

Isolation dans l'habitat : la chimie pour ne pas gaspiller de calories !

Jean-Claude Bernier est professeur émérite de l'Université de Strasbourg. Il a été directeur de l'École nationale supérieure de chimie de Strasbourg, directeur scientifique du Département des sciences chimiques du CNRS et il est actuellement vice-président de la Société Chimique de France (SCF¹).

Le coût de plus en plus élevé du carburant, du fioul, du gaz et même de l'électricité invite à faire des économies pour le chauffage des habitations et pour le transport. Le comportement « éco-citoyen » incite lui aussi à diminuer toutes les causes de production de gaz à effet de serre, notamment le CO₂. La montée en charge de l'exploitation des sources alternatives d'énergie – le soleil (voir les **Chapitres de D. Lincot, D. Plée et D. Quénard** sur le photovoltaïque), le vent, la biomasse (sujet abordé dans le **Chapitre de D. Gronier**) – répond partiellement à ces préoccupations mais elle reste

souvent coûteuse et marginale. En fait, il faut d'abord se mettre en tête que :

« L'énergie la moins chère et la plus écologique est celle qu'on ne dépense pas. »

Ce devrait être la première priorité qu'ont comprise nombre de gouvernements en encourageant par exemple le « down sizing » en automobile et les crédits d'impôts pour les investissements d'économie d'énergie dans l'habitat. Une nouvelle campagne de « chasse au gaspi » doit être encouragée prônant le « négawatt » par opposition au « mégawatt ».

1. www.societechimiquedefrance.fr

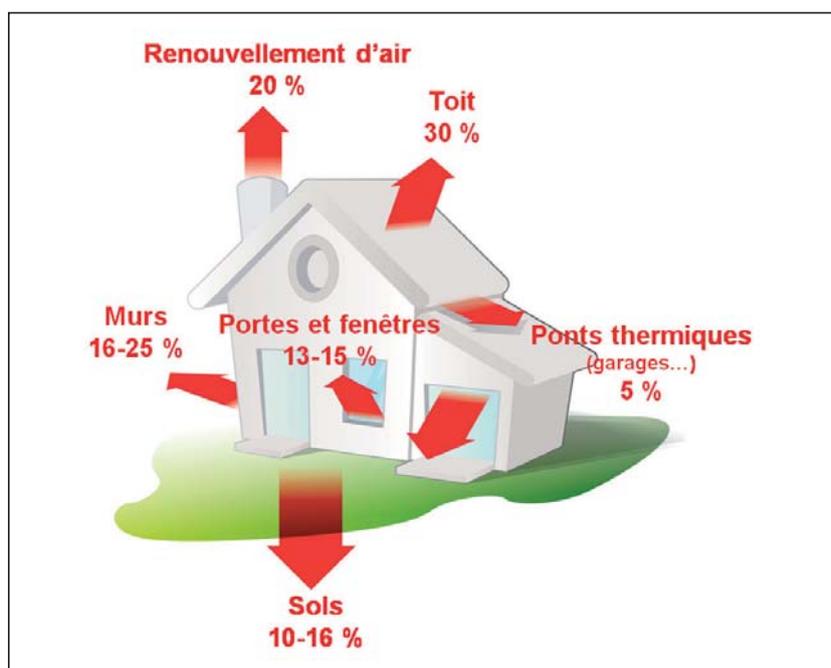


Figure 1

Les pertes de chaleur d'une maison peuvent s'effectuer de multiples manières : par le toit, les systèmes de ventilation, les murs, les sols, les portes et fenêtres, ou encore par les ponts thermiques.

Quand on chauffe une maison ou un appartement, les échanges de température avec l'extérieur occasionnent des pertes de calories. On estime qu'elles sont de 16 à 25 % par les murs, 13 à 15 % par les portes et fenêtres, 30 % par la toiture, 10 à 16 % par le sol et 5 % par les ponts thermiques² (Figure 1). Une bonne isolation permet de réaliser plus de 35 % d'économie de chauffage et de grands progrès ont été faits depuis 1973, date de la première crise pétrolière en France. La réglementation thermique (voir le **Chapitre de D. Quénard, Encart : « La réglementation thermique (RT) »**) et l'apparition de matériaux isolants efficaces ont abaissé la consommation moyenne d'énergie de 375 kWh/m²/an en 1973, puis à 250 kWh/m²/an en 2006.

2. Un pont thermique est une zone qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente une variation de résistance thermique (à la jonction de deux parois en général).

Il reste cependant une grande marge de progrès pour atteindre les performances de basse consommation situées à 50 kWh/m²/an (voir le paragraphe 3.1), mais les perspectives sont grandes, comme le montrent les nombreuses réalisations décrites dans cet ouvrage. L'amélioration du rendement et de l'efficacité énergétique des 30 millions de logements représente pour la France d'ici 2020 et 2050 un immense chantier, particulièrement pour l'habitat ancien, et un important business ainsi qu'un gisement d'emplois remarquable.

Dans les lignes qui suivent, nous essayerons de donner quelques précisions sur les définitions, les matériaux, les objectifs et les réalisations en matière d'isolation thermique dans le bâtiment.

1 Quelques principes sur l'isolation thermique

Lorsqu'un corps ou une paroi sépare deux zones à des températures différentes, $T_1 \geq T_2$, les lois de l'équilibre thermodynamique font que les calories diffusent à travers cette paroi si elle est conductrice de la chaleur. Le flux ne s'arrêtera que lorsque $T_1 = T_2$ (Figure 2). Si T_1 reste supérieure à T_2 , le flux sera permanent de T_1 vers T_2 . Ce flux est plus ou moins fort suivant la résistance thermique R de la paroi :

$$R = e/\lambda S$$

avec :

- e l'épaisseur de la paroi (en mètres) ;
- λ la conductivité thermique, exprimée en watt par degré

Kelvin et par mètre (W/K/m), qui est une caractéristique d'un corps. On peut s'en apercevoir si l'on dispose d'une casserole en cuivre avec un manche en métal et une casserole en inox avec un manche en bois ou en plastique, on se brûle la main bien plus facilement avec la première qu'avec la seconde. C'est que le cuivre et les métaux sont plutôt bons conducteurs de la chaleur, alors que le bois ou le plastique sont plutôt de médiocres conducteurs ;

– S la surface de la paroi, en mètres carrés.

