

Habiter sous contrainte carbone en 2050 :
hypothèses sur le confort

Rapport final

24 JANVIER 2010

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	3
A/ La « thermo-rénovation » : quelle ampleur ?.....	3
Quels logements prendre en considération ?.....	3
Date d'achèvement et réglementation thermique :	5
L'effectivité de l'application des réglementations thermiques :	8
Comportement thermique des constructions achevées avant 1969	10
B/ Quelle rencontre entre rénovation thermique, conditions et comportements ?	15
Rénovation thermique et systèmes de valeur liés aux bâtiments	15
Patrimoine, environnement et confort thermique :	18
Rénover en isolant par l'intérieur : réduire et-ou réallouer l'espace habitable	20
Rénover en isolant par l'extérieur : pousser les murs.....	27
Quelles vulnérabilités des populations et territoires ?	30
La question de l'adéquation des pratiques de travail à la rénovation thermique.....	36
Quel effort de construction et rénovation ?	36
Artisans et effet d'opportunité : impact sur les malfaçons et les inégalités	40
Les évolutions des pratiques d'isolation :.....	42
II/ Confort lié aux NTIC et consommation électrique.....	45
A/ Les nouvelles électrifications de l'habitat :	46
L'électrification de l'habitat :	46
Les efforts des fabricants pour diminuer les consommations électriques.....	49
B/ Résultats de mesures (wattmètre).....	54
De sérieuses difficultés dans la mesure :.....	54
Présentation de résultats et commentaires :	56
Où vont passer les économies de chauffage ?	63
Extérieur, intérieur : les évolutions du concept de confort	68
Facteur de puissance et effet joule :	71
Conclusion	76
Bibliographie.....	79

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 (scénario deux 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 thermique¹, 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 de plus de 1 000 m² de SHON concernant un bâtiment construit après 1948 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

¹ 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...

possible de ne pas isoler la paroi (dès lors qu'on ne la rénove pas) et de compenser thermiquement par ailleurs.

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... 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.

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 des NTIC 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'attend 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 ». C'est ainsi qu'en remplaçant un téléviseur « ancien » à écran CRT de 51 cm par le téléviseur à la meilleure notation environnementale du catalogue FNAC, 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 an² !

C'est dans ce contexte que nous avons effectué notre exercice prospectif.

² 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.

I/ CONFORT THERMIQUE ET DISPONIBILITE EN ESPACE HABITABLE

A/ La « thermo-rénovation » : 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 quelle ampleur peut revêtir cette rénovation thermique d'autre part. Donc mettre en relation la date d'achèvement du logement avec la réglementation thermique en vigueur à l'époque d'achèvement.

3

Dans l'absolu, il serait possible, avec les données longue série sur les dates de livraison de logement neufs et la connaissance historique du patrimoine bâti, notamment les époques constructives, d'avoir une estimation assez fine 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 beaucoup plus compliqué que prévu. Autant il est facile d'accéder via Internet à des données récentes, notamment sur le site 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, et donc la rénovation thermique, n'est applicable qu'à la France Métropolitaine (les 96 départements situés en Europe). 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 logements³. Nous avons donc choisi de nous centrer sur les chiffres 2006 de l'INSEE. Le crédit d'impôt dédié au développement durable et aux économies d'énergie s'applique à des logements (résidences principales ou prévues pour être louées comme telles), achevés depuis plus de deux ans.

³ Le site <http://sitadel.application.equipement.gouv.fr> est en maintenance. 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.

Toutefois le crédit est majoré pour les logements achevés avant le premier janvier 1977. 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 1995 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 1995. 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 : Logements construits avant 2004 par type, catégorie et époque d'achèvement de la construction

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 suivante : dans quelle mesure le comportement des mitoyens affecte-t-il 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 elles ne sont qu'une question d'écart de température : le transfert de chaleur au travers de la paroi mitoyenne n'est pas le même quand on a 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.

Date d'achèvement et réglementation thermique :

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 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 an⁴ : 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. On peut faire baisser ce chiffre à 44 ans en intégrant 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. 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 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.

⁴ [Traisnel et al 2010 p. 15] considèrent un taux de destruction de 0,12% soit 30 000 à 35 000 logements par an. Sur la base de notre tableau 5 le taux de destruction est de 42 326 logements par an entre 1872 et 1982. Il passe toutefois à 82 384 par an entre 1982 et 1990. Il y a donc des variations de ce taux dans le temps qui peut parfois passer au dessus de 1%.

Tableau 2 : résidences principales concernées par les réglementations thermiques successives

réglementation	exigence énergétique	R paroi	consommation chauf.	nb résidences princ.
aucune, hors incendie, sécurité...	aucune thermique		±300 kWh/m ² /an	13 049 533
1969 : chauffage + acoustique	aucune thermique		300 kWh/m ² /an	2 600 000
1 ^{er} mai 1974	- 25%	0,96 ?	±225 kWh/m ² /an	1 362 121
juillet 1977	modification coefficient G		225 kWh/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 kWh/m ² /an	1 850 402
1983	label HPE	1,59 ?		40 000 (1983-1987 ?)
1 ^{er} janvier 1989	- 25% ?	1,59	155 kWh/m ² /an	3 560 001
1989	labels HPE 1988			
1 ^{er} juin 2001	- 25% ?	2,65	130 kWh/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 kWh/m ² /an	1 290 953
2007	label BBC 2005	6,67	50 kWh/m ² /an	1 700
29 septembre 2009	HPE rénovation	5 ?	80 kWh/m ² /an	achevés après 1947
TOTAL				28 114 420

Compilé à partir de différentes sources : INSEE, CSTB magazine, Ademe, [Aussourd et al.] ; kWh/m²/an théoriques

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 attribués, ordonnés par types de labels et par années. Et la littérature existante ne livre plus que des graphiques, contribuant à une perte de mémoire des chiffres précis, effet pervers de l'informatisation. 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 le comportement thermique de parois ; il reste aussi à vérifier si la réglementation 1977 impactait ou pas l'épaisseur des parois.

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, il n'est pas absurde de considérer que 2,6 millions de logements puissent 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 ou l'estimation (à améliorer) du parc actuel ou en cours d'achèvement, est censée n'être conforme à aucune réglementation thermique, voire vierge 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, risque d'être maximal.

Le tableau 2 permet également d'examiner le rattrapage à effectuer en fonction des performances induites par les réglementations thermiques successives. C'est un travail que nous préciserons ultérieurement, sachant que les résistances de paroi sont théoriques de même que les consommations de chauffage.

En effet, 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 seulement 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 ». Et pour un logement avant 1948, il faut choisir un bouquet d'au moins trois travaux, mais qui peut ne comporter aucun travail d'isolation thermique. Ce qui a pour effet direct de réduire sensiblement le champ de notre travail : en croisant cette conception et le tableau 2 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, et on se base sur 17 millions de 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 en n'incitant au renforcement thermique de l'enveloppe que pour les résidences achevées entre 1948 et 1974.

L'effectivité de l'application des réglementations thermiques :

Sur la base du tableau 2 nous avons proposé que 13,05 millions de logements sont vierges de toute réglementation à incidence thermique. C'est une hypothèse basse. En effet, 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.

On ne peut pas faire abstraction de l'effectivité de l'application des réglementations. D'une part, parce que 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. Or 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.

D'autre part, 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.

Enfin, le présent travail se veut prospectif. Par ailleurs, les aides à la rénovation thermique ne vont pas rester figées en ce qui concerne les dates d'achèvement des logements éligibles : il n'est pas impossible qu'en 2020 l'éco-prêt à taux zéro, ou équivalent, s'applique aux logements achevés avant 2000. Il convient donc d'appréhender, tout au moins en hypothèse haute, le problème de l'impact des isolants thermiques sur la surface habitable pour un nombre plus important de logements que ce que nous avons extrait du tableau 2.

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].

En ce qui concerne la RT 2000, une évaluation avait été commandée au 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 les auteurs 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 a des non conformités en raison d'erreurs ou de changement de produits.

Par ailleurs, il n'a pas été possible de procéder à des évaluations de consommation (en 2006), en raison du phénomène d'anticipation de 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. 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 la nature des débats sur cette question du contrôle de l'application de la réglementation thermique il apparaît que son application a toujours été limitée⁵.

⁵<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

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 individuelles⁶ 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 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) est obligatoirement affichée de façon visible sur le matériau isolant. Ça n'empêche guère les particuliers d'acheter des 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...

Comportement thermique des constructions achevées avant 1969

Pour le moment, nous nous centrons sur les quelques 13 millions de logements achevés avant 1969 et ayant ainsi échappé à toute réglementation susceptible d'impacter leur comportement thermique. 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.

On peut objecter que tôt ou tard n'importe quelle résidence principale sera amenée à être rénovée. En effet, la stratégie affirmée au travers des réglementations thermiques successives est celle d'un

⁶<http://www.fvalabreguecommunication.com/dotclear/index.php?2009/03/05/20-la-rt-2005-en-12-questions-article-paru-dans-maison-magazine-septembre-2008>

renforcement progressif des exigences : un bâtiment conforme à la RT 2000 sera complètement dépassé au regard de la future RT 2020, par exemple. La question de base semble donc être : quelle est la résistance thermique de la paroi ? comment faire pour l'augmenter à un niveau réglementairement acceptable ?

Si la question 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 : nature de la paroi et épaisseur d'isolant requise en fonction de la performance visée⁷

		RT 2005	BBC 2005	passivhaus
nature et épaisseur de la paroi	R	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/m ³) apparente	0,46	2+9	3+20	3+34
mur 60 cm pierre calcaire ferme (1840 à 2340 kg/m ³) 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, sur la base de : [Lelu], [Oliva], [Oliva & Courgey] ; épaisseurs en centimètres⁸

⁷ Nous nous sommes basé sur diverses brochures de fabricants et [CTB 2008]. Nous ne tenons pas compte des zones 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.

