie d'un produit est décomposé en cinq phases : développement, introduction, croissance, maturité, déclin. Dans la phase de croissance, on peut assister à des effets d'aubaine, lesquels sont sanctionnés lors de la phase de maturité par élimination des entreprises les moins compétitives.

S'il y a débat sur l'universalité de cette théorie, sur le séquençage et la durée des phases, elle caractérise relativement bien l'histoire du marché des panneaux photovoltaïques ou des pompes à chaleur. Après une longue période d'introduction, les incitations gouvernementales (crédit d'impôt, subvention au prix de rachat de l'électricité...) ont favorisé un effet d'opportunité tant du côté de la demande que de l'offre. On se trouverait actuellement dans une phase de consolidation avec élimination des entreprises les moins compétitives, entre autres des «éco-délinquants», et donc un nombre relativement élevé de malfaçons.

Si le terme «éco-délinquants» a été largement médiatisé, il ne faut pas oublier que les effets d'opportunité sont d'autant plus importants que la croissance des volumes de vente est spectaculaire et que les aides gouvernementales à la demande sont importantes. En ce qui concerne la rénovation thermique, il était possible de cumuler éco-prêt à taux zéro et crédit d'impôt en faveur du développement durable (CIDD). Cette possibilité a été supprimée en 2011, mais elle devrait être rétablie en 2012, sans doute comme résultante de l'effondrement du nombre de prêts⁴⁵. Le montant maximum du CIDD est de 16 000 euros, jusqu'au 31/12/2015, pour un couple sans enfant avec imposition commune. Il n'y a pas de conditions de ressources, en revanche l'attribution de l'éco-prêt à taux zéro est conditionnée par les ressources (capacité de remboursement et endettement préalable ; plus plafond de revenus à compter de la réforme 2012).

⁴⁴ Vernon (R.), International investment and international trade in the product cycle, Quarterly Journal of Economics, 1966, pp. 190-207

⁴⁵ Le CIDD aurait un vif succès, avec 6,2 millions de logements aidés depuis 2005. En revanche, l'arrêt du cumul possible CIDD et éco-PTZ en 2011 aurait divisé par deux l'attrait pour ce dernier : 71 500 éco-PTZ octroyés en 2009 ; 78 000 en 2010 ; 30 000 en 2011.

Sachant que le CIDD finance jusqu'à 16 000 euros de travaux (ménage sans enfants), le plafond de l'éco-prêt à taux zéro (bouquet à deux travaux) tend à fixer le seuil minimal des devis : 20 000 euros. En effet, sauf pour les ménages à interdit bancaire ou surendettement notoire, et dès lors que le ménage dispose de revenus stables, il ne semble pas trop difficile de convaincre une banque d'accorder un prêt classique vu la « garantie » de 16 000 euros que représente le CIDD, et la capacité de remboursement résultant des économies sur les factures d'énergie. Avec les temps de retour sur investissement autorisés par les économies d'énergie, les maîtres d'œuvre ont donc une grande latitude pour convaincre les ménages de valider des devis de 20 000 euros. Quant aux ménages préférant recourir à l'éco-prêt à taux zéro, il est très probable que les maîtres d'œuvre inciterons à souscrire pour le plafond maximal (30 000 euros)⁴⁶.

Il nous paraît ainsi très probable que la valeur des travaux de rénovation va se fixer à au moins 20 000 euros par logement et non pas autour des 13 000 euros retenus par [Traisnel et al. 2010] comme valeur moyenne. Certes, dans le collectif, l'intervention en série autorise de sensibles rabais. Toutefois, seule la maîtrise d'ouvrage sociale et les copropriétés de grande taille paraissent susceptibles d'obtenir de telles économies d'échelles. En revanche, dans l'individuel et la copropriété courante le coût plancher des travaux devrait être indexé sur les montants d'octroi du prêt à taux zéro et du CIDD, lesquels favorisent des devis de travaux de 20 000 euros actuellement.

Par ailleurs, la théorie de cycle de vie du produit est à croiser avec un autre phénomène qui, même s'il est théorisé de façon très réductrice, n'en est pas moins à prendre en compte. Everett M. Rogers, dans sa théorie de diffusion de l'innovation⁴⁷ s'intéresse entre autres aux catégories d'adoptants, qu'il distingue entre : innovateurs, adeptes précoces, majorité précoce, majorité tardive, réfractaires. Bien que critiquée, cette distinction n'a pas été fondamentalement remise en cause, et elle peut relativement bien caractériser les comportements d'adoption des innovations dans le Bâtiment, au sens où les catégories « majorité tardive » et « réfractaires » nous paraissent particulièrement dominantes. En effet, le principal moteur de l'innovation dans le Bâtiment est la réglementation : tout au moins en ce qui concerne la réglementation thermique, les acteurs tendent à n'adopter l'innovation que lorsque la nouvelle réglementation est promulguée et qui plus est avec beaucoup de « réfractaires », à savoir d'importants écarts à la norme (confortés par un faible contrôle, quant à l'effectivité de l'application des RT 2000 et 2005 par exemple).

Sur la base de nos observations⁴⁸, nous dirions que le particulier s'adressant à un artisan pour rénover doit se comporter comme un maître d'ouvrage professionnel, faire tout spécifier par écrit sur les devis et

⁴⁶ Sur les données disponibles en 2010, le montant moyen d'un éco-PTZ était de 18 000 euros [Energies et Avenir].

⁴⁷ Rogers (E.M.), Diffusion of innovations, New York, The Free Press of Glencoe, 1962, 367 p.

⁴⁸ Nous avons profité de l'occasion de remplacer un chauffe-eau (propane) pour mener une enquête. Dans la région de Saint-Chéron (Ile de France, Essonne, 45 kilomètres de Paris) nous n'avons pu trouver que quatorze artisans susceptibles d'accepter d'effectuer le remplacement (plomberie-chauffage, propane) ; à savoir situés à moins d'une quinzaine de kilomètres de notre domicile (les artisans du sud de l'Ile de France refusant de se déplacer au-delà), et pratiquant le propane/butane (moins fréquent que pratiquer le gaz naturel). Seulement 50% (sept) ont accepté de se déplacer pour un devis, et de ceux-ci seulement cinq nous ont fait parvenir leur devis. L'un était hors de prix, les quatre restants relativement homogènes (aux alentours de 1 500 euros TTC). Seulement deux ont fourni un devis relativement détaillé. Pour celui que nous avons retenu, nous avons hélas constaté qu'entre l'interprétation du devis sur la base de ce que nous avait promis le commercial, et les prestations effectivement effectuées, il y avait un écart.

s'engager dans des discussions de marchand de tapis. On notera d'ailleurs la récente et relative émergence d'un nouveau métier : le courtier en travaux, lequel se charge pour le particulier de faire établir des devis et sélectionner la meilleure offre.

En tous cas, l'argument principal de vente pour l'artisan dans la rénovation semble être « *vous n'êtes pas aux normes* », utilisé comme un moyen d'effectuer le chiffre d'affaire le plus élevé possible. C'est possible que ce moyen de pression soit utilisé pour des prestations à petit chiffre d'affaire, et nous n'avons qu'une vue très partielle du comportement de vente de l'artisan. Mais on ne nous a pas proposé non plus des alternatives (à part un artisan qui nous a conseillé de recourir à un ballon électrique, façon de refuser d'intervenir) ; peut-être parce que nous ne correspondions pas au profil client recherché.

Toujours est-il que plusieurs des artisans approchés nous ont dit qu'ils avaient plutôt habitude d'intervenir pour des ordres de prix plus importants. Tous sont positionnés à la fois sur l'eau chaude sanitaire et le chauffage, certains intégrant les énergies renouvelables et les pompes à chaleur. En fait, en raison des incitations gouvernementales le marché du chauffage se porte plutôt bien et les artisans peuvent, dans une certaine mesure, refuser des marchés. Par ailleurs, si on nous avance les normes gaz naturel pour réaliser des prestations propane (bouteille), une fois le devis signé l'artisan se montre moins soucieux du respect des normes, sans doute parce qu'il intervient hors partenariat⁴⁹.

Rappelons que la méthode de recherche employée pour le présent travail est à base d'intuitions et d'observations personnelles. Bien que notre expérience paraisse anecdotique, nous dirions qu'elle est symptomatique de ce qu'il risque de se produire pour la rénovation thermique : les artisans ont tendance à privilégier les devis les plus rémunérateurs, ce qui tend à se traduire par des effets pervers sur les ménages les moins aisés, parce qu'ils finissent par devoir payer plus cher, et/ou avoir des délais d'exécution plus importants et/ou avoir une moindre qualité de prestation.

Théorie de cycle de vie du produit, théorie de diffusion de l'innovation, ou défaut de formation, quoiqu'il en soit l'étude « WinIt » de TBC met en valeur des problèmes de mise en œuvre relatifs à l'isolation thermique par l'extérieur : sur 301 professionnels de la mise en œuvre fenêtre étant intervenus sur des chantiers ITE, 47% n'auraient pas fait de retour sur isolant, et 20% interviennent une fois l'isolant posé, contrairement aux bonnes pratiques⁵⁰. Quant à l'étude AQC sur le bilan qualité des constructions BBC, elle pointe également, en ce qui concerne l'isolation par l'extérieur, une mauvaise coordination entre les corps d'états et plus généralement des défaillances de pose [AQC].

⁴⁹ Les politiques de partenariat (Dolce Vita par exemple) ou de label rencontreraient ainsi une forte limite : il n'y aurait pas ou peu effet d'osmose hors prestations encadrées, les artisans étant soucieux de limiter le temps d'intervention, leur rémunération dépendant surtout du ratio coût d'intervention horaire facturé / temps effectif d'intervention.

⁵⁰ Selon la restitution faite par TBC lors de la conférence « *Impact de la RT 2012 sur la conception et la construction de l'enveloppe : quelles innovations produits et techniques ? quelles évolutions des méthodes et des métiers ?* » à Bâtimat 2011.

LES EVOLUTIONS DES PROCEDES D'ISOLATION :

Une partie de notre analyse sera nulle et non avenue dès lors que : des procédés ultra-performants sans aucun impact sur les surfaces habitables et les valeurs esthétiques des bâtiments résidentiels seront largement maîtrisés ; et/ou que la montée en puissance de la prise en compte environnementale dans la définition de la valeur vénale compensera l'impact sur les surfaces habitables et les valeurs esthétiques⁵¹. Pour invalider notre analyse, il faudrait peut-être même une conjonction entre isolants ultra-performants économiquement acceptables et large acceptabilité sociale du remodelage, voire démolition, de bâtiments anciens, y compris haussmanniens, pour obtenir des immeubles à très forte sobriété énergétique.

Tableau 25 : épaisseurs (cm) et coût (euros) comparés d'isolants thermiques

	BBC U 0,23		Passif U 0,12	
	épaisseur	coût m ²	épaisseur	coût m ²
laine de verre (0,036 W/mK à 10° C)	15,7	10	30,0	22
Cabot aerogel (0,018 W/mK à 25° C : doc Ecodis)	7,9	40 ?	15,0	80 ?
panneau aérogel (0,014 W/mK)	6,11	1 762	11,67	3 365
panneau isolation sous vide (0,008 W/mK)	3,49	140	6,66	268

les isolants sont comparés uniquement au niveau du « lambda » (conductivité thermique), et non pas coût et épaisseur finale posé ; prix obtenus sur Internet pour aérogel (sauf Cabot) et isolation sous vide ; le coût relatif est plus élevé dans les fortes épaisseurs en laine de verre notamment pour des questions de tenue ; le coût relatif baisse en Passif pour l'isolation sous vide en raison du jeu sur les croisements d'épaisseurs de panneaux et que certaines épaisseurs sont plus chères que d'autres.

Concernant les procédés à impact réduit, du moins côté intérieur, nous avons déjà intégré les panneaux à isolation sous vide (PIV) dans le tableau 7 : l'impact est certes réduit mais il est assez perceptible. Mais on est à des coûts en isolants dix fois plus élevés, avec des produits qu'il faut importer, à mise en œuvre relativement complexe (nécessité de croiser des couches pour éviter les ponts thermiques, nécessité de pare-vapeur...) un risque de percement à l'usage (donc de perte des performances), sachant que les PIV ont une durée de vie limitée à 30 ans (au-delà baisse de la performance par perte de vide). L'apparition de PIV sur le marché français pourrait faire baisser les prix : à Bâtimat 2011 on pouvait noter la présence d'un PIV utilisé en isolation par l'extérieur (weber.therm lockplate), a conductivité thermique annoncée à 0,007 W/mK, mais ce produit est pour le moment commercialisé en Allemagne et non pas en France.

Les nanogels sont plus adaptés à la pratique courante mais carrément hors de prix, sur la base de nos requêtes Internet en 2010. Toutefois, on note des tentatives de démocratiser le produit. Telle l'association polycarbonate et aérogel (lanterneaux). Ainsi Ecodis commercialise Aerotech, à aérogel fourni par Cabot Corporation et injecté dans les alvéoles de plaques de polycarbonate. Le prix de l'aérogel serait de 80 euros par mètre carré pour les plaques de 25 mm d'épaisseur. Mais nous ne savons pas pour quelles épaisseurs d'aérogel, et la conductivité est donnée pour une température de 25°C. Nous ne savons donc pas comment le transposer au tableau 25, d'où les points d'interrogation. Rockwool aurait peut-être une

⁵¹ Selon une étude faite par l'association européenne des fabricants de laines minérales, des pays tel que la Suède seraient familiers d'épaisseurs bien plus importantes que celles en vigueur en France : <http://www.eurima.org/insulation-thickness/>

réponse puisque ce fabricant présentait fin 2010 Aerowool, qui associe laine de verre à un aérogel à conductivité thermique de 0,019 W/mK ; mais ce produit n'est pas encore commercialisé en France.

Il existe également la piste des isolants translucides : il s'agit du même principe que la vitre qui laisse passer la lumière mais bloque le rayonnement infrarouge de ce qui est chauffé par la lumière qui est passée. Ces isolants concourent au concept de bâtiment à énergie positive. Sauf que ces pièges à calories fort utiles l'hiver peuvent être redoutables l'été, et que l'on retrouve peu ou prou le problème de surchauffe des bâtiments à larges surfaces vitrées. Des recherches sont menées à cet égard pour améliorer le comportement thermique d'été. De toute façon, les isolants translucides s'utilisent en isolation extérieure. Et s'ils sont censés diviser par trois les épaisseurs au regard de la laine de verre, par exemple, cette capacité est moins fondamentale en isolation par l'extérieur sauf en centre urbain très dense (tableau 11).

À vrai dire, pour honorer l'objectif facteur 4 au vu des hypothèses du tableau 23, ne faudrait-il pas tout simplement remplacer les épaisseurs de laine de verre par des épaisseurs de panneaux à isolation sous vide ? Ne s'oriente-t-on pas sur des trajectoires où les épaisseurs resteraient constantes, l'élévation des performances s'obtenant par substitution de matériaux isolants ?

Concernant les isolants traditionnels nous n'avons pas intégré les meilleures performances tout simplement parce que ces performances sont loin derrière de celles des PIV et même des nanogels. Pour la laine de verre on peut descendre sous 0,030 et peut-être espérer atteindre 0,020 W/mK : mais c'est très loin de 0,010 (nanogels) et de 0,005 (PIV) voire 0,003 [Tenpierik & Cauberg]. Qui plus est, pour des produits comme le polystyrène, voire même la laine de roche, on peut commencer à se poser la question des réserves de matière première. Quelles distances entre gisements et marchés pour la laine de roche ? Quelles échéances pour que des polymères à base de mycélium (mycobond) puissent remplacer le polystyrène ?

Soulignons que, tout au moins pour les isolants certifiés Acermi, la pratique est de mesurer la conductivité thermique à une température de 10° C, ou alors de fournir un diagramme de la conductivité thermique en fonction de la température. Or la plupart des fabricants se contentent de mesures à 10° C. En revanche, Cabot Corporation fournit un diagramme où l'on peut constater que la conductivité thermique de l'aérogel passe plus ou moins de 0,011 W/mK à - 200° C à 0,034 W/mK à 100 ° C. Il serait peut-être prudent d'établir et comparer les diagrammes de conductivité thermique des isolants thermiques, pour pouvoir valablement les comparer du point de vue des épaisseurs et des coûts.

Avec le tableau 24 nous soulignons l'insuffisance de formation en isolation par l'extérieur, avec tous les risques que cela implique en cas de diffusion généralisée. Mais si la pose de PIV en intérieur est proche des pratiques d'isolation par l'intérieur, il ne s'agit pas moins d'une nouveauté et les panneaux ne peuvent pas être percés, ce qui exige des précautions qui ne correspondent pas aux actuelles pratiques de travail sur les chantiers. Bien plus, même avec les isolants les plus courants, augmenter les épaisseurs pose problème.

Photo 4 : PIV entre deux couches de polystyrène



Système weber.therm lockplate (0,007 W/mK)
Crédit photo : Dominique Theile

Photo 5 : esthétique et pont thermique



Béton de chanvre (0,08 W/mK) sur pierre (1,5 W/mK)
Crédit photo : Dominique Theile

En effet, avec les systèmes plus performants que la RT 2005 (BBC, maison passive, BEPOS...) on ne peut plus employer le procédé le plus couramment employé en isolation thermique, la pose par encollage en isolation par l'intérieur. Pour le polystyrène, c'est peut-être possible, mais il faudrait vérifier. En revanche, les laines minérales ont atteint leurs limites, et il faut passer à un système avec armature et/ou chevilles (tel que Optima proposé par Isover). Ce qui constitue une modification importante des pratiques de travail. C'est un peu comme passer d'un système où l'on a juste à encastrer un meuble déjà monté, à un système où l'on doit encastrer un meuble livré en pièces (kit prêt à monter).

Avec de telles épaisseurs, en isolation verticale la laine de verre fait face à des limites de tenue au temps en raison de problèmes de tassement. Qui plus est, en y ajoutant sa sensibilité à l'humidité, la laine de verre éprouve un handicap en isolation par l'extérieur, et doit consacrer de substantiels efforts pour faire face à la concurrence du polystyrène et de la laine de roche. Les laines végétales connaissant des problèmes similaires, en termes d'isolation par l'extérieur, le polystyrène, la laine de roche et la fibre de bois apparaissent comme les meilleurs candidats.

En outre, au vu des épaisseurs requises la sécurité incendie prend une nouvelle dimension. Certes, depuis le premier janvier 2010 la France a adopté l'obligation de pare-feu dans les systèmes d'isolation par l'extérieur. Néanmoins, le tout récent drame du foyer Sonacotra de Dijon met en lumière ce problème, sachant que les flammes se sont propagées par le polystyrène de l'isolation thermique extérieure.

En synthèse, laine de roche, polystyrène, fibre de bois et polyuréthane sont mieux qualifiés que laine de verre ou laines végétales en isolation verticale par l'extérieur. En termes de coupe-feu, la laine de roche est mieux qualifiée que la laine de verre. Pour l'heure, dans les isolants les mieux qualifiés en isolation par l'extérieur le polystyrène est le moins cher. Si l'on ajoute à ces données que la discontinuité dans la pose d'un isolant peut aller jusqu'à diviser par cinq la performance effective de la paroi au regard de la performance attendue [Oliva & Courgey p. 43], on se retrouve avec des procédés particulièrement complexes au regard des procédés actuellement les plus courants (isolation intérieure par encollage). L'adéquation entre les bonnes pratiques requises par les nouvelles technologies de rénovation thermique et les pratiques effectives sera un élément fondamental pour l'atteinte des objectifs de type facteur 4.

Enfin, il y a un écart entre les performances des références que l'on trouve chez les fournisseurs et la performance minimum que l'on veut conférer sur le chantier à la paroi. En effet, dans le tableau 3 il y a cinq exemples où la résistance thermique (R) de la paroi est supérieure à 0,60 : dans un seul cas on peut satisfaire à la RT2005 avec une solution 2+8 (doublage plaque de plâtre + polystyrène R = 2,15), pour les autres on est obligé de prendre 2+9, sinon on obtient une résistance thermique légèrement inférieure à 2,8.

L'écart n'est que de 1,50 euros entre les deux plaques⁵², donc il semble qu'il y a peu de risque de non conformité découlant d'économies d'achat. Et si une plaque 2+9 est sans doute légèrement plus lourde qu'une plaque 2+8, il ne semblerait pas que l'on ait là risque important de dérive.

En revanche, pour 1 centimètre de différence d'épaisseur, les artisans risquent de penser que ce n'est pas grave, par exemple si la référence n'est pas disponible, ou si en prenant les mesures on se dit qu'il y aura moins de découpes à faire si les plaques ont un centimètre d'épaisseur en moins... Sur des valeurs d'isolation RT 2005 ce n'est pas dramatique. En revanche, pour le tableau 25, avec les panneaux PIV nous avons eu du mal à obtenir les épaisseurs requises sur la base des épaisseurs commercialisées : vu le prix on peut être davantage enclin à préférer mettre 5 millimètres d'épaisseur en moins que 5 millimètres en plus, ce qui peut se traduire par des contre-performances en BBC et encore plus en Passif. Une solution serait de ne fournir que des références qui égalent ou dépassent nécessairement la norme thermique : est-ce techniquement et commercialement possible ?

Mais, pour le moment en France, les industriels de l'isolation classique (laines minérales, polystyrène) semblent peu concernés par les sujets que nous évoquons ici. Du moins, au vu de la présentation intitulée « *tendances de l'isolation à l'horizon 2020* » lors de Bâtimat 2011, effectuée par Caroline Lestournelle, secrétaire générale de la Fédération des Industriels des Laines Minérales Manufacturées (FILMM), et Yves Pélissier, secrétaire général du Syndicat National des Alvéolaires et des Polyuréthanes (SNAP). En effet, celle-ci présentait trois possibilités d'innover en isolation : augmenter l'épaisseur ; réduire la conductivité ; optimiser les systèmes. Dans les faits, les industriels travailleraient simultanément les trois pistes, les intervenants indiquant que si les épaisseurs pouvaient augmenter c'était avec des conductivités plus faibles.

⁵² Sur la base du catalogue Bricoman de septembre 2009.

Ainsi, pour répondre à la RT 2012 une épaisseur de 10 cm avec une conductivité de 0,022 W/mK était annoncée en paroi verticale (soit une résistance thermique de 4,5 m²K/W). Par contre, les intervenants n'ont pas pu indiquer les épaisseurs et les conductivités envisagées en parois verticales pour répondre à l'hypothèse d'une RT 2020 (résistance thermique envisagée à 5 m²K/W). En revanche, en toiture étaient envisagées des épaisseurs entre 30 et 40 cm (conductivité de 0,030 à 0,040 W/mK) pour satisfaire une résistance thermique de 10 m²K/W (soit un coefficient de transmission surfacique U de 0,1), soit plus ou moins le standard passif, et donc des épaisseurs d'isolants similaires à ce que nous envisageons (tableaux 3 et 20 et partie simulation thermique).

Pour ce qui est de la conductivité annoncée de 0,022 W/mK, le produit n'était pas précisé mais il s'agit probablement de polyuréthane⁵³. Rockwool serait à 0,019 W/mK en associant laine de verre et aérogel (Aerowool). Weber serait à 0,007 W/mK en associant polystyrène et panneau à isolation sous vide (weber.therm lockplate)⁵⁴. S'agissant de produits « vitrine » (tout comme les produits à changement de phase promus par BASF et DuPont), les trajectoires technologiques les plus probables dans l'isolation thermique s'appuient sur une stabilisation des épaisseurs d'isolant à 15 centimètres voire 30 centimètres, ce qui favoriserait une transition par substitution : les isolants conventionnels (laines minérales, plastiques alvéolaires) seraient remplacés, tout en gardant les mêmes épaisseurs, par des isolants hybrides utilisant les propriétés de l'isolation sous vide et/ou des aérogels et/ou des changements de phase ou autres concepts (matériaux translucides, réfléchissants...)

Et pour ce qui est des isolants dits « écologiques » (cellulose, laine de bois, chanvre, textiles recyclés, isolants d'origine végétale ou animale...) ? Ils nous paraissent contribuer à renforcer l'acceptation d'épaisseurs importantes d'isolants : en effet, ils ont beaucoup de mal à descendre sous 0,040 W/mK, et 0,030 W/mK apparaît comme une limite de conductivité infranchissable pour la plupart, alors que 0,030 W/mK est une valeur qui est de moins en moins rare dans les isolants conventionnels. Les isolants dits écologiques contribuent d'autant plus à renforcer la piste stabilisation des épaisseurs puis substitution par des hybrides, que bon nombre d'entre eux recourent au polyester pour assurer leur stabilité dimensionnelle (liant). Il n'y a pas de révolution à attendre du côté des isolants dits écologiques, à part éventuellement accélérer le processus de substitution des isolants conventionnels (substitution des matières premières non renouvelables par des matières premières renouvelables). Sauf à rompre avec une isolation basée sur la conductivité thermique. Mais on est très loin d'en prendre le chemin.

⁵³ Knauf propose du polyuréthane à 0,022 W/mK avec le produit de doublage (isolation par l'intérieur) Polyplac Xthane 22.

⁵⁴ A Bâtimat 2011 weber.therm lockplate était présenté sur le stand Saint Gobain...

Conclusion de la Première Partie :

Alors que la valorisation du bien immobilier est souvent avancée pour inciter à la rénovation thermique, nous avons mis en valeur que l'épaississement des murs dans un but de renforcement de l'isolation thermique, dégageait une perte de valeur, loin d'être aisément compensable par l'éventuelle émergence d'une « green value », dans le cas d'un recours à l'isolation par l'intérieur.

Mais le problème du recours à l'isolation par l'intérieur n'est pas réductible à la seule valeur du bien immobilier, et nous avons pu visualiser l'impact sur la distribution d'un logement d'une perte d'espace habitable : rénover en isolant par l'intérieur est un défi considérable à la conception pour minimiser le plus possible la perte d'espace habitable et optimiser les réaménagements. Recourir à l'isolation par l'extérieur n'est pas non plus la moindre des sinécures, sachant que les interventions sur les façades, toitures et pignons sont susceptibles d'être très contraintes, voire incompatibles avec de fortes isolations par l'extérieur, sur 70% du territoire français.

Nous nous sommes alors intéressés aux impacts sur les territoires d'un épaississement conséquent des murs des immeubles abritant les 15,6 millions de résidences principales concernées par la rénovation thermique : risque éventuel d'emballement des marchés immobiliers en conséquence d'une diminution de la surface moyenne des logements, en cas de recours massif à l'isolation par l'intérieur ; aggravation des problèmes de disponibilité en voirie et espaces publics en centres urbains denses, en cas de recours massif à l'isolation par l'extérieur.

D'un point de vue trajectoires résidentielles l'accès à la rénovation thermique paraît semé d'embûches, sauf pour les ménages ayant les moyens d'être bien informés. Bien plus, concernant l'appétence des ménages à s'engager dans une rénovation thermique nous mettons en valeur, en nous appuyant sur une simulation, que les conditions d'octroi du crédit d'impôt au développement durable, couplées aux coûts des travaux, incitent à rénover sans isoler les murs. Le diagnostic de performance énergétique ne semble pas en mesure de favoriser la vente de résidences principales rénovées, exception faite des biens à valeur élevée.

En somme, il est trop tôt pour s'inquiéter de l'impact de l'épaississement des murs en rénovation tout simplement parce le cadre réglementaire, incitatif, technique et de compétences ne s'y prête pas. Par conséquent, la tendance lourde nous paraît être celle d'un report de l'épaississement des murs en rénovation au-delà de 2020, lorsque la réalité des hausses des prix des énergies imposera de choisir entre isoler la totalité de l'enveloppe ou changer de définition de confort thermique.

Et ce d'autant plus que l'effort de formation en isolation par l'extérieur est nettement insuffisant, et les trajectoires technologiques dans l'isolation thermique s'appuient sur une stabilisation des épaisseurs d'isolant entre 15 centimètres et 30 centimètres. Les artisans ne feront que favoriser cette tendance à rénover sans isoler les murs, puisqu'il s'agit surtout pour eux de décrocher les marchés les plus faciles à

obtenir et non pas d'être des relais de l'ADEME. Cette tendance à rénover sans modifier le comportement thermique des murs ne fera que retarder l'essor de l'isolation thermique par l'extérieur, sauf si elle supplante l'isolation thermique par l'intérieur dans la construction neuve. Encore faudra-t-il que l'effort de construction neuve soit très important, et que la transposition à la rénovation soit aisée.

[COSTIC & ACF p. 3] conseille de rénover en plusieurs étapes, en commençant par remplacer la chaudière et isoler les combles (étape 1), puis poursuivre par du solaire thermique (étape 2), avant de passer à l'isolation thermique des murs (étape 3), puis finir par le remplacement des huisseries (état final). On passe ainsi d'un DPE F ou E à une étiquette DPE C, niveau BBC rénovation entre 98 kWhep /m²Shab/an et 78 kWhep /m²Shab/an selon que l'on profite du taux de conversion bois ou pas⁵⁵. C'est très astucieux sur le papier, d'autant plus que cette stratégie semble pouvoir permettre de profiter de la remise à zéro du plafond CIDD tous les 5 ans, et donc élever le taux d'aide (rapport CIDD / coût des travaux). Mais il est très risqué de bâtir des stratégies à 10 voire 15 ans sur la base du CIDD, au vu de la variabilité actuelle des critères d'aide. Qui plus est, isoler une toiture et changer une chaudière est une intervention en milieu occupé moins rapide et plus complexe que changer des fenêtres. Et rien n'est moins incertain que la propension des ménages à enchaîner plusieurs gestes de rénovation thermique. Cette stratégie tend même à conforter notre analyse : après l'étape 1 (chaudière + toiture), les ménages n'engageraient une des étapes suivantes qu'après 2020, poussés par les prix des énergies.

Nous avons élaboré des hypothèses catastrophe au niveau de l'impact des épaisseurs d'isolants et finalement nous voici amenés à considérer que le non recours à l'isolation thermique des murs va être probablement la pratique la plus courante en rénovation de bâtiments résidentiels, au moins jusqu'en 2021.

Rappelons que lorsque « *dans les locaux à usage d'habitation, les travaux d'isolation entraînent une diminution de la surface habitable des locaux concernés supérieure à 5 % en raison de l'épaisseur de l'isolant* »⁵⁶ la résistance thermique minimale peut être réduite à 2 m²K/W. Toutefois, pour obtenir le CIDD sur les parois verticales opaques la résistance thermique minimale doit être de 2,8 m²K/W, plancher qui devrait passer à 3,7 m²K/W en 2012. Au vu du coût des travaux, ainsi que des contraintes d'un chantier, il y a donc intérêt à ne pas isoler les murs, surtout si l'on veut maximiser le ratio coût des travaux / montant maximum du CIDD, ou alors isoler les murs hors CIDD.

Nous avons aussi souligné que plus le logement est grand, plus est important l'effet d'estompage d'une hausse importante des prix immobiliers, sur les coûts induits par la rénovation thermique, mais plus le crédit d'impôt « effectif » (CIDD – valeur perte éventuelle en surface habitable) est faible. A l'inverse, plus le logement est petit plus le crédit d'impôt « effectif » est « important » mais plus l'effet d'estompage par une hausse des prix immobiliers est lent. Cela tend encore plus à favoriser les investissements les plus

⁵⁵ Il n'est pas précisé s'il s'agit d'énergie primaire ou finale ni de Shab ou de Shon, mais l'étiquetage DPE est utilisé.

⁵⁶ Pour tous bâtiments objets de rénovation autres que ceux de plus de 1000 m² construits après 1947 et effectuant des travaux coûteux. Article 3 de l'arrêté du 03 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants.

« rentables », à savoir dont la valeur excède le moins le montant maximal du CIDD, donc à exclure les travaux d'isolation thermique des murs.

Nous nous sommes basés sur les conditions CIDD disponibles sur le portail impots.gouv.fr, à savoir celles valables pour des dépenses effectuées en 2010. Hélas, ce n'est pas sur le portail de l'administration fiscale que l'on peut trouver l'information la plus actualisée sur le CIDD, mais sur un des portails de l'Ademe (ecocitoyens.ademe.fr). Or il se trouve qu'en 2011 les taux d'aide ont été abaissés, et en particulier pour l'isolation thermique des parois opaques on passe de 25% à 22% dans la limite d'un plafond de dépenses (150 € TTC pour l'ITE, 100 € TTC pour l'ITI). Pour 2012, sous réserve du décret d'application, les taux ont encore été abaissés (18% pour l'isolation thermique des parois opaques), mais les plafonds ITE/ITI semblent avoir disparu. En outre, ces taux doivent être multipliés par 0,85, donc les taux réels sont inférieurs de 15%. Certes, à compter de 2012 une majoration de 10% est accordée à certains bouquets de travaux, mais le coefficient de 0,85 leur est également applicable.