Plus R est grand, plus la paroi est isolante et le flux de chaleur est ralenti ; plus R est petit, plus la paroi est conductrice et le flux de chaleur accéléré.

On définit également la conduction U comme l'inverse de la résistance en W/m²/K. Le flux de chaleur se définit comme proportionnel à la conductivité λ et à la différence de température ΔT sur la distance Δx : $\Phi_x = -\lambda \cdot \Delta T / \Delta x$. Le **Tableau 1** donne quelques valeurs de conductivités λ .

Ce tableau montre que ce sont les métaux qui sont les meilleurs conducteurs de la chaleur et donc les moins bons isolants. Le verre et le béton conduisent la chaleur mais raisonnablement. Le bois, le polystyrène expansé (voir le paragraphe 2.2.3), la paille et la laine de verre (voir le paragraphe 2.2.2) sont de bons isolants (**Figure 3**), l'air sec et les gaz rares encore meilleurs. Quand on sait que ce sont les vibrations des molécules ou des atomes qui sont, sous l'influence de la température, les vecteurs de

Tableau 1

Valeurs de conductivités thermiques.

		Conductivité thermique (W/K/m)
Métaux	Argent	418
	Cuivre	390
	Aluminium	237
	Acier	46
Matériaux	Verre	1,2-1,4
	Béton	0,9
	Bois chêne	0,16
	Polystyrène expansé	0,036
	Perlite expansée	0,038
	Paille	0,04
	Laine de verre	0,04
	Laine	0,05
Gaz	Air sec	0,026
	Hélium	0,15
	Argon	0,017
	Krypton	0,010

la conduction, le vide est alors l'isolant absolu puisqu'il n'y a plus de vecteur de conduction. À partir de ces propriétés, on a fabriqué, découvert ou redécouvert des matériaux d'isolation...

2 Les matériaux d'isolation

Pour l'isolation dans la construction il faut associer :

- une structure céramique (c'est-à-dire de la terre cuite) ou de type béton alvéolaire à de l'air ou à une substance peu conductrice ;
- accompagner le matériau de structure d'une barrière isolante si possible à l'extérieur.

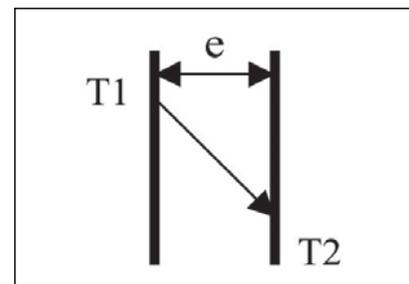


Figure 2

Les calories diffusent à travers une paroi conductrice de la zone à température la plus chaude T1 à la zone T2, jusqu'à égalisation des températures.

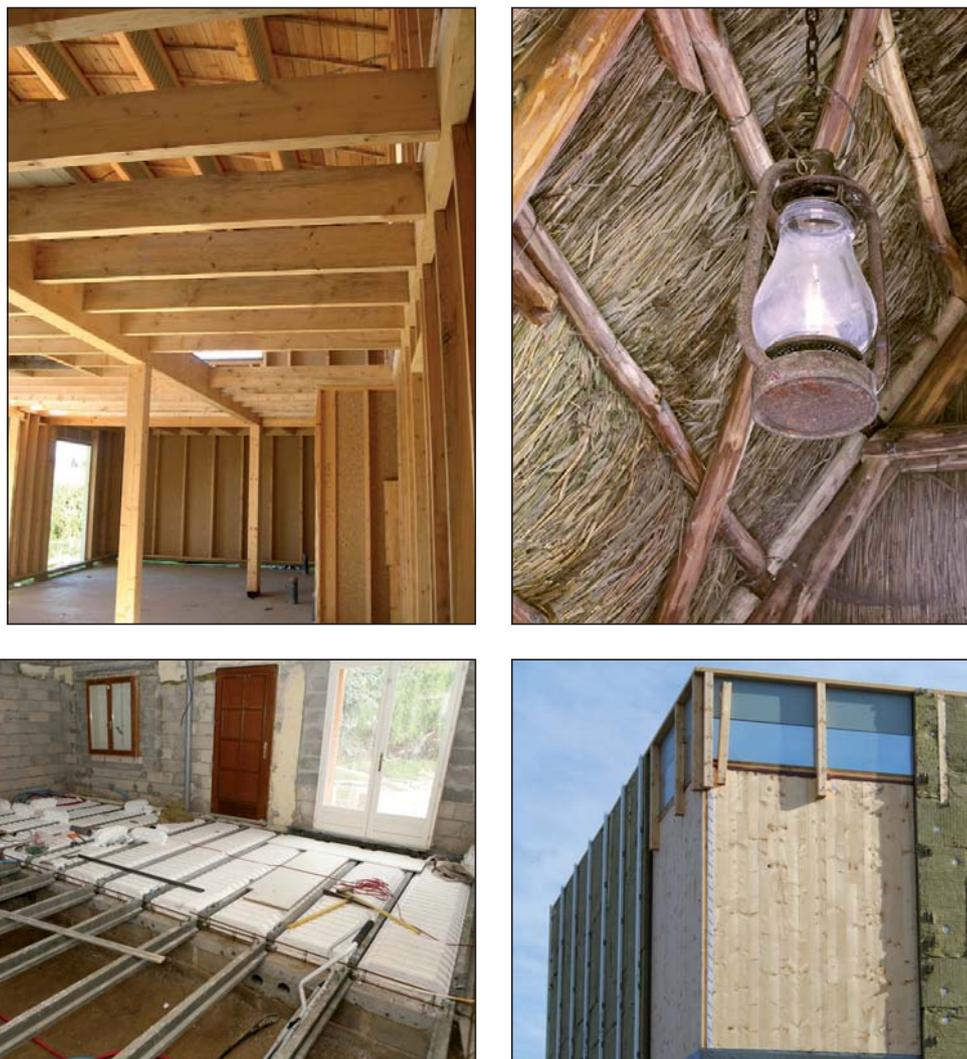


Figure 3

Bois, paille, béton, polystyrène et laine de verre sont de bons isolants thermiques.