⁸ 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.

Certes le tableau 3 soutient 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 exigence s'élèvera plus les bâtiments seront uniformément traités. Le rêve d'une pratique industrielle du Bâtiment enfin réalisé ?

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 « vulgaire » pavillon en parpaing de banlieue, il faut et il suffit d'une même épaisseur d'isolant pour que ces deux bâtiments aient la même valeur sur le marché au regard du diagnostic de performance énergétique ?

Sur la base du tableau 3, du point de vue de l'épaisseur d'isolant à mettre pour la mise en conformité thermique, la plupart des bâtiments construits en France, tout au moins avant 1969, n'ont aucune valeur thermique. Force est alors de convenir qu'il faudra bien envisager un jour de raser des immeubles haussmanniens dans le cadre de la rénovation énergétique, comme le proposait un professionnel de la maîtrise d'ouvrage. 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.

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 pris en compte dans le comportement global du bâtiment. Plus exactement, nous nous situons 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/m2/an)	(KWh/m2/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 : Énergie Demain – IAURIF cité dans [Leroi p. 61]

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.

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.

En seconde conséquence, le tableau 4 conforte la conviction qu'il faut aller s'intéresser aux dates d'achèvement, à savoir 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 volets (chauffage, ouvertures...).

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

Si on prend l'immeuble collectif de style haussmannien : le style proprement dit date de 1853-1870, puis ensuite viennent le post-haussmannien et le néo-haussmannien, le début de la première guerre mondiale marquant la fin de ce style. Sur Paris, par exemple, on peut dire que les données relatives aux immeubles à dates d'achèvement comprises entre 1871 et 1914 sont surtout de style haussmannien et ont donc des caractéristiques thermiques plus ou moins connues.

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)⁹.

⁹ 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).

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 contribué à élever la moyenne du comportement thermique de ceux qui restaient.

C'est peut-être le résultat 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.

Par définition, l'INSEE associe un ménage à un logement. Le nombre de résidences principales est donc le nombre de « ménages ordinaires » et pas exactement le nombre de logements occupés à titre principal. En effet, le recensement de population s'appuie sur un répertoire d'immeubles (d'adresses en fait) et non pas de logements [Godinot]. Qui plus est, les collectivités (pensionnats, casernes, maisons de retraite...) ne sont pas pris en compte, étant considérés comme « ménages collectifs ». La définition INSEE de logements est donc une convention (résultante du nombre d'adresses rapporté au nombre de ménages) et on ne connaît donc pas le nombre réel de logements.

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).

La simplification que nous faisons ainsi est extrême : le niveau d'isolation des parois n'est qu'un des éléments qui jouent 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-subsvention, 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 de marché, à savoir un 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...) ¹⁰.

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

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

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 avant la transaction, 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. 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

¹⁰ " 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].

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 hypothétiques économies de charges¹¹. En revanche, le système d'incitation à la rénovation énergétique sous-jacent au DPE risque de se situer en porte à faux avec certains facteurs de formation 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 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. C'est peut-être ce qui explique pourquoi il perd comparativement moins en pourcentage de superficie. En effet, le 100 m² a ici été calculé dans une configuration 20x5. Or si on calcule dans une configuration 10x10 on réalise une économie en surface habitable de... 3,7 m² pour la plus forte épaisseur d'isolant ¹²!

¹¹ Avec un baril constant à 55€, 205 Md€ de travaux génèreraient 145 Md€ d'économies d'énergie cumulées [Nicklaus].

¹² 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, varierait rarement à plus de 20%.

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) génèrerait 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.

Il faudrait effectuer un calcul avec le montant des travaux, le montant de l'emprunt diminué des aides, additionner la moins-value en espace habitable ce qui donnerait la moins-value totale. Pour le moment, il est difficile de voir émerger un contexte où la valeur accordée aux questions environnementales serait telle quelle ferait apparaître comme négligeables des investissements pouvant dépasser 180 000 euros.

Patrimoine, environnement et confort thermique :

Étymologiquement, patrimoine désignait les biens et droits hérités du père par opposition à matrimoine, 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* »¹³. 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*

¹³ <http://www.cnrtl.fr/definition/>

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-subvention, 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)¹⁴. 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 ?

Quoi qu'il en soit l'argument qu'une "green-value" émergerait et serait suffisante pour compenser l'investissement à consentir en rénovation thermique est parfois avancé. Des études américaines portant sur l'immobilier de bureau, et comparant des immeubles « verts » (certification Leed, Energy Star...) à des immeubles communs auraient mis en évidence des loyers et des prix de revente plus élevés pour les immeubles « verts » (Miller et al, Eichholtz et al, Fuerst & McAllister). Le problème est que la certification « verte » est un peu la cerise sur le gâteau d'opérations haut de gamme et qu'il est difficile de dissocier l'effet vert de l'effet haut de gamme. Et, surtout, le problème de perdre de la surface utile ne se pose pas ou peu.

¹⁴ 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...

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 m2			plus-value pour un 49 m2			plus-value pour un 100 m2		
	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

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 exigu plus l'incidence de la "green value" doit être élevée.

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 selon les marchés locaux. À en croire 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.

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

Le schéma 1 permet d'imaginer l'impact d'un épaississement 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...

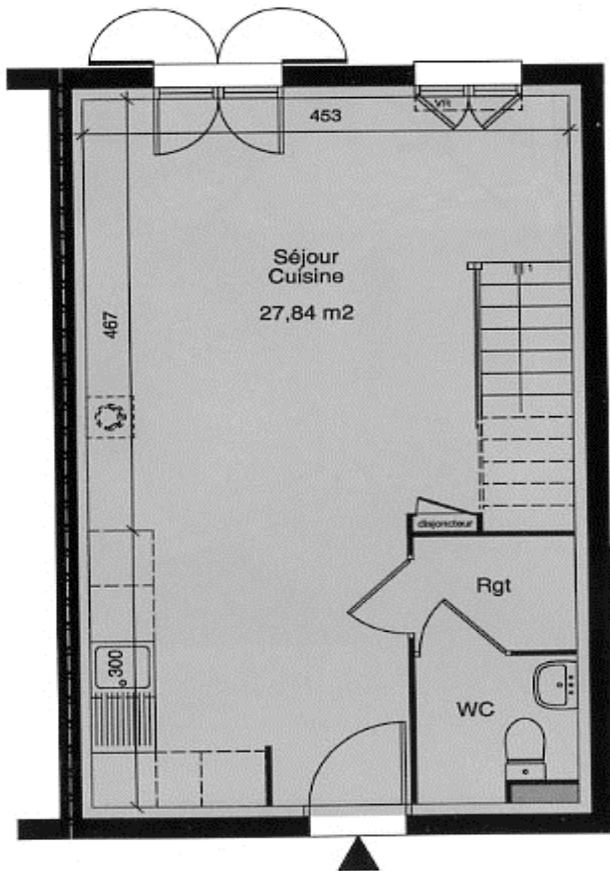


Schéma 1 : impact de l'isolation par l'intérieur

La diminution de l'espace habitable d'un espace déjà occupé, suite à épaississement 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...

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 ménages¹⁵.

Nous avons initialement utilisé le « Ikea Home Planner ». Mais si ce logiciel se révèle très pratique pour disposer du mobilier Ikéa 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). 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.

¹⁵ Architecte 3D est censé être le logiciel d'architecture 3D grand public le plus vendu au monde depuis 2004.

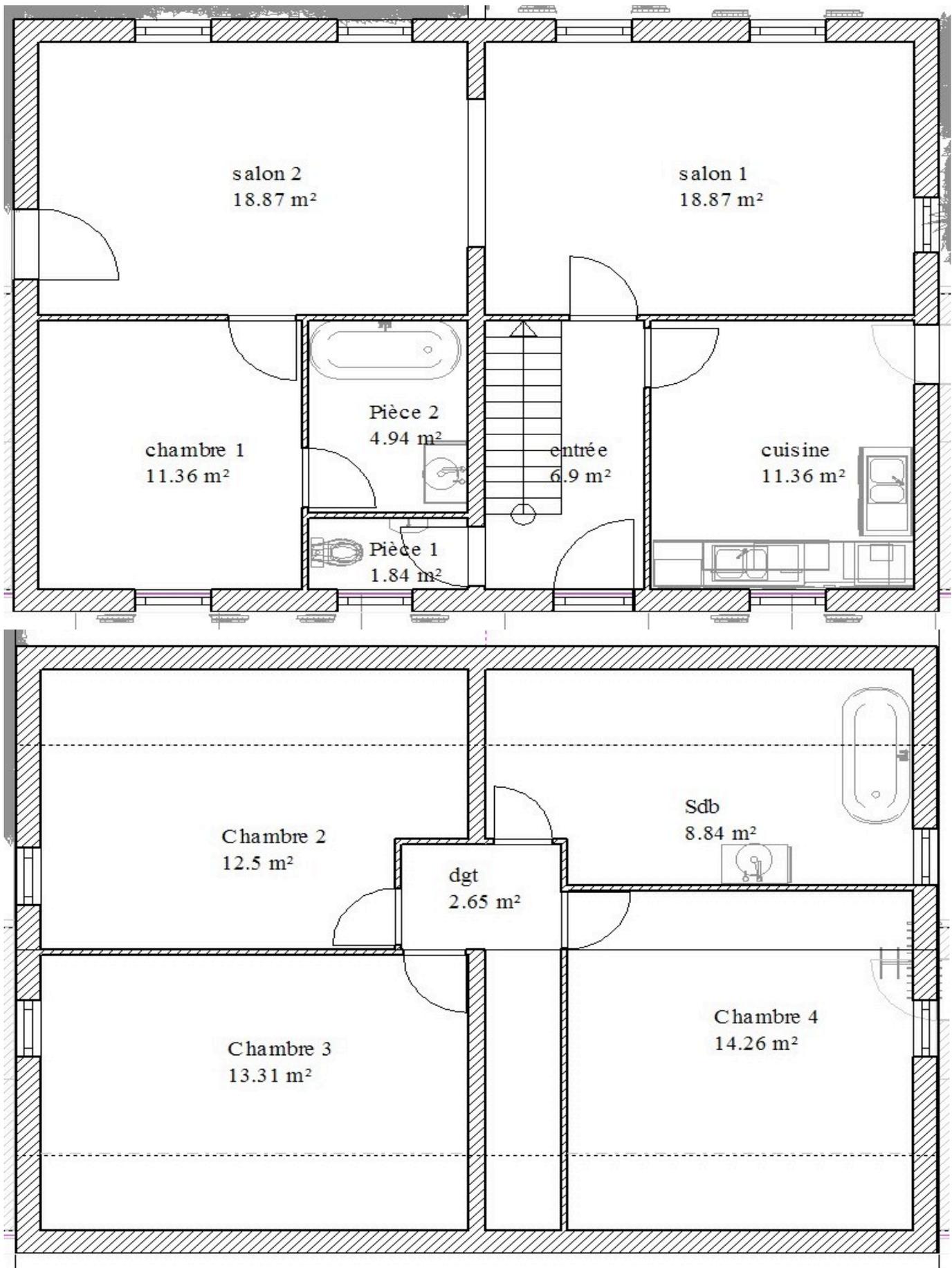


Schéma 2 : maison ouvrière (Nord) sans isolation (RDC et R+1)