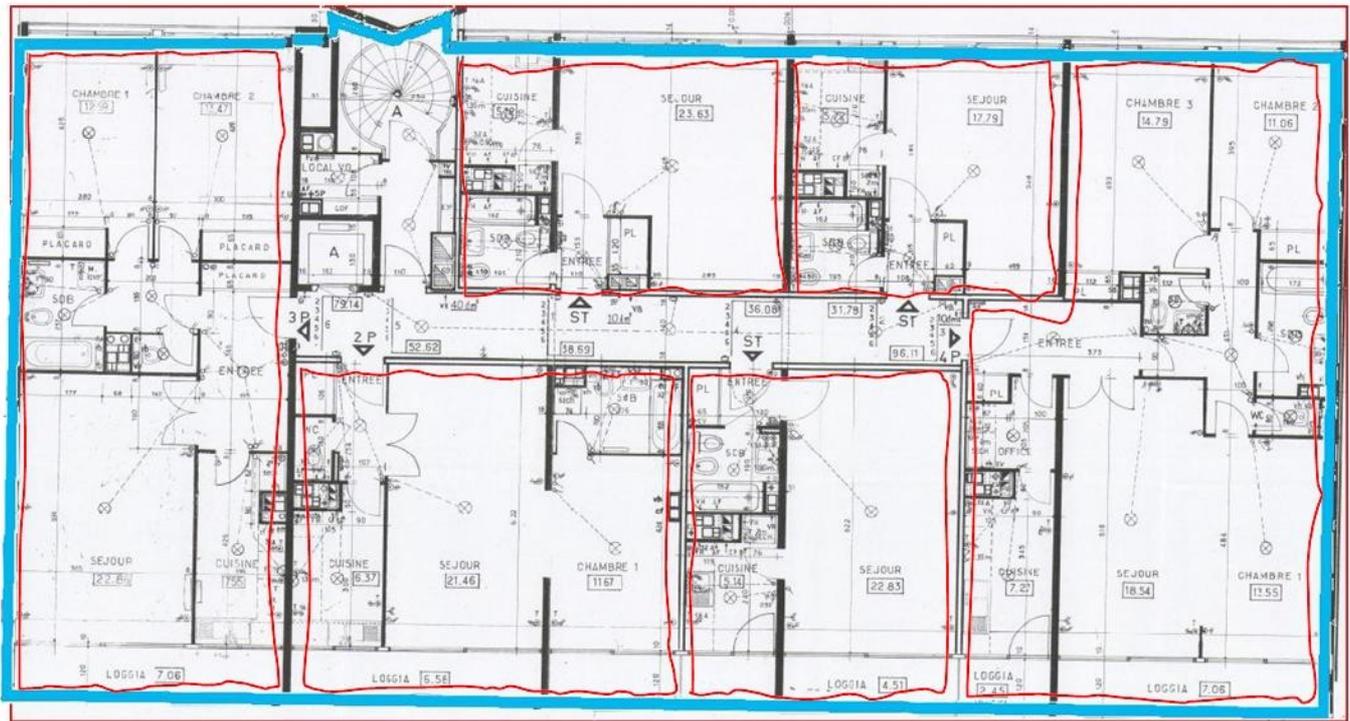
En somme, nous avons effectué des calculs optimistes, et les effets pervers que nous mettons en valeur devraient être encore plus accentués : rénovation thermique sans isolation des murs, et focalisation sur les équipements de production et distribution d'énergie (bois, solaire, pompes à chaleur...). Mais, tôt ou tard, ces rénovations partielles seront insuffisantes pour absorber l'impact des hausses des prix des énergies, et se posera alors, et dans l'urgence, la question des épaissements des murs.

Notre raisonnement sur l'impact des pertes de surface habitable sur les valeurs immobilières a une faiblesse : pour qu'une moins-value soit constatée il faut qu'il y ait vente ; ce ne sont pas des m² que l'on vend mais un bien immobilier. Néanmoins :

- la valeur estimée du bien après travaux est susceptible de jouer dans la demande d'un crédit bancaire : les banques seront-elles insensibles dans tous les cas aux conséquences des pertes en espace habitable ?
- nous n'avons pas pris en compte l'impact monétaire des réaménagements voire des désagréments découlant de la réduction de l'espace habitable ; or le rééquipement d'une cuisine de taille modeste peu aisément atteindre 6 000 euros (meubles + électroménager de base livré et posé).

Qui plus est, prenons des voisins dans un lotissement avec des pavillons de même surface : l'un décide d'isoler par l'intérieur, l'autre par l'extérieur avec les mêmes épaisseurs. En cas de vente, d'évaluation ou d'expropriation, la moins value que nous évoquons sera perceptible. Sans compter que quand l'un va chez l'autre la différence d'habitabilité risque d'être manifeste (ou le surinvestissement en aménagement intérieur). Cette différence sera encore plus perceptible en copropriété, en particulier dans les assemblées générales, lorsque les propriétaires des logements d'angles ou des petites surfaces constateront qu'ils perdent plus de surface que d'autres (exemple du schéma 5)... Et nous n'avons pas considéré les situations où rénover génère des gains en surface habitable, entre autres par utilisation de droits à construire. Là encore, Paris posséderait un gros avantage sur Mulhouse, puisque le m² habitable s'y vend plus cher...

Schéma 5 : impact d'une isolation par l'intérieur en copropriété au niveau du plan d'étage (simulation)



Isolation thermique par l'intérieur (trait bleu) avec récupération des loggias (en bas du plan) : studios (nord) = pertes en cuisines et séjour ; appartements pignons (est, ouest) = pertes + gains loggias ; appartements (sud) = gains loggias

Les calculs thermiques que nous avons effectués et les coûts de travaux que nous avons indiqués doivent être pris uniquement pour des ordres de grandeur. Qui plus est les consommations indiquées dans le tableau 19 n'incluent que le chauffage et l'eau chaude sanitaire⁵⁷, donc les performances effectives sont sans doute en deçà, ce qui ne remet cependant pas en cause notre analyse. Notons que le DPE, calculé sur la surface habitable, ne porte donc pas sur les mêmes surfaces : si la surface diminue pour une même consommation globale, la consommation au m² de surface habitable augmente ! Ce qui pénalise l'isolation par l'intérieur au regard de l'isolation par l'extérieur. Certes, les écarts sont à peine perceptibles dans le tableau 19, mais ces écarts peuvent jouer lorsque l'on se trouve en limite D/C C/B ou B/A du DPE.

Dans la partie qui suit, nous nous intéressons aux consommations d'électricité spécifique, non prises en compte dans la conception des bâtiments, que ce soit en neuf ou en rénovation, à l'exception de l'éclairage et des auxiliaires (sans que ce soit systématique en rénovation, voir encadré n° 1).

⁵⁷ Le Diagnostic de Performance Énergétique se calcule sur les consommations de chauffage, eau chaude sanitaire, refroidissement. Sachant qu'il n'y a pas refroidissement dans le cas envisagé, nous avons donc les éléments pour le calcul du DPE.

II/ CONFORT LIÉ AUX NTIC ET CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Nous avons mené jusqu'ici notre réflexion avec pour toile de fond un confort à base température ambiante, et disponibilité en espace habitable ; avec quelques digressions sur les axes patrimoine et environnement, de la définition du confort. La seconde partie du travail porte sur le confort associé à la diffusion des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). L'ensemble est supposé constituer la trame de lecture d'une prospective à 40 ans des modes de vie sous contrainte carbone, dans le contexte d'un scénario de forte action sur l'habitat et l'infrastructure, sans maîtrise urbaine.

En dépit du contexte d'incitation aux économies d'énergie, la demande des ménages en électricité ne cesse de progresser sous l'effet de multiples électroménagers. Ainsi, les objectifs de réduire les consommations de chauffage à 50 kWh/m²/an dans le résidentiel neuf et à 80 kWh/m²/an dans l'existant risquent de contribuer à accentuer le problème de la hausse de la consommation en électricité dite spécifique⁵⁸ : voyant leur facture énergétique baisser les ménages risquent d'être d'autant moins sensibles à leurs consommations en électricité spécifique, qu'elles sont le support de nouvelles dimensions du confort.

Cette hausse de la consommation d'électricité est susceptible d'avoir les effets suivants :

- retarder la diffusion des bâtiments à énergie nulle ou positive ;
- générer un important effet thermos dans les bâtiments fortement isolés ;
- accentuer les inégalités sociales et territoriales : ménages ne pouvant accéder au confort NTIC qu'au détriment d'autres consommations et/ou au détriment de l'espace habitable.

Nous présentons ici les résultats de nos réflexions et mesures de consommation. Avant de présenter nos résultats de mesures, nous replaçons la réflexion dans le cadre de l'électrification des usages liés à l'habitat, avec un habitat défini comme principal support de consommation des sociétés de consommation de masse.

A/ Les nouvelles électrifications de l'habitat :

L'électrification de l'habitat :

Les consommations électriques résidentielles sont très mal connues : on ne sait pas ce que devient l'électricité fournie une fois franchi le compteur électrique. Certes, Enertech possède, sur la base de campagnes de monitoring des consommations électriques, une base de données de plus en plus

⁵⁸ On distingue les usages d'électricité pour produire de la chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson) des autres usages. Les premiers sont dits substituables, car en concurrence avec d'autres sources d'énergie (fuel, gaz...). Les seconds sont dits spécifiques car ils ne sont pas concurrencés par d'autres sources d'énergie : sans électricité, ces usages sont réputés ne pas pouvoir exister. Pour l'éclairage, les autres sources, exception faite de la lumière naturelle, sont considérées comme inexistantes ou marginales donc non concurrentielles. La lumière naturelle n'est pas considérée comme une concurrence commerciale et l'éclairage est défini sur une base supplétive à l'éclairage naturel, principalement nocturne en résidentiel. Cette distinction pose néanmoins un problème : un micro-ondes est considéré en cuisson, alors même qu'il est impossible de faire fonctionner un micro-ondes sans électricité. Quant à une machine à pain est-elle à placer en cuisson ou en électricité spécifique ?

conséquence, mais ces données peuvent difficilement être considérées comme ayant valeur statistique. Par ailleurs, une filiale EDF gère un panel d'environ 7 000 logements censés être représentatifs, mais les données sur la répartition des consommations électriques des ménages sont considérées comme stratégiques par EDF et les informations rendues disponibles doivent être achetées. On ne dispose donc que d'estimations. Les logements sont donc comme autant de boîtes noires raccordées au réseau.

Selon les données 2004 de l'Institut Français de l'Environnement [Leroi p. 61] « *Les consommations d'énergie dans les bâtiments sont réparties en quatre postes : - le chauffage : 74 % ; - l'électricité spécifique (éclairage, électroménager, multimédia...) : 11% ; - l'eau chaude sanitaire : 9 % ; - la cuisson : 6 %.* ». [Traisnel et al. 2010 p.37] croisent différentes sources pour aboutir à des chiffres similaires en 2005 dans le résidentiel (résidences principales, toutes énergies, énergie finale) : chauffage 70,4 % ; électricité spécifique 13,5% ; cuisson 6,2 % ; eau chaude sanitaire 9,8%.

Tenter une photographie similaire de la répartition des consommations d'énergie en 1804 ou en 1904 aurait probablement montré une répartition différente, ou au moins l'absence sinon la moindre importance du poste « électricité spécifique », qui plus est avec des caractéristiques distinctes. Certes, de nos jours, chauffage, production d'eau chaude et cuisson sont souvent électriques. Mais le poste « électricité spécifique » est toujours présent, quelque soit l'énergie utilisée pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson. Il est le principal marqueur du processus d'électrification des foyers français. La rénovation énergétique devrait faire baisser le poste chauffage et donner plus d'importance relative aux autres, en particulier au poste « électricité spécifique », car l'électrification des foyers a pris de nouveaux chemins.

En trois décennies, la consommation unitaire moyenne d'électricité spécifique des logements aurait plus que doublé passant de 14 kWh/m²/an en 1973 à 29 kWh/m²/an en 2005⁵⁹. Cette augmentation de la consommation est notamment imputable à une généralisation d'une certaine définition du confort, laquelle se traduit par l'électrification de plus en plus importante de certains usages électrifiés, ainsi que par une multiplication des usages électriques.

On pourrait dire l'électrification de la consommation, vu que la prise de courant n'est pas spécifique du logement et que la pile électrique permet de s'affranchir de la prise. Toutefois, le logement et ce qui s'y rattache (automobile, vêtement...) est le principal support de consommation. Et l'usage « nomade » tend à revenir vers la prise de courant, avec la montée en puissance du rechargeable (pile/batterie).

Un bref aperçu de l'électrification de l'habitat, une frontière constamment repoussée, est nécessaire à notre propos. Le déplacement de cette frontière s'est appuyée sur : raccordement des logements ; essor de l'électroménager. L'électrification des logements est pratiquement terminée, étant donné que très rares sont les logements qui n'ont pas été raccordés en raison de leur éloignement du réseau, et que des

⁵⁹<http://www.ifen.fr/acces-thematique/activites-et-environnement/construction-et-batiments/construction-et-batiments/la-consommation-energetique-des-batiments-et-de-la-construction.html>

solutions organisationnelles et techniques existent pour obtenir le 100% de logements raccordés. De même, l'électroménager est présent à un titre ou un autre dans la totalité des résidences, tout au moins principales. Mais l'électrification ne s'est pour autant pas arrêtée : elle a pris de nouveaux chemins.

Ainsi, on peut distinguer, dans ce processus de « nouvelles électrifications » :

- électroménager de base : électrification de fonctions existantes (diodes), nouvelles fonctions ;
- nouveaux électroménagers : essor d'appareils jusque là peu utilisés, nouveaux appareils ;
- nouveaux usages électriques : électrification d'usages non électrifiés.

En ce qui concerne l'électroménager classique (lave-linge, réfrigérateur...) dans un sens large (Hi-fi, téléviseur...), l'électrification consiste à mettre des diodes pour les fonctions jusque-là à visibilité mécanique, installer des écrans digitaux... L'évolution des produits peut appeler de nouveaux usages. Par exemple, l'évolution des téléviseurs s'est nourrie de l'émergence des concepts du « Home Cinema » et de la convergence internet, informatique, Hi-fi. Depuis la sortie du film « Avatar » certains anticipent un marché de la 3 D : téléviseurs 3D, appareils photos 3D, écrans d'ordinateurs 3 D (pour jeux vidéo 3D)...

Par électroménager on entend électrification des tâches ménagères : remplacer la « traction animale » (ménagère, domestique...) par la « traction électrique ». Dans une certaine mesure on peut considérer que la veillée est une tâche domestique, et que son électrification (téléviseur, radio...) relève de l'électroménager. On peut aussi considérer que c'est plutôt de nouveaux usages électriques : on électrifie le son, puis l'image, puis le papier...

Si on reste dans une définition restreinte on qualifie de « nouveaux électroménagers » l'essor d'appareils peu utilisés ou de tâches ménagères non électrifiées. Toujours est-il que visiter les rayons du petit électroménager a de quoi donner le tournis : cafetière, bouilloire, machine expresso, grille-pain, presse agrume, centrifugeuse, robot mixeur, friteuse, cuiseur vapeur/riz, appareil à fondue, appareil à raclette – crêpes – pierrade, gaufrier, wok, grill, machine à pain, sorbetière... auxquels on ajoutera aspirateurs, fers à repasser de plus en plus remplacés par les centrales à vapeur, micro-ondes, four cyclone...

Chaque foyer français serait en moyenne équipé de 6,5 gros électroménager et de 13 petit électroménager. Il y aurait près de 500 millions d'appareils en service (36% gros, 64% petit) et le chiffre d'affaire du marché a progressé de 20% sur les dix dernières années (données GIFAM 2009). Les progressions sont cependant variables selon les catégories d'appareils, et ce selon que l'on se trouve dans une problématique dominante de renouvellement ou de progression du taux d'équipement. Pour les aspirateurs, le taux d'équipement passe de 71,7% en 2000 à 81,7% en 2009, on est plus en dominante de renouvellement avec toutefois la nouveauté des aspirateurs sans sac qui favorise une progression. En ce qui concerne les machines à pain, le taux d'équipement des ménages a bondi de 12,7% à 24,4% entre 2006 et 2008 mais les ventes se sont effondrées en 2009 et 2010 (données TNS Sofres et Gifam).

En ce qui concerne les nouveaux usages électriques, l'électrification s'axe essentiellement sur une électrification de la communication : la plus ancienne, celle liée à la voix et à l'image, via la radio puis la télévision est pratiquement achevée, mais elle est dans un fort renouvellement des appareils en conjonction toutefois avec les autres formes ; le téléphone qui avait sa propre électrification représente une nouvelle électrification, puisque désormais il reste assez peu de téléphones ne nécessitant pas un courant autre que celui fournit par le réseau téléphonique, et on est en pleine révolution de la mobilité, qui arrive toutefois à maturité ; l'informatique, et la numérisation qui lui est associée, a provoqué une véritable révolution, non seulement par le développement du matériel informatique, mais par l'essor d'internet et l'émergence de l'offre « triple-play » qu'elle a autorisée, et par la numérisation de supports papier ; l'électrification du support papier, via la numérisation, est actuellement le front pionnier et a révolutionné la photographie et la communication associée (envoi de photos, blogs, réseaux sociaux à base Internet, cadres photo LCD...), et des tentatives sont en cours dans le domaine du livre avec les liseuses électroniques...

Le téléphone mobile est en constante évolution : appareil photo, caméscope, connectivité Bluetooth, wifi, GPS, 3G+... mais on a surtout assisté à une explosion des SMS, les MMS (vidéos incluses) devraient peut-être suivre, et le succès de l'iPhone a provoqué une explosion d'applications de navigation qui tendent à favoriser le temps passé à consulter l'écran du téléphone portable et donc augmenter les consommations électriques. Le développement de la technologie 4G devrait favoriser une généralisation des Smartphones qui, pour le moment, sont victimes de leur succès, avec des saturations de réseau à certaines heures. Le déploiement de la 4G devrait transformer la téléphonie mobile en extension, sans fil, du réseau fixe, autoriser l'envoi de photos à la volée juste après avoir été prises, la généralisation des voitures communicantes...

La vidéo à la demande est une offre de service en émergence : elle peut se faire via l'ordinateur ou le téléviseur, par l'entremise de la « box » Internet ou pas, mais elle peut se faire également via les consoles de jeu (Xbox, Playstation...). Elle est loin d'avoir rencontré le succès escompté, sans doute freinée par les téléchargements, et/ou reproductions, illégaux de films. Mais, peu importe la légalité, le succès des copies numériques de film contribue à leur visionnage sur de nouveaux supports (ordinateurs, baladeurs MP4...) et dans des nouveaux lieux (transports en commun, salles d'attente...)

Lire un document numérisé s'inscrit dans l'électrification des tâches bureautiques. Ces dernières ont eu tendance à déborder sur la sphère domestique, électrifiant des tâches auparavant effectuées à la main avec un stylo et du papier. Ce faisant, elles ont contribué à la généralisation de la pratique de lecture et manipulation de documents numérisés, d'où les tentatives d'asseoir la diffusion des livres non plus seulement sur une base papier mais également sur une base numérisée (livre électronique ou e-book). La mise sur le marché de l'iPad était censée susciter une révolution dans les liseuses électroniques (eReaders), à l'instar du succès de l'iPhone dans la téléphonie mobile. On a assisté en fait à un essor des tablettes et pas vraiment des liseuses. Ces dernières, pour les plus récentes, ont un écran qui consomme de l'énergie seulement quand le lecteur tourne la page (encre électronique ou cristaux liquides bistables) ; toutefois au

regard d'un livre papier la lecture devient une activité complètement électrifiée, et donc consommant plus d'énergie (à même niveau d'éclairage du lecteur, tourner ou annoter les pages consomme plus).

En 2006, 14,023 millions des foyers français étaient censés être équipés d'au moins un ordinateur (sondage BFK – Médiamétrie), soit 54,9% des foyers contre 16% en 1996. En 1996, les ménages avec enfants étaient beaucoup plus équipés que les ménages sans enfants. Nous ne connaissons pas ce détail pour 2006, mais il est certain que, dans l'ensemble, les foyers avec enfants ont une consommation démultipliée par rapport aux foyers sans enfants.

Plus de 4,2 millions de résidences principales sont habitées depuis 30 ans ou plus par le même ménage, soit 16,13% du total. Ce chiffre monte à près de 30% si on considère les résidences principales occupées au moins 20 ans par le même ménage, soit plus de 7,8 millions de résidences principales. D'une part, il augmente le risque d'avoir des meubles peu adaptables à la réduction de la superficie habitable. D'autre part, il augmente les probabilités d'avoir des équipements désuets à consommations électriques plus élevées que les modèles récents. En effet, les déménagements figurent (aux côtés des naissances) parmi les événements qui amènent à renouveler le mobilier / équipement du logement.

Bref, il y a les ingrédients pour un important effet rebond, l'effet rebond étant ici défini comme une augmentation des consommations énergétiques en parallèle voire en conséquence d'actions de réduction des consommations énergétiques, réduisant par conséquent l'effet de ces politiques. Pour nourrir la demande liée aux appareils électroniques domestiques (audiovisuel, bureautique) au cours des vingt prochaines années, le directeur de l'Agence Internationale de l'Énergie estimait en 2009, sur la base d'un scénario tendanciel [Ellis & Jollands], qu'il faudrait construire l'équivalent de 200 réacteurs nucléaires⁶⁰.

Les efforts des fabricants pour diminuer les consommations électriques

UN DEPHASAGE ENTRE EFFORTS POUR LES BATIMENTS ET EFFORTS POUR LES EQUIPEMENTS

Suite à la directive 92/75/CEE du 22 septembre 1992, certains appareils électroménagers (réfrigérateur, congélateur, lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle, cuisinière électrique, climatiseur) et les ampoules électriques, doivent obligatoirement avoir une étiquette-énergie, informant le consommateur sur la consommation électrique du produit et sur son niveau d'efficacité énergétique.

En 1992, les Etats-Unis ont implémenté Energy Star, programme gouvernemental chargé de promouvoir les économies d'énergie par l'attribution d'un label, à savoir sur une base volontaire et non pas obligatoire. Il est principalement connu pour le matériel informatique, mais il concerne aussi l'électroménager et les bâtiments. En 2001, la communauté européenne a passé un accord avec les Etats-Unis pour participer au

⁶⁰ <http://www.liberation.fr/terre/0101567241-les-gadgets-electroniques-menacent-le-climat>

programme Energy Star en ce qui concerne les équipements de bureau (informatique). Est ainsi proposé un calculateur permettant de choisir les équipements au meilleur rendement énergétique⁶¹.

Parallèlement, la communauté européenne a adopté à partir de 2005 une directive-cadre (2005/32/CE abrogée par 2009/125/CE), sur l'éco-conception des appareils consommateurs d'énergie, fixant des exigences environnementales à respecter faute de quoi le produit ne peut avoir accès au marché européen. Les appareils domestiques figurent au nombre des produits considérés prioritaires pour l'application de la directive. Il est prévu que soient progressivement spécifiés les produits auxquels elle s'applique et les exigences à remplir. Par exemple, en 2009 des exigences étaient formulées pour les réfrigérateurs-congérateurs, et en 2010 des exigences pour les lave-linge et les téléviseurs.

Ces initiatives successives participent, via leur concomitance et le jeu de la concurrence, à ce que les fabricants fassent des efforts pour réduire la consommation électriques de leurs produits, du moins pour ceux soumis à l'obligation étiquette-énergie, et/ou à la directive éco-conception et/ou aux effets du label Energy Star. Les efforts sont réels, mais on n'en note pas moins des effets pervers, en particulier que l'essor du concept d'efficacité énergétique se fait au détriment de celui de sobriété énergétique⁶².

C'est ainsi que le site Coolproducts.fr, relayant les efforts d'ONG européennes pour l'adoption d'exigences environnementales plus ambitieuses quant à la conception des produits (animé en France par le CLER), estime que l'étiquette-énergie pour les téléviseurs est déjà dépassée à peine sortie : alors qu'elle n'est obligatoire que depuis le 30 novembre 2011, une étude allemande montrerait que la plupart des téléviseurs se situent déjà en classe C, B, A et même A+ (catégorie réservée aux innovations futures).

A vrai dire, l'étiquette-énergie pour les téléviseurs n'est pas complètement dépassée, puisqu'elle fonctionne par relèvements successifs des niveaux d'exigences : 2014, 2017, 2020. Toutefois, il y a lieu de se demander, sur la base du tableau 26, si l'étiquette-énergie ne pourrait pas être beaucoup plus incitative.

En effet, le distributeur d'électroménagers FNAC avait jugé bon dès 2010 d'instaurer un classement environnemental des téléviseurs disponibles dans ses magasins⁶³. De une à trois feuilles étaient initialement attribuées mais, dès l'année suivante, la FNAC a décidé d'en attribuer jusqu'à quatre, dans une tentative manifeste d'éviter d'avoir trop de téléviseurs dans la catégorie la plus exigeante, autrement dit de relever le niveau d'exigence : la répartition est plus étirée. En 2012 la FNAC substitue son propre classement à

⁶¹ <http://www.eu-energystar.org/fr/index.html>

⁶² L'énergie primaire est celle prélevée sur l'environnement (extraction et distribution), l'énergie finale est celle achetée par les consommateurs (factures), l'énergie utile est celle effectivement consommée (rendement). L'efficacité énergétique consiste à réduire l'écart entre énergie utile et énergie primaire ; la sobriété énergétique consiste à réduire les prélèvements d'énergie primaire.

⁶³ A partir des consommations électriques des téléviseurs converties en grammes équivalent CO₂. Ce calcul est basé sur les données fournies par les constructeurs, la FNAC s'engageant à « contre tester de manière aléatoire certains modèles, afin de vérifier les données utilisées ». Nous avons eu des échanges avec le laboratoire d'essai de la FNAC. Son directeur estime que les efforts d'efficacité énergétique effectués par les fabricants sont intenses et soutenus et que les données fournies sont généralement fiables. Mais, nous avons pu vérifier en magasin qu'il n'est pas aisé de faire la part entre la puissance nominale de l'écran et la consommation effective : dans certains cas, la consommation en marche affichée est inférieure à la puissance nominale, dans d'autres les deux valeurs sont identiques.

« feuilles » par le classement étiquette-énergie : cela se traduit par un resserrement du classement sur les trois meilleures notations. Autrement dit, l'effet concurrentiel est plus incitatif que l'étiquette-énergie.

Tableau 26 : comparatif classement environnemental FNAC, étiquette énergie (téléviseurs), et DPE

dossier FNAC 2010			dossier FNAC 2011			dossier FNAC 2012			Etude DPE 2011	
classement	nb écrans		classement	nb écrans		étiquette	nb écrans		étiquette	%
			4 feuilles	17	21%	A	28	39%	A	0,08
3 feuilles	27	36%	3 feuilles	39	48%	B	17	24%	B	1,40
2 feuilles	34	45%	2 feuilles	13	16%	C	26	36%	C	12,05
1 feuille	14	19%	1 feuille	12	15%	D	1	1%	D	32,20
						E	0	0%	E	32,54
						F	0	0%	F	16,45
						G	0	0%	G	5,27
total écrans	75			81			72			
W moy	133,28			103,78			87,16			

Téléviseurs : élaboré à partir des dossiers techniques FNAC 2010, 2011 et 2012. Diagnostic de performance énergétique (DPE) : étude EX'IM sur 100 000 logements à DPE effectué, publiée en mai 2011⁶⁴.

Il faudrait sans doute fournir une étude sur un échantillon plus large que le catalogue FNAC. Néanmoins, avant même que ne soit effective l'étiquette-énergie téléviseurs, la consommation moyenne de ceux-ci baisse de façon sensible : - 22% entre 2010 et 2011, - 16% entre 2011 et 2012. Et si le classement FNAC fait se côtoyer dans la meilleure catégorie 25 W (téléviseur 19 pouces) et 125 W (52 pouces) en 2010, et 22 W (19 pouces) et 101 W (55 pouces) en 2011, c'est tout de même moins surprenant que de constater qu'en 2012 le seul téléviseur à étiquette D (plasma 42 pouces 156 W) consomme 2 watt de moins que le plus grand écran décrochant l'étiquette A (LED direct 65 pouces 158 W), et que ce dernier est dans la même catégorie qu'un téléviseur à peine moins grand consommant 2,4 fois moins (60 pouces 65 W) !

Certes on peut poser que les tractations relatives à l'application d'une étiquette-énergie aux téléviseurs ont poussé les industriels à anticiper et faire des efforts. Néanmoins, sur la base des dossiers techniques FNAC sur les téléviseurs, l'adoption de l'étiquette-énergie représente un véritable recul dans l'information et la prise de conscience environnementale du consommateur. En effet, les classements FNAC et étiquette-énergie ont en commun d'être établis sur une consommation (veille plus fonctionnement) non pas globale mais divisée par la surface de l'écran. Ce qui permet d'éviter d'associer systématiquement sobriété et efficacité énergétique et donc de ne pas pénaliser les grands écrans. Sauf qu'avec les guides 2010 et 2011, le consommateur peut vérifier (tableau récapitulatif) que, à quelques exceptions près, la consommation par pouce a tendance à augmenter avec l'écran. Alors qu'avec le guide 2012 l'information (gramme équivalent CO2 / pouce /an) disparaît au profit de la mention étiquette-énergie, soit une perte sèche d'information.

On est là dans une situation qui tranche avec la première partie de notre travail. Certes il y a tentative de modérer les efforts de sobriété énergétique en pondérant les consommations (SHON en première partie,

⁶⁴ <http://www.exim-expertises.fr/actualites/repartition-des-logements-francais-sur-letiquette-energie>

surface de l'écran ici). Toutefois, la réglementation thermique est un véritable moteur incitatif et la plupart des entreprises doivent fournir des efforts non négligeables pour accompagner la législation. L'étiquette-énergie associée au DPE établissait une correspondance avec la réglementation thermique : C correspondait à la réglementation en vigueur au moment de son instauration (RT 2005), B devait correspondre aux valeurs à atteindre avec la RT 2012, et A aux objectifs de la RT 2020, du moins pour le logement neuf. Or la promulgation de la RT 2012 viens précisément d'accentuer le niveau d'exigence puisque tout logement neuf devra désormais viser un niveau proche du niveau A ; certes en SHON RT alors que le DPE est en SHAB, mais le DPE inclus un à deux postes de moins que la RT 2012 ; l'objectif n'en est donc pas moins extrêmement ambitieux.

Le tableau 26 met donc en valeur un déphasage important entre : des consommations d'énergie « immobilières », conditionnées par la réglementation thermique, pour lesquels les objectifs sont plus contraignants que pour les consommations d'énergie « mobilières » avec des objectifs beaucoup moins contraignants, car assez facilement atteints par les entreprises fabricants les produits et services les induisant, ce lorsqu'ils sont soumis à étiquette-énergie. En quelque sorte, dans le premier cas (bâtiments) ce sont les entreprises qui courent derrière la réglementation, et dans le second cas (appareils domestiques) c'est la réglementation qui court derrière les entreprises. L'insuffisance des efforts en électroménager tend à accroître le risque que, dans le Bâtiment, les efforts à consentir paraissent trop élevés et/ou que les gains obtenus en consommations énergétiques « immobilières » soient perdus de façon plus ou moins importante en consommations énergétiques « mobilières ».

Soulignons que les étiquettes-énergies sont basées sur un même principe quels que soient les secteurs : les classes les moins performantes doivent à terme disparaître pour ne conserver que les classes les plus performantes. Ainsi, pour les logements, les classes GFE sont censées disparaître d'ici 2020. Mais, pour l'électroménager à étiquette-énergie, on a fini par se poser la question de l'embouteillage sur la classe la plus élevée : finalement, c'est le remplacement d'une notation G à A par une notation de A à A+++ qui l'a emporté [Claustre]. En ce qui concerne les réfrigérateurs et les lave-linge la disparition des classes G à B est effectuée, ou en passe de l'être, et il est même prévu que la classe A disparaisse (entre 2012 et 2014 pour les réfrigérateurs). Ce faisant la juxtaposition de notations différentes risque d'induire confusion voire désintérêt. Et il se trouvera toujours quelqu'un pour affirmer qu'un DPE à piètre notation peut être compensé par des équipements domestiques de catégorie A+++.

PLUS EFFICACE MAIS PAS PLUS SOBRE : ILLUSTRATION AVEC DES LAVE-LINGE

Dans notre introduction, nous avons posé que le défi d'habiter sous contrainte carbone consiste à « décarboner » notre confort sans le remettre en cause, étant donné qu'il est le moteur de l'économie de biens et services qui nous permet de vivre. Encouragés notamment par les directives européennes, les industriels du « mobilier électrique » (appareils électriques domestiques), font des efforts pour réduire la

consommation électrique, ou du moins ne pas l'augmenter, mais par kilo de linge lavé, kilo de denrées climatisées, pouce d'écran regardé... Ce qui n'empêche pas de vendre des lave-linge, des réfrigérateurs, des écrans plus grands : efficacité énergétique ne rime pas avec sobriété. Et même lorsque les appareils sont sobres, ils tendent à susciter la consommation de fonctions ou d'accessoires amenant à consommer plus d'électricité. Autrement dit, pour le « mobilier électrique » les efforts de « décarboration » se traduisent par une consommation certes plus efficace mais qui pousse à consommer plus d'énergie.