2.1. Les matériaux de structure

La **brique monobloc** en terre cuite alvéolaire (*Figure 4* en haut) possède une bonne inertie thermique et ses alvéoles contiennent de l'air qui n'est pas en mouvement. Le dessin des alvéoles de type labyrinthe est tel que le flux thermique à travers la céramique doit parcourir plus d'un mètre pour faire un pont thermique avec l'extérieur, alors que l'épaisseur de la brique n'est que de l'ordre de 37 cm. On peut encore améliorer la performance en remplissant les alvéoles avec de la perlite expansée (voir le paragraphe 2.2.1) qui bloque

définitivement l'air emprisonné dans ces alvéoles (*Figure 4* en bas).

Le **béton cellulaire** joue un peu le même rôle ; il est constitué de blocs légers, combinaison de sable, de ciment, de chaux et d'eau, mais au cours de la prise du ciment, on y piège des bulles d'air (sous pression) ou de gaz (par réaction chimique) lorsque l'ensemble est encore pâteux ; ces bulles sont alors bloquées et immobilisées lors de la solidification (à propos de la préparation du béton, voir les *Chapitres d'A. Ehrlacher* et de *J. Méhu*). Cela donne un matériau poreux très léger et isolant, à comparer au parpaing, que l'on voit

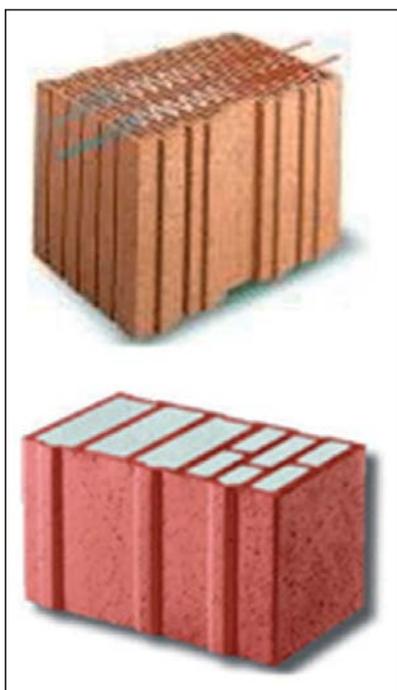


Figure 4

La brique monobloc en terre cuite alvéolaire sans ou avec remplissage.

malheureusement encore beaucoup dans les constructions et qui font preuve d'une résistance thermique faible.

Qu'en est-il du **bois** ? Les maisons à ossature en bois sont nombreuses dans les pays scandinaves, aux États-Unis, un peu moins prisées en France sauf dans les régions montagneuses, et pourtant, elles effectuent des percées intéressantes sur le marché national (voir notamment l'immeuble en bois décrit dans le **Chapitre de J.-P. Viguier**). Elles cumulent en effet deux avantages :

- une rapidité de construction grâce, le plus souvent, à une fabrication intégrée en usine ;
- des structures de panneaux à faible conductivité thermique.

Tableau 2

Résistance thermique et conduction de quelques matériaux.

Matériau	Résistance thermique R (m ² .K/W)	Conduction U (W/m ² /K)
Brique monomur (37,5 cm)	3	0,33
Brique isolation intégrée	5,55	0,18
Béton cellulaire	3,13	0,32
Parpaing classique (22 cm)	0,20	5

Autour des traverses de soutien et de montage, on trouve de la laine de roche entre les panneaux intérieurs et les panneaux d'isolation extérieure, le tout d'épaisseur de l'ordre de 25 cm avec des résistances thermiques intéressantes ($R = 4,8 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, avec $U = 0,21 \text{ W/m}^2/\text{K}$) et même en super isolées ($R = 7,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, avec $U = 0,13 \text{ W/m}^2/\text{K}$), valeurs qui permettraient de construire des maisons passives (« zéro énergie ». À propos des maisons passives, voir les **Chapitres de D. Quénard** et de **J. Souvestre**) ou mieux encore (**Figure 5**).

Par ailleurs, les revêtements extérieurs en bois couvrant des couches d'isolants avec les progrès de la protection du bois sont de bonnes solutions d'isolation par l'extérieur des bâtiments, si l'esthétique le supporte.

2.2. Les isolants des structures composites

Ils sont disposés au sein ou en éléments barrière des maté-

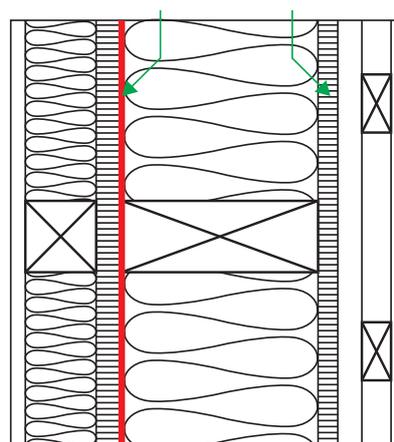


Figure 5

Ossature en composite à base de bois, composé de polystyrène avec revêtement enduit séparé par une plaque de bois (par exemple avec de la laine de verre ou de roche). Les montages peuvent être réalisés en usine en y intégrant canalisations et fils électriques.