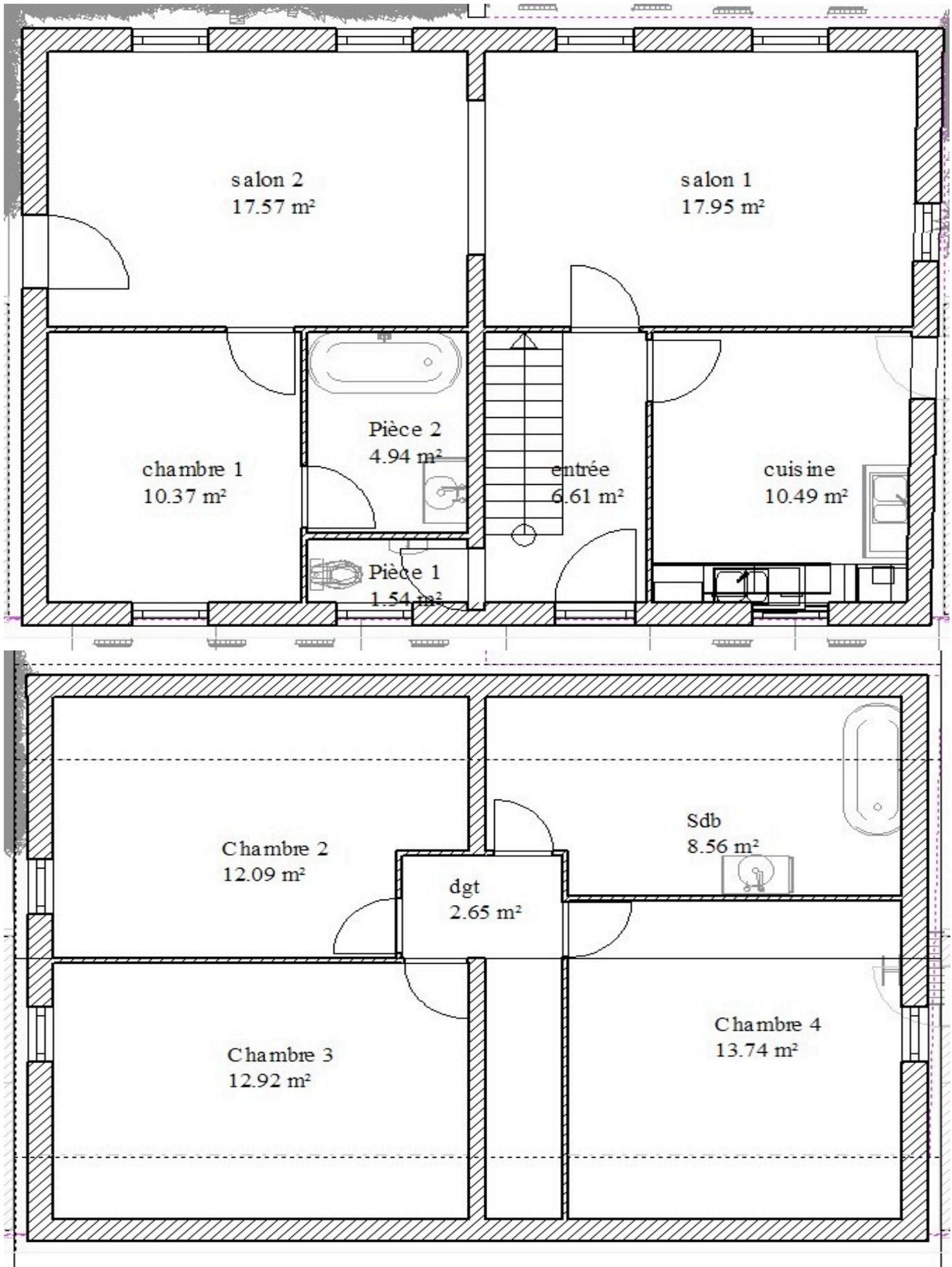


Schéma 3 : maison ouvrière (Nord) de type BBC (15 cm d'isolant ; RDC et R+1)

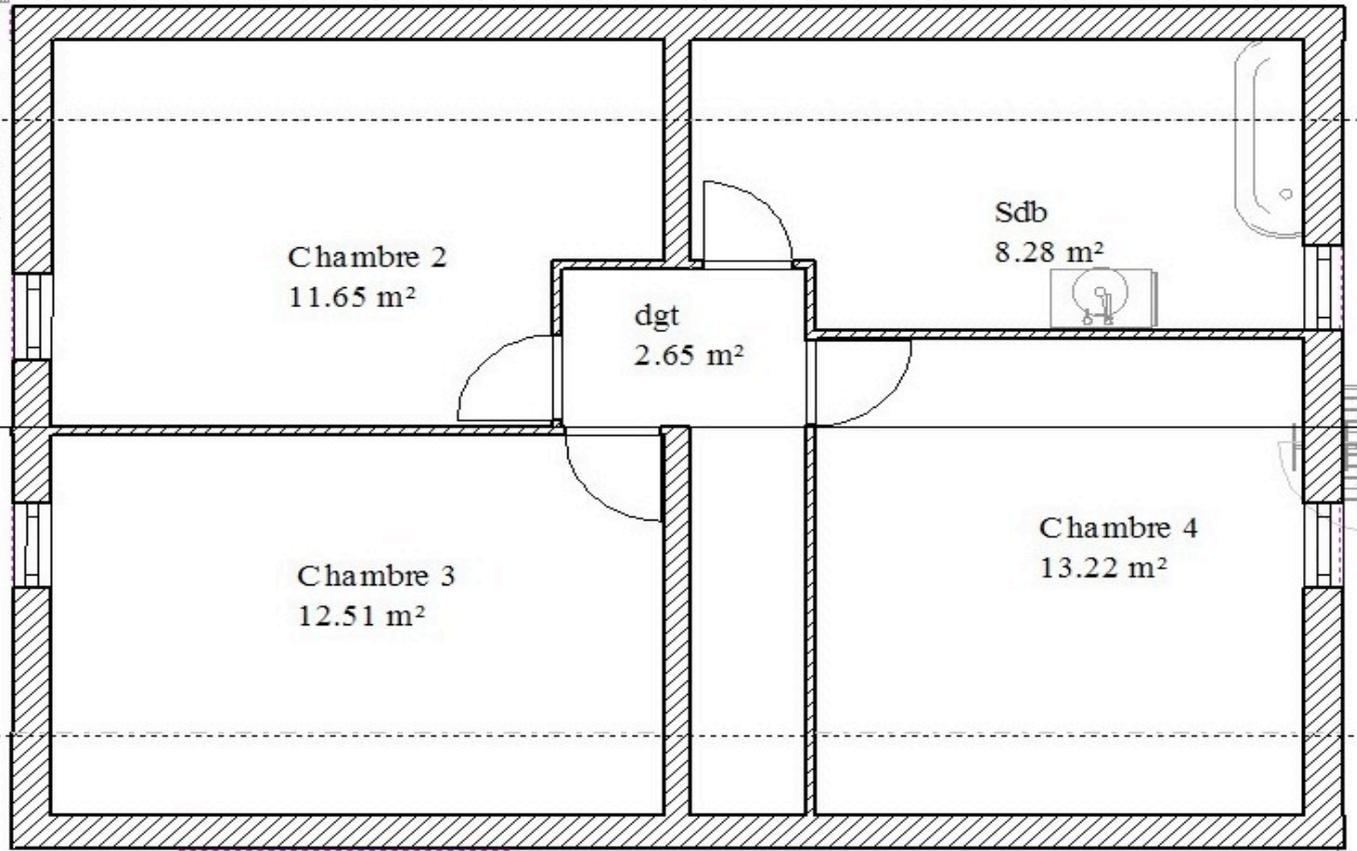
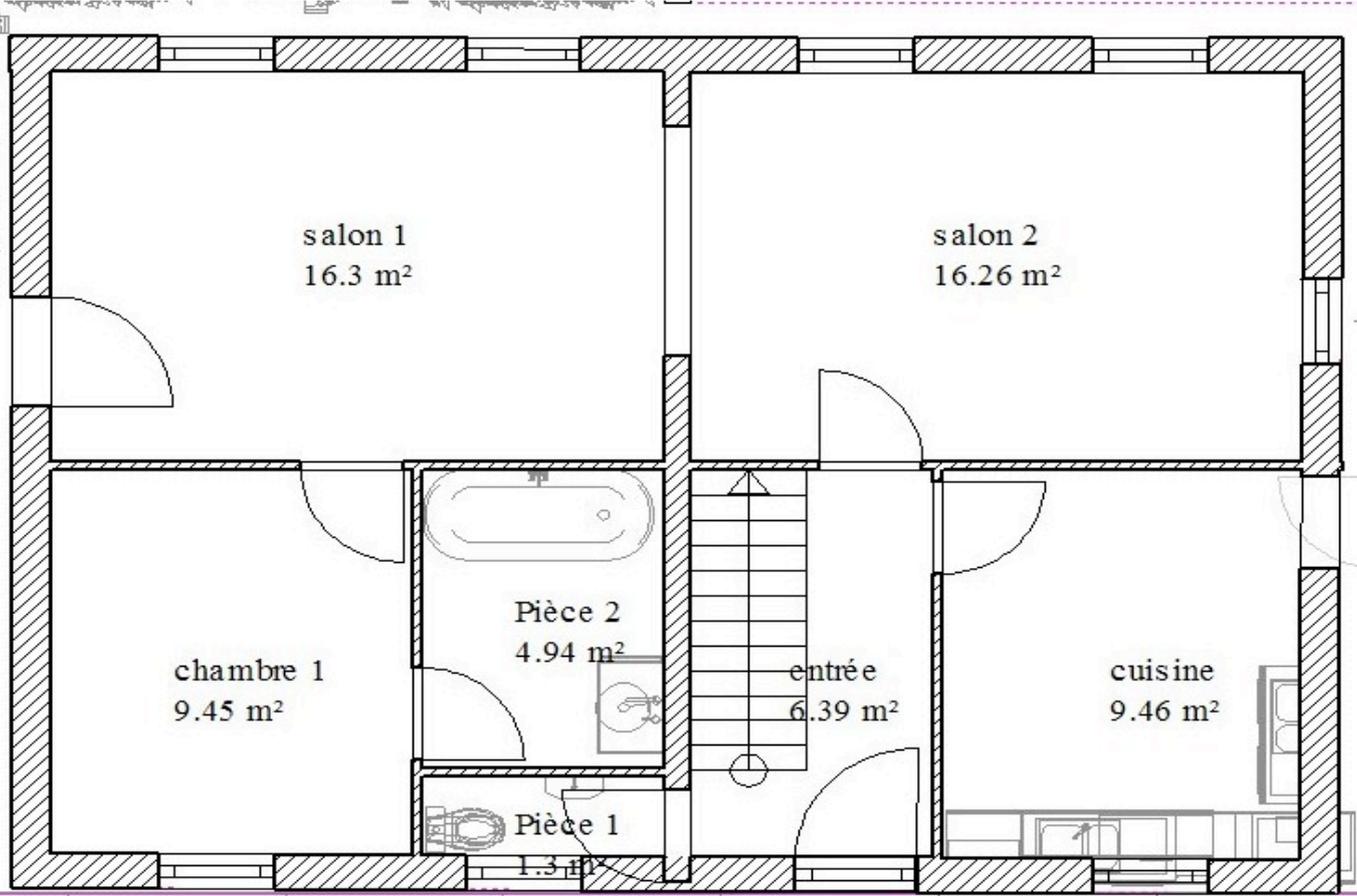