Par exemple, pour l'étiquette-énergie des lave-linge, le rendement énergétique est calculé pour une lessive sur le cycle « blanc » à 60 °C et ramené à 1 kg de linge, soit le kWh par kilo de linge. Or la tendance récente a été d'augmenter le volume des tambours : on ne trouve pratiquement plus de tambours de 4 kg, en revanche on a pléthore de tambours de sept, huit, dix voire quinze kilos. Même si la consommation totale augmente, le rendement énergétique est amélioré puisque le kWh par kg de linge baisse.

Cette tendance à l'agrandissement du tambour n'est peut-être pas un effet direct de l'étiquette-énergie, étant donné que les volumes de vente des lave-linges paraissent fonctionner avec des cycles d'environ huit ans : les lave-linge sont changés tous les 8 à 10 ans, voire plus, et les constructeurs sont constamment en train de chercher des nouveautés pour conduire les ménages à changer de lave-linge. En l'occurrence, l'argumentaire principal pour augmenter le volume du tambour est de pouvoir laver la couette.

Néanmoins, cette augmentation du volume du tambour est susceptible d'introduire un effet rebond. En effet, les ménages ont des habitudes de lavage basées sur des machines à tambour de 4 à 5 kg. Avec une machine à tambour de 12 kg on ne va pas attendre d'avoir 12 kg de linge sale pour lancer une machine. Alors les capteurs dont sont équipées les machines permettent d'adapter la consommation d'eau et d'électricité. Mais laver 1 kg de linge dans un tambour de 12 kg risque fort de finir par consommer davantage que laver 1 kg de linge dans un tambour de 4 kg⁶⁵. Par ailleurs les fabricants font porter leurs efforts sur le cycle « coton » à 60 °C, unique objet des mesures. On suppose que ces efforts bénéficient par ricochet aux autres programmes, mais aucun contrôle n'existe à cet égard.

Les mesures sur le cycle coton à 60 °C comportent un test à pleine charge et un test à mi-charge. Or, à en croire Joël Vormus du CLER (Comité de Liaison des Energies Renouvelables), les lave-linge à gros tambour auraient éprouvé quelques difficultés à réussir les tests à mi-charge. Par ailleurs, si les lave-linge sont changés tous les 8 à 10 ans, il semble difficile que les constructeurs aient agrandis les tambours sans s'être assurés que la durée de renouvellement ne sera pas allongée par une moindre utilisation (même quantité de linge pour de plus grands tambours donne moins de cycles) : ils parient sur de l'obsolescence programmée et/ou ils parient sur le fait que les rythmes d'utilisation seront inchangés.

⁶⁵ En 1989 la fréquence moyenne de lavage était de 3,5 machine par semaine [Delaunay], soit 182 machines. La consommation de 182 machines 5 kg est de 173 kW (base 0,95) et de 415 kW pour 182 machines 12 kg (base 2,28), toutes deux étiquette A. En admettant que la quantité de linge soit la même (910 kg) et la 12 kg réduise donc sa consommation de 2,4, on a sur le papier la même consommation. [Davis L.] montrerait que l'acquisition de lave-linges plus performants se traduit par une hausse de près de 6% de la demande de linge propre, résultant surtout de l'augmentation du poids de linge lavé par cycle, mais à volume de tambour constant.

En fait, en effectuant l'expérience de remplacer un lave-linge 5 kg par un lave-linge 9 kg, on se rend compte qu'il est plus difficile de remplir un tambour 9 kg avec 9 kg de linge, que remplir un tambour de 5 kg avec 5 kg de linge ! Qui plus est, après avoir fait rentrer le linge avec un peu de mal (tasser 9 kg est plus difficile que tasser 5 kg⁶⁶), on se rend compte, une fois le linge lavé qu'il comporte des traces ! La ménagère aura donc tendance à moins remplir la machine, à la fois parce que c'est plus difficile et pour éviter d'avoir des traces liées à des difficultés qu'éprouvent les machines à rincer quand le tambour est rempli au maximum de sa capacité⁶⁷. Qui plus est l'augmentation de la taille des tambours s'est accompagnée d'une multiplication des programmes, notamment pour le linge délicat, et en fait bon nombre de programmes indiquent en capacité maximale une capacité nettement inférieure à celle du tambour : 3,5 kg, 3 kg, 2,5 kg et même 2 kg sur un modèle 9 kg. Ce qui augmente le nombre de cycles et donc l'usure du lave-linge. En outre, sont proposées des fonctions « repassage facile », « rinçage plus » ou « peau délicate » ce qui augmente le temps de cycle et donc l'usure (mais aussi l'eau et l'électricité consommés).

Tableau 27 : efficacité énergétique des différents programmes d'un lave-linge

programme	charge kg	total kWh	kWh/kg linge	étiquette-énergie
60° Couleurs Eco	9,0	1,17	0,130	A
95° coton	9,0	2,60	0,289	D
60° Couleurs	9,0	1,53	0,170	A
40° Couleurs	9,0	0,80	0,089	A
60° Synthétique	3,5	0,85	0,243	C
40° Synthétique	3,5	0,50	0,143	A
30° délicats	2,5	0,40	0,160	A
40° laine	2,0	0,60	0,300	D
40° lingerie	2,0	0,60	0,300	D
40° baby	7,0	0,85	0,121	A
40° duvet	3,0	0,75	0,250	C
30° outdoor	3,5	0,55	0,157	A
60° Super Eco	9,0	1,08	0,120	A
40° magic XL 40	6,0	0,60	0,100	A

Données du fabricant : notice du modèle Whirlpool AWOE 9751 (9 kg de capacité maximale) ; dernier système de classement A à G connu (en kWh/kg linge) : A <0,19 B <0,23 C <0,27 D <0,31 E <0,35 F <0,39 G >0,39 (Wikipédia).

Le tableau 27 est relatif aux consommations électriques (données constructeur) des différents programmes d'un lave-linge à hublot à tambour 9 kilos acquis en juillet 2011. L'information A+ figure parmi les informations inscrites sur le capot du lave-linge, mais dans la documentation livrée l'étiquette-énergie est A. Il s'agirait d'une mesure transitoire avant l'adoption de la nouvelle étiquette-énergie pour les lave-linge qui devait intervenir en janvier 2012. Le tableau 27 met en valeur que les consommations électriques sont multipliées par 2,3 pour la laine et la lingerie, et par 1,9 pour les couettes (duvet), au regard du programme ayant permis l'obtention de l'étiquette-énergie A (60° Couleurs Eco). Autrement dit, les économies

⁶⁶ Il s'agit de lave-linge à hublot. Dans un lave-linge à charge par le dessus il serait ergonomiquement plus facile de tasser de grosses quantités (il suffit d'appuyer), mais la plupart des lave-linge à charge frontale (hublot) restent dans la capacité 5 kg et nous n'en avons pas trouvé proposant plus que 8 kg de capacité maximale. Nous ne savons pas si c'est par limitation technique, ou si c'est parce que le linge à charge par le dessus étant plutôt recherché pour les espaces exigus il n'est commercialement pas intéressant de proposer des grosses capacités. Aux USA 65% des lave-linge seraient à charge par le dessus contre seulement 10% en Europe

⁶⁷ Sur le modèle testé ce n'est qu'aux environs de 7 kg, soit à moins de 80% de la capacité maximale, que les traces tendent à se raréfier.

d'énergies effectuées sur les programmes les plus performants, sont perdues en partie ou totalement sur les programmes les plus énergivores.

L'histoire des fabricants de lave-linge peut être résumée à une longue lutte pour : convaincre les ménages à s'équiper ; convaincre les ménages équipés à utiliser leur lave-linge pour la totalité de leur linge. Du point de vue du nombre de foyers équipés, l'électrification du lavage du linge est pratiquement terminée en 2004 en France avec 99,3% des foyers équipés (tableau 32)⁶⁸. En revanche, le succès est loin d'être total sur l'autre front de l'électrification (laver tout le linge en machine chez soi), même si les avancées semblent importantes. L'augmentation de la capacité des tambours vise à mettre au lave-linge ce qui auparavant était lavé autrement (pressing, laverie automatique...) en raison d'une trop grande taille ou poids (couette, rideaux...). La généralisation des programmes « lingerie », « lavage main » et autres vocables est destinée à amener les utilisateurs à utiliser leur lave-linge pour laver le linge non lavable en machine (étiquette « laver à la main ») en association avec un filet à linge.

En achetant un nouveau lave-linge (Whirlpool) nous avons remplacé un lave-linge (Candy Activa Smart 12 à tambour de 5 kg acheté neuf en juin 2000), n'acceptant que du linge à étiquette « lavable en machine », par un lave-linge acceptant du linge à étiquette « laver à la main » (programme lingerie). Il ne nous paraît pas faux d'affirmer que laver du linge à la main est une tâche de moins en moins prise, à la différence de préparer un repas. Cette substitution de lave-linge se traduit donc par une hausse de la consommation électrique, laquelle n'est peut-être pas compensée par les économies autorisées par le nouveau lave-linge sur certains programmes au regard de l'ancien (0,13 kWh/kg au lieu de 0,19). Hausse de la consommation par incorporation de linge qui n'était pas lavé en machine à domicile, mais aussi hausse de la consommation par transfert de linge sur de nouveaux programmes, plus énergivores que ceux qui étaient précédemment utilisés. Pour le linge délicat, la Candy proposait un seul programme (délicat à environ 0,25 kWh/kg), alors que la Whirlpool en propose deux (délicat à 0,16 kWh/kg ou lingerie à 0,30 kWh/kg) : la tentation d'un transfert partiel ou complet est loin d'être négligeable, ce qui signifie passer de C à D (délicat > lingerie) en étiquette-énergie, au lieu de passer de C à A (délicat > délicat) !

SI CE N'EST PAS PLUS GRAND, C'EST PLUS PETIT MAIS AVEC PLUS D'USAGES...

La stratégie de la grande capacité ne se limite pas au lave-linge. Le GIFAM (groupement interprofessionnel des fabricants d'appareils d'équipement ménager) a ainsi réalisé en 2007 un dossier de presse intitulé « *l'électroménager grande capacité ou le quotidien en XXL* »⁶⁹. Cet organisme justifie ainsi le mérite de réfrigérateurs et congélateurs grande capacité parce « 33% des français n'aiment pas faire les courses », les lave-linge et sèche-linge de grande capacité parce que les français n'aiment pas les corvées

⁶⁸ Ce chiffre n'est probablement que le nombre de lave-linge en service au regard du nombre de ménages, et donc inclue des ménages avec plusieurs lave-linge (résidence secondaire...), car sinon les laveries automatiques auraient beaucoup moins de clients.

⁶⁹ <http://www.gifam.fr/index.php?id=59>

de linge, les lave-vaisselle et appareils de cuisson de grande capacité parce que les français sont « 93% à avoir reçu au moins une fois des invités pour partager un repas au cours des trois derniers mois ».

Or, pour les lave-vaisselle, à la différence des lave-linge, les technologies de capteurs semblent être moins opérantes pour adapter la consommation en fonction de la charge, car pour un lave-vaisselle c'est plus le nombre et les dimensions des articles que leur poids qui compte. Quant aux réfrigérateurs et congélateurs, leur consommation est fortement liée à l'inertie thermique du contenu sous contrainte de températures minimales à maintenir y compris lorsque l'appareil est vide. Enfin, si les systèmes de cuisson électrique sont soumis à l'obligation d'étiquette énergie ce n'est pas du tout le cas pour les systèmes de cuisson gaz. C'est d'ailleurs un vrai parcours du combattant (équipé d'une calculatrice) pour parvenir à identifier un système de cuisson gaz réellement performant, sachant qu'en plus les systèmes mixtes induisent en erreur (étiquette énergie de la partie électrique uniquement si elle est au niveau brûleurs, pas niveau grill). La stratégie de l'électroménager grande capacité est susceptible d'être un important réservoir à effet rebond.

Pour ce qui est du label Energy Star, en ce qui concerne le matériel informatique, il y a un effet rebond lié à l'augmentation de la taille des écrans, d'une part, et lié à la multiplication des alimentations sur port USB, d'autre part. Nous avons vu que, pour les téléviseurs, la tendance est à proposer des écrans de plus en plus grands : on constate le même phénomène tant pour les ordinateurs que pour les téléphones portables.

Pour un ordinateur, entre un écran LCD 17 pouces et un écran 30 pouces la consommation est multipliée par 5. D'après les données du site Energy Star de la communauté européenne l'effet de la consommation globale annuelle de l'ordinateur ne passe que de 49 à 93 kWh, mais c'est assez théorique et sans doute basé sur des comportements vertueux. De façon générale, plus l'écran est grand plus il consomme.

En ce qui concerne les multiplications des alimentations sur port USB, elles proviennent d'une part des accessoires que l'on branche sur les ordinateurs, et la substitution des adaptateurs secteur par le port USB. Pour les accessoires, on note une relative généralisation du stockage de donnée qui va de la clef USB au disque dur, de plus en plus apprécié car l'essor du MP3, de la vidéo et de la photo numérique nécessite des capacités de stockage de plus en plus importantes pour des usages de plus en plus nomades. On note aussi l'essor des claviers rétro-éclairés, à alimentation minime mais alimentation quand même.

Pour la substitution des adaptateurs secteur par le port USB, nous nous référons surtout à la possibilité de plus en plus offerte de recharger un baladeur MP3, ou même un téléphone portable, sur une prise USB, généralement celle de l'ordinateur. Ainsi le baladeur MP3 Archos 3 n'est pas livré avec un adaptateur secteur pour la recharge : on le recharge via un câble en le connectant sur la prise USB d'un ordinateur ou autre source. Le téléphone mobile iPhone se recharge par alimentation USB soit sur une base (dock) spécifique, soit via un câble à un ordinateur ou autre source, tel un adaptateur secteur à prise USB. Mais il y a aussi l'essor important des disques durs externes sans alimentation externe (alimentation sur l'ordinateur via la prise USB), de plus en plus prisés pour le stockage d'images (photos) et de musique.

Il n'est d'ailleurs pas impossible que les adaptateurs secteur classique disparaissent au profit des adaptateurs secteur à prise USB. En effet, pour peu que les câbles USB soient courants, ce système offre plus de souplesse puisqu'on n'est pas obligé d'avoir un adaptateur secteur. Mais ça revient à augmenter les consommations des ordinateurs, en déportant un certain nombre d'usages existants ou de nouveaux usages dessus. Avec le risque que, disposant d'un ordinateur labellisé acheté grâce aux recommandations d'un site comparateur de rendement énergétique (Energy Star, guide Top-Ten...) on ne prête pas attention aux connections via USB car l'ordinateur est réputé consommer peu...

On peut ainsi attirer l'attention sur le développement des casques audio sans fil, nouveau support à l'extension de la notion de confort. Les modèles que nous avons pu apercevoir possèdent une base émettrice avec adaptateur secteur. Mais on devrait voir apparaître des casques à prise USB pour recharge sur l'ordinateur ou le lecteur disque dur DVD Blue-Ray, si ça n'existe pas déjà.

Autrement dit, en même temps que les constructeurs font des efforts sur le rendement énergétique pour satisfaire au label Energy Star ou à l'étiquette-énergie, ils suscitent ou favorisent des usages qui augmentent les consommations. Une étude de l'Agence Internationale de l'Énergie sur l'impact énergétique des équipements NTIC de consommation de masse, souligne que les appareils (ordinateurs, téléphones, baladeurs...) sont souvent livrés avec un paramétrage de base (applications chargées au démarrage) qui excède largement les besoins des utilisateurs et que d'importantes économies pourraient être réalisées si les fabricants étaient soucieux d'offrir plus de souplesse dans les possibilités de paramétrage [Ellis & Jollands]. La même étude souligne également qu'à mesure que les capacités de stockage des batteries des petits appareils de type smart phones, baladeurs, appareils photo, caméscope augmentent, de nouvelles fonctionnalités sont proposées augmentant ainsi leur consommation.

On peut aussi citer le cas des anti-virus informatiques. La capacité des disques durs n'a cessé d'augmenter (on atteint maintenant les capacités du Tera-octet), alors que la vitesse des processeurs augmente beaucoup moins vite, voire stagne. Ça n'a pas été un obstacle aux anti-virus étant donné que les systèmes (OS) sont devenus multitâche, l'analyse antivirale se déclenchant en tâche de fond sans gêner l'activité : les temps d'analyse sont de plus en plus long mais l'activité en tâche de fond ne gêne pas, du moins tant qu'il y a activité. Parce que s'il n'y a pas activité, l'antivirus va perturber les systèmes destinés à réduire l'activité de l'ordinateur pour économiser de l'énergie. Par exemple, sur un iMac 600 la puissance descend à 81 Watt en veille écran mais remonte à 90/91 Watt pendant l'activité de l'anti-virus, soit 10 Watt de plus. Sur un ordinateur plus récent, l'antivirus peut retarder la mise en veille soit un passage de 37 Wh à 2,7 Wh (données Energy Star). Ce qui représente des watts heure en plus qui, multipliés par le nombre d'ordinateurs, finissent par représenter une consommation annuelle de plusieurs giga watts heure.

Le label Energy Star est attribué sur la base du rendement des équipements en début de vie et non pas en fin de vie. Or le rendement des batteries a tendance à se dégrader à mesure qu'elles vieillissent. D'une part, en raison de « l'effet mémoire » : les chargeurs les plus récents de qualité sont censés annuler cet effet

mémoire. D'autre part, parce que la durée de vie d'une batterie est limitée, et que ses performances se dégradent avec le temps. Il faut savoir que les meilleures batteries actuellement disponibles restituent, neuves, 99,9 % de l'énergie qu'elles ont consommé (charge) : il y a un pourcentage de perte qui va augmentant avec le temps jusqu'au moment où la batterie ne peut plus fonctionner⁷⁰.

Nous avons pu ainsi observer une recharge continue sur la batterie d'un téléphone portable de moins de 5 ans : il est tout simplement impossible de mesurer la fin de la charge, car la batterie ne cesse pas de se recharger même si c'est très faiblement. Sur ce portable (Sagem) la consommation de charge est d'environ 2,78 Wh, pour une capacité d'environ 6 Wh. Sous réserve de la fiabilité de nos mesures, le courant de fuite est d'environ 0,2 Wh ce qui est susceptible de mettre le téléphone à plat en 30 heures, sous réserve que ce courant n'est pas moindre lorsque le chargeur n'est pas connecté⁷¹. On observe en tous cas un changement des fréquences de chargement (tous les 2 jours) au regard des fréquences initiales (tous les 3 à 4 jours).

En d'autres termes, la multiplication des batteries crée un problème en passe de devenir plus important que celui des veilles si ce n'est pas déjà fait. En effet, la progression du nombre d'adaptateurs secteur est susceptible de ralentir en raison d'un mouvement de substitution par les ports USB, alors que la progression du nombre de batteries est susceptible de continuer sur un rythme effréné. Parallèlement, les fabricants s'engagent à réduire les consommations en veille, et notamment celles des adaptateurs secteur une fois la charge terminée. En Europe, dans le cadre de la directive Eco-conception, il est prévu de limiter à 0,5 Wh la consommation en veille de la plupart des appareils domestiques, ainsi que celle des chargeurs lorsqu'ils ont fini la recharge de la batterie [Lecq & Toulouse]. Il est probable que l'équivalent moyen de perte par batterie sera bientôt supérieur à cette valeur si ce n'est pas déjà le cas. Et nous nous limitons là à l'électricité « spécifique », problème moins considérable que celui des batteries de véhicules électriques.

De façon générale, rien ne permet de mettre en évidence que l'étiquette-énergie a effectivement conduit à réduire les consommations d'électricité. L'adoption de l'étiquette-énergie commence en 1992 : les tableaux 27 et 28 montrent qu'entre 1990 et 2008 la hausse estimée des consommations électriques liée à l'électroménager en France dépasse 80% ! Selon [Claustre 2005a p. 9] « *le calcul du coût global pour l'utilisateur additionnant le coût d'achat et la consommation d'énergie des appareils permet bien souvent de démontrer la rentabilité des appareils les plus efficaces* ». Il n'y a pas de rentabilité puisqu'il n'y a pas de retour sur investissement avant l'obsolescence du lave-linge ou la mort de l'utilisateur⁷². Qui plus est, la durée moyenne de renouvellement est de 8 à 10 ans et non pas de 15 ans, ce qui réduit les éventuelles

⁷⁰ Le rendement énergétique d'une batterie neuve varie selon la technologie : 99,9% en Li-ion, 80 à 90 en Ni-Cd... Par ailleurs, toute batterie « fuit » (autodécharge), en fonction de la technologie, de la charge, de la température, et de l'âge : 10% en Li-ion, 30% Ni-Cd...

⁷¹ La consommation électrique annuelle du réseau de télécommunications français (data centers compris) était estimée en 2006 à 5,9 TWh, consommation des terminaux usagers exclue, soit 1,5% de la consommation électrique française [Souchon Foll p. 78]. La téléphonie mobile était estimée consommer 23 kWh par usager pour l'acheminement réseau et 0,03 kWh pour la consommation propre au téléphone. Ce dernier chiffre, basé sur une enquête France Télécom, est manifestement sous-évalué. Pour le téléphone objet de nos mesures (Sagem MyX1-2 trio) qui n'est pas un smart phone et fonctionne surtout en voix (environ 4 heures d'appel et une dizaine de SMS facturés par mois) on obtient 1,8 kWh par an.

⁷² Sachant que le lave-linge A+ coûte 725 € sur 15 ans contre 836 € pour le lave-linge B, il faudrait renouveler 6,53 fois le cycle achat-fonctionnement, soit 98 ans, pour espérer amortir un seul lave-linge A+, en supposant que le différentiel reste constant.

économies de fonctionnement. Enfin, les lave-linge à moindre efficacité énergétique sont souvent les moins chers et donc souvent ceux dont l'obsolescence est la plus rapide. Il n'est pas sûr que le différentiel d'économies d'électricité soit nettement en faveur d'un ménage remplaçant en 2026 un lave-linge A+ acheté en 2011, au regard d'un ménage remplaçant à la même date par un lave-linge premier prix acheté en 2017 en remplacement d'un lave-linge premier prix acheté en 2011...⁷³

Peut-on pour autant affirmer que les mesures (Energy Star, étiquette-énergie, éco-conception...), destinées à inciter les industries des appareils domestiques à réduire les consommations d'énergie de leurs produits, sont inutiles ? Non, au sens où elles ont accéléré la diffusion d'un standard mis au point par les majors des dites industries. En effet, la réduction de la taille des appareils est une tendance lourde sur certains marchés et requiert des réductions des consommations d'électricité pour éviter les échauffements (effet Joule) ; et les innovations afférentes se diffusent à d'autres branches, ce qui permet d'amortir les investissements en recherche et développement, et donc de poursuivre l'effort de recherche en efficacité énergétique. Par ailleurs, les plus gros fabricants ont conscience que les réseaux électriques ont des limites et que ne pas faire des efforts en efficacité énergétique revient à mettre en péril l'expansion de la consommation.

Une limite à la mobilité (utilisations « nomades » tels que téléphonie mobile, lecteurs Mp3/Mp4, photo, vidéo...) est la recharge et donc la dépendance au réseau électrique. D'où la démarche de constructeurs, tel Sharp avec le SH002, qui travaillent sur des téléphones mobiles à recharge solaire (10 minutes de charge = 1 minute de conversation). Reste à savoir si ça restera un effort de promotion, dans l'air du temps, ou si c'est un axe d'innovation qui sera central chez les constructeurs et compatible avec les usages qu'ils chercheront à susciter chez les consommateurs, et/ou que les consommateurs inventeront⁷⁴. Energy Star, étiquette-énergie et directive éco-conception se contentent de contribuer à l'air du temps.

Conclusion du chapitre A :

Rares aujourd'hui sont les logements qui ne sont pas été raccordés au réseau électrique, dans une France où les logements approchent ou dépassent les 100% de taux d'équipement en matière d'équipements électroménager le plus courant. Ce qui n'empêche pas l'électrification de prendre de nouveaux chemins (voix, image, papier...), avec pour effet une continue progression des consommations. Les efforts d'efficacité énergétique ne semblent pas pouvoir, pour le moment contrebalancer cette tendance de fond.

En effet, rien ne permet de mettre en évidence que l'étiquette-énergie a effectivement conduit à réduire les consommations d'électricité. Energy Star, étiquette-énergie et directive éco-conception sont le support de la diffusion d'un standard nécessaire à certains secteurs industriels, car permettant d'amortir les

⁷³ Par contre, acheter deux lave-linge en 15 ans fait plus que doubler l'impact carbone, sauf si on fait des premier prix à bas coût carbone.

⁷⁴ La société Wysips a mis au point un film photovoltaïque transparent d'une épaisseur de 0,1 mm. Placé sur l'écran d'un téléphone mobile, il faudrait à peine 2 minutes de charge pour autoriser 1 minute de conversation. Mais une dispense totale de connexion au réseau électrique pour recharger la batterie ne serait éventuellement possible que dans des régions à très fort ensoleillement.

investissements en recherche et développement et donc de poursuivre l'effort de recherche en efficacité énergétique. Ce faisant, ces mesures incitatives se contentent de contribuer à l'air du temps. Il faut bien plus que ça pour tenir les objectifs de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Il faut une meilleure coordination entre les efforts d'efficacité énergétique « immobiliers » (logements) et les efforts d'efficacité énergétique « mobiliers » (électrodomestiques), notamment avec des étiquettes-énergies incitant à des efforts aussi importants que ce qui est censé être demandé avec le DPE et la réglementation thermique ; et travailler en particulier pour qu'efficacité rime avec sobriété.

En effet, pour le Bâtiment, la réglementation thermique est un véritable moteur incitatif et la plupart des entreprises doivent fournir des efforts non négligeables pour accompagner la législation. L'insuffisance des efforts en électroménager tend à accroître le risque que, dans le Bâtiment, les efforts à consentir paraissent trop élevés et/ou que les gains obtenus en consommations énergétiques « immobilières » soient perdus de façon plus ou moins importante en consommations énergétiques « mobilières ».

Cette insuffisance en électroménager proviens de ce que les efforts portent surtout sur l'efficacité énergétique et non pas sur la sobriété énergétique : il en est ainsi avec l'augmentation des tailles (écran de téléviseurs, tambours de lave-linge ...) ; ou encore la multiplication des postes consommateurs d'énergie (ports USB, applications, batteries, veilles...), qui tendent à faire perdre sur le terrain de la sobriété, tout au moins des consommateurs, ce qui est gagné sur celui de l'efficacité des équipements.

B/ Du wattmètre au paramétrage du confort : de la place pour la sobriété ?

De sérieuses difficultés dans la mesure, liées à un matériel pas assez précis :

En élaborant notre projet de recherche nous pensions qu'un wattmètre standard était un appareil qui permettait de mesurer la consommation électrique telle qu'elle est mesurée au compteur EDF. En effectuant les mesures nous avons eu le désagrément de constater que tel n'était pas le cas. D'une part, parce que rares sont les wattmètres non professionnels qui peuvent effectuer des mesures à partir de 0 W. D'autre part, parce que si un wattmètre non professionnel marche bien sur une simple résistance il a des marges d'erreurs avec des charges résistives complexes, comme certains ordinateurs, par exemple.

Nous avons démarré nos mesures avec un wattmètre à prise (Advisen 103353), assez aisé à trouver en grande surface de bricolage. Après avoir débuté nos mesures, nous nous sommes rendus compte que la puissance minimale mesurable était 5 Watt ! Par conséquent, les mesures effectuées ne prenaient pas en compte les veilles et puissances de fonctionnement inférieures à 5 Watt.

L'intérêt d'un wattmètre non professionnel est qu'il comporte une prise intégrée : on le branche dans une prise électrique et on y raccorde l'appareil dont on veut mesurer les consommations. Les wattmètres professionnels, qui permettent notamment des relevés informatisés, ne comportent pas de prise intégrée : ils comportent des câbles à connecter directement au tableau électrique du local où sont effectuées les mesures. Le wattmètre professionnel requiert donc des manipulations plus familières à un électricien qu'à un chercheur en sciences sociales, pour de toute façon obtenir des résultats qui ne permettent pas facilement d'isoler la consommation d'un seul appareil, contrairement au wattmètre à prise.

Mais, après un approfondissement sur les wattmètres à prise disponibles, il est apparu que rares sont les wattmètres permettant des mesures à partir de 0 Watt, et encore plus rares sont ceux qui fonctionnent sur le réseau électrique français. Après bien des difficultés, nous avons fini par importer d'Allemagne un wattmètre NZR à prise, à relevé informatisé. Toutefois, le logiciel initial d'analyse de données était d'emploi complexe et son manuel rédigé en allemand. Malgré les performances des outils de traduction disponibles sur Internet, nous n'avons pu intégrer au présent travail qu'une partie des analyses qu'étaient censées autoriser notre matériel⁷⁵. Réussir à faire fonctionner ce logiciel a mis en valeur un autre problème : l'intervalle de temps ne peut être réglé sous la minute, d'où fort lissage des graphiques sur des mesures de puissances très variables. En raison de ces difficultés dans la précision des mesures, nos résultats ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeur.

Ce qui nous a été signalé, après avoir approché EDF : nous ne disposerions que de simples indicateurs de consommation. On nous a précisé qu'il était possible d'effectuer des mesures à la prise, avec un wattmètre professionnel, en bricolant un peu pour lui adjoindre une prise. En tenant d'approcher O. Sidler sur le matériel de mesure utilisé, un responsable de son bureau d'études (Enertech) nous a fait savoir qu'ils fabriquaient leur propre matériel mais ne le commercialisaient pas. Nous en avons déduit qu'Enertech utilisait probablement des wattmètres professionnels adaptés pour effectuer des mesures à la prise.

En synthèse, nous avons effectué des mesures avec trois indicateurs de consommation :

- Advisen 103353 / FHT9999 ; champ de mesure de puissance : 5 à 3 000 W
- IDK MPM50 ; champ de mesure de puissance : 5 à 4 416 W
- NZR SEM16 ; champ de mesure de puissance : 0,2 à 3 680 W⁷⁶

D'après ce que nous avons pu comprendre lors de nos échanges avec EDF, un des problèmes des indicateurs de consommations est qu'ils n'effectuent pas une correction par le facteur de puissance (Cos Phi). Des trois indicateurs de consommation, seul l'appareil IDK MPM50 indique le facteur de puissance. Or nous avons pu vérifier que les watts heure mesurés par IDK MPM50 correspondent à ampère x volt x

⁷⁵ Bien que l'intermédiaire fournisseur avait indiqué qu'il n'en existait pas, nous avons fini par obtenir une version anglaise du manuel. Néanmoins, sa lecture ne nous a pas permis de surmonter le problème rencontré : le logiciel n'arrivait pas à détecter l'appareil de mesure. Après prise de contact avec le fournisseur allemand nous avons fini par recevoir un nouveau logiciel, beaucoup plus ergonomique. Mais celui-ci ne nous est parvenu qu'en janvier 2011, trop tard pour pleinement exploiter toutes ses possibilités.

⁷⁶ Selon la notice, car nous avons pu mesurer des puissances de 0,1 W, dont certaines, mais pas toutes, apparaissent sur les relevés.

facteur de puissance. L'IDK MPM50 effectue donc bien une correction par le Cos Phi. Qui plus est les résultats qu'il affiche sont souvent très proches des mesures du NZR SEM16, lequel est censé être le plus fiable des trois. On peut en déduire que le NZR SEM16 effectue également une correction par le Cos Phi.

Certes, se pose la question de la précision de la mesure du Cos Phi, et plus généralement de la qualité de la mesure des paramètres intensité et tension. Par exemple, si un wattmètre à la prise marche bien sur une simple résistance il y aurait des marges d'erreurs sur des charges résistives complexes, tel qu'un ordinateur⁷⁷. Mais s'il est certain que nous n'avons pas des appareils de mesure de qualité professionnelle, nos résultats sont, sinon identiques, du moins très proches de ce que mesure un compteur EDF⁷⁸.

L'avantage d'avoir utilisé des wattmètres à la prise, est que nous avons ainsi utilisé une méthode facilement reproductible pour les particuliers, à la différence du wattmètre professionnel (du moins non bricolé pour lui adjoindre une prise). En effet, les wattmètres facilement accessibles à des particuliers nous paraissent des outils incontournables pour faire prendre conscience aux ménages de leurs consommations et tenter de pallier aux effets rebonds, avec les réserves de [Strengers] et [Pierce et al.]. En particulier, tant que des wattmètres à plage de mesure inférieure à 5 W ne seront pas facilement accessibles aux particuliers, ceux-ci devront procéder en regroupant plusieurs appareils sur une même prise raccordée au wattmètre, de façon à ce que les veilles et petites consommations additionnées soient mesurables ; il suffit ensuite de débrancher successivement les différents appareils et noter les écarts pour obtenir des valeurs de consommations approximatives ; sachant que ce qui importe n'est pas d'obtenir des mesures ultra précises, mais bien de faire prendre conscience aux ménages de l'impact de certains de leurs gestes quotidiens⁷⁹.