Figure 6

Laine de verre, laine de roche, perlite expansée... Ces fibres minérales sont utilisées en isolation, seules ou en composites.



riaux de structure porteuse. On va trouver :

- des isolants minéraux – fibres et laines de verre, laine de roche, perlite expansée ;
- des isolants bio-organiques et végétaux – fibres de lin, fibres de chanvre, de coco, paille, laine de mouton, plumes de canard... ;
- des isolants synthétiques – polystyrène expansé ou extrudé, polyuréthane, Kevlar®, ouate de cellulose...

Ils seront mêlés aux murs, sols, toitures, soit en couche, soit en revêtement extérieur ou intérieur, parfois en sandwich entre parois, parfois en couche mince réfléchissante.

2.2.1. Les fibres minérales (Figure 6)

Ce sont les plus courantes. La plupart du temps, on trouve des **fibres de verre** à basse

composition en sodium, revêtues, par un procédé appelé ensimage, d'un polymère qui constitue une barrière à l'eau.

On trouve par ailleurs des **fibres de roche** (plus riches en silice que les fibres de verre), qui ont été fondues à haute température (1 100 °C). Leur fabrication ressemble beaucoup à celle de la « barbe à papa » hormis la température : le verre en fusion, comme le sucre fondu, tombe sur un disque tournant à grande vitesse qui projette les fibres dans un réceptacle, lequel alimente ensuite une bande déroulante de papier ou carton pare-vapeur où elles sont collées en diverses épaisseurs ; plus l'épaisseur est grande, meilleure est l'isolation. Elles sont délivrées en rouleaux ou en panneaux.

La **perlite expansée** est aussi une roche volcanique contenant de l'eau qui est expansée par chauffage haute température en de petites granules creuses isolantes, et qui est utilisée en vrac.

2.2.2. Les fibres bio-organiques issues de végétaux

Issues de plantes fibreuses largement utilisées pour le textile (lin, chanvre, coton) mais très concurrencées par les fibres artificielles (rayonne, nylon), elles retrouvent une nouvelle jeunesse grâce à l'« éco-conception ». Elles utilisent en effet les fibres courtes qui ne peuvent être employées pour le textile et valorisent donc la filière. Les fibres, après imprégnation d'un polyester protecteur, sont

mises en forme de feutres de diverses épaisseurs. La conductivité des feutres de lin ou de chanvre est de l'ordre de 0,39 ; elle est comparable à la laine de verre qui est de 0,40. Cela donne des résistances thermiques de l'ordre de 2,5 m².K/W pour des épaisseurs de 10 cm et de 3,8 m².K/W pour 15 cm, comparables aux fibres minérales. Le chanvre (**Figure 7**) est de plus un élément répulsif pour les rongeurs !

La **paille**, qui est aussi un matériau partiellement de récupération après récolte des céréales, a également une structure naturelle de canaux qui peuvent emprisonner de l'air. C'est un isolant bien connu de nos ancêtres qui, entre les poutres de leurs maisons, la mêlaient à l'argile pour en faire du torchis, constituant alors l'un des matériaux composites les plus anciens³ (**Figure 8**). La paille est redécouverte pour certaines constructions écologiques, soit par assemblage de ballots de paille, soit mélangée au ciment, à la chaux ou à l'argile (comme le montre le **Chapitre d'A. Ehlacher**). Cela reste bien sûr encore très artisanal et marginal. On peut aussi trouver depuis quelques temps des isolations à base de laine de coton, de mouton et même de plumes de canard qui désertent nos chambres à coucher pour s'attaquer aux combles et

3. Un matériau composite est composé d'une matrice et d'un renfort (voir le **Chapitre d'après la conférence de P. Hamelin**) : dans le torchis, la matrice est la terre et le renfort est en fibres végétales.



Figure 7

Le chanvre possède une conductivité thermique comparable à la laine de verre.

murs. Plus récemment encore, on peut aussi faire une bonne œuvre en utilisant des feutres à base de vêtements défilés recyclés par l'association Emmaüs.

2.2.3. Les isolants synthétiques

Ce sont en général des matériaux issus de la chimie du pétrole ou de la transformation chimique de substances naturelles (voir aussi le **Chapitre de J. Souvestre, Encart « Des polymères synthétiques pour notre quotidien. Exemples du polystyrène et du polyuréthane »**).

Le **polystyrène** est le plus utilisé (**Figure 9**). On le trouve sous deux formes : expansé (PSE) avec des porosités ouvertes, et extrudé avec des porosités fermées. Dans les deux cas, il contient plus de 95 % d'air ($\lambda = 0,026$) ou de pentane ($\lambda = 0,013$) immobilisé dans ses pores. Ces derniers ont été créés lors d'une pré-expansion du polymère par du pentane sous forme de petites sphères qui sont ensuite fortement expansées par chauffage à la vapeur dans des moules de formes variées que l'on connaît pour



Figure 8

La paille a longtemps été utilisée comme isolant, notamment dans les torchis.



Figure 9

Le polystyrène est un excellent isolant thermique grâce à ses 95 % d'air ou de pentane emprisonnés.



Figure 10

La ouate de cellulose est obtenue par recyclage de papier journal.

les emballages divers et les plaques d'isolation de 2 à 10 cm d'épaisseur, de basse ou de haute densité. C'est un très bon isolant, peu sensible à l'humidité avec des conductivités λ de 0,03 à 0,035.

Le **polyuréthane** est un polymère fabriqué à partir de l'urée ; il est aussi très poreux, sur le même principe que le PSE, d'un coût plus élevé, et sa conductivité thermique est aussi basse ($\lambda = 0,025$ à $0,030$).