Schéma 4 : maison ouvrière (Nord) de type Passif (30 cm d'isolant ; RDC et R+1)

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 à la situation d'origine. Sachant qu'il y a manifestement problème dans le calcul de surface en étage (l'effet combles ne paraît pas pouvoir expliquer de tels écarts entre R+0 et R+1), 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...

Et nous n'avons pas visualisé ici les impacts sur les éventuels radiateurs, ou les cheminées, voire la présence d'un garage ou d'un cellier accolés, ni pris en considération les problématiques de handicap, vieillissement des occupants... 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 : la toilette et le sommeil s'effectuant à l'étage, il faut nécessairement déplacer l'escalier si l'on souhaite conserver une accessibilité personne âgée voire mettre aux normes handicapés.

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 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. Et une mise à jour le rendant beaucoup plus fonctionnel pour l'examen d'impact des épaisseurs d'isolants est une hypothèse qui n'est pas improbable.

Rénover en isolant par l'intérieur est un défi considérable à la conception en termes d'anticipations et de créativité. Il faut chercher à minimiser le plus possible la perte d'espace habitable, variable selon les configurations, et donc trouver des astuces, thermiques, spatiales, fonctionnelles... Il faut également travailler à 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 par l'extérieur : les anticipations et innovations des professionnels de l'ameublement est 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, 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 haussmaniennes.

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



Rénover thermiquement, aussi bien par l'intérieur que par l'extérieur, est désormais soumis aux relatives contraintes de la réglementation thermique sur l'existant. En rénovation, isoler thermiquement relève essentiellement de la déclaration de travaux, mais l'isolation par l'intérieur n'y est pas nécessairement soumise, contrairement à l'isolation par l'extérieur. Or, 70% du territoire français est protégé à un titre ou un autre (zones de protection, secteurs sauvegardés, sites classés, espaces sensibles...). Par conséquent, isoler par l'extérieur est susceptible d'être soumis à l'avis 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 en ZPPAUP (Zone de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager), secteur sauvegardé, site protégé ou dans un rayon de 500 mètres autour d'un monument historique. Toutefois, 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 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 tolèrera 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.

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 vulnérabilités des populations et territoires ?

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). C'est assez délicat étant donné qu'on ne connaît pas du tout 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 prévisionnel simple, en s'appuyant d'une part 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.

Tableau 9 : pertes globales en surface selon mode d'isolation (hypothèse BBC tableau 7 : 23 cm)

catégorie	Isolation par l'intérieur			Isolation par l'extérieur			
	total	m2	perte Surf Hab	appartement	perte S publique	maison	perte S publique
moins de 40 m2	2 227 085	5	8 801 389	1 591 903	994 939	635 182	317 591
de 40 à 99 m2	11 945 064	7	66 424 188	5 320 169	4 655 148	6 624 895	4 637 427
plus de 99 m2	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)

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). 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 dans le tableau 3) côté intérieur se traduirait par une perte en espace habitable cumulée de l'ordre de 128 millions de mètres carrés. La même rénovation thermique menée côté extérieur aurait dix fois moins d'impact, avec seulement 12,5 millions de mètres carrés prélevés sur l'espace public, et encore ce chiffre est-il peut-être surestimé.

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 « péri-urbain » (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%¹⁶. Mais ce serait tout sauf une « green-value ». Ce serait une résultante d'un emballement des marchés sous effet de la diminution la taille moyenne des logements résultant de la rénovation thermique. Avec probablement accentuation de certains phénomènes de gentrification.

On aurait ainsi des ménages « vertueux », nourrissant en finançant des travaux de rénovation la hausse des prix immobiliers et donc les plus values de ménages « moins vertueux » (revendant sans réaliser de 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 pourrons pas amortir, par une plus-value de marché, leurs travaux de rénovation, notamment 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

¹⁶ Il y a problème d'harmonisation : il faudrait établir le tableau 8 sur une base BBC ou le tableau 9 sur une base Passivhaus.

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-villes anciens, donc là où se posent déjà d'importants problèmes de stationnement et gestion des espaces publics. La rénovation thermique devra donc être accompagnée d'un réaménagement des réglementations d'urbanisme (prospect, alignement, COS...) ainsi que 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...), ou les relations entre riverains, usagers, et collectivités (places et horaires de livraison, pistes cyclables, végétalisation...).

Tableau 10 : 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)

[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 9). 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 9 avec les hypothèses de 10 cm en ITI et 15 cm en ITE (tableau 10).

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

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

Le tableau 9 est fondé sur une hypothèse de 15 649 533 résidences principales à 50 kWh/m²/an en 2050, alors que le tableau 10 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% en tout ITE en BBC (tableau 9).

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 épaissements d'isolants sur les surfaces habitables¹⁷, 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.

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.

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 mur épais sont sources 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 construction vernaculaires ont des épaisseurs de paroi plus importantes (granit en Bretagne) que dans d'autres (pans de

¹⁷ 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 se compléter, ou tout au moins nous aurions pu baser les tableaux 9 et x sur des chiffres moins approximatifs.

bois en Lorraine). Mais on a aussi, et sans doute surtout, à l'inégalité de population, voire à la ségrégation : en effet, à part peut-être dans le nord, en milieu urbain l'habitat vernaculaire est souvent valorisé et la vente à plus fort prix est une possibilité de sortie ; en revanche 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 : 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 différenciations décisionnelles, accentuer des inégalités...

En individuel isolé, le propriétaire est censé avec 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 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, la nature du bâti à isoler et les 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 certains lobbies ont obtenu que ce soit la SHON (surface hors œuvre nette), et non plus la surface habitable, qui soit retenue pour le calcul du coefficient d'efficacité énergétique (puissance consommée par heure rapportée au mètre carré). 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. Toutes choses égales d'ailleurs, à même performance énergétique effective les modalités réglementaires de calcul du coefficient d'efficacité énergétique avantagent l'isolation par l'extérieur¹⁸. Et l'avantage va croissant à mesure que l'épaisseur d'isolant augmente.

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 des revendeurs et/ou auprès des conseillers en énergie, avoir le réflexe de faire effectuer plusieurs devis, être capable de comprendre et saisir les 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 et qu'on s'y maintenait.

On peut ainsi citer l'exemple d'un couple qui a fait construire sa maison peu avant la première réglementation thermique mais avait eu le souci d'isoler thermiquement : ils sont persuadés que leur maison est bien isolée thermiquement et ne sentent pas concernés par la rénovation thermique. Se

¹⁸ Sous réserve de la façon dont va être appliqué l'article R 112-2 du Code de l'Urbanisme, tel que modifié par le décret n°2009-1247 du 16 octobre 2009, paru au Journal Officiel du 18 octobre 2009. En effet 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 ». Ce qui introduit le risque d'un usage différencié : SHOB réglementaire pour les calculs de densité pour les règles d'urbanisme, SHON réelle pour les calculs d'efficacité énergétique.