Des résultats qui tendent à noircir le scénario ouvrant ainsi des pistes de pondération :

La mesure effective se révèle donc une tâche assez ardue, surtout sur les petites puissances. Ces dernières ne doivent pas être négligées, surtout quand elles sont susceptibles de se traduire par un nombre important d'heures de fonctionnement. L'objectif du présent travail était d'effectuer des mesures les plus fines possibles, les rapporter à des hypothèses de consommation à fondement statistique puis les confronter aux données Energy Star, étiquette-énergie et constructeurs (lorsque disponibles pour ces dernières).

⁷⁷ <http://forums.futura-sciences.com/electronique/3862-wattmetre-pfc.html>

⁷⁸ Selon <http://mgc99.free.fr/Telephone/Electricite.html> la puissance apparente ($P=U*I$) « n'est pas donnée en Watt mais en volt-ampère symbole VA ». La puissance réelle (dite aussi active) est mesurée par un wattmètre, à savoir exprimée en Watt, selon la formule : $P = U * I * \cos(\phi)$ avec $\cos(\phi) = P / S$. Le NZR SEM16 n'affiche pas le facteur de puissance, à savoir le $\cos(\phi)$, mais en exportant les mesures d'un lave-linge sous format Excel nous avons pu vérifier qu'il s'agit bien de la puissance réelle, le $\cos(\phi)$ avoisinant 1 lorsque l'activité de la machine à laver consiste essentiellement à chauffer l'eau de lavage.

⁷⁹ Dans l'étude [Strengers] l'utilisation de wattmètres n'aurait pas amené les usagers à réduire leurs consommations. [Pierce et al.] soulignent que les études sur les compteurs de consommations résidentielles d'énergie portent exclusivement sur leur efficacité supposée et pas du tout sur d'éventuelles inefficacités. Par ailleurs, des tentatives de production d'appareils affichant leur consommation auraient été conduites mais n'auraient pas été poursuivies faute de succès commercial.

Nos mesures servent à bâtir un scénario du pire, où aucun effort n'est réalisé pour réduire les consommations propres aux appareils : dans quelle mesure les évolutions prévues en « électroménager », notamment dans la communication, traitement et mise à disposition de l'information, sont-elles susceptibles de gonfler les consommations en électricité des résidences principales ? Nous avons regroupé, dans le tableau 28, les consommations constatées, celles attendues, ainsi que des hypothèses de consommation, lorsqu'il ne s'agit pas d'une consommation continue (veilles, téléphonie fixe...) : quantité moyenne de pizza consommée par foyer, nombre moyen de lavage en machine par foyer...

Il n'y a aucune prétention de représentativité : à partir de mesures appliquées à nous même et à notre entourage, ainsi que d'observations, il s'agit, comme dans la première partie, de rendre plausible un scénario catastrophe. Cette catastrophe n'est pas inéluctable. L'émergence continue de nouveaux usages électriques, associée à des démarches d'efficacité énergétique favorisant une consommation décomplexée et non pas la sobriété, nous y mènent certes tout droit. Mais il suffit d'associer efficacité et sobriété, ainsi que mobilier et immobilier, pour éviter ladite catastrophe. De même, si nos résultats de mesure permettent de noircir encore plus le scénario catastrophe, en faisant émerger des points sensibles, ces derniers peuvent également servir de curseurs d'atténuation, dès lors que l'on fait porter dessus des efforts de sobriété :

- écart avec étiquette-énergie
- affichage lumineux informatif (LED, horloge...)
- variations lumineuses des écrans (composition colorimétrique)
- activités logicielles de maintenance (logiciel système, anti-virus)

Les constructeurs ont obligation de réaliser les mesures et fournir les données permettant l'établissement de l'étiquette-énergie. Mais ce sont les revendeurs qui s'occupent de l'affichage. Or il n'y a pas toujours rigoureuse correspondance entre les données du constructeur et l'affichage en magasin. Le réfrigérateur-congélateur objet de nos mesures était ainsi affiché avec une consommation de 251 kWh par an, pour une puissance nominale de 160 W, soit étiquette A en juin 2010. Toutefois dans le manuel constructeur l'étiquette-énergie était B, avec une consommation annuelle de 384 kWh.

Qui plus est, nous avons constaté, à la lecture de la notice fournie avec l'appareil, que sous 18° C il faut allumer une ampoule à incandescence pour augmenter la température dans le réfrigérateur, de sorte que l'appareil puisse continuer à produire les températures requises pour la longue conservation à -18°C. Ladite lampe a une puissance nominale de 15 W, et c'est celle qui s'allume lorsque l'on ouvre la porte de l'appareil⁸⁰. En mode « température du local inférieur à 18° C » il faut presser un bouton, qui permet de laisser l'ampoule allumée à une intensité moindre lorsque la porte est fermée. La lampe consomme environ 8,4 à 8,5 Wh. Nous ne savons pas si l'étiquette affichée en magasin (A) résulte d'une erreur, ou s'il s'agit de la consommation mode « température du local inférieur à 18° C » exclus (sur la base d'un utilisateur qui ne songerait pas à lire la notice, par exemple).

⁸⁰ Soit une consommation de 14 à 14,7 Wh pour une puissance de 15 W. La température, à moins que ce ne soit la durée d'allumage, semble jouer sur la consommation.

Ce problème ne serait peut-être pas spécifique au modèle que nous avons utilisé. Or il est relativement fréquent, en maison individuelle, d'avoir des températures inférieures à 18° C dans certaines parties de la maison, en saison de chauffe : c'est souvent le cas du garage lorsque celui-ci est intégré à l'enveloppe du bâtiment, chose assez courante. Or, il est assez fréquent de placer les bahuts congélateurs, voire des réfrigérateurs, dans ce type de garage. Par ailleurs, il n'est pas rare, en situation de précarité énergétique, d'avoir des températures inférieures à 18°C dans la cuisine, là où se trouve généralement le réfrigérateur. Sur 250 jours de températures extérieures ne permettant pas d'avoir 18° C en local non ou peu chauffé, 8,5 Wh représentent 51 kWh. Auxquels il faut rajouter la consommation pour compenser la chaleur produite par cette lampe, étant donné que le rôle de cette lampe est précisément de faire fonctionner le moteur lorsque la température externe n'est pas suffisante pour amener le thermostat interne à le faire.

Ce serait peut-être un problème spécifique aux réfrigérateurs-congélateurs deux portes, à savoir associant la conservation des aliments (réfrigération) et la congélation dans des compartiments distincts, mais avec un seul moteur et un seul thermostat, ce qui serait assez fréquent. En effet, le thermostat étant réglé sur la température interne du réfrigérateur, plus la température externe sera proche de la température de réfrigération (entre 4 et 8° C), moins le moteur aura besoin de tourner, ce qui par contre a tendance à élever la température dans le compartiment congélation. Ce qui pose particulièrement problème quand il s'agit de garantir des températures inférieures à -18° C (compartiment congélation quatre étoiles).

Sur la base des études d'O. Sidler, l'Ademe recommande de placer les réfrigérateurs et congélateurs dans les parties les moins chauffées du logement. Mais, d'une part, O. Sidler s'appuie sur des échantillons non représentatifs de l'ensemble du parc de logement français : en individuel, la pratique de placer le congélateur dans le garage ou le cellier est loin d'être rare. D'autre part, et surtout, il faudrait prendre des mesures pour s'assurer que les congélateurs et réfrigérateurs peuvent fonctionner sans surcoûts à des températures inférieures à 18° C. D'ailleurs, lors de l'achat d'un appareil à conservation d'aliments on ne fait pas nécessairement attention aux limitations de fonctionnement, aussi bien en températures maximales à respecter qu'aux températures minimales, et des études ainsi que des mesures d'harmonisation seraient sans doute nécessaires pour que économies d'énergies soient compatibles avec hygiène et santé.

De façon plus générale, optimiser les consommations des réfrigérateurs-congélateurs deux portes est assez complexe : il faut réfrigérer sans congeler dans la partie concernée, donc ne pas trop faire tourner le moteur ou jouer sur les épaisseurs d'isolant, tout en congelant suffisamment dans la partie congélation. De même, chauffer de l'eau dans un tambour contenant du linge est une opération d'une relative complexité thermique. Or les mesures pour l'établissement des étiquettes-énergie sont effectuées dans des contextes normalisés qui sont très éloignés de la réalité de la diversité du contexte et des comportements des utilisateurs. Nous reviendrons ultérieurement plus en détails sur ce point crucial.

Pour ce qui est de l'affichage lumineux informatif, de type heure, par exemple, ou programme de lave-linge, lave-vaisselle, gazinières et autres appareils domestiques, les quelques observations et mesures

effectuées nous ont permis de constater une forte diversité de pratiques à cet égard. Les négociations liées à la limitation des consommations en veille et/ou hors marche des appareils devraient amener à une certaine harmonisation des pratiques, au regard des consommations d'électricité. Encore faudra-t-il que ces mesures incitent à de réels efforts en recherche et développement, et non pas simplement à favoriser la diffusion des « meilleures » technologies déjà disponibles.

L'affichage digital (écran à cristaux liquides) de l'heure sur un micro-ondes Samsung (CE297DN acquis neuf vers 2002) requiert en moyenne une puissance de 2,2 W. Il est toutefois à signaler que chaque chiffre étant composé de sept barres, on a un total de 28 barres susceptibles de s'allumer pour composer l'heure et les minutes. Or chaque barre allumée influe sur la consommation électrique : 11h11 (8 barres) est moins consommateur que 23h58 (22 barres). La puissance appelée peut ainsi fluctuer de 0,8 W. Certes, la consommation est déterminée par la moyenne des puissances appelées, mais s'il était possible de l'établir sur la plus petite valeur observée (1,7 W) l'économie serait de 0,5 Wh, soit 4,38 kWh sur un an.

Ce problème est démultiplié par le nombre d'appareils avec affichage de l'heure impossible à désactiver autrement qu'en éteignant l'appareil, et donc à devoir reconfigurer l'heure à chaque fois. Sur une chaîne Hi Fi Yamaha (GX50 acquis neuf vers 1995) l'horloge fait un peu moins varier (0,5 W) la puissance appelée mais pour une puissance ne descendant jamais sous 5,6 W. En revanche sur une gazinière Brandt (KGP710W acquise neuve en 2010) la variation de l'horloge est de 0,1 W pour une puissance ne descendant pas sous 1,8 W, ce qui souligne l'importance des gisements de progrès et d'harmonisations.

Certes, nous comparons là des consommations pour des horloges sur des appareils de « générations » différentes : une chaîne de 1995 (5,9 Wh), un micro-ondes de 2002 (2,2 Wh), une gazinière de 2010 (1,8 Wh). Ce qui pourrait être interprété comme la démonstration d'efforts constants des fabricants. Sauf qu'il ne s'agit pas d'appareils de standing équivalents ni nécessairement représentatifs des fabrications les plus courantes. Et, surtout, l'efficacité générale des mesures sur les veilles et périodes hors marche sera fortement dépendantes des cycles de remplacement. Il vaudrait donc mieux que les consommations en veille des nouveaux appareils soient d'ores et déjà extrêmement basses, pour produire des effets non négligeables avant même que la plupart des appareils déjà en service ne soient remplacés !

On a un autre exemple d'affichage lumineux informatif, portant sur des générations similaires : les indicateurs de fonctionnement des modems (modulateur-démodulateur), et plus exactement des modems liés aux offres « triple play » des opérateurs téléphoniques (téléphone + Internet + télévision) appelés « box ». C'est ainsi que l'on peut visuellement contrôler sur la « NeufBox » que tout marche bien. En fait ces LED (Light Emitting Diode), en français diodes électroluminescentes, de contrôle ne servent à rien sauf lorsqu'il y a un problème pour guider le technicien lorsque l'utilisateur appelle le service après-vente. En ce qui concerne la « NeufBox », il est facile de désactiver et réactiver ces LED, sous réserve d'avoir la curiosité d'examiner l'interface de contrôle, car cette fonctionnalité n'est pas signalée dans le manuel d'utilisation. Par contre, chez d'autres opérateurs ce n'est pas possible, par exemple sur la « Freebox ».

L'écart de consommation entre la « NeufBox » avec LED activés et LED désactivés n'est que de 2 Wh, soit un écart de 730 Wh sur un an. L'incidence sur la facture de l'utilisateur n'est pratiquement pas perceptible. En revanche, si on multiplie par le nombre d'accès à la télévision par « box », soit 15% des ménages [Donnat], que l'on applique au nombre de résidences principales on obtient 2,66 GWh soit tout de même 0,03% du potentiel de production de la puissance totale installée début 2010 en fermes éoliennes et installations photovoltaïques (8,16 TWh)⁸¹. Autrement dit, rien que par une information des usagers ou une désactivation par défaut des LED on pourrait obtenir en économies d'énergies l'équivalent de 60% du potentiel productif de l'investissement francilien en photovoltaïque raccordé au réseau début 2010.

Comme autre point sensible, nous avons remarqué que nos mesures de consommation d'énergie sur un ordinateur à écran cathodique, mettaient en évidence un écart de puissance appelée allant jusqu'à 5 W, fonction de la composition colorimétrique de l'image affichée à l'écran. Au laboratoire d'essais FNAC on nous a confirmé cette incidence, en précisant toutefois qu'elle est beaucoup moins perceptible sur les écrans à cristaux liquides que sur les écrans cathodiques. Sous réserve de l'imprécision de notre équipement de mesures, nous avons pu observer des variations de 0,8 W sur un baladeur iPod touch 8Go, soit jusqu'à 60% de la puissance appelée, qui semblent liées à la colorimétrie de l'écran (mais il s'agissait de vidéos Youtube, donc il y aurait incidence éventuelle de la connexion Internet WiFi). Sur un téléviseur (écran cathodique) nous avons également observé des écarts allant jusqu'à 33 W (37% de la puissance) qui pourraient aussi être liés à la colorimétrie. Nous avons également noté des variations sur un baladeur Archos 3 mais la relation à la colorimétrie est plus incertaine⁸².

Il y aurait donc des pistes de travail concernant l'efficacité énergétique des écrans en fonction de la colorimétrie des images. En effet, la couleur n'est pas sans incidence énergétique : le passage du noir et blanc à la couleur a augmenté la consommation des écrans, au point que, en dépit des efforts pour réduire les consommations un vieil ordinateur portable acquis neuf en 1995 (PowerBook 150) consomme moins (14 Wh au plus) qu'un ordinateur portable Lenovo labellisé Energy Star acquis en 2009 (au moins 16,5 Wh). Il ne s'agit pas de proposer un retour au noir et blanc. Notons cependant que l'iPad était initialement assimilé à une liseuse électronique. Mais en fait pas du tout, et son succès a stimulé l'essor des tablettes à écran couleur, intermédiaires entre le Smartphone et l'ordinateur portable, alors que le succès des liseuses électroniques à écran noir et blanc se fait toujours attendre.

Enfin, comme déjà dit, un ordinateur est soumis régulièrement à des activités logicielles de maintenance (logiciel système, anti-virus, optimisation, entretien...). Cette activité affecte beaucoup plus les ordinateurs tournant sous Windows que ceux tournant sous Mac OS. Certes, sous Windows il est possible de

⁸¹ France métropolitaine, 4 492 MW en éolien et 272 MW en installations photovoltaïques (sources : Wikipédia ; ERDF). Nous retenons un facteur de charge moyen par MW installé de 1 750 MWh pour l'éolien et 1 100 MWh pour le solaire. Soit 4 492 MW x 1 750 MWh = 7,86 TWh, plus 272 MW x 1 100 MWh = 299 GWh, ce qui donne un total de 8,16 TWh.

⁸² On observe des variations jusqu'à 0,5 W, soit jusqu'à 38% de la puissance, mais la variation de la colorimétrie ne semble pas être facteur explicatif. Sous réserve de recherches plus approfondies, ce serait peut-être lié à la qualité du matériel utilisé pour réaliser les vidéos : les vidéos avec du matériel professionnel seraient moins consommatrices au visionnage que celles réalisées avec du matériel amateur, ou du moins de moindre qualité (caméscopes, appareils photo, baladeurs, webcams...).

configurer l'ordinateur de façon à n'avoir aucune ou très peu d'opérations de maintenance. Mais il est plus simple de désactiver des opérations de maintenance sous Mac Os que sous Windows. Pour s'en convaincre, il suffit de fréquenter une bibliothèque : on ne voit jamais un étudiant quittant les lieux avec son Mac allumé parce qu'il a malencontreusement accepté de lancer une mise à jour au moment d'éteindre son ordinateur ; en revanche, ce n'est pas rare pour les possesseurs d'un portable tournant sous Vista...

Quel impact en consommations électriques ? Sur le portable testé une maintenance augmente la puissance appelée de 10 W au regard de ce qui est nécessaire lorsque le disque dur ne tourne pas : en usage bureautique, on est souvent à 16,5 W, mais lorsque la maintenance s'effectue, souvent en tâche de fond, on est constamment à 26,5 W. La firme Apple fait régulièrement produire des études pour démontrer que ses ordinateurs autorisent des gains de productivité. Même s'il est vrai que le temps passé en redémarrages systèmes, problèmes de configuration, pilotes, mises à jour, correction de virus et autres peut faire perdre beaucoup de temps, il paraît difficile de s'appuyer, en toute rigueur scientifique, sur les mesures de productivité commandées, dans une optique commerciale, par Apple. En revanche, il est possible d'estimer les temps de mises à jour Vista et Windows 7 et les consommations électriques qu'elles induisent.

Résumé de mesures : il y a bien boîte noire donc tout est possible !

Le tableau 28 est une tentative de résumer toutes nos mesures. Ce tableau devait permettre d'obtenir une moyenne annuelle électricité spécifique. Sur la base de 91 m² à 29 kWh/m²/an, on obtient une consommation annuelle moyenne de 2 639 kWh par logement. Sur la base du tableau 28 nous obtenons 1523 kWh (option NeufBox avec LED), soit 16,74 kWh/m²/an. Il y a un problème quelque part. Il nous manque très certainement quelques appareils, en particuliers diverses veilles / chargeurs / horloges. Mais ça ne peut expliquer ce « trou » de plus de 800 kWh annuels.

Et il est difficile de tenter une comparaison sur la base de la répartition moyenne des postes composant les usages dits spécifiques. En effet, les données trouvées sont généralement basées sur les études de O. Sidler, certes intéressantes mais non représentatives de l'ensemble du parc français. Nous avons trouvé des données [Global Chance p. 70] mais dans le poste éclairage est inclus l'éclairage public et ce n'est donc pas vraiment représentatif de la consommation domestique, mais faute de mieux : froid (21%), éclairage (18%), lavage (20%), autres (audiovisuel, bureautique, outillage domestique...) : 40%). Notre répartition sur la base du tableau 28 est la suivante : froid (367 kWh / 24%), éclairage (159 kWh / 10%), lavage (237 kWh / 16%), autres (760 kWh / 50%). O. Sidler obtient 636 kWh pour le froid et 365 kWh en éclairage sur son étude de 2007, soit le double de nos valeurs, mais sa présentation ne permet pas de reconstituer l'ensemble des usages spécifiques [Sidler 2009].

Tableau 28 : mesures de consommations électriques par appareil, fonction et type d'utilisation

appareil	fonction	1 heure (Wh)	24 h (Wh)	365 jours (kWh)
NeufBox	sans LED	6,59	158	57,7
	avec LED	6,67	160	58,4
	conversation	+ 1,5		
ordinateur bureau moyenne 12h/semaine	radio internet	100 à 105		
	bureau foncé	84,91		
	bureau clair	87,91		
	interactif net	96,91		60,5
	veille écran seul	74,91		
	veille	34,41		
	arrêt	4,41	106	35,88
ordinateur portable moyenne 12h/semaine	radio internet	27,7		
	bureau foncé	16,5		
	bureau clair	16,5		12,75
	interactif net	17,9 à 26,6		
	veille écran seul	12,5		
	veille	1,2		
	arrêt ⁸³	0,4 à 1,5	12 à 36	2,34
imprimante laser	recharge	51		
	impression + veille	1000 pages / an		66
lecteur disquette	veille	5,5		
	lire-écrire	2,5		
baladeur MP4	affichage 12h/semaine	0,5		0,3
	affichage propre	1		
	affichage ordinateur	1,5		
	Recharge : 180/an	2,5		0,45
	transfert	3,5		
réfrigérateur congélateur			1,01	367
lave-linge	veille	3,4 à 4	82 à 96	
	programmation	4,7	4,7 à 108	
	marche 60° C	795		236,6
fer à repasser	1 heure par semaine	875		45,5
micro-ondes	horloge	2,2	53	19
	cuisson pizza	200		23,6
chaîne Hi-fi moyenne 12h/semaine 2h /semaine	programmation	+ 0,2	+ 4,8	
	veille	5,89	141,4	51,6
	radio	18		11,23
	marche divers	61,23		6,4
iTunes + chaîne HiFi ⁸⁴	connexion via aux.	35		36,5
éclairage	hypothèse 40% ⁸⁵			159
aspirateur 1050 W	25 min / semaine	0,96		50
téléviseur LED	moyenne INSEE	72,3	412,3	150
décodeur box	veille	11	264	96,4
console Wii	veille	1,5	36	13,14
prise parasurtenseur		1,1	26,4	9,64
mobile iPhone 3GS		5	30	10,95

Une autre raison réside peut-être dans notre méthode : en dehors des veilles, nous tentons de nous caler sur des moyennes de consommations, or ces moyennes sont bâties sur des sondages et non pas sur les

⁸³ Auto décharge de 10% par mois sur 9 mois, 20% par mois sur 3 mois ; 250 recharges/an, moyenne 3 ans : 1% perte an 1, 3% an 3.

⁸⁴ Ordinateur iBook connecté à la chaîne : serveur musique et/ou web radio ; 12 h usage à 45 W, 8 h veille (oubli) à 20 W, par semaine.

⁸⁵ Hypothèse d'un équipement « tout fluo-compact ». Sur la base d'un éclairage représentant 15% de la facture électricité spécifique (donnée Ademe). Les fluo compacts autorisant 80% d'économies, nous nous basons sur 60% d'économies par effet rebond (ne pas éteindre car ça ne coûte pas cher et/ou parce que les extinctions répétitives diminuent la durée de vie des lampes fluo-compactes).

données réelles de consommation, d'ailleurs impossibles à obtenir. Le chiffre de 29 kWh/m²/an est certes une estimation mais sur un pourcentage d'une valeur brute de consommation, contrairement aux moyennes d'écoute de radio, de lavage de linge, etc.... Et certaines de ces moyennes sont exprimées par habitants et non pas par logements : il faudrait peut-être d'abord ramener le tableau 28 à une consommation par habitant avant de transposer à une consommation par m². Ce que tend à conforter la comparaison avec [Sidler 2009] : la plupart des postes du tableau 28 sont basés sur les consommations d'un célibataire et non pas de la moyenne d'occupants par logement.

Il se pourrait également que le décalage résulte de ce que nos mesures sont effectuées sur des appareils à efficacité énergétique beaucoup plus élevée, malgré leur relative vétusté, que ceux qui sous-tendent la moyenne de 29 kWh/m²/an. Certes, ce dernier chiffre date de 2005, mais il ne mesure pas encore pleinement l'impact de la diffusion de lampes fluo-compactes et de matériel électroménager à étiquette A ou A+. En fait, il mesure surtout la consommation des équipements domestiques que les français possédaient en 2005, rapporté à la consommation des équipements de 1973. On peut en déduire que les français se sont massivement équipés entre 1973 et 1992, instauration de l'étiquette-énergie, (encore faut-il pondérer par le nombre d'habitants) mais on ne connaît pas le taux de renouvellement de ces équipements.

Toutefois, sur la base des données CEREN, on voit qu'en dépit d'une relative stabilisation en volume des consommations résidentielles d'énergie depuis 2000, les consommations en électricité spécifique ne cessent d'augmenter. C'est d'ailleurs le seul poste dont la progression paraît constante depuis 1990. Certes, on n'a pas d'indication si les congélateurs de 1990 sont toujours en service, mais il n'en montre pas moins que les achats de nouveaux équipements contribuent à augmenter la consommation globale.

Tableau 29 : consommation totale d'énergie du secteur résidentiel

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008
Résidentiel								
Chauffage	30,0	30,6	31,5	31,3	30,8	30,4	30,3	30,0
Eau chaude sanitaire	3,9	4,0	4,4	4,3	4,2	4,1	4,2	4,2
Cuisson	2,1	2,4	2,6	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Electricité spécifique	3,6	4,1	5,0	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6
Total	39,6	41,1	43,5	43,9	43,5	43,1	43,3	43,3

Unité : millions de Tep. Source : CEREN ; données corrigées des variations climatiques ; inclus le bois mais pas les autres sources d'énergies renouvelables

Néanmoins, si on admettait que, en dépit des dérapages sur les téléviseurs, les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique des fabricants ajoutés à la généralisation des lampes fluo-compactes et au remplacement des appareils devraient amener à une baisse sensible de l'électricité dite spécifique la ramenant de 29 kWh/m²/an à 18 kWh/m²/an ... Faut-il pour autant se réjouir et être rassurés ?

D'une part, les données récoltées par l'Agence Internationale de l'Énergie montrent que la hausse des consommations électriques domestique est générale : elle est la résultante de l'évolution des modes de consommation et des redéfinitions du confort qui lui est associée. En Europe (pays OCDE) la hausse représente près de 20% entre 1996 et 2006 [Ellis & Jollands]. Certes, certains pays, notamment les scandinaves, voient leurs consommations baisser. Mais d'autres, voient leurs consommations exploser, notamment Grèce, Turquie, Espagne, Portugal sans doute sous la double conjonction de l'explosion de la consommation de climatiseurs et de la généralisation de la consommation de masse d'équipements électriques domestiques. La France se situant légèrement au-dessus de la moyenne.

D'autre part, et surtout, parce que plus les économies dégagées seront importantes, plus les risques de non contrôle des consommations risquent d'être importants. Par exemple, remplacer une voiture fortement consommatrice d'essence par une voiture très économe incite à l'utiliser davantage et/ou à rouler plus loin [Chêne-Pezot & Bernasconi]. De même, remplacer des lampes à incandescence par des lampes fluo compactes se traduit par une augmentation de la durée d'éclairage et d'espaces éclairés [Pautard].

Or, précisément, la rénovation énergétique abordée, en première partie, est censée dégager d'importantes économies de chauffage : dès lors que les ménages ont des baisses importantes de leurs dépenses énergétiques, celles-ci augmentent leur pouvoir d'achat, sous réserve que l'intégralité des économies ne soit pas absorbée par les remboursements des emprunts contractés pour financer les travaux de rénovation.

En conclusion, l'échec de notre tentative, de rapprocher la moyenne de consommation découlant du tableau 28 à une moyenne nationale, tend à confirmer que la consommation électrique des ménages est une boîte noire : on ne sait pas sur quel base comparer une consommation de célibataire, et on ne connaît pas la part de consommations résultant d'équipements ne relevant ni de l'étiquette-énergie, ni du label Energy Star, ni d'efforts d'éco-conception. On a donc affaire à une boîte noire, dans un contexte de mesures d'incitations à l'efficacité énergétique pour le moins timorées, alors même que les efforts d'efficacité énergétique dans le bâtiment sont censées améliorer le pouvoir d'achat des ménages et donc leur permettre d'accroître leur confort en consommant davantage. Il y a donc bien là de quoi nourrir un scénario de hausse soutenue des consommations électriques, sous réserve du comportement budgétaire des ménages.

Où vont passer les économies de chauffage ?

QUELLES ECONOMIES DE CHAUFFAGE ?

A l'issue de la première partie nous avons conclu que la tendance lourde d'ici à 2020, serait une rénovation thermique sans isolation des murs, et focalisation sur les équipements de production et distribution d'énergie (bois, solaire, pompes à chaleur...). Il est délicat d'estimer les économies de chauffage qui pourraient en résulter, d'autant plus qu'elles risquent d'être absorbées assez vite par les hausses des prix des énergies. Tôt ou tard, ces rénovations partielles seront insuffisantes pour absorber l'impact des hausses

des prix des énergies, et il faudra alors procéder au renforcement de l'isolation thermique des murs et/ou changer les habitudes de confort thermique. Face à la hausse probable des prix des énergies, des économies de chauffage pourront-elles être durablement dégagées ? Si oui, dans quoi seront-elles réinvesties ? Nous postulons ici que les économies de chauffage ne sont pas englouties par les hausses des prix des énergies.

Il était question à une époque d'instaurer, à partir de 2012, une réglementation thermique applicable aux logements existants imposant une consommation d'énergie inférieure ou égale à 80 kWhep/m²/an, à savoir la généralisation de l'objectif HPE rénovation (tableau 2). Pour le moment, c'est la généralisation de l'objectif BBC 2005 (50 kWhep/m²/an) à la construction neuve qui a été privilégiée, au travers de la promulgation de la RT 2012. Pour le moment, les logements existants ne sont donc soumis, lorsque des travaux sont engagés et en fonction des travaux engagés, qu'à la réglementation actuelle sur l'existant, qui impose au mieux une consommation d'énergie inférieure ou égale à 90 kWhep/m²/an. Dans les faits, c'est la réglementation éléments par éléments qui s'applique le plus souvent, donc des consommations bien supérieures à 90 kWhep/m²/an, à supposer que la réglementation soit systématiquement appliquée.

La loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'Environnement, dite Loi Grenelle 1, précise que « *l'Etat se fixe comme objectif de réduire les consommations d'énergie du parc de bâtiments existants d'au moins 38% d'ici à 2020. A cette fin, l'Etat se fixe comme objectif la rénovation complète de 400 000 logements chaque année à compter de 2013* » (article 5). Ces objectifs sont réaffirmés par le Plan Bâtiment Grenelle.

Sur la base de la transposition des consommations du tableau 2, les 21,6 millions de bâtiments achevés avant le 1 janvier 1989 auraient une consommation moyenne évaluée à 274 kWhep/m²/an. Réduire leur consommation de 38% signifie établir ladite consommation moyenne à 170 kWhep/m²/an. Certes, l'objectif est donné pour l'ensemble du parc existant, mais c'est sur le parc existant construit avant 1989 et plus particulièrement sur celui antérieur à 1974 que les efforts de rénovation sont susceptibles de produire les réductions les plus substantielles de consommations d'énergie. Cet objectif devant être atteint par le biais de 400 000 logements rénovés par an, cela signifie que 3,2 millions de logements devront avoir été rénovés avant le 01 janvier 2021, dans une interprétation souple de « *d'ici à 2020* ».

Tableau 30 : objectif Grenelle 1 à 2020 pour l'existant (consommations d'énergie réduites de 38%)

	Nb de logements	sans privilégier d'énergie		conversion électrique vers bois	
		total TWhep	kWhep/m ² /an	total TWhep	kWhep/m ² /an
Construits avant 1989	21 575 968	502,86	274		
Objectif à 2020	21 575 968	311,78	170	311,78	170
Logements non rénovés	18 375 968	415,50	266	302,27	194
Logements rénovés	3 200 000	-103,72	-381	9,51	35
				maximum bois	58

Ce qui signifie que ces 3,2 millions de logements rénovés devront avoir une consommation de... - 381 kWhep/m²/an (tableau 30) ! Cet objectif est impossible à atteindre, sauf si la rénovation consiste à rénover

uniquement les logements les plus énergivores chauffés à l'électricité, en substituant le chauffage électrique par du chauffage bois. Autrement dit, que l'on joue sur les coefficients de transformation en énergie primaire : l'électricité a un coefficient de 2,58 alors que celui du bois est de seulement 0,60. Selon [Traisnel et al. 2010] on trouve en maison individuelle construite avant 1975 des consommations moyennes d'énergie de 267 kWh_{ef}/m²/an, ce qui donne 689 kWh_{ep}/m²/an en chauffage électrique. Dès lors que l'on prend soin à sélectionner 3,2 millions de logements à surface moyenne de 91 m² de type maison individuelle d'avant 1975 chauffées à l'électricité, les sortir permet non seulement d'atteindre d'emblée l'objectif, mais en plus d'avoir un plafond de 35 kWh_{ep}/m²/an pour les habiter tels quels. Si en plus on les chauffe au bois, ce plafond monte à 58 kWh_{ep}/m²/an. Avec des gestes complémentaires d'isolation thermique, il semble possible de s'assurer que ces plafonds ne soient pas dépassés.

Avec l'étiquette-énergie nous avons pu entrevoir que l'efficacité énergétique n'est pas nécessairement une question de sobriété. Avec le tableau 29, l'efficacité énergétique paraît beaucoup plus être question d'astuces que de sobriété. Néanmoins en dépit des astuces au niveau de la conversion en énergie primaire, l'effort à consacrer est considérable. En effet, l'énergie bois n'est utilisable, pour le moment, qu'en chauffage et eau chaude sanitaire. Il reste l'énergie d'éclairage, d'auxiliaires, et éventuellement de refroidissement, si l'on se limite à la définition des consommations d'énergie de la RT 2012. En outre, le coefficient de conversion bois ne permet pas de diminuer les consommations électrodomestiques qui ne peuvent être ignorées au niveau des bilans de production et consommation d'électricité, même si elles sont ignorées par la RT 2012 ou peuvent être amoindries par le solaire et/ou l'éolien.