À cette famille appartiennent également les **isolants en couche mince** ; ils ne font que quelques millimètres d'épaisseur ; les multicouches sont de l'ordre du centimètre : ils sont constitués de couches multiples de polyéthylène ($\lambda = 0,037$) revêtues d'une mince couche d'aluminium réfléchissant et de couches de polyéthylène bulles qui contiennent de l'air immobilisé. Ces couches allient le pouvoir isolant et le pouvoir de réflectivité en réfléchissant aussi bien l'énergie extérieure du soleil que l'énergie des zones intérieures chauffées. Les fabricants revendiquent une aussi bonne isolation qu'une couche de laine de verre de 20 cm qui, elle, est sensible à l'hygrométrie et à l'humidité. Les professionnels de l'isolation et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB, voir le **Chapitre de V. Pernelet-Joly, Encart : « Le CSTB et l'OQAI »**) sont plus prudents, ils affichent des performances moindres et reprochent à ces films d'être étanches à la vapeur d'eau et de ne pas laisser « respirer » les murs ou la toiture.

Quelques nouvelles matières apparaissent depuis quelques temps. La plus industrialisée est la **ouate de cellulose (Figure 10)**, que ses promoteurs présentent comme un produit écologique. En vérité, il s'agit de papier journal recyclé au moyen d'un procédé chimique et mécanique qui permet une seconde vie au papier journal. On sait que la cellulose du papier est issue de fibres de bois ou du textile, de faible conductivité ($\lambda = 0,039$). Le produit est disponible en vrac ou en panneaux, il peut aussi être projeté. La ouate est revêtue d'oxyde de bore ou de borates, qui sont de bons ignifuges et qui sont aussi protecteurs par rapport aux insectes et moisissures. De coût encore un peu élevé, elle apporte, semble-t-il, une bonne protection et isolation thermique qui concourent au confort en hiver mais aussi en été.

2.3. Les vitrages⁴

On a vu qu'un bâtiment perd environ 15 % d'énergie par les fenêtres et huisseries vitrées. Il faut cependant avoir une surface vitrée minimum pour l'éclairage bien sûr, mais aussi pour profiter du rayonnement solaire qui peut pénétrer et chauffer la maison en hiver. On estime qu'il faut un minimum de 1/6^e de surface vitrée par rapport à la surface habitable (2 m² pour une chambre de 12 m², 7 m² pour une salle de séjour de 42 m²). Encore faut-il qu'elles soient judicieuse-

4. Voir aussi le **Chapitre de J. Ruchmann**.

ment orientées ; on considère qu'il faut au minimum 40 % exposés au sud et 20 % pour les trois autres orientations en minimisant celles exposées au nord.

Le verre, bien que peu conducteur ($\lambda = 1,2-1,4$), n'est pas un isolant lorsqu'il est massif ; on le constate facilement sur les fenêtres à vitrage simple d'épaisseur 4 à 6 mm. En hiver, la paroi froide intérieure se couvre de buée de condensation et parfois de givre, lors de températures extérieures très négatives.

Les fenêtres à **double vitrage** sont constituées de deux verres de 4 mm séparés par un espace de 16 mm, le tout scellé par un joint métallique ou plastique qui isole l'air sec intérieur entre les deux lames. Elles ont apporté un réel progrès sur l'isolation thermique et le confort intérieur (**Figure 11**). Le coefficient de conduction thermique s'exprime par deux valeurs :

- U_g : la conduction thermique du vitrage ;
- U_w : la conduction thermique de la fenêtre (vitrage + huisserie).

U_w va bien évidemment varier, pour le même double vitrage, avec le matériau utilisé pour l'huisserie. Il sera très bon pour une huisserie en polychlorure de vinyle (PVC), polymère industriel de bonne tenue mécanique et bon isolant. U_w sera un peu moins bon avec une huisserie en bois, encore un peu moins bon pour l'aluminium s'il n'y a pas rupture du pont thermique.

On définit aussi le facteur solaire g , qui est le pourcentage d'énergie solaire que laisse passer

le vitrage et qui contribuera à gagner des calories en hiver, mais aussi malheureusement en été. Une solution possible est présentée dans le **Chapitre de J. Ruchmann**.

On trouve depuis quelques années des **vitrages à isolation renforcée (VIR)**, qui sont aussi à faible émissivité. Ils sont constitués de deux parois de verre de 4 mm, en général séparées comme dans le double vitrage standard par un espace de 16 mm, serti par un joint en aluminium ou en plastique. Cet espace est rempli par un gaz rare, l'argon, qui a un pouvoir isolant meilleur que l'air ($\lambda = 0,017$ au lieu de 0,026). De plus, la face interne du vitrage intérieur est revêtue d'une mince couche nanométrique d'argent ou d'oxyde métallique (à la façon d'un miroir sans tain) qui, par son pouvoir de réflectivité, fait barrière aux infrarouges de grandes longueurs d'ondes issus des pièces chauffées de l'habitation et laisse passer les infrarouges du rayonnement solaire. Ce type de vitrage VIR (Climaplust[®], Planitherm futurN[®]) est deux fois plus performant qu'un double vitrage classique et cinq fois meilleur qu'un simple vitrage, avec des conceptions $U_g = 1,2$ à $1,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

On peut également trouver depuis quelques temps des **triples vitrages** portés par des huisseries en aluminium à rupture de pont thermique, avec un facteur

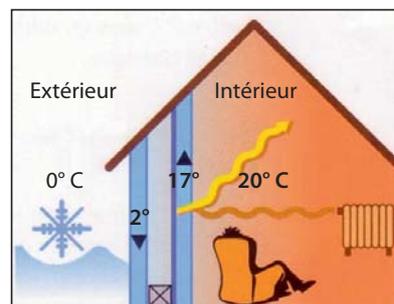


Figure 11

Les doubles vitrages ont apporté un progrès considérable en termes d'isolation, permettant mieux maintenir la chaleur en hiver.