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). Pourtant pionniers de la conception assistée par ordinateur, l'informatique ne fait absolument pas partie de leur quotidien de retraités, Internet et l'ordinateur personnel étant complètement étrangers à leur culture informatique.

Une étude récente de l'INSEE met en valeur que si la part moyenne du budget des ménages de métropole consacré à l'énergie passe de 8% en 1970 à 12% en 1985, puis redescend, il ne sort plus d'une oscillation entre 8 et 9% en dépit des efforts en économies d'énergie [Merceron & Theulière]. Cette étude met surtout en valeur de sensibles 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 en ce qui concerne 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%).

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 » doublée par la « prime SHON », 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...

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. Pour les bâtiments résidentiels, cela signifie, sur la base du tableau 2, de diviser par quatre 126 TWhep, sous réserve que diviser par quatre des consommations d'énergie équivaut à diviser par quatre des émissions GES. Or plus la surface totale de

résidences principales augmente, que ce soit par augmentation du nombre de logements et/ou augmentation de leur surface, plus la performance énergétique de l'ensemble du parc doit être élevée.

Tableau 11 : scénarios de construction et rénovation pour atteindre le facteur 4 en 2050

	logements	kWh/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

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 2012 avec 400 000 logements par an rénovés à la norme 80 kWh/m²/an. Par déduction on obtient ce qu'il reste de logements et donc la performance énergétique à viser : respectivement 13 et 6 kWh/m²/an, soit plus performant que la norme passivhaus.

Dans le scénario de gel, il faut que dès 2012 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.

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 croisière de 400 000 rénovations par an ne le permet pas et/ou des immeubles qu'il n'est pas possible de rénover pour ne pas 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 2012 à 2029 et de logements qui seront construits à la norme « zéro » (0 kWhep/m²/an) dès 2030.

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 un scénario tendanciel mais basé sur la croissance de la population et non pas sur le rythme de construction. L'autre différence est que leur objectif du facteur 4 est basé sur une relative dissociation 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. Ils 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 (à zéro kWhep/m²/an), [Traisnel et al. 2010] atteignent ou dépassent 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 principalement sur le recours à l'isolation par l'extérieur. Hélas, on ne semble pas en prendre le chemin, si on se base sur l'effort de formation actuel en isolation par l'extérieur.

Tableau 12 : estimation des capacités de formation en isolation par l'extérieur¹⁹

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 ?

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 12) 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 obtiens une capacité de formation inférieure à 1 000 diplômés par an. Et encore, avons-nous des sessions plutôt surchargées.

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

¹⁹ Enquête effectuée uniquement sur requêtes Internet. Il est donc possible que nous soyons passé à côté d'une partie de l'offre de formation, notamment celle proposée par les 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.

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'eco-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 outre un problème de formation des formateurs étant donné que la France n'a pas de tradition en isolation par l'extérieur.

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

La théorie de cycle de vie du produit de Raymond Vernon, 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, les marchés des panneaux photovoltaïques ou des pompes à chaleur se prêtent relativement bien à ladite théorie. 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 par conséquent 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 l'isolation, l'eco-prêt à taux zéro fixe d'emblée le seuil minimal de travaux : 20 000 euros. Il nous paraît ainsi très probable que la valeur des travaux de rénovation va se fixer à 20 000 euros et non pas aux 13 000 euros de la valeur moyenne retenue par [Traisnel et al. 2010]. Certes dans le collectif, l'intervention en série autorise de sensibles rabais. Toutefois, seule la maîtrise d'ouvrage sociale et une partie de la copropriété paraît susceptible d'obtenir de telles économies d'échelles. En revanche, dans l'individuel le coût plancher des travaux sera indexé sur les conditions d'octroi du prêt à taux zéro, soit au minimum 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 Rogers, dans sa théorie de diffusion de l'innovation 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).

Nous avons profité de l'occasion de remplacer un chauffe-eau (butane) 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, butane). 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.

En somme, 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 s'engager dans des discussions de marchand de tapis. Qui plus est, 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 est utilisé pour des prestations à petit chiffre d'affaire, et que nous n'ayons 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.

Toujours est-il que plusieurs artisans 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 butane, une fois le devis signé l'artisan se montre moins soucieux du respect des normes, sans doute parce qu'il intervient hors partenariat²⁰.

Le marché du chauffage semble donc symptomatique de ce qu'il risque de se produire pour la rénovation thermique : les artisans ont tendance à privilégier les devis très 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.

LES EVOLUTIONS DES PRATIQUES 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 esthétiques²¹. Pour invalider notre analyse, il faudrait peut-être même une conjonction entre isolants ultra-performants économiquement acceptables et large acceptabilité sociale de la démolition de bâtiments haussmanniens (pour les remplacer par des immeubles à ultra-haute efficacité énergétique).

Tableau 13 : épaisseurs et coût comparés d'isolants thermiques

	BBC U 0,23		Passif U 0,12	
	épaisseur	coût m2	épaisseur	coût m2
laine de verre (0,036 W/mK)	15,7	10	30,0	22
panneau aerogel (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 », et non pas coût et épaisseur finale posé

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 (nécessite 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). Les nanogels sont plus adaptés à la pratique courante mais carrément hors de prix.

²⁰ 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.

²¹ 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/>

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 permettre de 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 9).

À vrai dire, pour honorer l'objectif facteur 4 au vu des hypothèses du tableau 11, ne faudrait-il pas tout simplement remplacer les épaisseurs de laine de verre par des épaisseurs de panneaux à isolation sous vide ? Ne s'orientent-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). 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 sont les réserves pour produire de la laine de roche ? Quelles échéances pour que des polymères à base de mycélium (mycobond) puissent remplacer le polystyrène ?

Avec le tableau 12 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 en conservant les isolants les plus courants, juste en augmentant les épaisseurs d'isolants, pose problème.

En effet, avec les systèmes plus performants que la RT 2005 (BBC « norme » 2005 et BBC « norme » passivhaus) on ne peut plus employer le procédé le plus couramment employé en isolation thermique, la pose par collage en isolation par l'intérieur. Pour le polystyrène, c'est peut-être possible, mais il faudrait vérifier. En revanche, les laines minérales on 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 encastrier un meuble déjà monté, à un système où l'on doit encastrier un meuble livré en 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 collage). 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 1€50 entre les deux plaques²², donc il semble il y a peu de risque de non conformité pour faire des économies d'achat. Et si une plaque 2+8 est légèrement plus lourde qu'une plaque 2+9 (poids à déterminer), 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 13, 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

²² Sur la base du catalogue Bricoman de septembre 2009.

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 ?

II/ CONFORT LIÉ AUX NTIC ET CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Nous avons mené jusqu'ici notre réflexion avec pour toile de fond une approche du confort en ce qui concerne la température ambiante, la disponibilité en espace habitable ; avec quelques digressions sur les axes patrimoine et environnement dans 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 l'audiovisuel-informatique-téléphonie. 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 spécifique²³ : 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.

²³ 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 ?

Nous présentons ici nos premiers résultats de nos réflexions et mesures de consommation. Avant de présenter nos premiers résultats de mesures, nous replaçons la réflexion dans le cadre de l'électrification des usages liés à l'habitat, l'habitat étant lui-même le principal support des sociétés de consommation de masse.

A/ Les nouvelles électrifications de l'habitat :

L'électrification de l'habitat :

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 %. »

Tenter une photographie similaire de la répartition des consommations d'énergie en 1804 ou en 1904 aurait probablement montré une répartition différente, ou tout 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 des nouveaux chemins.

En trois décennies, la consommation unitaire moyenne d'électricité spécifique des logements a plus que doublé passant de 14 KWh/m² en 1973 à 29 KWh/m² en 2005²⁴. 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, étant donné 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. En outre,

²⁴<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>

l'usage « nomade » tend à revenir vers la prise de courant, au regard de la montée en puissance de la pile/batterie rechargeable.

Un bref aperçu de l'électrification de l'habitat est nécessaire à notre propos. Une frontière constamment repoussée. Elle s'est appuyée sur : électrification 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 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 de la consommation d'appareils peu utilisés, nouveaux appareils ;
- nouveaux usages électriques : électrification de fonctions non électrifiées.

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 du concept 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 faire un tour dans 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 13 petit électroménager. Il y aurait près de 500 millions 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 autorisé, 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, Facebook, cadres photo LCD...), et des tentatives sont en cours dans le domaine du livre avec le livre électronique...

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 : 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...)

Les lecteurs de livres numériques ou eReaders : les concepteurs de l'iPad espèrent une révolution dans les livres électroniques (e-book) comme celle qu'à provoquée l'iPhone dans la téléphonie mobile. Les livres électroniques les plus récents, 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.

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 la même famille / occupant, soit 16,13% du total. Ce chiffre monte à près de 30% si on considère les résidences principales occupées au moins 20 ans par la même famille / occupant, 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.

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 nucléaires²⁵.

Les efforts des fabricants pour diminuer les consommations électriques

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

En 1992 les Etats-Unis ont implémenté Energy Star, un 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 programme Energy Star en ce qui concerne les équipements de bureau

²⁵ <http://www.liberation.fr/terre/0101567241-les-gadgets-electroniques-menacent-le-climat>

(informatique). Est ainsi proposé un calculateur permettant de choisir les équipements au meilleur rendement énergétique²⁶.

Ces deux éléments ont participé, via 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 aux effets du label Energy Star. Les efforts sont réels, mais on n'en note pas moins des effets pervers.

Par exemple, pour ce qui est de l'étiquette-énergie pour les machines à laver le 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 kilog 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 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 aménager 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 kg²⁷. Par ailleurs les fabricants font porter leurs efforts sur le cycle « blanc » 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.