Selon le Commissariat Général au Développement Durable (SOeS), la consommation unitaire moyenne totale d'énergie du secteur résidentiel aurait baissé de 41% entre 1973 et 2005, passant de 365 à 215 kWh/m², sans préciser s'il s'agit d'énergie primaire ou finale. Ce qui n'a pas empêché une explosion des consommations électriques liées aux appareils électroménagers (tableaux 24, 27 et 28).

Comparativement l'objectif du Grenelle 1 est une réduction des consommations d'énergie de 38%. Certes pour l'existant et non pas l'ensemble du secteur, mais vu la part prédominante de l'existant au regard du neuf et que l'effort de réduction porte sur sept ans, il s'agit d'un effort sans précédent, et un dégageant théorique de pouvoir d'achat (ou d'épargne ce qui a une incidence sur l'achat et l'endettement) nettement plus sensible sur le budget de certains ménages que la baisse de 41% des consommations d'énergie en 32 ans. En particulier, 3,2 millions de logements passant de 267 kWh_{ef}/m²/an à 13 kWh_{ef}/m²/an cela donne une économie annuelle de 23 114 kWh d'électricité (base de 91 m² moyen) ce qui peut atteindre facilement une économie annuelle de 2 315 euros (tarif juin 2011 de l'électricité)⁸⁶ ; en supposant que l'on parvienne à trouver 3,2 millions de logements à rénover exclusivement chauffés à l'électricité.

Si substituer le chauffage bois au chauffage électrique permet d'obtenir les plus fortes baisses de consommation globale, par le jeu des coefficients, cela ne se traduit pas nécessairement par les plus fortes

⁸⁶ Hypothèse de 40% heures pleines (0,11916 le kWh) et 60% heures creuses (0,0875 le kWh).

économies sur les budgets des ménages. En effet, 2 335 euros cela semble bien inférieur à ce qu'il est possible d'économiser en rénovant une maison chauffée au fioul, si l'on se base sur le tableau 17.

Toutefois, passer de 267 kWh/m²/an à 33 kWh/m²/an en chauffage fioul donne une économie de 21 294 kWh de fioul soit 1980 euros à 0,92 euros TTC le litre de fioul⁸⁷. Soit des économies moindres en fioul qu'en électricité, ce qui ne correspond pas aux estimations disponibles sur les dépenses d'énergie de chauffage : celles des ménages se chauffant au fioul seraient plus élevées de 28% que celles des ménages se chauffant à l'électricité, à caractéristiques de logement, ménage et localisation similaires [Calvet & Marical].

Certes, les économies vont dépendre : des quantités d'énergies utilisées avant et après rénovation ; des évolutions respectives de ces énergies. Qui plus est, l'ampleur de la baisse globale des consommations d'énergie du résidentiel existant s'exprime en euros par kWh, alors que l'ampleur de la rénovation thermique des bâtiments s'exprime en kWh. Par conséquent, les deux phénomènes n'ont pas nécessairement la même ampleur, ni le même impact sur les budgets énergie des ménages,

DE LA DESTINÉE DES ÉCONOMIES : ENTRE REBONDS, TOLÉRANCES ET VISIBILITÉ

Que vont faire les ménages de ces économies : épargner ou consommer ? Ou payer les dettes ? En effet, nous avons pu voir en première partie (tableau 17) que les investissements à consacrer peuvent être conséquents. Se pose donc d'emblée la question de savoir si la charge de la dette va être supérieure, égale ou inférieure aux économies de fonctionnement et ce pendant combien de temps. Et par conséquent, de cerner quel peut être l'impact de la relation dette / économies sur les répartitions budgétaires des ménages.

Entre 1985 et 2006 le poids des dépenses courantes de logement (loyers, charges, énergie, entretien...) passe de moins de 18% à plus de 22% dans le budget des ménages français, devenant le poste plus important, principalement sous l'effet des hausses de loyers [Christel & Even]. Et [Plateau] souligne que la part de l'énergie dans ces dépenses passe de 27% en 1984 à 17% en 2004, alors que dans le même temps le confort des logements progressait : la part des logements équipés en ECS, chauffage et sanitaires passe de 80% en 1984 à 93% en 2004. Mais ces données de la comptabilité nationale mesurent la consommation du service du logement, où les propriétaires occupants versent un loyer, et non pas les dépenses effectives. Le poids des dépenses d'énergie est donc susceptible d'être bien plus important dans les dépenses effectives ; sauf que ces données ne prennent pas non plus en compte les dépenses d'achat des logements, de travaux d'amélioration ni les intérêts liés, comptabilisés dans la production du service du logement.

[Merceron & Theulière] ont tenté de s'approcher des dépenses effectives en retirant de la consommation du service du logement les loyers imputés (loyers fictifs des propriétaires occupants), mais pour isoler les

⁸⁷ Le prix du fioul aurait atteint 1 euros le litre en 2008, sur la base des séries de prix moyens de la Direction de l'Énergie et du Climat.

dépenses d'énergie transports inclus. Les données résultantes font apparaître que la part de l'énergie varie peu entre 1985 et 2006, ce qu'ils attribuent à l'étalement urbain (hausse de l'équipement en automobile), et aux augmentations de la taille des logements et du taux d'équipement en électroménager. [Merceron & Theulière] soulignent que ce sont les ménages aisés qui ont le plus bénéficié des économies d'énergie résultant des efforts combinés d'isolation thermique, et d'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage et des véhicules. Mais ils ne soulignent pas que ce sont également les ménages aisés qui ont le taux d'équipement le plus élevé en électroménager.

En d'autres termes, [Merceron & Theulière] passent à côté de ce que nous tentons de saisir : les effets rebonds, à savoir les dépenses d'énergie provoquées par les économies d'énergie. En effet, l'étalement urbain, qui induit la hausse d'équipement automobile, et l'augmentation de la taille des logements, qui induit la hausse de leur besoins énergétiques (plus de surfaces à chauffer, éclairer...), ne résultent pas des économies d'énergie. En revanche, l'équipement et la consommation en électroménager peuvent être favorisés par les économies d'énergie et donc qualifiés d'effet rebond.

Si l'on reprend [Davis S.] et [Sorrell] les effets rebonds peuvent se décomposer entre : effets directs (consommer plus de ce qui est à économiser), indirects (sur la consommation d'autres biens/services), globaux. Si on s'intéresse aux effets sur les consommateurs, les effets directs sont de deux types : effets de substitution (maintien du niveau de satisfaction), effets de revenu (demande pour plus de satisfaction). Les effets indirects sont de deux sortes : effet d'énergie grise (consommation d'énergie requise pour obtenir les économies visées), effets secondaires. Les effets rebonds globaux résultent de l'addition des effets directs et indirects, considérés pour l'ensemble d'un système économique (un pays par exemple).

Sur la base de [Sorrell], les effets rebond directs sont les mieux connus (dans un champ de mal connaissance) : les économies liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique des logements sont susceptibles de générer des effets rebonds directs inférieurs à 30%, soit au pire 70% d'économies effectives pour 100% d'économies attendues. Toutefois, la connaissance des effets rebonds d'ensemble, quoique balbutiante, suggérerait que ceux-ci sont supérieurs à 50%. Le calcul de l'effet rebond étant ainsi défini : économie attendue – économie constatée / économie attendue x 100.

Le présent travail s'intéresse essentiellement à la deuxième catégorie des effets rebonds indirects : les effets secondaires. Plus précisément, nous nous intéressons aux interactions entre l'amélioration de l'efficacité énergétique liée au renforcement de la réglementation thermique du résidentiel, et l'évolution des consommations électrodomestiques. À vrai dire, nous nous intéressons moins aux effets rebonds indirects qu'aux conceptions du confort qui les alimentent, en ce qu'elles conditionnent les arbitrages que les ménages vont devoir opérer sous l'injonction aux économies d'énergie des pouvoirs publics.

L'effet rebond sur l'électricité spécifique lié à la baisse des économies de chauffage reviendrait à dépenser en électricité spécifique ce qui n'est plus dépensé en chauffage. Mais la question de fond est : que vont

faire les ménages avec les économies en énergie dégagées par la rénovation énergétique du logement qu'ils habitent ? Ce qui pose deux problèmes : celui de la réalité des économies ; celui de leur visibilité.

Concernant la réalité des économies, celles-ci seront dépendantes de la qualité de la rénovation effectuée, d'une part, des comportements des occupants d'autre part. En effet, ouvrir les fenêtres dans des logements à isolation renforcée peut faire déraiser les consommations de chauffage. Par ailleurs, chauffer à 21°C parce que chauffer coûte moins cher et qu'on se sent mieux que quand on chauffait à 19° C, peut également produire moins d'économies que ce qui était prévu sur le papier.

Se pose également la question de la visibilité des économies. Parce que si on reste en tout électrique l'effet de la baisse des consommations de chauffage sur la facture EDF est visible. En revanche, si on passe du fuel au tout électrique, on n'a certes plus de facture fioul, mais la facture EDF augmente et comme on se dit qu'on n'a plus de facture fuel à payer on ne surveille pas la facture EDF...

Le tableau 31 restitue l'évolution de toutes les factures électriques des ménages (usages censés être résidentiels, sachant qu'une bonne part du travail à domicile est sans doute dedans), et non pas l'évolution des consommations des ménages en tout électrique, ce qui aurait été plus intéressant pour notre propos. Il montre que les consommations augmentent en valeur absolue sur tous les postes. Sous réserve de connaître l'évolution des consommations des ménages « tout électrique », ce tableau donne à croire qu'il y a une relative « insensibilité » des ménages à l'augmentation de leur facture d'électricité. Si les consommations des ménages ne sont pas freinées par des augmentations des factures d'énergie, elles seront encore moins freinées lorsque ces factures baisseront. Et ce d'autant plus qu'en dépit des efforts d'isolation et d'amélioration de l'efficacité énergétique, les consommations de chauffage n'ont presque pas baissé en 2008 au regard de ce qu'elles étaient en 1990 (tableau 29).

Tableau 31 : évolution des consommations électriques domestiques 1990-2008

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008
Résidentiel								
Chauffage électrique	36,7	39,5	39,2	39,8	40,5	41,8	43,2	45,0
Eau chaude sanitaire	13,6	17,1	18,6	18,9	18,8	18,8	19,2	19,7
Cuisson	6,3	8,6	9,7	9,9	10,0	10,1	10,4	10,7
Electricité spécifique	41,5	48,1	58,3	67,6	69,8	71,9	73,9	76,6
Total	98,1	113,4	125,8	136,2	139,1	142,6	146,7	152,0

Unité : TWh ; 1 TWh correspond à 0,086 tep. Source : CEREN ; données corrigées des variations climatiques

En vingt ans, la part des achats prépayés dans le budget des ménages français serait passée de 13% à 20%. Le forfait « triple play » (téléphone – internet – télévision) est une consommation prépayée. Et elle induit des consommations électriques : comme on a payé et que les consommations ne sont pas limitées on consomme d'autant plus sans voir les consommations d'électricité. Alors, ça devrait se répercuter sur la

facture EDF... Mais EDF s'est aussi lancée dans l'achat prépayé : les factures sont désormais un forfait calculé sur l'année précédente et la régulation est effectuée en fin d'année. Ce qui est susceptible de favoriser l'effet rebond.

Le concept « triple play » est particulièrement important dans l'évolution des consommations électriques. D'abord, parce qu'il accompagne une électrification de fonctions non électrifiées (ouïe, voix, vue), ce qui induit une augmentation de la consommation électrique, tout au moins sur les postes concernés. Ensuite, parce que la façon dont est formulée l'offre associée à ce concept incite à consommer davantage, en rendant le consommateur captif. D'une part, parce que le forfait prépayé s'accompagne de consommations hors forfait, et induit d'autres forfaits prépayés : le « triple play » peut être vu comme le regroupement de forfaits distincts, mais vouloir Internet oblige à avoir le téléphone, vouloir la télévision oblige à avoir Internet et donc à avoir le téléphone⁸⁸... Enfin, parce que les différents appareils associés sont devenus dépendants les uns des autres : autrefois pour avoir la télévision il suffisait d'un écran et d'une antenne ; aujourd'hui on peut se dispenser d'une antenne, mais à l'écran il faut alors associer un décodeur et un modem et, tant qu'à faire, un téléphone...

Autrement dit, des évolutions de marché (ouverture à la concurrence), techniques et organisationnelles ont accompagné le foisonnement de l'électrification « ouïe – voix – vue » et abouti non pas à une dispersion de la demande entre différents postes, mais au contraire à la regrouper de façon à ce que le plus grand nombre consomme le plus possible sur tous les postes. À une époque, il était possible d'avoir télévision sans téléphone fixe, ou téléphone portable sans télévision ni téléphone fixe, par exemple, et en plus avec des opérateurs différents. Certes pour avoir Internet il fallait posséder un abonnement téléphonique, mais on pouvait moduler entre consommations téléphone et consommations Internet, ces dernières étant assimilées à des consommations téléphone du moins pour ce qui était de l'accès dit « libre » (sans forfait). De façon générale, le consommateur avait la possibilité de moduler ses différentes consommations.

Le regroupement des offres et la mise en place de forfaits prépayés a été progressif, pour diverses raisons. Mais elle a eu pour effet de stimuler les consommations : chaque fois qu'une proportion plus ou moins définie des plus gros consommateurs atteignait des seuils d'intolérance aux dépenses, apparaissaient des forfaits permettant de continuer à dépenser, donnant le sentiment de payer moins et finissant par conduire à consommer plus. L'apparition des offres « quadruples » (téléphone mobile – téléphone fixe – internet – télévision) est destinée à rendre tolérable aux gros consommateurs le cumul téléphone mobile + « triple play ». Cumul devenu intolérable probablement parce que la gratuité des communications fixes des offres triple play, sur un grand nombre de destinations, amène à une modification de la définition du confort : il devient moins admissible de ne pas pouvoir téléphoner à qui on veut quand on en a envie où que l'on se trouve (dans la limite des codes sociaux). Et l'on s'achemine peut-être vers des offres « quintuples » : par

⁸⁸ Les données Credoc mettent en évidence une relative substitution du téléphone fixe (chute du taux d'équipement de 94% à 82%) par le téléphone mobile (hausse de 4% à 70%) entre 1997 et 2005. A partir de 2006 la progression de la téléphonie mobile s'accompagne d'une progression de la téléphonie fixe, ce qui serait attribuable à l'apparition des offres « triple play » [Bigot & Croutte pp. 10-11].

exemple lorsque le cumul « quadruple play » + abonnement jeu vidéo sera devenu intolérable pour une frange significative de consommateurs (généralisation des consoles et accessoires de type Wii, Kinect...)

Ces regroupements et relèvement successifs des seuils de tolérances aux dépenses induisent un véritable effet rebond : les économies obtenues par regroupement des dépenses de communication sur un seul forfait finissent par augmenter la totalité des dépenses de communication. En effet, les économies obtenues se traduisent généralement par davantage de consommation sur un autre forfait et/ou sur les dépenses hors forfait. En outre, le regroupement incite à consommer sur l'ensemble des postes et donc à acquérir les équipements associés. Par exemple, souscrire un « triple play » alors qu'on ne regarde pas la télévision va finir par conduire à regarder la télévision. De même, souscrire un « quadruple play » alors qu'on n'avait pas de téléphone fixe est fortement susceptible d'inciter à changer le téléviseur, s'abonner à de la vidéo à la demande, gérer son compte bancaire à domicile, bref ajoute des dimensions supplémentaire au logement comme support de consommation. Et enfin parce qu'il y a de plus en plus d'équipements associés : la dépense télévision est désormais composée du téléviseur, du décodeur, de la redevance audiovisuelle, et des consommations électriques associées.

Mais ces éléments ne peuvent pas fonctionner s'il n'y a pas de prise ADSL, et un modem associé. Et tant qu'à faire on y adjoint un combiné téléphonique, de préférence sans fil car c'est plus pratique (et on est habitué au téléphone portable). Au bout du compte, l'ensemble des consommations associées à la souscription d'une offre « triple play » constituent un poste de consommation qui tend à devenir l'un des plus importants.

Enfin, un autre phénomène accompagne l'émergence des nouvelles technologies de l'information et de la communication associées à la prise téléphonique : la mobilité. C'est un phénomène antérieur aux mutations de la téléphonie ; radio à piles, radiocassettes, walkman, puis émergence quasi-simultanée du téléphone portable et de l'ordinateur portable... Mais avec son succès, le téléphone portable devient une locomotive, son taux de pénétration agissant comme diffuseur d'une « culture » de la mobilité. Or la contrainte majeure de la mobilité est la recharge : le besoin de recharge risque de l'emporter sur l'éventuel désir d'économies d'énergie, au sens où le consommateur ne sera pas regardant sur la dépense énergétique s'il peut se dispenser d'avoir à se soucier de recharger ses multiples artefacts (téléphone portable, téléphone sans fil, baladeur numérique, ordinateur portable, appareil photo, caméscope...). Il semblerait qu'on puisse déjà constater avec le relatif succès des chargeurs sans fil, dont le rendement théorique serait de 85% (surconsommation de 15%). Et les chargeurs solaires ne représentent pas, pour l'heure, une solution.

En synthèse, le téléphone fixe consomme moins que le GSM, lequel consomme moins que la 3G [Flipo 2007a]. Cette transition est soutenue par une incitation à la consommation via les forfaits et accompagnée d'une multitude d'équipements technologiques. Certes, la mobilité contraint à s'accommoder d'équipements miniaturisés à consommations assez faibles. Mais ceux-ci contribuent également à un relèvement progressif des « seuils de douleur » : le prix des ordinateurs baissant, on fini par accepter de

payer aussi cher un « iPhone », puis à déboursier encore plus pour un « iPad », et au total le budget ménages téléphonie et compatibles prend une part de plus en plus importante. Et les économies issues de la rénovation énergétique risquent de contribuer encore davantage à alimenter ce poste budgétaire, qui n'a de cesse de croître.

En admettant que les économies soient visibles, que vont faire les ménages avec ces économies ? Si elles ne sont pas englouties dans les déplacements (voiture...), vont-ils s'autoriser à plus de confort électrique ? Ou se diront-ils qu'il leur reste 20 000 à 30 000 euros d'éco-prêt à taux zéro à rembourser ? Ou les dépenses de santé n'auront-elles pas continué à dérapier d'ici-là, dans un contexte où les ménages seront soucieux d'affecter les économies de chauffage aux remboursements des dépenses de santé ? Les nécessités d'arbitrages auxquelles seront soumis les ménages l'emporteront-elles inhibant l'effet rebond de l'électricité spécifique, ou l'effet rebond sera « insensible » aux nécessités d'arbitrages ?

Extérieur, intérieur : les évolutions du concept de confort

Après un survol de [Pautard] et [Shove] et à la lumière de nos réflexions antérieures sur le confort thermique [Theile 2009], nous pouvons relier isolation thermique et consommations électrodomestiques en les replaçant dans l'histoire générale du confort.

Le Code de la Construction pose que “*Les équipements de chauffage permettent de maintenir à 18° C la température résultante intérieure au centre des pièces du logement*”. Le décret n° 2002-120 du 30 janvier 2002 relatif au logement instaure une obligation de « chauffage normal ». On peut rechercher l'origine de ces décrets dans les efforts entrepris par nos ancêtres pour parer le vent, le froid, le soleil, la chaleur, les agresseurs... On peut distinguer ces efforts entre parade statique (abri) et parade mobile (habit). Assez tôt, le confort se distingue entre ce qui est lié à l'abri, plus exactement à la vie dans l'abri, et ce qui est lié à l'habit, ou plus exactement à la vie à l'extérieur de l'abri.

Parmi toutes les possibilités non métaboliques de régulation de température (regrouper des êtres vivants, susciter et canaliser des courants d'air, exploiter le rayonnement solaire, la topographie, s'enfouir...) l'homme a fini par se distinguer des autres espèces par sa capacité à utiliser puis engendrer le feu. Pourtant, pendant très longtemps le feu aura surtout une fonction de défense, de cuisson, sacrée et assez peu de chauffage.

[Crowley] pose que le confort, défini comme l'autosatisfaction retirée du rapport du corps humain avec son environnement physique immédiat, est l'expression d'une nouvelle culture matérielle, la culture « anglo-américaine », telle qu'elle émerge dès le 18^{ème} siècle. [Rybczinski] pose que pour cerner la notion de confort il faut s'intéresser à la complexité de son évolution plutôt qu'accepter les définitions physiologiques ou psychologiques dominantes. Il affirme également que ce n'est qu'au 18^{ème} siècle

qu'émerge la notion de confort comme bien-être matériel lié à la maison, et comme contentement thermique.

Mais si la culture « anglo-américaine » contribue à l'émergence du confort moderne avec une diffusion à l'échelle de la planète, la définition de confort n'en a pas moins été fortement influencée par les contextes régionaux et culturels. Bien plus, l'émergence de la définition « anglo-américaine » du confort s'inscrit dans une lente émergence d'un climat intérieur distinct du climat extérieur.

En effet, avec sans doute de fortes variations locales et temporelles, à savoir sans être nécessairement linéaire, la lente dissociation entre l'extérieur de l'abri et l'intérieur de l'abri participe à l'émergence du confort domestique, base du confort moderne⁸⁹. Cette dissociation se traduit plus ou moins par un transfert de certaines activités de l'extérieur à l'intérieur : dormir, se reposer ; le feu, la cuisine... La sédentarisation d'une part de plus en plus importante de l'humanité contribue à l'affirmation du confort domestique.

En Europe, à partir du moyen-âge la diffusion des technologies de chauffage suit une trajectoire de l'élite vers le peuple, avec un relèvement progressif de la température de confort. Elle s'inscrit dans un mouvement de contrôle de la circulation de l'air : la cheminée, la porte et la fenêtre. Ces améliorations de l'isolation des conditions extérieures, concomitantes à l'émergence du chauffage centrale puis à l'éclairage électrique, autorisent l'émergence d'un climat intérieur au logement fortement distinct des conditions extérieures. Parallèlement on assiste au transfert, de l'extérieur à l'intérieur du logis, du lavage (corps, linge, vaisselle).

Tableau 32 : évolution du taux d'équipement des ménages 1962 - 2004

	1962	1974	1975	1984	1985	1986	1988	1989	1996	1997	2000	2004
Télévision	23,1	81,2	84,2	91,8	92,3	92,6	93,2	93,5	95,3	95,6	96,5	97,5
Magnétoscope / lecteur DVD	0	0	0	0	5	7,4	16,2	24	59,3	61,3	67,4	70,6
Four à micro-ondes	0	0	0	0	0	3	6,42	9,4	45,1	47,2	60,6	74,3
Réfrigérateur	36,1	87,6	89,7	96,0	96,3	96,6	97,1	97,4	99,3	100	100	100
Congélateur indépendant	0	0	16,9	34,1	36,2	37,2	39,3	40,4	50,1	50,7	52,8	53,5
Micro-ordinateur	0	0	0	0	0	0	0	8,2	16,9	18	27	45
Lave linge	30	68,5	71,8	81,0	81,4	82,1	83,6	84,3	89,4	90,3	93	99,3
Téléphone portable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,5	44,1	69,6
Voiture	35,4	62,7	64,1	73,5	74,5	74,6	74,9	75	77,5	78,2	80,3	80,7

Source : Insee, enquêtes Budget de famille 2006 ; ménages métropolitains

⁸⁹ Il nous semble que la notion de confort désigne le bien-être associé aux outils de parade des contraintes environnementales, et donc associé à l'entretien d'un climat artificiel : habit, habitacle, habitat. Le confort d'un fauteuil de jardin renvoie à son équivalent maison, le confort d'une piscine renvoie à un « climat » artificiel. Ce qui tend à rejoindre, en la précisant, la définition de [Crowley].

Après la seconde guerre mondiale, la « *fée électricité* » favorise l'apogée de l'individuation des fonctions : la radio puis la télévision mettent fin à la pratique des veillées, le réfrigérateur puis le micro-ondes tendent à estomper le caractère collectif de la prise de repas... Cette individuation des fonctions culmine avec la « *nomadisation* » liée à l'essor des nouvelles technologies de l'information et de la communication (radio portable, radiocassette, walkman, téléphone portable, ordinateur, baladeur...). On assiste à une inversion du mouvement : le confort domestique tend à être transposé à l'extérieur.

À vrai dire, ce mouvement de transposition du confort intérieur à l'extérieur se manifestait déjà avec l'essor de l'automobile : en effet on quitte un logement à climat régulé pour un véhicule à climat régulé permettant de se rendre à un bâtiment à climat régulé (bureau, commerce...) et vice-versa. Avec un lent effet de vase communicant du bureau au logement, pour ce qui est du confort d'été (climatisation).

Qui plus est, la multiplication des voyages internationaux par avion, tant pour affaires que pour tourisme, tend à uniformiser au niveau de la planète entière une norme de climat régulé : l'acclimatation, autrefois passage obligé du voyageur, qu'il soit touriste, marchand ou colonisateur, tend à devenir impensable, du moins pour ceux qui ne relèvent pas de la catégorie « travailleur immigré ».

On peut relever des différences dans les seuils minimaux réglementaires de températures (entre 16°C et 22°C) à respecter entre la France, le Royaume-Uni, et différentes régions des Etats-Unis. Il faudrait peut-être les voir comme des fossiles archéologiques : survivances d'une époque où l'individuation du confort n'avait pas encore contribué à une standardisation mondiale⁹⁰ ?

Notons toutefois que la nomadisation tend à faire accepter d'utiliser le téléphone, travailler sur ordinateur, écouter de la musique, regarder un film dans des conditions de confort qui ne correspondent pas au confort à l'intérieur d'un logis. Il s'agit donc d'une adaptabilité de la notion de confort domestique, et notamment du confort thermique. Mais dans le même temps, les « sacrifices » consentis pour une fonction nomadisée sustentent une demande pour du plus grand, plus performant pour les équivalents domestiques (écrans plus grands, meilleure qualité de son, ordinateurs de bureau plus performants...). Ces frontières mouvantes sont susceptibles de jouer sur les arbitrages en rénovation thermique, consommations électrodomestiques de moins en moins compressibles, sur les effets rebond...

Par ailleurs, soulignons que la santé participe également à la définition du confort, même si ça a été sans doute occulté par les règles déontologiques du corps médical, en général, les modalités de fonctionnement des systèmes de sécurité sociale et les contrôles sur la vente de médicaments, en particulier. Mais, du moins en France, le relatif assouplissement des règles du commerce des médicaments, les modifications du financement du système de sécurité sociale, l'intérêt grandissant pour l'entretien du corps, l'essor du commerce "bio"... sont autant de phénomènes qui concourent à ce que la santé devienne un paramètre plus visible de la consommation de masse et donc du confort.

⁹⁰ En France, entre 1986 et 2003, la température moyenne des logements chauffés serait passée de 19 à 21° C [Poquet & Dujin].

Une conséquence est que les dépenses liées à la santé joueront sans doute davantage dans les arbitrages opérés par les ménages entre les différents paramètres concourant à leur confort, et pèsera sans doute dans leurs décisions affectant l'énergie en général et la rénovation énergétique en particulier. Une autre conséquence est un plus grand intérêt pour l'influence des matériaux de construction et des conditions d'habiter sur la santé, lequel risque d'être tributaire du niveau de revenu.

En effet, la rénovation thermique massive n'est pas neutre en matière de santé publique. Or, pour le moment, l'impact sanitaire n'est pas ou peu évalué. Au Canada [Simard] s'est intéressée à l'analyse en cycle de vie d'isolants thermiques (laine de verre, polystyrène, cellulose, chanvre, lin...). Elle souligne, en ce qui concerne le potentiel d'atteinte à la santé humaine durant la vie utile de l'isolant, une nette insuffisance de données. On ne connaît pas précisément les incidences, sur la santé des occupants, des COV du polystyrène ou de la laine de verre, des risques de fibrose pulmonaire du lin ou de la cellulose...

Certes l'isolation thermique par l'extérieur permet d'évacuer le risque à l'extérieur. Mais elle demande un investissement plus important que l'isolation par l'intérieur, et il y a le risque que le quintile le plus pauvre, les personnes les plus âgées, les ménages les plus ruraux soient les moins bien informés et donc les plus soumis aux éventuels risques sanitaires de l'isolation thermique. Par ailleurs, reporter le risque à l'extérieur n'est pas annuler le risque, et des études sur les phénomènes de dispersions de polluants, au regard de la climatologie urbaine, seraient sans doute bienvenues pour prévenir d'éventuelles concentrations indésirables.

L'alimentation électrique de charges thermiques complexes

L'efficacité énergétique peut être définie comme réduire l'écart entre énergie utile (rendement de l'énergie utilisée) et énergie primaire (extraction et distribution d'énergie). Et la sobriété énergétique peut être définie comme réduire les prélèvements d'énergie primaire. Nous avons vu que les politiques d'efficacité énergétique en électroménager n'avaient pas contribué à la sobriété énergétique, ce qui faisait peser des risques sur la sobriété énergétique censée découler des politiques d'efficacité énergétique axées sur le fonctionnement des bâtiments.

Mais il y a pire. En effet, nous avons vu qu'il y avait bien abaissement des consommations finales des appareils électroménagers, et que le manque de sobriété était dû à ce que les consommateurs étaient incités à multiplier les usages et les équipements. Toutefois, il n'est pas impossible que les politiques d'incitation à l'efficacité énergétique en électroménager et audiovisuel-informatique-téléphonie, soient de simples politiques d'abaissement des consommations finales, et non pas d'efficacité énergétique : il se pourrait qu'elles abaissent les consommations finales, mais sans réduire l'écart entre énergie utile et énergie primaire. Ou, tout au moins, que la réduction de l'écart entre énergie utile et énergie primaire ait entraîné une augmentation de l'écart entre énergie utile et énergie facturée (finale).

Quoi qu'il en soit, il est absolument certain que l'essor de l'électroménager s'accompagne d'un essor des pollutions harmoniques, lesquelles font peser un risque sur l'allocation des ressources électriques, en particulier dans le contexte français où le choix du nucléaire ne va peut-être pas dans le sens d'une souplesse de gestion de la répartition des ressources, quand bien même elles seraient abondantes.

Par ailleurs, on ne peut ignorer que les appareils électroménager et audiovisuel-informatique-téléphonie jouent un rôle dans la conception thermique des bâtiments. Parce que la consommation de ces appareils conditionne les dépenses de fonctionnement des bâtiments qui les abritent : d'une part, au travers de leurs propres consommations d'électricité ; d'autre part, parce que ces consommations d'électricité gèrent de la chaleur (effet joule). La réglementation thermique a d'ailleurs commencé à intégrer une partie du champ des consommations d'électricité dite spécifique, en incluant l'éclairage et les auxiliaires, mais plus du point de vue des consommations que de celui du comportement thermique du bâtiment (effet joule).

A notre sens, la conception des bâtiments à rénover ou à construire, dans l'objectif d'une division par quatre des émissions des gaz à effet de serre à l'horizon 2050, doit se faire sur une base de sobriété énergétique. L'efficacité énergétique est un des moyens pour y parvenir, à insérer dans une réflexion plus générale sur le confort. Réflexion sur le confort qu'il faut, entre autres, appréhender du point de vue des consommations d'énergie et des charges thermiques que les définitions du confort génèrent. Les appareils électrodomestiques doivent être non seulement appréhendés pour leurs consommations électriques et leurs effets sur le réseau, mais également comme charges thermiques. Ces charges thermiques conditionnent la conception thermique des bâtiments et leur alimentation en énergie.

FACTEUR DE PUISSANCE :

La puissance (watt) d'un courant électrique est définie par sa tension (volts) multipliée par son intensité (ampère), à savoir la formule : $P = U \times I$. En courant continu il n'est pas possible de faire varier la tension (U) par rapport à l'intensité (I). Ce qui pose problème pour le transport de l'électricité en raison de pertes par effet joule : une partie de la puissance (P) est dissipée sous forme de chaleur par la résistance des câbles électriques, sachant que la puissance dissipée par la résistance est proportionnelle au carré de l'intensité du courant. L'invention de l'alternateur et du transformateur permis de résoudre ce problème, sachant que seul du courant alternatif peut être transformé. Ainsi, en diminuant l'intensité et donc en augmentant la tension, on réduit les pertes de transport par effet joule. Ce qui contribua à l'adoption généralisée du courant alternatif et au transport haute tension⁹¹.

Le courant alternatif a néanmoins un défaut : en simplifiant de façon caricaturale, les caractéristiques des composants consommant de l'électricité (récepteur électrique) peuvent générer des déphasages entre

⁹¹ Ce raisonnement n'est plus valable pour des puissances très élevées transportées sur des distances supérieures à 500 kilomètres en aérien ou 50 kilomètres en liaison sous-marine, pour lesquelles le courant continu haute tension (HVDC) peut paraître plus intéressant.

l'intensité et la tension. Pour un récepteur électrique de type simple résistance (charge résistive simple), tel qu'un convecteur ou une lampe à incandescence, l'intensité et la tension sont en phase. En revanche pour des récepteurs à impédance complexe, tels que les nombreux types de moteurs utilisés en électroménager [Multon et al.], les bobinages, les tubes fluorescents, les lampes fluo-compactes... l'intensité et la tension ne sont pas en phase. On mesure ce déphasage par le facteur de puissance, égal, en courant sinusoïdal, au cosinus du déphasage entre l'intensité et la tension (d'où son appellation « cos-phi »). Il varie entre 0 et 1 (ou 0 et 100 s'il est exprimé en pourcentage). Lorsqu'intensité et tension sont en phase, le facteur de puissance est égal à 1 (en courant sinusoïdal).