$U_g = 0,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Les avis diffèrent sur l'avantage de ces derniers. Leur dimension de 36 mm (4/12/4/12/4) et leur poids (30 kg/m²), comparés au double vitrage classique (24 mm et 20 kg/m²), posent des problèmes d'adaptation ; de plus, les deux couches de basse émissivité réduisent le facteur solaire g, ce qui pénalise les apports solaires en hiver. Il ne semble donc pas que les coûts supplémentaires qu'ils occasionnent soient réellement rentables.

les exigences de performance énergétique des bâtiments neufs. À partir de septembre 2006, des consommations énergétiques de référence ont été établies en kilowatt-heure par mètre carré par an (kWh/m²/an), ainsi que des coefficients thermiques Cep du bâtiment et une température intérieure pour l'été maximums.

La France est divisée en huit zones (**Figure 12**) : trois zones H1 (nord et est), quatre zones H2 (ouest), une zone H3 (zone méditerranéenne). Ces zones correspondent à des climats particuliers imposant des consommations de référence énergétiques de 80 à 130 kWh/m²/an si l'on se chauffe au fioul (chauffage combustible fossile), et de 130 à 250 kWh/m²/an si l'on se chauffe à l'électricité. Les exigences suivant les zones et type de chauffage sont reportées sur le **Tableau 3**.

L'arrêté recommande également d'éviter ou de supprimer les ponts thermiques ; il soutient très fortement les installations de chaudières à condensation ou au bois et les systèmes solaires d'eau chaude sanitaire. Par ailleurs, dans la ligne du Grenelle de l'environnement

3 Les objectifs, la réglementation et les réalisations

3.1. Les constructions neuves

Depuis 1974, les divers règlements thermiques pour les bâtiments et constructions neufs (voir le **Chapitre de D. Quénard, Encart : « Les règlements thermiques (RT) »**) ont permis, dans le domaine du logement, des économies de près de 50 % par rapport aux consommations d'avant la crise pétrolière. La réglementation thermique RT 2005 prolonge celle de 2000 et, par arrêté paru en mai 2006, fixe

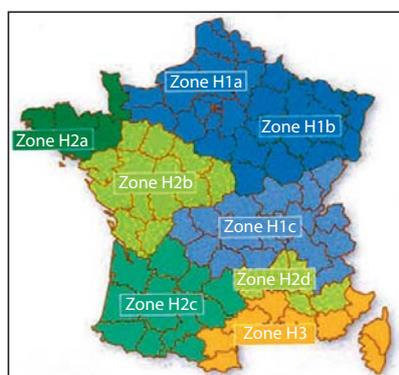


Figure 12

Les trois zones géographiques pour la réglementation du chauffage en France.

Tableau 3

Consommation énergétique maximum par zone (RT 2005).

Zone	Chauffage combustible fossile	Chauffage électrique
H1	130 kWh/m ² /an	250 kWh/m ² /an
H2	110 kWh/m ² /an	190 kWh/m ² /an
H3	80 kWh/m ² /an	130 kWh/m ² /an

depuis 2007 (voir le **Chapitre de J.-M. Michel**), de nouveaux labels assortis de conditions sont apparus :

- le label haute performance énergétique (HPE), réservé aux bâtiments consommant 10 % de moins que la consommation de référence ;
- le label très haute performance énergétique (THPE), se définissant par une consommation inférieure de 20 % aux références ;
- s'y ajoutent les labels HPE EnR et THPE EnR, réservés aux constructions qui de surcroît utilisent des énergies renouvelables : biomasse (voir le **Chapitre de D. Gronier**), pompes à chaleur, solaire thermique ou photovoltaïque (voir les **Chapitres de D. Lincot, D. Plée et D. Quénard**) ;
- enfin, le label basse consommation énergétique (BBC 2005), calqué sur le Passivhaus allemand (environ 15 kWh/m²/an) pouvant être attribué aux logements consommant moins de 50 kWh/m²/an (valeur variant d'un facteur 0,8 à 1,2 suivant

les zones H) (voir aussi le **Chapitre de J. Souvestre, Encart : « Les labels énergie »**).

Nul doute que ces classifications et labels assortis d'étiquettes, dont nous sommes devenus familiers pour l'électroménager, auront et sont déjà un facteur de plus en plus déterminant en cas de construction, d'achat ou de revente d'une maison ou d'appartement, car depuis 2006 en cas de vente d'un bâtiment, et depuis 2007 en cas de location, doit être établi un diagnostic de performance énergétique qui range et affiche la classe du logement. Le classement de consommation énergétique va de A (logement économe) à G (logement énergivore), et la classe d'émission de gaz à effet de serre va aussi de A (faible émission) à G (forte émission). Pour les bâtiments des collectivités, les communes et départements sont fortement incitées à afficher l'étiquette énergie sur leurs propriétés, officialisée au 1^{er} août 2008 (**Figure 13**).

Figure 13

La réglementation impose d'afficher les performances énergétiques des logements et leurs classes d'émission de gaz à effet de serre (GES).