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* »²⁸. Cet organisme justifie ainsi le mérite de réfrigérateurs et congélateurs grande capacité parce « 33% des français n'aiment pas

²⁶ <http://www.eu-energystar.org/fr/index.html>

²⁷ 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. Toutefois une étude américaine 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 [Sorrell p. 35].

²⁸ <http://www.gifam.fr/index.php?id=59>

faire les courses », les lave-linge et sèche-linge de grande capacité parce que les français n'aiment pas les corvées de linge et vaisselle, les lave-vaisselles 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 ».

Sur la base de nos mesures²⁹, lesquelles mettent en évidence une relative diminution des consommations en fonction de la charge, on peut 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. Nous sommes un peu plus sceptique pour un lave-vaisselle, où c'est plus le nombre et dimensions d'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 (car arborant l'étiquette énergie de la partie électrique). La stratégie de l'électroménager grande capacité est donc susceptible d'être un important réservoir à effet rebond.

Pour ce qui est du label Energy Star, 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. La tendance est à proposer des écrans de plus en plus grands, et ce de façon générale, aussi bien pour les téléviseurs, les ordinateurs ou 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 : si on regarde du côté des téléviseurs, il est courant de trouver des écrans 40 pouces, avec des consommations allant de 72 à 180 Wh selon les modèles ; un écran 42 pouces (plasma) consomme 175 Wh, un 46 pouces (LCD LED) 105 Wh, un 55 pouces (LCD LED) 220 Wh... Nous nous sommes procuré le dossier technique sur les téléviseurs de la FNAC : le modèle qui consomme le moins (60 W) est un 32 pouces (LED direct) et celui qui consomme le plus (430 W) est un 65 pouces (plasma).

²⁹ Effectuées à diverses charges et cycles sur une Candy Activa Smart 12 à charge maximale de 5 kg âgée de 10 ans. La valeur de nos mesures ne va pas au delà de vérifier qu'après 10 ans de fonctionnement cette machine adapte sa consommation à la charge. Nous n'avons pas mesuré si, en fonction de la charge et du cycle, les performances de consommation sont constantes.

Il est d'ailleurs à signaler que la FNAC a établi un classement « carbone » des téléviseurs qu'elle vend : les grammes équivalent CO₂ sont calculés à partir de la consommation électrique des téléviseurs. Mais ce calcul est essentiellement basé sur les données fournies par les constructeurs, même si la FNAC s'engage à « *contre tester de manière aléatoire certains modèles, afin de vérifier les données utilisées* ». Or, 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 est inférieure à la puissance nominale, dans d'autres cas les deux valeurs sont identiques³⁰.

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 également l'apparition des claviers rétro-éclairés, à alimentation minime mais alimentation quand même.

Pour la substitution des adaptateurs secteur par le port USB, 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.

Il n'est d'ailleurs pas impossible que les adaptateurs secteurs classique disparaissent au profit des adaptateurs secteurs 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 certains nombre d'usages existants ou de nouveaux usages dessus. Avec le risque que, disposant d'une 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.

³⁰ 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.

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.

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, notamment en raison de « l'effet mémoire ». Les chargeurs les plus récents de qualité sont censés annuler cet effet mémoire. Néanmoins la durée de vie d'une batterie est limitée et, surtout, nous avons pu observer un comportement de 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 W. Sous réserve de la fiabilité de nos mesures, le courant de fuite est d'environ 0,2 W ce qui est susceptible de mettre le téléphone à plat en 30 heures, sous réserve qu'il ne soit pas moindre lorsque le chargeur n'est pas connecté³¹. On semble observer en tous cas un rapprochement des fréquences de chargement (tous les 2 jours) au regard des fréquences initiales (tous les 3 à 4 jours)

On peut aussi citer le cas en informatique des antivirus. La capacité des disques durs n'a cessé d'augmenter (on atteint maintenant des 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 réduire sa consommation. Par exemple, sur un iMac 600 la consommation descend à 81 Watt en veille écran mais remonte à 90/91 Watt pendant l'activité de l'antivirus, 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 en plus qui multipliés par

³¹ 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 [Suchon 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 obtiens 1,8 kWh par an.

le nombre d'ordinateurs finissent par représenter une consommation annuelle de plusieurs giga watts heure.

Certes le tableau n'est pas complètement noir. Ainsi, des constructeurs, tel Sharp avec le SH002, 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 (greenwashing) 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, ou que les consommateurs inventeront.

B/ Résultats de mesures (wattmètre)

De sérieuses difficultés dans la mesure :

Nous avons connu des problèmes de mesure. 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 des wattmètres non professionnels est qu'ils comportent 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 d'analyse de données est d'emploi complexe et son manuel est en allemand. Malgré les performances des outils de traduction disponibles sur Internet, nous n'avons pu intégrer au présent travail qu'une infime partie des analyses qu'étaient censées autoriser notre matériel³². 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 à faibles puissances ; le temps de mesure n'est calculé que pour les puissances supérieures à 1 W, quand bien même si l'appareil détecte des puissances à partir de 0,1 W. Nos résultats ne peuvent donc être considérés que comme des ordres de grandeur.

Ce qui nous a été signalé, après avoir approché EDF : il apparaît que nous disposons de simples indicateurs de consommation. Nous avons été informés que pour effectuer des mesures à la prise, il suffisait d'acquérir un wattmètre professionnel et de lui adjoindre une prise, en bricolant un peu. En tenant d'approcher M. Sidler sur le matériel de mesure qu'il utilisait, 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 W

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 watt heure mesurés par IDK MPM50 correspondent à ampère x volt x facteur de puissance. Le 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 ordinateur³³. Mais s'il est certain que nous n'avons pas des appareils de mesure de qualité professionnelle, nos résultats sont probablement très proches de ce que mesure un compteur EDF.

³² 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 exploiter toutes ses possibilités.

³³ <http://forums.futura-sciences.com/electronique/3862-wattmetre-pfc.html>

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. 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 quotidiens.

Présentation de résultats et commentaires :

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 de ce travail en cours est 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).

Le tableau 14 doit nous servir à bâtir notre 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 en termes de traitement et de mise à disposition de l'information, sont-elles susceptibles de gonfler les consommations en électricité des résidences principales ? À partir des consommations constatées, d'une part, et de celles attendues, d'autre part, on produit sur la dernière colonne du tableau 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...

Les mesures et observations qui sous-tendent le tableau 14 nous permettent également de structurer la prospective sur les stratégies des industriels de réduction des consommations de leurs produits, laquelle participera à l'élaboration du scénario de pondération. Ainsi nous avons pu déjà faire émerger certains points sensibles sur lesquels faire porter les efforts de prospective :

- 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, soit étiquette A. Toutefois dans le manuel constructeur l'étiquette-énergie était B, avec une consommation annuelle de 384 kWh. En raison du fait que sous 18° C il faut allumer une lampe 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. Cette ampoule consomme environ 5 Wh.

C'est à creuser, mais ce problème ne serait 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 dans ce type de garage. Sur six mois de saison de chauffe continue 5 Wh représentent 22 kWh. Auxquels il faut rajouter la consommation pour compenser la chaleur produite par cette lampe.

Sur la base des études de 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 représentatif du parc de logement français : en pavillonnaire, 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.

Ce qui consomme le plus pour une machine à laver c'est chauffer l'eau de lavage. Toutefois, en procédant à des mesures à 60° C à des écarts apparemment minimes (100g de linge, vitesse légèrement moindre d'essorage) on relève des écarts d'une soixantaine de Wh dont il nous faut trouver les raisons³⁴. Toutefois ce qui fait varier nos calculs n'est pas tant la consommation relevée sur le cycle : elle est souvent proche de 1,3 kWh. C'est le temps total du cycle qui varie, et fait donc varier la consommation rapportée à l'heure. Par rapport à la consommation affichée sur l'étiquette-énergie (0,95 kWh le cycle), on a un écart de 27% ce qui est susceptible de se traduire par un dérapage en consommation annuelle de 63,7 kWh.

L'inadéquation des mesures entre l'établissement de l'étiquette-énergie et les comportements de consommation serait donc susceptible de se traduire, si elle se vérifiait systématiquement pour les 25,4 millions de résidences principales de 2004 (tableau 1), par une surconsommation de 1,62 TWh. Ce qui

³⁴ Il aurait fallu effectuer un étalonnage sur la base des paramètres de calcul de l'étiquette énergie, ce que nous n'avons pas fait.

serait perceptible au niveau de la consommation finale totale des logements quoique dans de faibles proportions (0,3%). En revanche, ce seul chiffre représenterait plus de 3% 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, près de 19% d'une centrale nucléaire (8,58 TWh pour 1 300 W de puissance installée)³⁵.

L'affichage digital (petit écran à cristaux liquides) de l'heure sur un micro-ondes requiert en moyenne 2,5 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 consommation peut ainsi fluctuer de 0,8 W. Ce problème est démultiplié par le nombre d'appareils comportant un affichage de l'heure impossible à désactiver autrement qu'en éteignant l'appareil, et donc à devoir effectuer une reconfiguration à chaque fois. Sur une chaîne Hi Fi Yamaha l'horloge fait varier la consommation de seulement 0,3 W mais sur une consommation ne descendant jamais sous 5,6 W. En revanche sur une gazinière Brandt la variation de l'horloge est de 0,1 W pour une consommation ne descendant pas sous 1,8 W, ce qui souligne l'importance des gisements de progrès et d'harmonisations.

On a un autre exemple d'affichage lumineux informatif : 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. Il est facile de désactiver et réactiver ces LED, sous réserve d'avoir la curiosité d'examiner l'interface de contrôle de la « NeufBox », car cette fonctionnalité n'est pas signalée dans le manuel d'utilisation.

L'écart de consommation entre la « NeufBox » avec LED activés et LED désactivés n'est que de 2 Wh, soit un écart de 730 Watt 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)³⁶. 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.

³⁵ 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.