En synthèse, si en courant continu la puissance apparente (W) est égale à la puissance effective (W), ce n'est pas le cas en courant alternatif. En courant alternatif pour obtenir la puissance effective il faut utiliser la formule : $P = U \times I \times \text{Cos } \phi$. Le facteur de puissance renseigne sur la répartition entre puissance active et puissance réactive et donc sur le rendement du récepteur et de l'installation.

Si nous avons bien compris, un facteur de puissance de 0,4 (ou 40%) signifie que pour 1000 Wh facturés pour un courant de 230 V, l'intensité est de 10,87 A, alors qu'elle aurait été de 4,35 pour un facteur de puissance de 1 ($I = P / U / \text{Cos } \phi$). Il faut donc 2,5 fois plus d'intensité que pour un facteur de puissance de 1, et par conséquent les pertes par effet joule sont augmentées du carré de l'intensité, ce qui peut accélérer le vieillissement du réseau de transport ou obliger à le redimensionner. Une partie de la puissance réactive est facturée aux industriels s'approvisionnant directement en haute tension, et même aux entreprises du tertiaire à partir d'un certain niveau de consommation (grilles tarifaires des distributeurs).

En ce qui concerne la rénovation énergétique, et son impact sur les consommations d'électricité, la baisse des consommations de chauffage et la hausse des consommations dites spécifiques signifie que la part des récepteurs à impédance simple baisse significativement. Et ce d'autant plus que le remplacement de convecteurs par une pompe à chaleur signifie le remplacement d'une impédance simple par une impédance complexe, tout comme le remplacement d'une lampe à incandescence par une lampe fluo-compacte.

Tableau 33 : évolution des consommations électriques domestiques et facteur de puissance

	1990			2008		
	TWh	%	Cos ϕ	TWh	%	Cos ϕ
Chauffage électrique	36,7	37,4	1	45,0	29,6	0,8
Eau chaude sanitaire	13,6	13,9	1	19,7	12,9	1
Cuisson	6,3	6,4	1	10,7	7,1	1
Electricité spécifique	41,5	42,3	0,8	76,6	50,4	0,6
Total	98,1	100	0,9	152,0	100	0,7

1 TWh correspond à 0,086 tep. ; données corrigées des variations climatiques ; adapté de CEREN (voir tableau 31)

Les colonnes du tableau 33 concernant le facteur de puissance (Cos ϕ) sont "fictives" : il s'agit d'une transposition de nos résultats de mesure et l'on ne peut sans doute pas agréger ainsi les facteurs de puissance. Il s'agit juste de mettre en évidence l'accroissement d'un problème souligné dans les rares

mesures des pollutions harmoniques. Une étude au niveau européen montre que ces pollutions ont augmenté, notamment en France [EURELECTRIC].

Ça ne signifie pas pour autant qu'il faille complètement redimensionner le réseau de transport, étant donné que les consommations unitaires sont relativement faibles au regard de ce qu'elles sont dans l'industrie. Mais cette mutation se traduit par une augmentation du risque de modifications de tension sur les lignes, d'usure prématurée des câbles et transformateurs électriques par effet joule, perturber l'onde sinusoïdale et générer des pollutions harmoniques perturbant d'autres appareils.

114

Les effets de cette pollution harmonique vont de la simple altération des images (télévision) ou du son (HiFi, téléphone) à la destruction de condensateurs et de disjoncteurs. La multiplication des ordinateurs, téléviseurs et plus généralement la multiplication du nombre d'appareils transformant le courant alternatif en courant continu (téléphones, box, baladeurs...) est susceptible d'accentuer de façon importante les pollutions générées en raison du grand nombre de foyers multi-équipés et de la longueur des périodes d'utilisation (veilles)⁹². La généralisation de bâtiments à « énergie positive » peut être un facteur de risque supplémentaire, par le raccordement de panneaux photovoltaïques au réseau : en cas de malfaçons ou de pannes affectant le comportement des onduleurs ; mais même lorsque ces derniers marchent correctement, des problèmes non maîtrisés d'injections de courant continu sur le réseau ont été mis en valeur [ESPRIT].

Il est possible de lutter contre ces pollutions et ces problèmes au moyen de filtres passifs ou actifs (opposition de phase), de compensateurs, de systèmes de transmissions flexibles... Mais ça se traduit par une augmentation des coûts des producteurs et distributeurs, et/ou à un transfert sur les bâtiments à « énergie positive ». Il est possible également d'améliorer le facteur de puissance des récepteurs : la communauté européenne a ainsi adopté une directive (EN 61000-3-2) incitant les fabricants de certains matériels électriques à améliorer le facteur de puissance de façon à ce qu'il soit égal ou supérieur à 0,9.

Toutefois, de nombreux récepteurs ne sont pas concernés, telles les lampes fluo-compactes qui ont un facteur de puissance de l'ordre de 0,5. Qui plus est les effets de cette directive ont apparemment du mal à se faire sentir puisque nous avons pu mesurer une machine à laver tournant la plupart du temps avec un facteur de puissance à 0,67, et des ordinateurs avec un facteur compris entre 0,45 et 0,60.

Ce qui tient notamment à ce que la directive EN 61000-3-2 comporte d'importantes exceptions : en particulier, ne sont concernés que les appareils consommant continuellement plus de 75 W et moins de 1001 W. Ce qui tendrait à induire un comportement où l'on ne respecte cette norme que parce qu'on ne peut pas y échapper ; qui plus est, les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique tendent à faire sortir du champ d'application de cette norme : par exemple, de plus en plus de téléviseurs y échappent, ainsi que la plupart des ordinateurs, alors même que le pouvoir de génération d'harmoniques est important.

⁹² Les pollutions harmoniques "peuvent aussi être générés, de façon diffuse, par l'effet cumulatif d'une multitude de charges de faibles puissance raccordées sur les réseaux basse tension : téléviseurs, micro-ordinateurs, moteurs à vitesse variable..." [Berthet et al.]

Nous avons même le cas d'un adaptateur secteur avec un facteur de puissance de zéro, si on le laisse branché dans une prise sans qu'il soit relié à un appareil. C'est sans doute très anecdotique et peut-être lié aussi à un problème de fiabilité de notre wattmètre (IDK), mais ça n'en démontre pas moins qu'on est encore loin d'une harmonisation des pratiques en ce qui concerne le facteur de puissance.

D'ailleurs un facteur de puissance de 1 n'est pas nécessairement équivalent à aucune pollution harmonique : la directive EN 61000-3-2 impose non seulement des valeurs de facteur de puissance à respecter, mais également des valeurs d'harmoniques à ne pas dépasser. Qui plus est, il existe un débat sur les correcteurs d'harmoniques, entre les tenants de la correction passive moins coûteuse mais moins efficace, et les tenants de la correction active, plus efficace mais plus coûteuse ; sachant que la température aurait une incidence sur l'efficacité de la correction...

Par conséquent, tôt ou tard les opérateurs d'électricité vont poser la question des coûts qu'ils ont à supporter, en raison de la multiplication des récepteurs à impédance complexe sans correction du facteur de puissance et/ou des harmoniques. Tôt ou tard il y aura négociation entre acteurs pour la prise en charge des coûts et répercussion de ces coûts sur les usagers⁹³... Plus tôt sera correctement anticipée cette question plus les solutions pourront être, sinon consensuelles, du moins satisfaisantes pour les parties.

La loi NOME (nouvelle organisation du marché de l'électricité), du 07 décembre 2010, pousse en ce sens. En effet, elle instaure une obligation de contribuer à la sécurité d'approvisionnement en électricité aux fournisseurs d'électricité et de respecter un niveau de sécurité d'approvisionnement (article 6). Et elle crée la catégorie de consommateurs final à profil d'interruption instantanée, lorsque le fonctionnement normal du réseau public de transport est menacé de manière grave et immédiate (article 10).

La loi NOME participe d'une démarche pour transposer les directives européennes relatives au marché de l'électricité. C'est-à-dire, imposer une obligation aux gestionnaires des réseaux de transport de garantir un réseau électrique sûr, fiable et efficace, en tenant compte des échanges avec d'autres réseaux interconnectés. Mais aussi, autoriser une obligation de régularité et de qualité de l'électricité ainsi que d'efficacité énergétique pour les fournisseurs d'électricité, d'une part, un service universel de fourniture d'électricité d'une qualité définie, d'autre part. Et surtout, fortement inciter les fournisseurs d'électricité à l'optimisation de l'utilisation de l'électricité (directive 2009/73/CE).

Par conséquent, la conjonction entre réglementations thermiques des bâtiments, incitations à la rénovation thermique des résidences principales, directives d'efficacité énergétique et d'éco-conception des biens électro domestiques, tend à générer une montée en puissance des pollutions harmoniques, lesquelles

⁹³ Si, dans le tertiaire et l'industrie, la montée en puissance de l'électronique et autres générateurs de puissance réactive n'a pas suscité trop de problème, c'est parce qu'ils sont confinables à des sites, traitables par des spécialistes et relativement bien intégrés dans la tarification des opérateurs. En revanche, la multiplication de ces équipements chez les particuliers contraint à une autre approche.

finiront par se traduire sur les modalités de fourniture de l'électricité et donc les tarifs. En quelque sorte, il s'agit d'une forme d'effet rebond des politiques d'incitation aux économies d'énergie.

DE L'EFFET JOULE DANS LES APPORTS INTERNES POUR LE PARAMETRAGE DES BESOINS D'ENERGIE

Pour en revenir à l'effet joule, nous avons souligné qu'une partie de la puissance (P) est dissipée sous forme de chaleur par la résistance des conducteurs traversés, sachant que la puissance dissipée par la résistance est proportionnelle au carré de l'intensité du courant. La présence de disjoncteurs et la fréquence des incendies d'origine électrique démontrent que le transport d'électricité peut générer des températures relativement importantes, y compris dans le réseau domestique basse tension. Il suffit par exemple de prendre un enrouleur standard avec 50 mètres de câble : lorsque le câble est enroulé il est déconseillé d'utiliser un appareil dépassant 1 000 watt et si on le fait on peut constater que l'enrouleur produit une chaleur perceptible, lorsqu'il ne disjoncte pas (si muni d'un fusible).⁹⁴

Dans des logements pas ou peu isolés, la contribution à la température du local de l'effet joule du matériel électrique n'est généralement pas ou peu perceptible. En revanche, dans des logements sur-isolés, certains éléments (machine à laver, réfrigérateur...) peuvent être pris en considération dans ce qui est appelé « apports internes » pour le dimensionnement thermique de la capacité de chauffage / climatisation. Le tableau 34 permet de visualiser comment les apports gratuits internes jouent sur la détermination des besoins en énergie finale des bâtiments.

Tableau 34 : cheminement intellectuel du paramétrage des besoins en énergie d'un bâtiment

	déterminent	déterminent	ajouter	égale	ajouter	égale
températures moyennes	Déperditions enveloppe	Besoins bruts	Apports gratuits externes	Besoins nets	déperditions émission	besoins terminaux
caractéristiques de l'enveloppe			Apports gratuits internes		déperditions distribution	

Si l'on réduit les déperditions de l'enveloppe, la part des apports gratuits dans les besoins terminaux augmente en valeur relative. C'est sur ce principe, en conjonction avec l'amélioration des équipements de production et utilisation d'énergie (réduction des déperditions d'émission et de distribution, et des besoins terminaux), que sont basés les concepts BBC et BEPOS⁹⁵. A quelques exceptions près, en résidentiel, les apports de chaleur des appareils électrodomestiques ne sont pas pris en compte.

⁹⁴ Sur un enrouleur avec près de 50 mètres de câble enroulé, avec 1200 W de puissance maximale admissible lorsque le câble n'est pas déroulé, on mesure une température proche de 50° C en connectant un lave-linge appelant par moments plus de 1700 W. L'identification de la température d'actionnement du fusible thermique, ou une mesure en cœur d'enrouleur, pourraient donner la température atteinte.

⁹⁵ Le chauffage d'un pavillon BEPOS à Verrières-le-Buisson a été calibré sur 50% d'apports gratuits (32% internes, 18% solaires).

Nous posons que ces apports de chaleur se font par effet joule de façon générale. Ce qui inclut l'effet joule volontaire (résistance de chauffage), et les effets joules moins volontaires (dissipation de chaleur des condensateurs de réfrigérateurs, ventilateurs d'ordinateurs...) ou « involontaires » (courant électrique traversant un matériau).

Et plus les logements sont isolés, plus les usages électriques dits spécifiques induisent une production de chaleur par effet joule qui est susceptible d'être perceptible. Si la régulation de la température de chauffage se fait par capteur thermique dans le salon, la salle de bain et la chambre des parents, mais qu'un enfant se trouve dans une chambre sans capteur avec différents équipements, il y régnera une température qui risque de le pousser à ouvrir la fenêtre pour avoir moins chaud. Cette probabilité sera extrêmement élevée, s'il se lance avec un ami, présent physiquement ou via Internet, dans une partie de jeu Wii ou Kinect (détection par les mouvements du joueur). En effet, chaleur du corps humain dissipée par évapotranspiration et chaleur émise par les appareils s'ajoutent et s'inter-influencent.

[Sidler 2007 p. 43] a ainsi pu monitorer un immeuble à isolation renforcée où les apports internes contribuent à une température dans les logements constamment supérieure de 5° C à la température extérieure. Sur la base de [Sidler 2007] l'électricité spécifique représenterait 39% des apports internes, soit le plus gros poste. Mais cela ne renseigne pas sur les valeurs d'échauffement par effet joule ; bien que [Sidler 2007 p. 44] précise que diviser par deux la consommation d'électricité spécifique serait censé permettre un abaissement de la température de 1° à 1,5° C, ce qui par déduction donne une contribution par effet joule du poste électricité spécifique de 2°C à 3°C.

Il est possible de calculer avec précision la chaleur dégagée par effet joule : en électronique, on effectue ce calcul pour dimensionner les dissipateurs de chaleur permettant aux ordinateurs, téléphones et autres appareils de fonctionner sans griller.

Pour en revenir à nos mesures, on sait que la tension est égale au produit de la résistance par l'intensité : $V = R \times I$. Ainsi, pour 227 volts et 0,33 ampère, soit une puissance nominale de 75 watts, on a en théorie une résistance de 688 Ohms. Notons qu'avec un facteur de puissance de 0,55 la puissance est de 41,2 watts, la résistance ne change pas, et l'intensité est de 0,60 ampère.

L'énergie calorifique (joules) dégagée par un conducteur électrique de résistance R (ohms) traversé par un courant d'intensité I (ampères) pendant un temps t (secondes) se calcule ainsi : $E = R \cdot I^2 \cdot t$

Pour 75 Wh, cela fait donc $75 \cdot 3600$, soit 269 724 joules, soit 64 194 kilocalories, soit une quantité de chaleur suffisante pour chauffer de 1° C 64 kilos d'eau, ou encore l'équivalent de 4 minutes et 2 secondes de chauffage par un convecteur de 1 000 watt, soit plus ou moins 67 Wh. Ces 75 Wh sont la consommation apparente d'un ordinateur de bureau (iMac 600) en veille et d'une NeufBox raccordés à une prise parasurtenseur. Mais il faut compter un facteur de puissance de 0,55, soit 41,2 Wh facturés. Ce qui fait plus que tripler l'effet joule, avec 212 211 kilocalories, soit 222 Wh d'équivalent chauffage.

À vrai dire, la valeur de l'équivalent de 13 minutes et 20 secondes de chauffage par un convecteur de 1 000 watt pour une heure de fonctionnement est très théorique : il faut prendre en compte la nature (résistivité) et le dimensionnement des matériaux traversés par le courant, lesquels contribuent à modifier la valeur exprimée en Ohms. En l'occurrence, il n'est pas certain que la chaleur dégagée soit égale à cet équivalent de 13 minutes, étant donné que l'ordinateur en question fournit 28° C en sortie de ventilation au niveau du capot dans la dite configuration (pour 18° C au centre de la pièce)⁹⁶. Autrement dit, l'effet sur la température du local est-il comparable à celui de l'effet d'un convecteur de 1 000 watt fonctionnant 13 minutes et 20 secondes par heure ?

L'importance de la chaleur dégagée par cet ordinateur tient, entre autres, à ce que 50% de l'électricité consommée par un ordinateur serait dissipée dans la conversion du courant alternatif fourni à la prise en courant continu de 1,5 V, du moins sur la base d'une étude de 2003 (citée par [Souchon 2007 p. 1216]). Dans un réseau où la part des utilisations en courant continu devient de plus en plus importante, soit on remet en cause la distribution en courant alternatif, soit on tente de prendre en compte ces déperditions dans le calibrage des systèmes de chauffage et de climatisation. En tous cas, il paraît de plus en plus difficile d'ignorer cette délicate question⁹⁷.

Nous avons difficilement tenté de l'incorporer par le biais de Mediademe. En intégrant un réfrigérateur à puissance nominale de 160 Watt consommant 367 kWh par an (tableau 28), on obtient 209 kWh d'apports internes⁹⁸, soit un taux de 57% : un kilowatt heure d'électricité facturée pour le fonctionnement d'un réfrigérateur de 160 W donnerait 0,57 kWh de chaleur par effet joule. Ci-dessus, pour l'ordinateur, nous avons trouvé un taux de 88% avec un facteur de puissance 1 (66 Wh pour 75 Wh), et 539% avec un facteur de puissance 0,55 (222 Wh pour 41,2 Wh). Bref, ces chiffres semblent très discordants.

Il est éventuellement possible de simuler l'interaction entre l'équipement électroménager et des gestes techniques de rénovation thermique. Sous réserve que nous parvenions à trouver les taux de conversion d'énergie finale en apports gratuits pour les principaux appareils électroménagers, et à ne pas avoir trop de difficulté à les intégrer en jouant sur les curseurs Mediademe. Mais c'est un travail qui justifierait à lui seul un projet de recherche, travail trop lourd pour être inclus dans la présente recherche, et pour lequel d'autres logiciels sont peut être plus adaptés, sous réserve de la prise en compte du facteur de puissance.

⁹⁶ En fonctionnement normal nous relevons 43,5° C degré en sortie de ventilation, valeur observée aussi bien pour une température de 16,5° C que de 18,5° C au centre de la pièce. Sur un ordinateur portable Lenovo Y530 on observe 32° C en sortie de ventilation pour 18,5° C au centre de la pièce après 15 minutes de fonctionnement normal. Il s'agit juste d'indications, le thermomètre utilisé étant trop rudimentaire et le nombre de paramètres de comparaison pris en compte trop insuffisant.

⁹⁷ [Sidler 2007] envisage les apports internes dans une perspective confort été. Mais lors de la présentation des résultats de [Traisnel et al 2010], O. Sidler a évoqué une expérience de calibrage chauffage intégrant les apports internes (électricité spécifique) ayant échoué car les comportements réels étaient différents des comportements utilisés comme référence (issus d'une campagne de mesure sur une opération différente). Nous avons vainement tenté d'en savoir plus auprès d'Enertech.

⁹⁸ Données de pilotage avec hypothèse de : 100% de la puissance (160 W) engagée de 7 à 8 heures et de 19 à 20h00, 29% de 8 à 19 heures, et 10% de 20h00 à 7 heures ; pas de période de non utilisation.

Bien que le tableau 34 soit la base pour l'établissement du bilan thermique d'un bâtiment, la prise en compte des apports gratuits internes⁹⁹ est généralement succincte. Dans les calculs de vérification de conformité à la réglementation thermique on se borne à l'application de ratios réglementaires (par exemple méthode TH-C-E ex 2008 pour la réglementation thermique sur l'existant). Dans les études thermiques plus poussées, par exemple une optimisation d'un projet bioclimatique, la prise en compte peut être plus poussée sans dépasser toutefois l'utilisation de ratios dérivant de certaines études (Enertech, Ashrae...). L'essor de bâtiment à isolation très renforcée devrait stimuler une plus grande prise en compte des apports internes, et notamment des apports des appareils électroménager en résidentiel.

Tableau 35 : la part relative des apports gratuits augmente à mesure que l'on renforce l'exigence thermique

	non rénové		toit ECS		tout sauf paroi		tout ITI 15		tout ITI 30	
Gratuits internes	2 679	3,2%	2 679	5,7%	2 679	10,0%	2 679	31,3%	2 679	34,5%
Gratuits externes	2 751	3,3%	2 751	5,9%	2 751	10,3%	2 751	32,1%	2 751	35,4%
Chauffage + ECS	77 762	93,5%	41 594	88,5%	21 322	79,7%	3 138	36,6%	2 336	30,1%
Total	83 192	100,0%	47 024	100,0%	26 752	100,0%	8 568	100,0%	7 766	100,0%

En kWh d'énergie par an. Les apports liés au métabolisme des occupants n'apparaissent pas ici. Chauffage + ECS exprimé en kWh_{th}. Les apports gratuits ne sont pas tous exprimables en kWh_{th} même s'ils déterminent tous les kWh d'énergie chauffage + ECS. Sous réserve, 1 kWh_{th} utilisé par un électroménager donnerait ici 0,57 kWh d'apports gratuits.

Le tableau 35 permet de visualiser l'importance que peut acquérir l'électroménager, dans le bilan thermique d'un bâtiment : pour la maison du schéma 2 les apports gratuits passent d'à peine 6% avant rénovation, à pratiquement 70% dans le cas de plus forte isolation et efficacité énergétique. Ces valeurs sont à considérer uniquement à titre illustratif, car nous avons constaté que Mediademe ne fait pas figurer les apports métaboliques dans le récapitulatif faisant apparaître les apports internes. Dans le tableau 35, n'apparaissent donc que les apports internes d'éclairage et d'électroménager que nous avons fait figurer. Nous ne savons pas de quelle façon Mediademe prend en compte les apports métaboliques.

Les 2 679 kWh d'apports gratuits du tableau 35 pourraient être générés par 4 705 kWh_{th} d'appareils électroménagers / électricité spécifique. Ce qui est à retenir du tableau 35 c'est qu'une variation des apports gratuits n'a pas du tout la même importance dans un bâtiment non isolé et dans un bâtiment à forte isolation thermique. Sur le paramétrage Mediademe, si on fait varier la consommation d'électroménagers de 1 500 kWh_{th}, ce qui est loin d'être improbable, on modifie les apports internes de 855 kWh/an : soit à peine 1 % du total en non rénové mais tout de même 11% du total en « tout ITI 30 ». Certes, il n'est pas du tout sûr que ce calcul de Mediademe soit pertinent et il faudrait un travail de recherche approfondi sur ces points, ce qui n'est pas l'objet de la présente recherche. Mais cela met bien en valeur le manque de

⁹⁹ Les apports internes sont dus à : métabolisme des occupants, fonctionnement des équipements, appareils et auxiliaires, éclairage, ventilation, pertes de distribution (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire), pertes de stockage (eau chaude sanitaire)...

robustesse des économies de fonctionnement découlant d'une rénovation thermique, et plus généralement des concepts basés sur la « super-isolation » thermique et l'efficacité énergétique (BBC, BEPOS...).

Fragilité d'autant plus importante que les consommations électriques résidentielles sont extrêmement mal connues dans leur détail. Mais ne suffirait-il pas d'appliquer des ratios, sur la base des monitorages de consommations de type Enertech, les écarts dans les comportements réels (logement) tendant à être compensés par l'effet pondérateur du nombre (bâtiment, quartier, ville, région...) ? Mais, encore faudrait-il que les appareils électrodomestiques n'aient pas eux mêmes un comportement thermique instable.

Or, sur la base de nos mesures initiales de la consommation d'électricité d'un lave-linge, qui mettaient en évidence une relative diminution des consommations en fonction de la charge, on pouvait admettre que les capteurs sur machine à laver sont relativement efficaces : le poids du linge et le niveau/quantité de l'eau sont des paramètres qui ne sont pas trop difficiles à déterminer avec les technologies de capteurs les plus couramment employées. Toutefois, en poussant nos mesures, nous avons fini par prendre la véritable mesure de l'avertissement qui accompagne les indications de consommation d'énergie des notices des lave-linge : « la consommation individuelle peut varier par rapport aux valeurs spécifiées, en raison des différences de pression et de température de l'alimentation en eau, de la charge et du type de linge ».

Tableau 36 : le lave-linge comme charge thermique et électrique complexe (modèle Candy)

date	programme	quantité linge	conso kWh	kWh par kg	étiquette énerg
directive EN 60456	60° Coton intensif	5,0	0,950	0,190	A
05/01/2011	40° Délicat	3,3	0,933	0,283	C
15/06/2011	40° Délicat	2,5	0,571	0,228	B
21/01/2011	40° Coton normal	4,8	0,818	0,170	A
16/02/2011	40° Coton normal	4,5	0,785	0,174	A
25/03/2011	40° Coton normal	4,5	0,724	0,161	A
10/04/2011	40° Coton normal	4,2	1,187	0,283	C
25/04/2011	40° Coton normal	4,7	0,637	0,136	A
27/05/2011	40° Coton normal	4,8	0,643	0,134	A
10/01/2011	60° Coton normal	5,0	1,136	0,227	B
20/01/2011	60° Coton normal	4,8	1,411	0,294	C
09/03/2011	60° Coton normal	5,0	1,214	0,243	B
01/04/2011	60° Coton normal	4,4	1,187	0,270	C
06/05/2011	60° Coton normal	4,5	1,150	0,256	C
23/05/2011	60° Coton normal	4,6	1,026	0,223	B
01/06/2011	60° Coton normal	4,5	1,154	0,256	C
05/07/2011	60° Coton normal	4,4	0,903	0,205	A
	moyenne	75,5	16,429	0,218	A

Mesures avec le wattmètre NZR SEM 16 sur une Candy Activa Smart 12, tambour 4,5 kg, puissance 2150 W ; n'ayant pu trouver le classement A à G en vigueur en 2000 (en kWh/kg linge), nous avons utilisé celui du tableau 27, assoupli.

En effet, le tableau 36 montre ce que nous prenions au départ pour des problèmes sur notre wattmètre. Mais, bien que nous avons utilisé trois modèles différents, ces différences persistaient, en particulier sur le wattmètre censé être le plus précis dans la mesure (le tableau 36 porte uniquement sur les mesures

effectuées avec ce dernier). Le tableau 36 tendrait à mettre en évidence toute l'importance du message d'avertissement ci-dessus. Notamment, la température du local, influencée par la température extérieure et l'éventuelle température de chauffage, est susceptible de jouer sur les consommations du lave-linge.

Si on effectue la moyenne, on reste en étiquette A. Toutefois, par rapport à la consommation affichée sur l'étiquette-énergie (0,95 kWh le cycle), on a une surconsommation d'environ 15%. Laquelle grimpe à 30% si on utilise constamment le programme « 60° coton normal », objet des tests ayant permis d'obtenir l'étiquette A, dont le libellé donne d'ailleurs à penser qu'il pourrait être plus économe que le programme « 60° coton intensif. Ce qui est susceptible de se traduire par un dérapage en consommation annuelle de près de 71 kWh sur la base du tableau 28.

Tableau 37 : le lave-linge comme charge thermique et électrique complexe (modèle Whirlpool)

date	programme	kg linge	kWh	kWh/kg	°C local	°C ext	étiquette	écart not	durée
24/07/2011	30° délicats	2,5	0,614	0,246	18,1	20	C	53,50%	00:53
01/11/2011	30° délicats	2,4	0,377	0,157	16	9	A	-1,82%	00:45
12/02/2012	30° délicats	2,5	0,585	0,234	17	-6	C	46,25%	00:48
13/12/2011	40° délicats	2,5	0,658	0,263	16,95	9	C	64,50% +	00:49
20/01/2012	40° délicats	2,5	0,641	0,256	16,15	7,5	C	60,25% +	00:49
31/07/2011	30° lingerie	2	0,229	0,115	17,9	19	A	-61,83% -	00:37
16/09/2011	40° lingerie	2	0,527	0,264	17,55	18	C	-12,17%	00:37
27/09/2011	40° lingerie	2,1	0,487	0,232	17,7	20,5	C	-22,70%	00:38
16/10/2011	30° Synthétic Eco	5,6	0,501	0,089	19,1	10	A	-37,44% -	01:46
30/07/2011	40° Couleurs	9	0,974	0,108	18,5	20	A	21,60%	02:36
04/03/2012	40° Couleurs	7,8	1,133	0,145	16,2	6,5	A	63,21%	02:40
29/07/2011	40° duvet	2,5	0,536	0,214	18,8	20	B	-14,24%	01:38
10/09/2011	40° Super Eco	7,8	0,854	0,109	20,25	23	A	-8,76% -	04:14
16/11/2011	40° Super Eco	7,5	0,996	0,133	16,5	6,5	A	10,67% -	04:12
22/12/2011	40° Super Eco	7,1	1,184	0,167	17,25	10	A	38,97% -	04:19
23/07/2011	40° magic XL 40	6	0,534	0,089	18	20	A	-11,00%	00:59
20/08/2011	60° magic XL 40	6	0,66	0,110	19,5	21	A	10,00% +	01:16
22/08/2011	60° Couleurs	6	1,665	0,278	22,45	22,5	D	63,24%	02:49
21/10/2011	60° Couleurs	7,5	1,94	0,259	15,1	5	C	52,16%	03:03
24/01/2012	60° Couleurs Eco	7,1	1,727	0,243	16,65	6	C	87,11%	04:03
30/01/2012	60° Couleurs Eco	7,1	1,81	0,255	17	0	C	96,10%	04:13
14/09/2011	60° Super Eco	7,8	1,196	0,153	18,7	14,5	A	27,78%	04:12
08/12/2011	60° Super Eco	6,2	1,345	0,217	16,7	7,5	B	80,78%	04:15
13/07/2011	60° Synthétique	0,8	0,946	1,183	19,6	21	G	386,63%	01:38
	moyenne	120,3	22,119	0,184			A	16,15%	
EN 60456	60° Couleurs Eco	9	1,17	0,130			A		04:00

Mesures avec le wattmètre NZR SEM 16 sur une Whirlpool AWOE 9751/1, tambour 9 kg, puissance 2300 W; dernier système de classement A à G connu (en kWh/kg linge) : A <0,19 B <0,23 C <0,27 D <0,31 E <0,35 F <0,39 G >0,39 (Wikipédia) ; température = moyenne min/max ; écart not = données kWh/kg du fabricant (notice), voir tableau 27 ; + indique qu'on a utilisé une température supérieure (à la notice) de lavage, - indique une température inférieure de lavage.

Là encore, le tableau 37 tend à accréditer la pertinence d'une approche par ratios : nos calculs n'auraient servi en synthèse qu'à montrer que la moyenne s'est établie en étiquette A en dépit des écarts. Bien plus, on obtient un dérapage de consommation moyen de 16%, similaire à celui que nous avons déduit pour le

modèle Candy ! Oui, mais cet écart est établi par rapport au tableau indicatif des consommations par programmes donné par le fabricant (tableau 27). Si on compare la moyenne des lavages (0,184 kWh/kg) et la valeur pour l'obtention de l'étiquette énergie (0,130 kWh/kg) on a un dérapage de près de 42% ! Et les programmes « délicats », d'une part, et les lavages à 60° C, d'autre part, ont tendance à déraper de façon importante. Pour ces derniers, on trouve même des valeurs de consommation dignes d'une étiquette D et même d'une étiquette G. Un peu comme si, le calibrage pour les tests EN 60456 se faisant à 60° C pour des charges de 9 et 4,5 kg, le lave-linge ne parvient pas à respecter les valeurs de consommation obtenues dès lors qu'on sort des paramètres sur lesquels ont été établis les tests (charge de linge, température...).

Tableau 38 : le lave-linge comme charge thermique et électrique simplifiée (EN 60456 charge de 9 kg)

dureté eau	23 à 27 (2,3 à 2,7 mmol/l)
température eau	13 à 17° C
température local	21 à 25° C
température linge	18 à 22° C
humidité air	60 à 70%
humidité linge	0%
charge de linge	8,94 à 9 kg
draps coton 2,40x1,60 m 725 g	3
taies d'oreiller coton 0,80x0,80 m 240 g	18
serviettes coton 110 g + bandes test coton	en complément pour atteindre 8,94 à 9 kg (serviettes 1 m x 0,50 m)
matières d'encrassage du linge	noir de carbone, huile minérale, sang de porc, lait chocolaté, vin rouge
détergent	180 g avec composition fixe
âge minimum des pièces de linge	5 lavages
âge moyen de la charge de linge	35 à 50 lavages
âge maximum des pièces de linge	80 lavages

Valeurs à respecter, coton 60° C, cahier des charges EN 60456 gérant l'obtention de l'étiquette énergie des lave-linge

Le plus gros de la consommation électrique d'un lave-linge (sans fonction de séchage) consiste à chauffer la charge d'eau et de linge. Cette consommation dépendra donc de la température du local, du lave-linge, du linge, de l'eau, de la résistance thermique des pièces de linge constituant la charge, de l'humidité du linge avant chargement, autant d'éléments qui conditionnent l'inertie thermique de la charge à chauffer... Le tableau 38 montre que les tests (EN 60456) pour l'obtention de l'étiquette énergie, conduisent à figer autant que faire se peut les conditions d'opération des lave-linge. Qui plus est, les volumes d'eau par kilo de linge sont spécifiés, le linge est chargé à plat de bas en haut, dans un ordre immuable et très précis... Bref, les conditions de test relèvent d'un rituel qui n'a absolument rien à voir avec la variété des charges thermiques et des conditions de chauffage, qu'affrontent les lave-linge dans le quotidien des ménages.