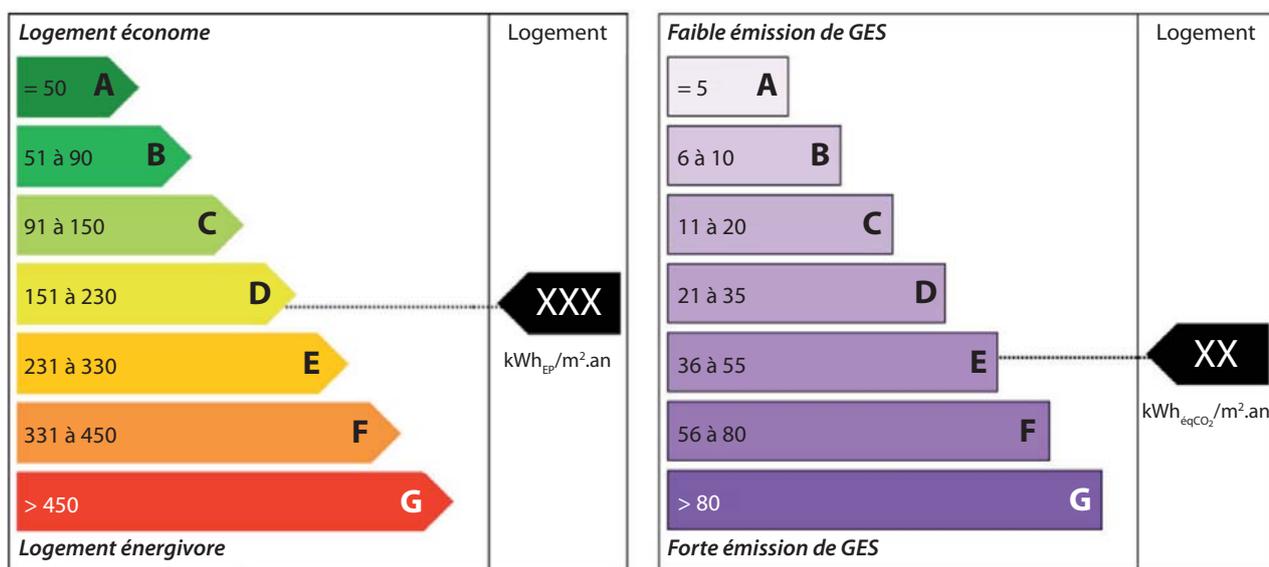


Tableau 4

Objectifs de consommation moyenne d'énergie visés par les réglementations thermiques.

Année	Objectif de consommation moyenne (kWh/m ² /an)
2008	150
2010	120
2013	50
2020	0

On sait que la moyenne de consommation des bâtiments anciens est située entre 250 et 350 kWh/m²/an. Pour les bâtiments neufs après 2005, cette fourchette sera comprise entre 80 et 250 kWh/m²/an. Après le Grenelle de l'environnement, les objectifs sont nettement plus ambitieux (**Tableau 4**).

Ces objectifs de très basse consommation pour les constructions neuves et la réglementation thermique 2012 en préparation vont inciter et encourager les architectes et bureaux d'études à étudier et concevoir des constructions de bâtiments et de maisons à « énergie zéro », et même à énergie positive, avec inévitablement des conséquences sur l'aspect esthétique, environnemental et patrimonial, aspects auxquels les municipalités et préfets devront veiller.

Figure 14

Dépenses énergétiques des foyers en France.

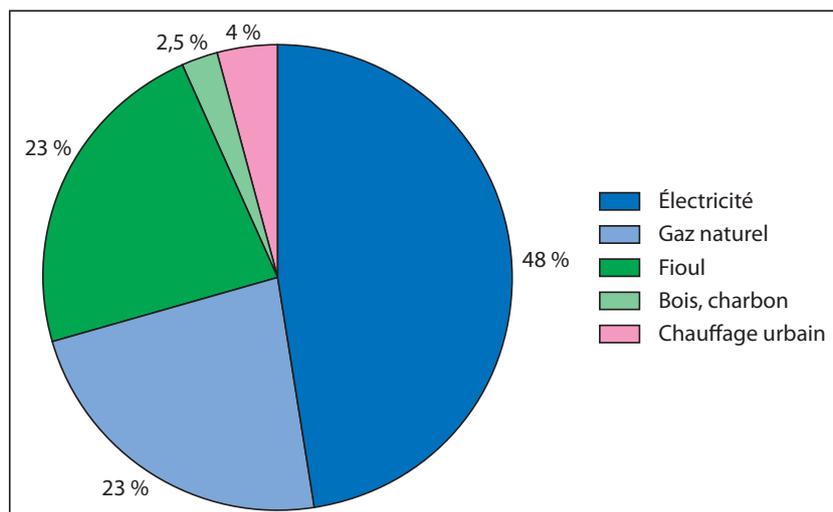
La totalité de ces dépenses (principalement pour le chauffage et l'éclairage) atteint 37,5 milliards d'euros, à comparer aux dépenses de carburant pour le transport (35,3 milliards d'euros).

3.2. Et pour l'existant ?

Il est déjà clair que l'objectif « énergie zéro » des logements ne pourra être atteint pour 2020 pour l'ensemble immobilier français ; le Gre-

nelle de l'environnement, dans le « facteur quatre », se fixe de réduire par quatre les émissions de CO₂ en 2050. La France étant le meilleur élève de l'Europe sur les émissions de gaz à effet de serre grâce à l'énergie nucléaire, on peut se demander si cet objectif n'est pas utopique, sauf à considérer un effort sans précédent, non pas dans l'habitat mais pour le transport des personnes et des marchandises. Pour les logements existants, cela représente environ 400 000 logements à rénover par an d'ici 2050 dans des conditions qui sont à rapprocher d'exigences supérieures à RT 2005, puisque la RT 2012 est en élaboration et concernera les bâtiments anciens. Les études statistiques et enquêtes menées en 2006 sur les dépenses énergétiques des Français ont donné les résultats reportés sur la **Figure 14**.

Depuis novembre 2007, en cas de rénovation, réhabilitation de maisons, logements ou bâtiments de moins de 1000 m², les chaudières, fenêtres, radiateurs, ballons d'eau chaude, isolation, pompe à chaleur, etc., doivent présenter des performances énergétiques supérieures ou égales au niveau réglementaire minimum. Des réductions d'impôts de 25 % sur les fournitures qui satisfont à ces exigences sont accordées et peuvent s'ajouter aux réductions de 50 % accordées aux fournitures solaires (eau sanitaire) ou 25 % depuis 2011 pour le photovoltaïque, s'il y a investissement de cet ordre. Par ailleurs, des réductions de taxe foncière pourront être



prévues en cas de travaux conduisant à des réductions de consommation et changement de classe. Enfin, il est aussi prévu, en cas d'obtention du label THPE, la possibilité de dépasser le COS⁵ dans la limite des 20 %, dans l'hypothèse d'une nouvelle construction ou d'un agrandissement.