³⁶ France métropolitaine, 4492 MW en éolien et 272 MW en installations photovoltaïques (sources : Wikipédia ; ERDF)

Nous avons signalé plus haut que nos mesures de consommation d'énergie sur un ordinateur à écran cathodique, avaient mis en évidence un écart jusqu'à 5 Wh, 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 incidence éventuelle de la connexion Internet WiFi). Sur un téléviseur (écran cathodique) des variations jusqu'à 33 W (37% de la puissance) qui pourraient aussi être liées à la colorimétrie. Nous avons également noté des variations sur un baladeur Archos 3 mais la relation à la colorimétrie est plus incertaine³⁷.

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

³⁷ 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 (came scopes, appareils photo, baladeurs, webcams...).

Tableau 14 : 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			
	bureau foncé	16,5		
	bureau clair	16,5		10,3
	interactif net			
	veille écran seul			
	veille			
	arrêt	0,5 à 1,5	12 à 36	
	recharge	51		
imprimante laser	impression			
	veille	5,5	132	48,2
lecteur disquette	lire-écrire	2,5		
	affichage	0,5		
baladeur MP4	affichage propre	1		
	affichage ordinateur	1,5		
	recharge	2,5		
	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	2,5	60	21,9
	cuisson pizza	200		23,6
chaîne Hi-fi moyenne 12h/semaine 2h /semaine	programmation	+ 0,2	+ 4,8	
	veille	5	120	40,2
	radio	18		11,23
	marche divers	61,23		6,4

iTunes + chaîne HiFi	connexion via aux.	9,6	230,95	84,60
éclairage	hypothèse 40% ³⁸			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	9,63
mobile iphone 3GS		5	30	10,95

Quel impact en consommations énergétiques ? Sur le portable testé une opération de maintenance augmente la consommation de 10 W par rapport à la consommation lorsque le disque dur ne tourne pas : en bureautique, on est souvent à 16,5 W, mais lorsque la maintenance s'effectue, souvent en fond de tâche, 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 doit être possible de connaître les temps de mises à jour Vista et Windows 7 et estimer les consommations électriques qu'elles induisent.

Le tableau 14 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 obtiens une consommation annuelle moyenne de 2639 kWh par logement. Sur la base du tableau 14 nous obtenons 1448 kWh, soit 15,91 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 1100 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) 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 14 est la suivante : froid (367 kWh / 25%), éclairage (159 kWh / 11%), lavage (237 kWh / 17%), autres (685 kWh / 47%). Sidler obtiens 636 kWh pour le froid et 365 kWh en éclairage sur

³⁸ Hypothèse d'un équipement « tout fluo-compact ». Sur la base d'un éclairage représentant 15% de la facture électricité spécifique (donnée Ademe). Les fluo compacte 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).

son étude de 2008, soit le double de nos valeurs, mais sa présentation ne permet pas de reconstituer l'ensemble des usages spécifiques.

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 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 14 à une consommation par habitant avant de transposer à une consommation par m². Ce que tend à conforter la comparaison avec l'étude de Sidler : la plupart des postes du tableau 14 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 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 1975. On peut en déduire que les français se sont massivement équipés entre 1975 et 1990 (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 15 : 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 leur 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].

Où vont passer les économies de chauffage ?

La consommation unitaire moyenne totale d'énergie du secteur résidentiel a baissé de 41% entre 1973 et 2005, passant de 365 à 215 kWh/m². Il est prévu, à partir de 2012 l'instauration d'une réglementation thermique applicable aux logements existants imposant une consommation unitaire moyenne d'énergie inférieure ou égale à 80 kWh/m². Sous réserve qu'il s'agisse de chiffres comparables, on aurait donc ainsi une baisse d'au moins 63 % de la consommation d'énergie pour au moins 19 millions de résidences principales (tableau 2). Sur la base du régime de croisière attendu de l'éco-prêt à taux zéro (400 000 rénovations par an), cette baisse serait effective pour plus de 3 millions de logements d'ici 2020. On aurait un dégagement théorique d'épargne nettement plus sensible sur le budget de certains ménages que la baisse de 41% des consommations d'énergie en 32 ans.

Ce dégagement théorique d'épargne n'est-il pas susceptible de nourrir des consommations d'énergie ? Autrement dit les économies de chauffage ne risquent-elles pas d'alimenter des consommations d'énergie, réduisant ainsi l'importance des dites économies. Nous nous intéressons donc aux effets rebonds : les dépenses d'énergie provoquées par les économies d'énergie.

Si l'on reprend [Sorrell] les effets rebonds peuvent se décomposer entre : effets directs, indirects, globaux. Si on s'intéresse uniquement 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, suggèrerait que ceux-ci sont supérieurs à 50%.

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 électro-domestiques. 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 dérapier 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...

Tableau 16 : 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

Ce tableau 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'améliorations 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 15).

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 pré-payés : 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 téléphone... 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 plus gros consommateurs le cumul téléphone mobile + « triple play ». Cumul devenu intolérable très 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 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, radio-cassettes, 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 le constater avec le relatif succès des chargeurs sans fil, dont l'efficacité énergétique serait pour l'heure déplorable. 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]. Cette transition est soutenue par une incitation à la consommation via les forfaits et accompagnée d'une foultitude 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 finit 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 ? 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 déraiper 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 moderne. 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, concomitante à l'émergence du chauffage central 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).

Après la seconde 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, radio-cassette, walkman, téléphone portable, ordinateur, baladeur...). On assiste à une inversion du mouvement : le confort domestique tend à être transposé à l'extérieur.

Tableau 17 : 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
Magnéscope / lecteur de 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

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 réglementaires 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 mondiale ?

Notons toutefois que la nominalisation 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 été occulté par les règles déontologiques du corps médical, en général, les modalités de fonctionnement 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.

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.

Facteur de puissance et effet joule :

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 tension³⁹.

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 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, 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). Lorsque 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 : $P = U \times I \times \cos \phi$. 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.

³⁹ 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.

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 10,89 A, alors qu'elle aurait été de 4,35 pour un facteur de puissance de 1. 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 (voir grilles tarifaires des distributeurs).

En ce qui concerne la rénovation énergétique, 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, de même que le remplacement d'une lampe à incandescence par une lampe fluo-compacte. 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.

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). La généralisation de bâtiments à « énergie positive » peut être un facteur de risque supplémentaire, en cas de malfaçons ou de pannes affectant le comportement des onduleurs.

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 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 à 0,67, des ordinateurs entre 0,45 et 0,60. 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'il n'y a pas encore harmonisation des pratiques en ce qui concerne le facteur de puissance.

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. Tôt ou tard il y aura négociation entre acteurs pour la prise en charge des coûts et répercussion de ces coûts sur les usagers⁴⁰... Plus tôt sera correctement anticipée cette question plus les solutions pourront être, sinon consensuelles, du moins satisfaisantes pour les parties.

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).

Dans des logements pas ou peu isolé 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. Les concepts BBC et BEPOS sont d'ailleurs basés sur la prise en compte des apports internes, qui en conjonction avec les apports solaires sont censés substantiellement réduire les consommations chauffage⁴¹.

Et plus les logements seront 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 sonde dans le salon, la salle de bain et la chambre des parents, mais qu'un enfant se trouve dans une chambre sans sonde 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).

⁴⁰ 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.

⁴¹ Le chauffage d'un pavillon BEPOS à Verrière-le-Buisson a été calibré sur 50% d'apports gratuits (32% internes, 18% solaires).

[Sidler p 43] a ainsi pu observer 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] 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 [Sidler 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, mais la résistance elle ne change pas.

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. Ces 75 Wh, soit 41,2 Wh de puissance active (facteur de puissance de 0,55), sont la consommation d'un ordinateur de bureau (iMac 600) en veille et d'une Neufbox raccordés à une prise parasurtenseur.

À vrai dire, la valeur de l'équivalent de 4 minutes et 2 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 est probable que la température dégagée soit un peu plus élevée que cet équivalent de 4 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)⁴².

L'importance de la chaleur dégagée par cet ordinateur tient, entre autres, à ce que 50% de l'électricité consommée par un ordinateur est 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

⁴² 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 utilisée étant trop sommaire et le nombre de paramètres de comparaison pris en compte trop insuffisant.

remet en cause la distribution en courant alternatif, soit on tente de prendre en compte ces déperditions dans le calibrage des système de chauffage et de climatisation. En tous cas, il paraît de plus en plus difficile d'ignorer cette délicate question⁴³.

En synthèse, les politiques d'économies d'énergie récentes induisent des phénomènes complexes. D'abord, parce qu'elles se font dans un contexte de fort équipement et rééquipement en matériel électrique domestique : les économies en chauffage, déjà sujettes à effet rebond, pourraient être perdues, dans des proportions pour l'heure non connues, dans l'essor des consommations électriques spécifiques. Les mesures au wattmètre permettent de connaître les comportements effectifs des appareils, d'une part, des consommateurs d'autre part. Mais si les données sur les comportements des appareils font avancer les connaissances, par palliement aux déficits d'information des fabricants et/ou confrontation aux standards d'efficacité énergétique, en revanche les données relatives aux consommateurs sont d'utilisation plus délicate.

En effet, il y a d'importantes lacunes dans la connaissance fine des consommations électriques domestiques (absence de statistiques) et il est délicat d'extrapoler sur la base des données récoltées. Qui plus est, si EDF réalise des enquêtes auprès de ses consommateurs, sa privatisation et le contexte concurrentiel on conduit à considérer ces données comme stratégiques et à ne plus accepter de les communiquer. Cette absence de référence statistique fait écho à l'absence d'études sur les effets rebonds. L'essor de ventes de wattmètres aux particuliers pourrait être un moyen de combler ces lacunes : en menant des recherches s'appuyant sur la participation active et volontaire des ménages, à savoir des enquêtes participatives de type « grid-based » (les données sont renseignées sur un site par les enquêtés). Les projets de smart grid sont compatibles avec ce concept, permettant a priori de se dispenser de wattmètre, substitués par les compteurs intelligents.