Nous avons, trop tardivement, pris conscience de la diversité des paramètres jouant sur la consommation d'un lave-linge, et eu accès au détail de la norme EN 60456, pour pouvoir effectuer des mesures plus précises que celles relatées dans les tableaux 36 et 37. Néanmoins, nous avons pu effectuer deux mesures comparatives sur le programme objet des tests EN 60456 (60° couleurs éco), en intégrant la température du linge et de l'eau, et elles semblent mettre en valeur que la consommation de chauffage, pour un poids identique de linge et une température de local similaire, est corrélée à la température de l'eau et du linge.

On retrouve une corrélation de même type pour le programme « 40° couleurs » (30/03/2012). En revanche, sur le programme « 30° délicats » la température particulièrement basse de l'eau et du linge ne semble pas jouer (12/02/2012)¹⁰⁰. Peut-être l'amplitude thermique est-elle à prendre en compte ? Ou le rapport entre volumes d'eau, du tambour, et du linge (notamment taille des pièces de linge) ?

En tous cas il y a des paramètres que nous ne maîtrisons pas et dont il faudrait tenir compte, tout au moins dans les études sur les effets rebonds. En effet, [Davis L.] s'appuie sur les résultats d'une étude empirique sur les consommations de lave-linges, pour la modéliser et généraliser les conclusions de celle-ci : si les lave-linge à haute efficacité induisent une légère hausse de la quantité de linge lavé (+ 5,6%), la baisse des consommations d'électricité n'en est pas moins significative (- 48%).

Toutefois, les données alimentant le modèle de [Davis L.] présentent de sérieuses faiblesses¹⁰¹. Et surtout, pour une mesure correcte d'un éventuel effet rebond, une telle enquête aurait du, à notre avis, comparer des années complètes, sur des territoires différents, aux climats différents voire contrastés, avec monitoring systématique des températures de l'air, de l'eau, du linge, et du poids du linge avant et après lavage, ainsi que de la résistance thermique moyenne de la charge de linge.

Soulignons également que la dureté de l'eau, éventuellement pondérée par des détartrages ou l'emploi d'inhibiteurs de tartre, conditionne dans le temps l'efficacité énergétique des lave-linges et des lave-vaisselle. En effet, plus la résistance de chauffage du lave-linge, ou du lave-vaisselle, est entartrée plus sa consommation pour une même montée en température risque d'être importante.

Il ne s'agit pas de nier que les politiques d'incitation à l'efficacité énergétique se traduisent par de réelles économies d'électricité en ce qui concerne les lave-linge : remplacer un lave-linge économe en énergie, vieux de 11 ans, par un lave-linge encore plus économe en énergie a tout de même permis de gagner 34 Wh d'économies par kilo de linge lavé, soit près de 16% d'économies d'électricité, sous réserve du faible nombre de mesures effectués, et du contexte mono-typologique (climat, fréquence de lavage, caractéristiques du linge...) . Il s'agit de souligner que faire passer la part de l'électrodomestique de 3% à près de 35% dans la gestion d'énergie d'un bâtiment, donc ramener la part chauffage + ECS de 94% à 30%, n'est pas sans incidence importante : elle consiste à passer d'un mode d'apport de chaleur stable et connu à plus de 93%, avec un aléa d'ensoleillement minime, à un mode instable et mal connu d'au moins 35%, avec un aléa d'ensoleillement important (tableau 35).

¹⁰⁰ Nous avons utilisé en simultané deux wattmètres (NZR SEM16 et IDK MPM50), ce qui exclut tout dysfonctionnement du wattmètre, les valeurs obtenues étant proches à 10/15 Wh près. Tableau 37, lavage 60° Couleurs Eco du 24/01/2012 : eau à 9° C, linge (mise en machine) à 12° C. Lavage 60° Couleurs Eco du 30/01/2012 : eau à 8,5° C, linge à 8,5° C. Les résultats de mesure NZR, effectuée à un pas d'une minute, montrent que le surcroît de consommation de la charge la plus froide (30/01/2012), soit 83 Wh, est dû à 80% au chauffage de la charge. Lavage 40° couleurs du 04/03/2012 : eau à 8,5° C, linge à 14,5° C. ; 30° délicats du 12/02/2012 : eau à 5° C, linge à 0,5° C.

¹⁰¹ Enquête sur 91 ménages s'étant vu remettre gratuitement un lave-linge à haute efficacité énergétique, qu'ils ont utilisé en lieu et place de leur lave-linge habituel pendant 3 mois. On compare ainsi la période juin-juillet 1997 (lave-linge habituel) à la période août-octobre 1997 (lave-linge nouveau), pour 91 ménages habitant la même ville. Ce sont les ménages qui avaient pour charge de noter les principales informations (poids du linge, cycles de lavage...). S'il est précisé que des compteurs eau ont été placés sur l'alimentation des lave-linge, rien n'est précisé sur la mesure des consommations électriques. Enfin, l'enquête était en partie financée par un fabricant de lave-linge, et les participants ont été particulièrement informés sur les performances énergétiques des lave-linge qui leur étaient gracieusement prêtés.

Certes, les sondes de température permettent de minimiser l'impact sur le confort de l'occupant, tout au moins en saison de chauffe. Mais ce faisant, elles systématisent les éventuels dérapages de consommation d'énergie (en cas d'insuffisance de chauffage). Qui plus est, une fois le paramétrage thermique du bâtiment effectué on ne va pas intervenir dessus avant le prochain changement de chaudière ou équivalent, soit un laps de temps d'au minimum 15 ans. Entretemps la composition électrodomestique du bâtiment risque d'avoir évolué, puisque c'est là où les résistances au changement tendent à être les moins fortes, alors que les durées d'obsolescence tendent à y être de plus en plus réduites. Bref, les politiques d'incitation à l'efficacité énergétique introduisent de l'instabilité dans la gestion thermique et électrique des bâtiments, mais en plus il y a décalage¹⁰² entre le paramétrage énergétique du bâtiment et l'évolution des charges thermiques et électriques que constituent les appareils électrodomestiques.

Et encore n'avons-nous pas envisagé le comportement thermique et électrique des lave-vaisselle, probablement assez différent de celui des lave-linge. Qui plus est, avec des technologies de capteurs peut-être moins opérantes pour adapter la consommation en fonction de la charge, étant donné que le nombre et les dimensions des articles compteraient plus que leur poids ? Quant aux réfrigérateurs et congélateurs, leur comportement serait fortement liée à l'inertie thermique du contenu sous contrainte du comportement des occupants (ouverture) et des températures minimales à maintenir, même quand l'appareil est vide ; sous contrainte aussi de paramètres tels que : teneur en eau et température du contenu, ajustement et qualité du joint de porte, empoussièremment des échangeurs, fréquence et nature de l'entretien...

Un ordinateur est aussi une charge thermique et électrique complexe, d'autant plus que les stratégies d'efficacité énergétique ont conduit à une forte variation relative des consommations électriques. Sur la base du tableau 28, la consommation des ordinateurs les plus économes paraît fortement influencée par le comportement de l'utilisateur : pour le modèle de bureau, datant de 2001, la différence entre bureautique simple et mode Internet est d'environ 12 Wh, soit 14% environ ; pour le modèle portable, datant de 2009, si cet écart est au plus de 10 Wh, il représente tout de même une amplitude de 61%.

Les ordinateurs portables ont également une autre dimension de complexité : ils intègrent une batterie. Or une batterie a des pertes par autodécharge : ces pertes doublent à 20° C, puis à chaque 10° C supplémentaire ; l'âge de la batterie accélère ces pertes ; et les technologies influent sur ces pertes (10% d'autodécharge par mois sur les Li-ion, 30% sur les Ni-Cd...). D'autre part, toute batterie connaît une résistance interne, et donc dissipation d'électricité par effet joule, phénomène qui augmente avec l'âge. Certes, en dehors des ordinateurs et des onduleurs, les batteries sont de petite taille et leur impact thermique très limité. Toutefois, cette dimension ne restera peut-être pas marginale, surtout si les véhicules

¹⁰² Nous avons constaté également un décalage entre évolution de la capacité des lave-linge et instructions de dosage des lessives. En effet, aux côtés de lessives qui continuent de préciser que le dosage est calculé sur une charge de 4,5 kg, d'autres ne donnent aucune précision, et quelques-unes donnent des précisions pour adapter le dosage pour des charges supérieures à 4,5 kg. Mais, à notre connaissance, aucun fabricant de lessive ne donne d'indication de dosage par kilo de linge ou toute formule plus adaptée à la réalité actuelle de l'évolution des capacités de tambours. Ce qui soulève la question : pourquoi les lave-linge n'intègrent-ils pas systématiquement une fonction permettant d'afficher le poids du linge lors du chargement dans le tambour ? S'il n'y a pas d'obstacle majeur, de nature à déterminer, ce serait un pas indéniable vers une meilleure maîtrise des consommations des lave-linge.

électriques, garés dans les immeubles, viennent à substituer massivement les véhicules à hydrocarbures, ou que des solutions de stockage d'énergie viennent à être associées au concept BEPOS.

Sous réserve de la pertinence de notre simulation, renforcer thermiquement l'enveloppe d'un bâtiment avec 15 à 30 centimètres d'isolant autorise de sérieuses économies d'énergie, mais fait dépendre ces économies de la constance des apports gratuits internes et externes. Pour la part des apports internes relevant de l'électroménager, il apparaît qu'elle s'appuie en bonne partie sur des charges thermiques variables, si on caractérise thermiquement les conditions de fonctionnement des appareils. Variabilité à l'égard des connaissances, au regard des ratios éventuellement utilisés par les thermiciens et/ou des tests servant à l'obtention de l'étiquette énergie. Variabilité en termes d'équipement, l'électroménager et audiovisuel-informatique-téléphonie constituant un secteur à renouvellement assez important.

Cette variabilité se traduit par une variabilité d'effet joule, et donc une relative inconstance des apports gratuits internes, laquelle peut grever les économies de chauffage. Cette variabilité peut également grever les factures électriques des ménages, et donc absorber une partie des économies de chauffage. Enfin, cette variabilité peut jouer sur les caractéristiques d'alimentation en énergie électrique des bâtiments, et notamment la relation entre puissance apparente et puissance effective, et générer entre autres des harmoniques, susceptibles d'être répercutées sur les factures d'électricité des ménages.

Conclusion de la Seconde Partie :

Nous avons examiné les formes de l'évolution des consommations électriques liées aux appareils impliqués dans la définition du confort contemporain, pour le risque qu'elles font courir pour le succès d'une éventuelle rénovation thermique de masse, et, plus généralement, pour l'efficacité des politiques d'incitation aux économies d'énergie, dans l'objectif d'obtenir une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre en 2050. Il n'est pas certain que les économies de chauffage découlant des politiques d'économies d'énergie liées au fonctionnement des bâtiments soient visibles. Et il n'est pas acquis, en cas de visibilité de ces économies qu'elles réduisent la part des budgets des ménages consacrée aux énergies.

A l'issue du chapitre A nous avons souligné que si les efforts d'efficacité d'énergétique en électrodomestique étaient réels les gains en efficacité tendaient à générer des pertes en sobriété, tendant à annuler les économies dégagées de la rénovation thermique. Dans le chapitre B, nous avons constaté que nous ne savions pas trop à quoi rapporter les résultats de nos mesures, étant donné que les logements sont des boîtes noires concernant la répartition des consommations entre les différents appareils électroménagers et audiovisuel-informatique-téléphonie. Puis, nous avons été amenés à constater que l'essor des appareils électroménagers induisait des pollutions harmoniques susceptibles de modifier les tarifs et conditions de fourniture de l'électricité ; et qu'en plus le comportement thermique de ces appareils

était mal maîtrisé puisque les tests de certification s'effectuent dans des conditions de laboratoire déconnectées des réalités des quotidiens domestiques, à cultures, climats, et typologies d'habitat différents.

Les dérapages réels et potentiels ont des conséquences à différents niveaux. Au niveau de la demande globale d'électricité, des consommations minimales au niveau des ménages (veilles, horloges, maintenance, surconsommations de tout ordre...), peuvent avoir des répercussions jusqu'à plusieurs TWh au niveau national¹⁰³. Au niveau des budgets des ménages, les dérapages peuvent jouer sur les économies liées à la rénovation thermique (chauffage et ECS), et donc sur les retours sur investissement et les capacités à rembourser des ménages. Au niveau des réseaux de distribution électrique ces dérapages ont des incidences en termes d'harmoniques, ce qui peut se répercuter sur les budgets des ménages. Enfin, ces dérapages peuvent modifier les apports internes des bâtiments rénovés, ce qui peut impacter la demande globale d'électricité mais aussi remettre en question les économies de chauffage et donc les retours sur investissement et les capacités à rembourser des ménages... Bref, on est en présence d'un potentiel d'effets rebonds dont l'interaction peut générer des effets boule de neige voire des cercles vicieux.

La stratégie de rénovation progressive, par bouquets successifs de travaux, pour arriver au stade BBC rénovation, prônée par [COSTIC & ACF], prend un coup de plus. En effet, sur le papier, le premier geste de rénovation permet de dégager des économies de fonctionnement permettant d'améliorer la capacité de financement de l'étape suivante. Sauf que notre seconde partie tend à rendre les retours sur investissements par économies de fonctionnement plus incertains. Et si l'on augmente les temps de retour on diffère les étapes suivantes, ce qui accroît l'obsolescence du premier geste de rénovation, et donc dégrade les économies de fonctionnement. Sans compter qu'il y a un risque de décalage de dimensionnement de la chaudière entre étapes de rénovation, susceptible d'accélérer l'obsolescence de la chaudière...

Enfin, il faudrait évoquer que les prix des énergies ont une incidence non seulement sur les frais de fonctionnement du logement mais également sur les transports. Certes l'incidence d'une hausse des prix des énergies n'est pas du tout la même suivant que l'on se déplace à pied, en vélo, en transports en commun, en véhicule individuel à hydrocarbure, véhicule individuel électrique, en multimodal... Les ménages fortement dépendants de la voiture risquent, face aux hausses des prix des énergies, de préférer revoir leurs stratégies de rénovation thermique pour pouvoir continuer à se déplacer, d'autant plus que leur capacité à déménager et/ou choisir leur lieu de travail est réduite voire nulle. Pour ces ménages, s'engager dans une stratégie de rénovation par étapes entraîne une probabilité élevée de rester bloqué à l'étape 1.

¹⁰³ Le surcroît de consommation de 41,54 % du lave-linge du tableau 37, au regard des consommations fondant l'étiquette-énergie, serait donc susceptible de se traduire sur la base du tableau 28, si elle se vérifiait systématiquement pour les 25,4 millions de résidences principales de 2004 (tableau 1), par une surconsommation de 2,49 TWh. Ce qui serait perceptible au niveau de la consommation finale totale des logements, quoique dans de faibles proportions (0,05%). En revanche, ce seul chiffre représenterait 5% du potentiel de production annuelle de ce qu'il est prévu d'installer en France en 2020 en fermes éoliennes et photovoltaïques (49,7 TWh pour 30,4 GW de puissance installée) ; ou encore, 29% d'une centrale nucléaire (8,58 TWh pour 1 300 W de puissance installée). Nous retenons un facteur de charge moyen par MW installé de 1100 MWh pour le solaire, 1750 MWh pour l'éolien et 6600 MWh pour le nucléaire. L'objectif du Grenelle Environnement est de 5,4 GWc de puissance installée en 2020 pour le solaire.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons démarré notre réflexion sur l'obstacle à la rénovation thermique que pouvait constituer l'incidence sur l'utilisation de l'espace, en particulier habitable, d'un épaissement des murs résultant d'un ajout d'isolant thermique, pour environ 15,7 millions de résidences principales. Mais nous avons fini par conclure que le contexte incitatif et réglementaire favorisait une rénovation thermique sans isolation des murs, ce qui reportait à plus tard, le problème de l'impact des épaisseurs d'isolant sur l'espace habitable et/ou urbain. Autrement dit, nous retenons le scénario d'une rénovation thermique par étapes, l'étape de l'isolation thermique des murs étant repoussée au-delà de 2020.

REPOUSSER L'ISOLATION DES MURS AU RISQUE DE NE JAMAIS LES ISOLER

Toutefois dans un contexte de fort équipement et rééquipement en matériel électrique domestique, les économies en chauffage des résidences s'engageant dans la première étape de rénovation, pourraient être perdues, dans des proportions pour l'heure non connues, dans l'essor des consommations électriques spécifiques. Qui plus est, la hausse des prix des énergies impactant les prix des transports, une fraction significative de ménages n'accèdera jamais à l'étape de l'isolation des murs, préférant revoir les habitudes de confort thermique (transfert sur l'habillement, literie...). On estime le nombre de ménages en situation de précarité énergétique à 3,4 millions, et à un nombre indéterminé ceux qui ne franchissent pas ce seuil en se chauffant pas ou peu [Pelletier et al. p. 8]. Sur une telle base, il n'est pas exagéré d'affirmer que cinq millions de résidences principales ne procéderont pas au renforcement thermique des murs d'ici 2050.

Reste 10 à 11 millions de ménages qui, n'isolant pas les parois opaques ou isolant seulement la toiture, se prendront de plein fouet la question de l'impact des épaissements des murs sur les surfaces. Après 2020, ces ménages sont poussés, par les hausses des prix des énergies, à isoler les murs, mais la caractéristique de leur budget est que le transport n'obère pas trop les possibilités de rénovation. Une partie significative (50%) de ces ménages préférera sans doute encore différer l'isolation des murs, s'orientant sur des choix solaire thermique (rénovation par étapes) ce qui finira par les amener, pour la plupart, à ne pas avoir procédé au renforcement thermique des parois d'ici 2050, car coincés par les hausses des prix des énergies.

Il ne restera donc que 5 millions de résidences principales qui s'engageront dans l'isolation thermique des parois. Une partie, au plus un million, ne connaîtra pas de problèmes, car à valorisation immobilière susceptible d'amortir l'impact des investissements requis, et qui plus est occupée ou acquise par les ménages les plus aisés. Pour les quatre millions de résidences principales restantes, les économies de fonctionnement ne seront pas à la hauteur des espérances car absorbées en partie par les dérapages en électricité spécifique, et leurs incidences sur les apports internes dans les bilans thermiques des bâtiments. Ces dérapages permettront des économies de chauffage en hiver, mais que ne compenseront pas les consommations de climatisation en été. Ces quatre millions de ménages reverront alors leur train de vie, ce

qui permettra une baisse des consommations d'électricité spécifique, mais viendra conforter le marasme économique créé par les conditions de vie des onze millions précédemment cités.

Si l'on revient à notre tableau 23, nous avons posé que sur 15,7 millions de résidences principales à rénover, environ 15,2 millions seraient rénovées d'ici 2050, à un rythme de 400 mille par an. On aura donc 5,2 millions de résidences bloquées à l'étape « chaudière + toiture » (200 kWhep/m²/an), 5 millions bloquées à une étape supérieure mais sans isolation thermique (105 kWhep/m²/an), et 5 millions ayant pu accéder au graal de la rénovation (26 kWhep/m²/an). Certes les situations seront variées, mais les restrictions sur les consommations de chauffage aidant, on aurait une moyenne de consommation s'établissant à 112 kWhep/m²/an pour ces 15,2 millions de résidences. Ce qui nous amène à reconfigurer notre scénario, pour l'hypothèse intermédiaire de croissance de résidences principales, comme suit :

Tableau 39 : scénario final de construction et rénovation pour atteindre le facteur 4 en 2050

	logements	1- isolation thermique	2- conversion énergie
		kWhep/m ² /an	kWhep/m ² /an
résidences principales en 2050	35 505 000	39	39
à soustraire	15 200 000	112	76
il reste	20 305 000	-16	11
à 1% renouvellement	13 491 900	-65	-3
reste	6 813 100	81	39

Lecture 1 : le nombre de résidences principales fixe le kWhep/m²/an moyen pour atteindre le facteur 4 ; on en déduit 400 000 logements par an rénovés à 112 kWhep/m²/an ; il reste donc une quantité de logements ce qui fixe leur kWhep/m²/an moyen pour le facteur 4 ; on fait l'hypothèse de 1% de renouvellement, constructions qui portent le plus gros effort de performance ; le solde est constitué de 2,2 millions de logements non isolables (caractère architectural), 2,2 millions de construction neuve norme 50 kWhep/m²/an (2013-2030), et 2,4 millions ans de construction neuve norme 0 kWhep/m²/an (2031-2050).

Lecture 2 (conversion énergie) est identique au précédent excepté : les 15,2 millions de logements, rénovés au rythme de 400 000 par an, dont 3,2 millions les plus énergivores chauffés à l'électricité ont été convertis au non électrique (voir tableau 30) ; les 2,2 millions de logements non isolables dont la conversion en énergie divise les kWhep/m²/an par au moins 2,58.

Cela signifie que l'on doit immédiatement se lancer dans la construction massive de logements neufs de type BEPOS produisant plus d'énergie que ne consomment les logements à la norme RT 2012 (colonne isolation thermique). Et encore, nous n'avons pas intégré au tableau 39 que les dérapages de consommation en électricité spécifique ne se limitent pas aux bâtiments existants, mais concernent toutes les résidences, qu'elles soient neuves ou anciennes, principales ou secondaires. Or, c'est précisément les bâtiments censés être les moins énergivores qui sont les plus sensibles aux consommations des appareils électrodomestiques. Le facteur 4 ne sera pas atteint en 2050, ou alors sera atteint parce que les ménages luttant contre la démesure de leur budget transport et/ou tentant de se désendetter face à des économies de fonctionnement qui n'étaient pas au rendez-vous, auront fortement réduit leurs consommations d'énergie. Autrement dit, le facteur 4 ne sera atteint qu'au prix d'une récession économique majeure et durable.

Certes, l'atteinte du facteur 4 est un objectif global et non pas mono sectoriel. Mais nous avons précisément mené ici une approche plurisectorielle, puisque examiné à la fois le fonctionnement des logements et le fonctionnement des appareils électroménagers. Quant aux transports, ce sont précisément les propriétaires occupants les plus vulnérables, aux hausses des prix sur les transports, qui n'ont pas ou

peu les moyens de rénover thermiquement leur résidence principale. Et ils rouleront en véhicules à essence ou diesel, car les véhicules électriques sont chers à l'achat. Et imposer des retraits de circulation sur les véhicules pas chers à l'achat mais chers en fonctionnement, dégènera en marché noir et/ou émeutes. En effet, dans la précarité, le plus dur n'est pas de dépenser l'argent que l'on a, mais bien d'obtenir l'argent que l'on n'a pas.

Nous excluons tout transfert important entre résidences principales, secondaires et vacance, susceptible de dégrader la moyenne de consommation d'énergie des résidences principales, ne serait-ce que par des pertes thermiques sur mitoyens. Or dans la première partie (chapitre B), nous avons souligné l'attrait que pouvaient avoir des DPE G ou F dans des stratégies de rénovation, ou encore la possibilité de vendre pour acheter plus petit afin de financer une rénovation. Nous pouvons désormais même envisager des résidences principales en étapes 1 ou 2 de rénovation thermique partir dans la vacance (départ en locatif social d'un propriétaire occupant), des migrations liées aux difficultés de transport, voire des migrations thermiques. Stratégies qui permettraient de dénouer des situations intenable, mais pourraient se traduire par des pertes de résidences principales, partiellement rénovées, par transferts dans le parc secondaire ou la vacance.

Nous raisonnons comme si les 15,7 millions de résidences principales susceptibles d'être concernées par la rénovation thermique étaient toutes possédées par des ménages propriétaires (occupants ou bailleurs), et ne considérons pas les bailleurs sociaux. Or la loi Grenelle 1 fixe un objectif de rénovation de 800 000 logements sociaux consommant plus de 230 kWhep/m²/an pour les amener à moins de 150 kWhep/m²/an d'ici 2020. En 2004, le nombre de logements sociaux était d'environ 4,1 millions (vacance de 2% exclue), soit 16% du total de résidences principales. Il faudrait regarder comment la proportion de logements sociaux construits avant 1974, et non encore rénovés thermiquement, impacterait notre raisonnement.

Toutefois, une rénovation à moins de 150 kWhep/m²/an est un effort moins important que les efforts qui fondent notre tableau 39. Qui plus est, la rénovation du parc social risque d'accentuer son attractivité, sous effet des hausses des prix des énergies, et donc abaisser le taux de rotation de sa population (10% par an actuellement), et par conséquent accentuer les difficultés des accédants décrites plus haut. Le parc social n'échappera pas non plus aux incidences des dérapages de consommations d'électricité spécifique. En revanche, il pourrait atténuer l'impact des épaississements des murs sur les surfaces.

UNE RENOVATION THERMIQUE AVEC FORT EPAISSISSEMENT DES MURS EST-ELLE PERTINENTE ?

Quelque soit le choix d'épaississement des parois, par l'intérieur ou l'extérieur, il aura une incidence sur les îlots de chaleur urbaine. L'isolation par l'extérieur augmentera les surfaces minéralisées, donc augmentera les effets d'îlot de chaleur urbain, de façon certes différenciée selon les configurations des territoires. Et il y aura une augmentation généralisée des phénomènes d'inertie thermique, de façon sans doute différenciée selon les modalités d'isolation. Effets d'îlot de chaleur urbain qui génèreront un décalage entre les DJU

(degrés-jour unifiés), ayant basé les bilans thermiques des bâtiments, et les moyennes réelles de températures, générant sans doute des économies de chauffage en hiver mais des surchauffes en été. Ce qui participera à l'aggravation de la situation précédemment décrite.

Se pose toutefois la question de la pertinence du fort épaissement des parois. Rappelons (tableau 30) qu'il suffirait de substituer chauffage et eau chaude sanitaire électriques, par des équipements à coefficient 1 de conversion énergie finale/primaire, pour 3,2 millions de logements sélectionnés dans le parc le plus énergivores (sous réserve d'une consommation moyenne annuelle de 24 297 kWh_{ef} par logement), pour atteindre l'objectif du Grenelle 1 pour 2020 (- 38% par rapport à 1990). C'est ce que nous avons intégré au tableau 39 par la colonne « conversion énergie » qui, outre l'isolation thermique des murs d'une partie du parc, exploite les différentiels de conversion en énergie primaire. En plus de ces 3,2 millions, nous y avons ajouté 2,2 millions de logements, à trouver de préférence parmi ceux qu'il n'est pas possible d'isoler, dont on change chauffage et ECS de façon à diviser par 2,58 les consommations d'énergie primaire. L'effort à consentir paraît alors beaucoup moins considérable pour atteindre le facteur 4.

D'ailleurs, [MEDDTL et al.] estime que le CIDD devrait permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'existant de 26% en 2020, par rapport à 2000. C'est certes loin de l'objectif cité du Grenelle 1, et qui plus est dépendant de grandes imprécisions pour le photovoltaïque, les chaudières à condensation et l'isolation thermique. Mais c'est basé surtout sur un effort de rénovation sans isolation thermique des murs¹⁰⁴. Il suffirait alors d'optimiser l'effort, en isolant modérément et systématisant la conversion des énergies au coefficient de conversion final/primaire le plus élevé (électricité) vers les plus bas coefficients.

Mais cette démarche suppose d'inventer les mécanismes permettant de cibler des logements à caractéristiques énergétiques précises mais dont la distribution territoriale peut être très diffuse, et amener leurs propriétaires à changer d'énergie de chauffage. Elle requiert donc d'améliorer significativement la connaissance statistique du parc de résidences principales, et est incompatible avec des transferts significatifs entre résidences principales, secondaires et vacance.

Et cela revient à dépendre de décisions politiques, la valeur scientifique de ces coefficients de conversion pouvant faire débat. Cette démarche dépend en particulier d'un consensus international durable sur les coefficients de conversion de l'électricité. Et combien de temps faudra-t-il pour que la réalité des impacts des gaz à effet de serre finisse par rendre vains les jeux sur les taux de conversion des énergies ?

Qui plus est, les conséquences des consommations liées à l'électroménager risquent de peser encore plus sur le bilan, puisque électriques. Cela revient à dépendre encore davantage des variations des prix des énergies, éventuellement pondérées par les rendements, taux d'usure et coûts d'entretien des équipements de production/distribution de chaleur. Or, si une fraction significative des ménages finit par avoir des

¹⁰⁴ Ce que tend à confirmer le rapprochement entre l'estimation de 6,2 millions de logements ayant bénéficié d'un CIDD [Mission PBG], et les estimations sur le coût du dispositif CIDD [MEDDTL et al.], soit un montant moyen de 1 957 € par logement aidé.

budgets qui ne laissent même plus de place au financement d'un changement de chaudière, la marge de manœuvre sur les coefficients de conversion se réduit considérablement.

Quoi qu'il en soit, on ne pourra pas faire l'économie d'un épaississement des parois qui, même minime, est susceptible d'avoir un impact sur les surfaces (hypothèse PIV, tableau 7). Cette perte d'espace pourrait accentuer les difficultés de certaines populations et territoires. En matière d'espace habitable, via l'isolation par l'intérieur, il existe des risques de tension sur les marchés immobiliers dont les effets sont à débattre. L'isolation par l'extérieur est moins consommatrice d'espace vital, néanmoins elle peut aggraver les difficultés de stationnement et de chalandise de certaines zones urbaines très denses. Et elle n'est pas applicable à l'ensemble du territoire, étant donné que 70% de celui-ci est protégé à un titre ou un autre.

131

Une suite possible du présent travail serait de tenter d'estimer l'impact des épaississements d'isolants sur les surfaces (par exemple avec Énerter-Résidentiel), et estimer son incidence sur la structuration des prix immobiliers (par exemple avec PERVAL). Et ainsi procéder à une évaluation territoriale des risques d'exclusion induits par la rénovation thermique, en incluant des données telles que les conditions de crédits et aides, les coûts comparables des travaux d'isolation, de réaménagement, de ré-ameublement...

CONDITIONNEMENT DES COMPORTEMENTS MOYENS ET LIMITES DES BATIMENTS INTELLIGENTS

Malgré les limites du présent travail, il paraît assez certain que les pratiques actuelles de confort thermique, consistant à chauffer, systématiquement et à fréquences élevées, la totalité ou la plus grande partie du logement, ne perdureront pas au-delà de 2050. Soit un épisode d'au plus 100 ans dans l'histoire de l'humanité. La question est de savoir comment. Par ré-acclimatation, à savoir en se réhabituant à des températures inférieures à 19° C dans les bâtiments ? Ou par l'amélioration concomitante du comportement thermique de l'enveloppe et du rendement énergétique des équipements, pour sustenter la définition contemporaine de confort thermique la plus usuelle en France, en chauffant peu (réduction des fréquences) ? Nous revenons donc à la question abordée en introduction : comment « décarboner » notre confort, moteur du système économique qui nous sustente, sans le remettre en cause ?

La clef nous paraît être le comportement : comportements des ménages face aux incitations à rénover ; comportements des entreprises dans les choix et la maîtrise des gestes de rénovation thermique ; comportements des ménages dans l'utilisation du logement et des appareils électrodomestiques ; comportements des appareils électrodomestiques sous incidence du comportement des ménages ; comportement des logements sous incidence de ces multiples comportements...

Face à une telle complexité que faire ? La tendance lourde des politiques énergétiques est de s'appuyer sur des moyennes en postulant que les écarts tendent à être noyés par le nombre. Dès lors qu'un ménage s'engage dans la rénovation thermique, le comportement moyen des artisans est de respecter la

réglementation thermique et les règles de l'art, le comportement moyen des isolants est celui de mesures effectuées à 10° C, et une machine à laver qui génère des économies dans un local à 23° C, avec une eau à 15° C, est censée générer forcément des économies dans la plupart des autres cas de figure thermiques. Ce qui compte est l'effet d'entraînement créé par la décision des ménages de rénover.

Le problème est que cet effet d'entraînement risque de vite se gripper en raison du déphasage entre le secteur du Bâtiment, poussé par la réglementation à visée énergétique, et un secteur électroménager qui pousse la réglementation à visée énergétique. L'exigence pour l'électroménager doit être aussi forte que pour celle du bâtiment, et même plus forte si l'on tient compte de la hausse constante des consommations d'électricité spécifique et des impacts sur les apports internes dans le bilan thermique des bâtiments. Pour les téléviseurs, par exemple, il est à espérer que le relèvement des exigences prévu pour 2014 conduise à ce très net relèvement des objectifs. Relèvement auquel pourrait participer l'enseigne FNAC, en faisant à nouveau figurer l'information sur l'impact en CO² des téléviseurs, dans ses guides techniques.

Par ailleurs, ce n'est pas parce que l'augmentation du nombre de paramètres complexifie le modèle, que simplifier les paramètres améliore nécessairement le modèle. Ne serait-il pas possible et opportun de s'appuyer sur des approches statistiques intégrant mieux la complexité, que de continuer à s'appuyer sur des ratios de type DJU¹⁰⁵, DIN, EN et autres ISO ? Peut-on continuer à se contenter de baser la mesure de la conductivité des isolants thermiques sur une température de 10° C ? Pour l'électroménager, est-il si compliqué de baser les mesures pour l'obtention des étiquettes énergie sur des variations de paramètres, et fournir des diagrammes de performance en fonction de conditions plus proches des réalités domestiques ?

Toutefois, l'élaboration d'approches davantage en prise avec les réalités domestiques, risque de buter sur l'éventail des possibilités offertes aux ménages, sur certains électroménagers. En ce qui concerne les lave-linge, il semblerait que l'augmentation de la taille des tambours rallonge les temps de lavage, en particulier sur ceux censés être les plus économiques. Le tableau 37 met en valeur que certains programmes durent moins de 40 minutes alors que d'autres peuvent durer plus de quatre heures, ce qui n'a pas du tout le même impact en termes d'effet joule et donc d'apports internes. Une dizaine de programmes, avec plusieurs options de température, rinçage, essorage, et autres, cela donne plusieurs centaines de combinaisons et donc de durées de fonctionnement possibles. Certes, il est probable que les combinaisons les plus utilisées ne dépassent guère la demi-douzaine. Mais quelle assurance y a-t-il que la plupart des ménages utilisent les mêmes combinaisons de programmes ? La stabilisation des apports internes ne passe-t-elle pas par une sobriété des possibilités de configuration d'utilisation des appareils électrodomestiques ?

Il semble difficile de croire à un ratio unique de conversion d'effet joule électrodomestique. Qui plus est, si le facteur de puissance joue sur les pertes de distribution (les pertes par effet joule sont augmentées du carré de l'intensité), il semble difficile de ne pas devoir considérer les écarts de facteur de puissance entre appareils, et les incidences sur le ratio de conversion. Des recherches seraient à mener sur ces points.

¹⁰⁵ Mediademe utilise les degrés-jour unifiés moyens sur 30 ans de la période... 1951-1980 !

La gestion de bâtiment peut apparaître alors comme moyen de réduire les écarts, aux moyennes de comportements requis pour l'atteinte de l'objectif facteur 4. Basée sur des capteurs, elle permet de détecter la présence, réguler la température, gérer l'éclairage... Associée au comptage elle permet de repérer les anomalies, sensibiliser les occupants... On parle de compteurs intelligents, bâtiments intelligents, quartiers, villes, réseaux intelligents... Effacer les pointes, conditionner les comportements, ramener vers une moyenne... Cette notion d'intelligence tend donc à participer au concept de « *persuasive technologies* », concept connu aussi sous des vocables tels que persuasion technologique, ergonomie incitative, design persuasif, interfaces persuasives, captologie...

Le bâtiment intelligent et les interfaces persuasives peuvent apporter des solutions en efficacité et sobriété énergétique, s'il s'agit de permettre aux utilisateurs de mieux comprendre le fonctionnement du bâtiment, des équipements, des appareils... Dès lors que c'est accompagné du souci de concevoir des bâtiments, systèmes, équipements et appareils au plus près des comportements des usagers. Et que l'on admette qu'informer les ménages sur l'impact de certains de leurs gestes quotidiens puisse être inefficace pour les inciter à modifier leurs comportements [Pierce et al.]. En effet, l'utilisation de wattmètres pour générer une prise de conscience ne modifie pas nécessairement l'inertie des habitudes [Strengers]. Plus de recherches sur l'efficacité des pratiques incitatives sont nécessaires ; y compris en s'intéressant aux comportements expliquant des pratiques anti-tabac qui génèrent une hausse du nombre de fumeurs, et des permis à points qui génèrent une hausse du nombre de conducteurs roulant sans permis de conduire.

En ce qui concerne les compteurs intelligents d'électricité, ERDF aurait pour objectif d'en équiper l'ensemble des consommateurs reliés au réseau à l'horizon 2021. Mais on peut se demander s'il s'agit bien d'une interface persuasive. En effet, la plupart des compteurs se trouvant en coffret (individuel) ou armoire (collectif) extérieurs, cela ne favorise pas du tout une consultation fréquente du compteur par l'utilisateur. Sauf si ces compteurs peuvent facilement être interrogés à distance par leurs usagers respectifs. Il a ainsi été recommandé l'ajout d'un système d'affichage à l'intérieur du lieu de vie [Lenoir & Poniatowski].

On butte alors sur un autre écueil : comment conditionner les comportements si les consommations d'électricité spécifique sont très mal connues (absence de statistiques) et en pleine mutation ? Selon un responsable d'une société d'équipement électrique¹⁰⁶, les installations électriques résidentielles ne seraient renouvelées que tous les 35 ans en moyenne. Ne serait-il pas opportun d'associer le diagnostic électricité à une rénovation permettant d'organiser les tableaux électriques par postes correspondant aux postes à intérêt statistique (cuisson, éclairage, électroménager blanc, audiovisuel-informatique-téléphonie...) ? Ou d'avoir des tableaux électriques permettant de visualiser la consommation d'un appareil électrodomestique quel que soit le point de raccordement à l'installation électrique ? Questionner le confort au travers d'une histoire des intimités serait alors sans doute nécessaire. Toujours est-il que l'atteinte du facteur 4 ne pourra pas se passer de la sobriété énergétique, laquelle ne pourra pas faire fi de l'anthropologie domestique.

¹⁰⁶ Emmanuel Bellandras, Responsable développement commercial domotique, Legrand, conférence « Comment convaincre vos clients de la nécessité d'une installation domotique ? Que peut-elle leur apporter ? », Salon Interclima + Elec, 09 février 2012.

BIBLIOGRAPHIE

- AFME, Guide isocèle, Paris, AFME, 1989, 58 p.
- Aïdi (A.), Pitrou (L.), Geneteaud (M.), Les ménages et leur logement : principales analyses des trois enquêtes-logement de l'INSEE 1984, 1988, 1992, Paris, Economica, 1997, 169 p.
- AQC, BBC : les retours de terrain, les premiers enseignements, dans Qualité Construction, revue de l'Agence Qualité Construction, numéro spécial Bâtimat 2011, 68 p.
- ARENE, Construction durable et bonus de COS, bonifier les droits à construire pour les constructions et les rénovations à haute performance énergétique et environnementale ; guide d'application pour les collectivités locales, Paris, Arene,
- Aubert (D.), Robin (P.), Les HLM face à la maîtrise de l'énergie, dans Bâtiment énergie, n° 27, juin-juillet 1983, pp. 27-37
- Aussourd (Ph.), Prevot (M.), Slama (R.), Evaluation de la mise en œuvre de la réglementation thermique 2000, Conseil Général des Ponts et Chaussées, rapport n° 004475-01, novembre 2006, 49 p.
- Bachoud (L.), Jacob (Ph.), Toulhier (B.), Patrimoine culturel bâti et paysager : classement, conservation, valorisation, Paris, Delmas, 2002, 280 p.
- Balland (J.), L'usufruit, un outil méconnu de gestion et de transmission de patrimoine des particuliers, 2008, 238 p.
- Baudier (M.), Xiang (L.), Marchio (D.), Mesure de coefficient de déperditions de pavillons habités ; rapport final, Paris, ENSMP – ARMINES, 1990, 47 p.
- Baudis (P.), La réhabilitation de l'habitat ancien, synthèse documentaire, Paris, STU, 1982, 221 p.
- Berlioz (P.), La notion de bien, Paris, LGDJ, 2007, 596 p.
- Bernard (A.), Evaluation des biens : terrains, immeubles bâtis, fonds de commerce, titres non cotés, Paris, Le Moniteur, 2004, 570 p.
- Bernard (N.), Mertens (Ch.), (dir.), Le contrôle de la qualité des logements : à la recherche de solutions nouvelles, actes du colloque international du 24 novembre 2006, Bruxelles, Bruylant, 2007, 132 p.
- Boucher (P.), Pepin (M.), La gestion des labels HPE et solaire par l'ATG, dans Gaz d'aujourd'hui, 111ème année, n° 3, mars 1987, pp. 108-112
- Berthet (L.), Boudou (D.), Mamo (X.), Premiers résultats de la campagne de mesure des harmoniques sur les réseaux basse tension français, dans Electricity Distribution, 2001. Part 1. CIRED. 16th International Conference, pp. 199 - 204
- Binz (A.), Steinke (G.), Vacuum insulation panels in the building sector, Muttentz, IEBAU, 2006, 6 p.
- Bleuler (P.), Renault (P.), Isolation thermique : des notions de base à la pratique des calculs ; pour mieux connaître, comprendre et appliquer les « règles Th », Dourdan, H. Vial, 1982, 195 p.
- Boucher (P.), Pepin (M.), La gestion des labels HPE et solaire par l'ATG, dans Gaz d'aujourd'hui, 111ème année, n° 3, mars 1987, pp. 108-112
- Boudour (D.), Even (K.), et al., Comptes du logement : premiers résultats 2009 ; les comptes 2007-2008, Paris, Commissariat Général au Développement Durable – SoeS, mars 2010, 185 p.

- Bourgeat (G.), et. al., Habitat H.P.E. (haute performance énergétique) : enquête psychosociologique, Paris, DHC, 1991, 178 p.
- Brindel-Beth (S.), Isolation : une double fonction indispensable, dans Cahiers techniques du bâtiment, n° 88/104 bis, déc. 1988, pp. 23-28
- Briquel (V.), La construction de logements neufs a triplé, en valeur, de 1964 à 1974, dans Economie et statistique, n° 79, Juin 1976, pp. 69-73
- Calvet (S.), Marical (F.), Le budget « énergie du logement » : les déterminants des écarts entre les ménages, dans Le point sur, n° 56, Commissariat général au développement durable, Juin 2010, 6 p.
- CEGIBAT, L'innovation énergétique dans l'habitat neuf : un bilan, une politique. Réunion – débat, 12 janvier 1984, dans Bâtiment énergie, n° 31, fév.-mars 1984, pp. 33-52
- Christel (V.), Les durées de production des logements : de l'autorisation à l'achèvement des travaux, Paris, Documents de travail du SES, septembre 2005, 13 p.
- Christel (V.), Even (K.), Les dépenses de logement en 2005 et 2006 : des rythmes de croissance jamais atteints, dans SESP en bref, n° 19, juillet 2007, pp. 1-4
- Claustre (R.), L'efficacité énergétique : un gisement conséquent, dans CLER Infos, N° 75, mars-avril 2010, pp. 8-9
- Claustre (R.), Etiquette énergie : discordes et confusion pour trouver une solution, dans CLER Infos, N° 75, mars-avril 2010, p. 14
- COSTIC, Association Chauffage Fioul, Fioul domestique : la rénovation thermique des maisons individuelles, Paris – Saint Rémy lès Chevreuse, fiche conseil, édition février 2012, 8 p.
- CREE, Le chauffage est aussi une culture, dans Architecture intérieure – CREE, N° 225, août-sept 1988, pp. 204-209 et 212
- Crowley (J.E.), The Sensibility of Comfort, dans The American Historical Review 104.3 (1999), 43 par. 11 Nov. 2005, <http://www.historycooperative.org/journals/ahr/104.3/ah000749.html> .
- CSTB, Des bâtiments plein d'énergie, dans CSTB Magazine, n° 79, novembre 1994, pp. 3-23
- CSTB, Règles TH-k77 et TH-g77, dans Cahiers du CSTB, n° 184, nov. 1977
- CTB., Le diagnostic thermique de l'habitat, dans Cahiers techniques du bâtiment, n° 43, mars 1982, pp. 51-61
- CTB, Thermique : comment accroître la performance énergétique, dans Cahiers techniques du bâtiment, n° 279, mai 2008, pp. 60-66
- Daussy, (R.-J.), Pour une meilleure maîtrise de l'énergie dans le secteur habitat et tertiaire neuf et existant, Paris-La-Défense, Isover Saint Gobain, 1982, 164 p.
- Davis (L.W.), Durable goods and residential demand for energy and water: evidence from a field trial, dans The Rand Journal of Economics, Vol. 39, n° 2, summer 2008, pp. 530-546
- Davis (S.J.), Spend, save and splurge – the rebound effect of energy efficiency initiatives, Domestic Use of Energy Conference Proceedings, 2008, pp. 53- 58
- Debomy (P.), et al., L'isolation thermique des maisons individuelles indépendantes (classes II et III) en construction neuve, Paris, CEIP, 1976, 236 p.

- Delaunay (Q.), Histoire de la machine à laver : un objet technique dans la société française, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 1994, 346 p.
- Depecker (P.), Maîtrise des ambiances habitées et repérage de la qualité thermique, dans Annales de l'IBTP, n° 443, avr. 1986, pp. 49-63
- Deval (J.), Menard (J.-P.), Ecole énergie, dans Bulletin d'informations architecturales, suppl. n° 106, oct. 1986, 19 p.
- Donnat (O.), Enquête Pratiques culturelles des Français, 2008 - DEPS ministère de la Culture et de la Communication : <http://www.pratiquesculturelles.culture.gouv.fr/08resultat.php>
- Eenschooten (M.), Le logement de 1978 à 1984 : toujours plus grand et toujours mieux, dans Economie et statistique, n° 206, janv. 1988, pp. 33-43
- Eichholtz (P.), Kok (N.), Quigley (J.), Doing well by doing good? An analysis of the financial performance of green office buildings in the USA, RICS, Maastrich, march 2009, 15 p.
- Ellis (M.), Jollands (N.), Gadgets and gigawatts : policies for energy efficient electronics, OECD / International Energy Agency, Paris, 2009, 420 p.
- Energies et Avenir, La rénovation énergétique des maisons individuelles : performance et potentiel des systèmes à eau chaude ; étude 2010, Puteaux, Energies et Avenir, 2010, 38 p.
- Estlimbau (P.), Méthode d'évaluation « in situ » du coefficient de déperdition thermique d'un mur, Paris, CFE, sd, 15 p.
- ESPRIT, Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension, cadre réglementaire, impacts et préconisations, 2010, Ademe, 64 p.
- EURELECTRIC, Power quality in european electricity supply networks, 2002, Bruxelles, 62 p.
- Fassi Fehri (B.), Comparaison des coûts énergétiques de divers types de partis d'aménagement en fonction des bilans d'immeubles et de l'organisation de l'espace, Champs-sur-Marne, ENPC, 1997, 68 p.
- Francis Lefebvre Ed., Évaluation : terrains, immeubles bâtis, fonds de commerce, titres non cotés en bourse, droits d'auteurs et droits voisins, Paris, Éditions Francis Lefebvre, 2005, 329 p.
- Frénot (M.), Sawaya (N.), L'isolation thermique : le répertoire des solutions pratiques pour l'habitat existant, Aix-en-Provence, Edisud, 1979, 190 p.
- Flipo (F.), L'infrastructure numérique en question, dans Entropia, n° 3, 2007, pp. 67-85
- Flipo (F.), L'écologie de l'infrastructure numérique, dans La société de la connaissance à l'ère de la vie numérique, Colloque du dixième anniversaire du GET, 29 juin 2007, pp. 55-64
- Fuerst (F.), McAllister (P.), Green noise or green-value ? Measuring the price effects of environmental certification in commercial buildings, Munich, MPRA paper n° 16625, avril 2008, 31 p.
- Fuerst (F.), McAllister (P.), New evidence on the green building rent and price premium, Monterey, Annual Meeting of The American Real Estate Society, avril 3, 2009, 30 p.
- Gallauziaux (Th.), Fedullo (D.), Le grand livre de l'isolation, Paris, Eyrolles, 2009, 671 p.
- Girard (N.), Marescot (R.), Cornuau (F.), La réglementation thermique du bâtiment, 3^{ème} édition. Tome 1 : bâtiment existant. Tome 2 : bâtiment neuf. Habitat – non habitat, Paris, Recherche – Méthode – Analyse, 1989, 390 p.

- Girault (M.), Lecouvey (F.), Projection tendancielle de la consommation d'énergie des logements, dans Notes de synthèse du SES, n° 137, sept.-oct. 2001, pp. 7-14
- Girault (M.), Les économies d'énergie de chauffage depuis 25 ans, dans Notes de synthèse du SES, n° 129, mai-juin 2000, pp. 9-12
- Global Chance, Du gâchis à l'intelligence : le bon usage de l'électricité, Les Cahiers de Global Chance, n° 27, coédité avec l'association négaWatt, janvier 2010, 148 p.
- Godinot (A.), (réd.), Logement, crise du logement et statistique : synthèse des débats, Société Française de Statistique, Les Cafés de la Statistique, soirée du 9 juin 2009, 14 p.
- Goff (O. Le), L'invention du confort : naissance d'une forme sociale, Lyon, Presses Universitaires de Lyon, 1994, 217 p.
- Gowri (K.), Farinaccio (L.), Review of advanced building envelope technologies, dans Housing science and its applications, vol. 19, n° 2, 1995, pp. 83-94
- Gras (A.), Moricot (C.), Technologies du quotidien : la complainte du progrès, Paris, Éditions Autrement, 1992, 221 p.
- Heintz (M.), Joubert (O.), Cohen (P.), L'architecture en Luberon : habitat et patrimoine rural, connaître et restaurer, Aix-en-Provence, Edisud, 2002, 164 p.
- Hiez (D.), Etude critique de la notion de patrimoine en droit privé actuel, Paris, LGDJ, 2003, 466 p.
- INSA, L'inertie thermique par le béton : économies d'énergie et confort d'été, Paris, Centre d'information de l'industrie cimentière, 1984, 19 p.
- INSEE, Les revenus et le patrimoine des ménages - édition 2009, Paris, INSEE, 2009, 158 p.
- Jego (H.), Opération 1000 labels HPE, dans Gaz d'aujourd'hui, 113ème année, n° 12, décembre 1989, pp. 475-484
- Jouët (J.), Pasquier (D.), Les jeunes et la culture de l'écran (volet français d'une enquête comparative européenne), dans Réseaux, vol. 17, n° 92-93, 1999, pp. 25-102
- Latreille (P.), La question du logement : guide d'approche d'un problème complexe, Lyon, Chronique Sociale, 2007, 159 p.
- Lavalou (A.), Madec (Ph.), Gauzin-Muller (D.), Construction et environnement : les blocages français, dans D'architectures, n° 153, mars 2006, pp. 27-36, 56-58
- Lecq (Ch.), Toulouse (E.), Directive Eco-conception : la directive Ecodesign pour les nuls, dans CLER Infos, N° 75, mars-avril 2010, p. 10
- Lelu (P.), (dir.), Connaissance de l'habitat existant : un bâti en pierre en Franche-Comté, Besançon, EDF-ARIM, 1979, 87 p.
- Lenoir (J.C.), Poniowski (L.), Comité de suivi de l'expérimentation sur les compteurs intelligents, Paris, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, 2011, 52 p.
- Leroi (P.), Mettetal (L.), Le parc francilien : les enjeux énergétiques dans l'habitat et le tertiaire, dans Cahiers de l'IAURIE, n°147, février 2008, pp. 60-68
- Lieberherr (R.), Le feu domestiqué : usages et pratiques dans l'architecture mondiale, Paris, Unesco, collection Etablissements humains et environnement socioculturel, n°54, 2006, 160 p.

- Lorentz (A.), Woersdorfer (J.L.), Energy-efficient household appliances and the rebound effect - A model on the demand for washing machines, Jena, Max Planck Institute of Economics, 2009, 44 p.
- Matana (M.), Isolation : réglementation, murs, planchers, toitures, vitrages, Paris, Syros Alternatives, 1992, 125 p.
- MEDDTL, MINEFI, MBCPFP, ADEME, Synthèse de l'évaluation du crédit d'impôt développement durable : rapport au comité d'évaluation des dépenses fiscales et des niches sociales, 2011, 126 p.
- Merceron (S.), Theulière (M.), Les dépenses d'énergie des ménages depuis 20 ans : une part en moyenne stable dans le budget, des inégalités accrues, dans INSEE Première, n° 1315, octobre 2010, 4 p.
- Mission Plan Bâtiment Grenelle, Plan Bâtiment Grenelle : rapport d'activité 2011, La Défense, Plan Bâtiment Grenelle, 2012, 88 p.
- Mortier (E.), Amélioration énergétique des bâtiments existants : les bonnes solutions, Paris, SEBTP, 2004, 180 p.
- Miller (N.), Spivey (J.), Florance (A.), Does green pay off?, draft, San Diego University, july 2008, 23 p.
- Muldavin (S.), Quantifying « green » value : assesing the applicability of the CoStar studies, San Rafael, Green Building Finance Consortium, june 2008, 18 p.
- Multon (B.), Ben Ahmed (H.), Bernard (N.), Cavarec (P.E.), Les moteurs électriques pour applications de grande série, dans Revue 3EI, juin 2000, pp. 1-10
- Nicklaus (D.), Teissier (O.), L'étude d'impact ex-ante du projet de loi de programme Grenelle 1, Paris, Commissariat Général au développement durable, Le Point Sur n° 37, décembre 2009, 4 p.
- OEE, Enquête sur l'utilisation de l'énergie par les ménages 2007, Statistique Canada, Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada, 2009, 2 p.
- Oliva (J.-P.), L'isolation écologique : conception, matériau, mise en œuvre, Mens, Terre Vivante, 2001, 237 p.
- Oliva (J.-P.), Courgey (S.), L'isolation thermique écologique : conception, matériau, mise en œuvre ; neuf et réhabilitation, Mens, Terre Vivante, 2010, 256 p.
- Orselli et al., La réglementation thermique de la construction de logements, dans La maîtrise de l'énergie, Comité Interministériel d'évaluation des politiques publiques, Documentation Française, 1998
- Parent (Ch.), Suite du Grenelle de l'environnement : mobilisation des professionnels du bâtiments ; rapport du groupe de travail, Conseil Général des Ponts et Chaussée, Mars 2008, 43 p.
- Pautard (O.), Vers la sobriété électrique : politiques de maîtrise des consommations et pratiques domestiques, Thèse de Doctorat, Université Toulouse II, 2009, 627 p.
- Pelletier (Ph.), De Quéro (A.), Lapostolet (B.), (dir.) (2010), *Rapport du groupe Précarité énergétique du Plan Bâtiment Grenelle*, Paris, La Documentation française, 2009, 55 p.
- Pezeu-Massabuau (J.), Éloge de l'inconfort, Marseille, Parenthèses, 2004, 105 p.
- Pierce (J.), Fan (Ch.), Lomas (D.), Marcu (G.), Paulos (E.), Some consideration on the (in)effectiveness of residential energy feedback systems, communication à la DIS 2010, Aarhus, 2010, 5 p.
- Pivo (G.), Fisher (J.D.), Investments returns from responsible property investments: energy efficiency, transit-oriented and urban regeneration office properties in the US from 1998-2008 , working paper, University of Arizona, Indiana University, october 2008, revised march 2009, 33 p.

- Plateau (C.), Forte augmentation des dépenses de logement sur vingt ans, dans Notes de synthèse du SESP, n° 160, août-déc. 2005, pp. 17-28
- Poquet (G.), Dujin (A.), Pour les ménages, la recherche du confort prime encore sur les économies d'énergie, dans Crédoc consommations et modes de vie, n° 210, mars 2008, 4 p.
- Pouget (A.), Bâtiments résidentiels : une réglementation à la carte, dans Cahiers techniques du bâtiment, 88/104 bis, déc. 1988, pp. 59-66
- Pouilloux (D.), Echange franco-allemand sur la politique de l'énergie dans les constructions, dans Cahiers de l'urbanisme et du logement, n° 4, déc. 1981, pp. 41-46
- Raffestin (Y.), Du logement à la ville (1945-2000) : chronique d'un demi-siècle de bouleversements, Lyon, Editions Lyonnaises d'Art et d'Histoire, 2009, 287 p.
- Rennes Coop, Evaluation scientifique du projet expérimental de la résidence Salvatierra à Rennes, Rennes, Coop de construction, 2004, 50 p.
- Rybczinski (W.), Home : a short history of an idea, Penguin, 1987, 272 p.
- Sagniez (J.-M.), Synthèse expérimentations climatiques, Colloque Atee – novembre 1985, Paris, DREIF, 1985
- SCBR, Research and development in building physics during the last 25 years, Stockholm, Swedish council for building research, 1992, 165 p.
- Shove (E.), Comfort, Cleanliness and Convenience. The Social Organization of Normality, Oxford, Berg, 2003, 221 p.
- Sidler (O.), Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France : projet Renaissance, programme européen Concerto, Felines sur Rimandoule, Enertech, 2007, 81 p.
- Sidler (O.), Connaissance et maîtrise des usages spécifiques de l'électricité dans le secteur résidentiel, Felines sur Rimandoule, Enertech, 2009, 93 p.
- Simard (E.), Les matériaux traditionnels dans une perspective de construction résidentielle durable : analyse comparative, mémoire, Québec, Université de Sherbrooke, 2009, 179 p.
- Simmler (H.), Brunner (S.), Vacuum insulation panels for building application : basic properties, aging mechanism and service life, dans Energy and building, n° 37, 2005, pp. 1122-1131
- Sniadower (M.), Economie d'énergie : exploitation statistique des diagnostics thermiques réalisés sur l'opération pilote de la ville de Meaux, Paris, CETEN – APAVE, 1983, 277 p.
- Solaini (G.), Mammi (S.), Guazzotti (M.), Isolation thermique et bien-être dans l'environnement. La loi 373, une règle largement inadaptée. Récupération d'énergie et isolement acoustique, dans Recuperare, Ediliza designe impianti, n° 22, mars-avril 1986, pp. 138-159
- Sorrell (S.), (dir.), The rebound effect : an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency, UKERC, Londres, 2007, 123 p.
- Souchon (L.), Aesbicher (B.), Roturier (J.), Flippo (F.), Infrastructure of the information society and its energy demand, dans ECEE 2007 Summer Study, 2007, pp. 1215-1225
- Souchon Foll (L.), TIC et Énergétique : Techniques d'estimation de consommation sur la hauteur, la structure et l'évolution de l'impact des TIC en France., Thèse de Doctorat, Institut National des Télécommunications / Université d'Evry-Val d'Essonne, 2008, 164 p.

- Strengers (Y), Challenging comfort & cleanliness norms through interactive in-home feedback systems, Pervasive 2008 Workshop Proceedings, 2008, 5 p.
- Tenpierik (M), Cauberg (H), Vacuum insulation panel : friend or foe ?, PLEA 2006, The 23rd conference on passive and low energy architecture, Switzerland, 6-8 september 2006, 6 p.
- Theile (D.), Acteurs de la construction et choix des partis techniques, dans L'innovation en chantier, Paris, Plan Urbanisme Construction et Architecture, 2004, cd-rom
- Theile (D.), De la parade au changement climatique: Homme, habitat et isolation thermique, XXIII International Congress of History of Science and Technology, Budapest, 2009, 15 p.
- Traisnel (J.P.), et al., Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif, dans Les cahiers du CLIP, n°13, avril 2001, pp. 5-72
- Traisnel (J.P.), et al., Habitat Facteur 4: étude d'une réduction des émissions de CO2 liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, dans Les cahiers du CLIP, n°20, novembre 2010, 103 p.
- Traisnel (J.P.), Production du confort et architectures de l'extrême : introduction au diagramme de l'air humide, Cours EAPB 2006, 19 p.
- TRIBU, Exemple de l'applicabilité des exigences de la future réglementation thermique et vérifications des impacts économiques, Paris, Tribu, 2000, 22 p.
- Trochet (J.R.), Maisons paysannes en France et leur environnement (XVe - XXe siècles), Paris, ed. Creaphis, 2006, 605 p.
- Tubiana (F.), Bâtiment et énergie : objectif basse consommation, dans Environnement magazine, n° 1644, janv.-fév. 2006, pp. 47-52
- Vu (B.), Isoler écologique, Paris, Eyrolles, 2007, 93 p.
- Vu (B.), Le guide de l'habitat passif, Paris, Eyrolles, 2008, 159 p.

ILLUSTRATIONS, TABLEAUX, ENCADRES, GRAPHIQUES

Encadré n° 1 : réglementation thermique pour l'existant et correction thermique

Tableau 1 : Nombre de logements en 2004 par catégorie d'occupation et époque d'achèvement d'immeuble

Tableau 2 : résidences principales concernées par les réglementations thermiques successives

Tableau 3 : nature de la paroi et épaisseur d'isolant requise en fonction de la performance visée

Graphique 1 : épaisseurs de parois et performances thermiques en fonction de la conductivité thermique

Tableau 4 : consommations de chauffage par année d'achèvement des bâtiments en Île-de-France

Tableau 5 : logements construits (avant 1949) par date d'achèvement et année de recensement

Tableau 6 : facteurs de détermination de la valeur vénale d'un logement

Tableau 7 : épaisseur d'isolant et pertes en surface habitable (pour des logements de 30, 49 et 100 m²)

Encadré n° 2 : patrimoine, environnement et confort

Tableau 8 : hausse de prix immobilier requise pour amortir perte espace habitable + travaux

Tableau 9 : moindre quantité pour même valeur monétaire égale plus-value ?

Tableau 10 : quelle moins-value monétaire pour une perte en surface habitable ?

Schéma 1 : impact de l'isolation par l'intérieur

Schéma 2 : maison ouvrière (Nord) sans isolation (RDC et R+1)

Schéma 3 : maison ouvrière (Nord) de type BBC (15 cm d'isolant ; RDC et R+1)

Schéma 4 : maison ouvrière (Nord) de type Passif (30 cm d'isolant ; RDC et R+1)

Photo 1 : enduit vernaculaire et esthétique contemporaine de mise à nu (Essonne)

Tableau 11 : pertes globales en surface selon mode d'isolation (hypothèse BBC tableau 7 : 23 cm)

Tableau 12 : pertes globales en surface selon mode d'isolation (hypothèse ITI 10 cm, ITE 15 cm)

Photo 2 : chauffage avec cuisinière au fioul

Tableau 13 : coûts d'isolation de parois et problématique d'intégration de perte d'espace habitable

Tableau 14 : tentative de pondération du tableau 13 au vu de l'erreur sur les surfaces à isoler

Tableau 15 : problématique d'intégration de perte d'espace habitable : intégration du CIDD

Tableau 16 : problématique d'intégration de perte d'espace habitable : intégration des bouquets de travaux

Tableau 17 : problématique d'intégration de perte d'espace habitable : bouquets de travaux et CIDD

Tableau 18 : taux d'aide CIDD sans et avec prise en compte de la perte en surface habitable

Tableau 19 : hausse de prix immobilier requise (Lille) pour amortir une rénovation un an après livraison

Tableau 20 : hausse de prix immobilier requise pour amortir une rénovation un an après livraison

Tableau 21 : perte en espace et économies de charges rapportées à la valeur du bien par variantes et villes

Tableau 22 : valeur des économies annuelles d'énergie rapportée à la valeur du bien, exprimé en années

Tableau 23 : scénarios de construction et rénovation pour atteindre le facteur 4 en 2050

Tableau 24 : estimation des capacités de formation en isolation par l'extérieur

Photo 3 : isolant fixé avec matériau conducteur

Tableau 25 : épaisseurs (cm) et coût (euros) comparés d'isolants thermiques

Photo 4 : PIV entre deux couches de polystyrène

Photo 5 : esthétique et pont thermique

Schéma 5 : impact d'une isolation par l'intérieur en copropriété au niveau du plan d'étage (simulation)

Tableau 26 : comparatif classement environnemental FNAC, étiquette énergie (téléviseurs), et DPE

Tableau 27 : efficacité énergétique des différents programmes d'un lave-linge

Tableau 28 : mesures de consommations électriques par appareil, fonction et type d'utilisation

Tableau 29 : consommation totale d'énergie du secteur résidentiel

Tableau 30 : objectif Grenelle 1 à 2020 pour l'existant (consommations d'énergie réduites de 38%)

Tableau 31 : évolution des consommations électriques domestiques 1990-2008

Tableau 32 : évolution du taux d'équipement des ménages 1962 - 2004

Tableau 33 : évolution des consommations électriques domestiques et facteur de puissance

Tableau 34 : cheminement intellectuel du paramétrage des besoins en énergie d'un bâtiment

Tableau 35 : la part relative des apports gratuits augmente à mesure que l'on renforce l'exigence thermique

Tableau 36 : le lave-linge comme charge thermique et électrique complexe (modèle Candy)

Tableau 37 : le lave-linge comme charge thermique et électrique complexe (modèle Whirlpool)

Tableau 38 : le lave-linge comme charge thermique et électrique simplifiée (EN 60456 charge de 9 kg)

Tableau 39 : scénario final de construction et rénovation pour atteindre le facteur 4 en 2050