Les politiques énergétiques en conjonction avec l'essor soutenu des usages spécifiques ont également d'autres impacts : modification des facteurs de puissance des récepteurs et donc augmentation des coûts de production et distribution d'électricité ; hausse de la part des apports gratuits par effet joule à mesure que les logements acquièrent une forte isolation thermique. Ces apports sont censés être pris en compte dans la configuration des bâtiments BBC et BEPOS. Mais comment effectuer des calibrages corrects si les comportements de consommation électricité spécifique sont très mal connus et en pleine mutation ?

Il y a là aussi nécessité d'études et enquêtes, à l'aide de wattmètres voire de capteurs de températures. Des enquêtes participatives à base Internet pourraient être éventuellement intéressantes. Les compteurs intelligents pourraient éventuellement être configurés pour fournir des informations à cet égard, mais ça risquerait d'être à double tranchant (tentation pour les distributeurs de facturer). Sachant que la

⁴³ [Sidler] 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 de Enertech.

connaissance des comportements électricité spécifique est une chose, le calibrage des systèmes de production d'énergie sur des comportements électricité spécifique réellement stables dans le temps en est une autre.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, nous avons pu mieux caractériser l'ampleur attendue de la rénovation thermique, son impact sur la surface habitable et son articulation avec les pratiques existantes au niveau des ménages et des entreprises, en particulier dans l'approche des effets rebond liés aux consommations électriques.

La rénovation thermique est génératrice de perte d'espace et donc d'accentuation des 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 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 zone urbaines très denses.

Pour les consommations électriques, nous avons souligné l'incidence globale des petites consommations, même s'il faudrait plutôt ramener les consommations aux mètres carrés disponibles par habitants, pour relativiser les consommations rapportées aux mètres carrés par logement. Certaines de ces petites consommations (baladeurs MP3, appareils photo, téléphones portables...) pourraient-elles être satisfaites par des chargeurs solaire que l'on trouve de nos jours sur le marché pour une trentaine d'euros ? Quelles sont leurs performances ? Une piste pourrait être d'utiliser le photovoltaïque pour la recharge des appareils et l'alimentation des veilles au lieu de revendre l'électricité solaire à EDF. L'alternative des chargeurs face aux réseaux d'alimentation électrique est à considérer dans les scénarios postcarbone.

Nous avons produit des scénarios qui rendent assez pessimistes quant aux chances d'atteindre le facteur 4 en ce qui concerne le résidentiel d'ici 2050. On pourrait produire les relativisations suivantes :

- le métrage total reste constant, tout ITE, la croissance du nombre de résidences s'obtient par partitions des logements ;
- le métrage total reste constant dans le neuf, mais diminue dans la rénovation, car on est en tout ITI ce qui diminue les volumes à chauffer/rafraîchir (donc amputer du métrage moyen obtenu dans le tableau comparatif tout ITE / tout ITI).

Autrement dit, les chances d'atteindre le facteur 4 augmentent si on diminue la surface par logement, à savoir si on n'augmente plus la superficie totale, la croissance démographique étant absorbée en augmentant le nombre de logements (donc la densité résidentielle).

La seule chance d'atteindre le facteur 4 dans nos scénarii pessimistes réside dans les performances des bâtiments dits à énergie positive. Mais nous sommes dubitatifs quant à la pertinence de ce concept.

Le bâtiment / quartier à énergie « positive » nous paraît être surtout une technique de correction de cap dans l'objectif du facteur 4 : on espère compenser les consommations des uns par les productions des autres. Sauf que la médiation entre « l'offre » et la « demande » est effectuée par ERDF. Et que ERDF est loin d'être indépendant de EDF, laquelle a fait le choix du nucléaire. Et quand bien même, ERDF deviendrait indépendant, il est probable qu'il faudrait que les tarifs de l'électricité soient multipliés par plusieurs décimales pour que l'écoulement de la production des bâtiments / quartiers à énergie « positive » puisse compenser celle des bâtiments/quartiers à énergie « négative » par l'entremise du réseau ERDF.

Qui plus est, le bâtiment à énergie « positive » n'est pas nécessairement la résultante d'une continuelle amélioration des performances des isolants et des systèmes énergétiques : on peut passer de 50 kWhep/m²/an à -5 kWhep/m²/an sans nécessairement passer par l'étape des 10 kWhep/m²/an, par exemple. En effet, barder un bâtiment de 50 kWhep/m²/an de panneaux photovoltaïques suffit pour le transformer en bâtiment à énergie « positive ».

Enfin, et surtout, le concept BEPOS (bâtiment à énergie « positive »), tout comme le concept BBC, intègre pour une part significative les apports internes électrodomestiques dans le calibrage des systèmes de production de chauffage / rafraîchissement. Or les comportements électrodomestiques sont extrêmement mal connus, dans leur diversité, évolution et effets rebonds.

Il apparaît nécessaire de donner davantage de profondeur au concept, en travaillant les performances des isolants et systèmes énergétiques, d'une part, le stockage de l'énergie produite d'autre part. Ce concept ne nous paraît viable qu'à cette condition, et encore faut-il travailler ses caractéristiques environnementales (impact environnemental de la production et du stockage de l'énergie solaire...) et l'adaptation aux comportements des habitants.

Nous n'avons pas intégré pas les performances des système énergétiques, à la différence de [Traisnel 2010]. Toutefois, cette étude ne prend pas en compte les effets rebonds. Or, l'hypothèse d'effets rebonds globaux de 50% n'est pas improbable, ce qui signifie que dans les scénarii [Traisnel 2010 p. 7] on atteindrait, en énergie primaire, au mieux facteur 2,5 (scénario ELEC/BOIS/GAZ) au pire facteur 1,25 (scénario ELEC/BOIS/GAZ), à savoir que le facteur 4 n'est atteint en aucun cas. D'où l'importance de

faire progresser la connaissance des effets rebonds, notamment en ce qui concerne les interactions entre efforts de secteurs.

En synthèse, il apparaît que l'atteinte de l'objectif de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre en 2050 requiert des efforts importants de rénovation des logements. Mais ces efforts se traduisent par des augmentations d'épaisseurs d'isolants telles, qu'elles accentuent les inégalités par les pertes induites en espace, et mettent en valeur qu'une fraction non négligeable du parc existant ne pourra pas satisfaire aux exigences de performance.

Dès lors, l'atteinte du facteur 4 repose sur un relèvement des performances de la construction neuve. Dans un contexte où les économies en production de chaleur risquent d'être en partie perdues dans les augmentations des consommations électrodomestiques, alors même que ces consommations électrodomestiques sont essentielles dans le calibrage des consommations des concepts BBC et BEPOS. Il n'y a alors pas d'autre alternative qu'un effort important de recherche dans la caractérisation des comportements de consommations électriques des ménages et des effets rebond liés. Sachant que la connaissance des comportements électricité spécifique est une chose, le calibrage des systèmes de production d'énergie sur des comportements électricité spécifique réellement stables dans le temps en est une autre.

Le contrôle des effets rebonds passe par leur identification précise et une prise de conscience. La démocratisation des appareils de mesure de consommations peut être un pas important en ce sens. Le déploiement prévu des compteurs intelligents peut être un levier mais aussi un frein. 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. En tous cas, la forte démocratisation d'outils de mesure de consommations auprès des usagers pourrait faciliter une limitation des effets rebonds. D'une part, les usagers pourraient prendre conscience des consommations insoupçonnées et non désirées ; sous la très forte réserve qu'une prise de conscience puisse modifier l'inertie des habitudes [Strengers]. D'autre part, ils pourraient contribuer à améliorer les connaissances, par exemple en participant à des enquêtes participatives par renseignement via un site Web dédié. Ce qui suppose que la popularisation des wattmètres se fasse sur une base d'appareils sensibles dès 0,01 W la sensibilité des wattmètres domestiques actuels étant trop insuffisante (5 W).

Une suite possible du présent travail serait également de tenter d'estimer l'impact des épaissements d'isolants sur les surfaces habitables (par exemple avec Énerter-Résidentiel). Pour tenter d'approcher l'impact des pertes en surface sur la structuration des prix immobiliers (par exemple avec PERVAL), et 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...

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.
- 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
- 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.
- 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
- 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
- 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.
- 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.
- 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
- Estlimbau (P.), Méthode d'évaluation « in situ » du coefficient de déperdition thermique d'un mur, Paris, CFE, sd, 15 p.
- Ellis (M.), Jollands (N.), Gadgets and gigawatts : policies for energy efficient electronics, OECD / International Energy Agency, Paris, 2009, 420 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
- 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
- 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.), étude critique de la notion de patrimoine en droit privé actuel
- 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-Mueller (D.), dans Source D'architectures, n° 153, mars 2006, pp. 27-36, 56-58
- Lelu (P.), (dir.), Connaissance de l'habitat existant : un bâti en pierre en Franche-Comté, Besançon, EDF-ARIM, 1979, 87 p.
- Leroi (P.), Mettetal (L.), Le parc francilien : les enjeux énergétiques dans l'habitat et le tertiaire, dans Cahiers de l'IAURIF, n°147, février 2008, pp. 60-68
- Matana (M.), Isolation : réglementation, murs, planchers, toitures, vitrages, Paris, Syros Alternatives, 1992, 125 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.
- Mortier (E.), Amélioration énergétique des bâtiments existants : les bonnes solutions, Paris, SEBTP, 2004, 180 p.
- 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.
- 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 bâtiment ; rapport du groupe de travail, Conseil Général des Ponts et Chaussées, 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.
- Pezeu-Massabuau (J.), Éloge de l’inconfort, Marseille, Parenthèses, 2004, 105 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
- 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.
- Rybczynski (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.
- Simard (E.), Les matériaux traditionnels dans une perspective de construction résidentielle durable : analyse comparative, mémoire, Québec, Université de Sherbrooke, 2009, 179 p.
- 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.
- 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.