3.3. Les réalisations

Les maisons basse consommation doivent mettre en place une stratégie d'isolation de tous les éléments de la maison : les murs, les toitures, les sols et les vitrages.

Les murs

Il existe trois types de structures (**Figure 15**) :

- les murs massifs à isolation extérieure, éliminant les ponts thermiques, protègent les murs porteurs sans réduire la surface habitable. Ils conviennent donc en cas de rénovation ou d'assainissement. Il faut simplement veiller à la diffusion de la vapeur d'eau afin d'éviter les dégâts consécutifs à une humidité permanente par condensation. Le matériau isolant, la finition extérieure et la couleur de façade doivent être assortis et compatibles avec l'environnement et l'aspect architectural initial (ce qui pose souvent problème pour des bâtiments anciens ou patrimoniaux) ;

5. Le coefficient d'occupation des sols (COS) détermine la quantité de construction admise sur une propriété foncière en fonction de sa superficie. Il est contrôlé notamment lors de l'instruction des permis de construire.

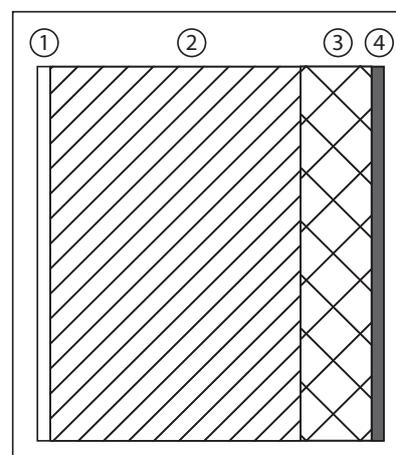
- les murs à double paroi : l'isolant central ne peut dépasser une certaine épaisseur pour des raisons mécaniques (15 cm maximum). Les points de jonction entre la maçonnerie extérieure et les zones chauffées peuvent entraîner des ponts thermiques. Les murs à double paroi conduisent souvent à de bonnes stabilité et inertie thermique contribuant au confort, mais ils ne conviendront pas en général pour des maisons à énergie zéro ;

- les structures légères : souvent les parois et structures sont fabriquées en atelier à partir d'éléments porteurs en bois. L'ossature en bois peut être recouverte de polystyrène et d'enduit, l'intérieur comblé par de la laine de verre ou de cellulose avec une contre-cloison intérieure en plâtre. Les canalisations et circuits électriques sont intégrés en usine et le montage sur site est bien plus rapide que pour la construction traditionnelle. Il faut simplement veiller à la conduction de la chaleur par le bois, à son vieillissement sous charge et à la sensibilité à l'humidité.

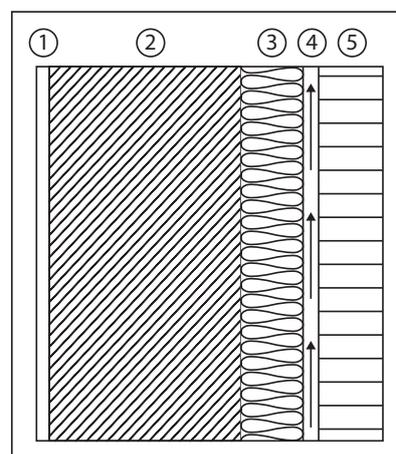
Les toitures

Pour les toitures, deux cas se présentent :

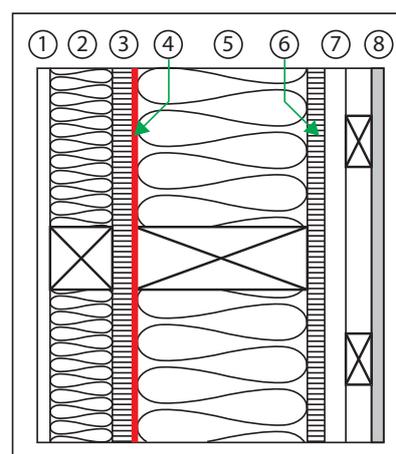
- les combles perdus : il s'agit alors d'épandre sur les solives des plafonds ou sur la dalle supérieure des feutres épais de 15 à 30 cm de laine de verre, de lin ou chanvre, ou en vrac de la ouate de cellulose ou laine isolante de même épaisseur (en veillant à placer un pare-vapeur du côté habitable) ;
- les combles habitables : il faut alors dérouler entre les



A : monomur + isolation externe



B : brique silico-calcaïque



C : structure légère composite

Figure 15

Les différents types de structures pour les murs :
 A : monomur + isolation externe ;
 B : brique silico-calcaïque ;
 C : structure légère composite. (voir la **figure 5**).

charpentes des bandes d'isolants de matériau classique ou de films minces isolants et réfléchissants, en veillant toujours à laisser une lame d'air près de la toiture.

Les sols

Il s'agit d'isoler les dalles et chapes du sol ou du vide sanitaire, voire des sous-sols. Ce sont le plus souvent des plaques de polystyrène expansé ou extrudé d'épaisseur variable qui sont utilisées.

Les ouvertures

On utilisera des vitrages à double parois, classiques ou à isolation renforcée.

Les caractéristiques techniques

La réglementation thermique se traduit sur le terrain par les caractéristiques de résistance thermique ou de conductivité des éléments de construction ou de rénovation. Elles sont résumées dans le **Tableau 5**.

Tableau 5

Caractéristiques thermiques minima des matériaux (R résistance en m².K/W et U conduction thermique en W/m²/K).

	R (RT 2005)	U (RT 2005)	R (BBC)	U (BBC)
Toiture	6	0,17	8	0,125
Mur	4	0,25	5	0,20
Sol/terre	4	0,25	5	0,20
Sol/vide sanitaire	4	0,25	6	0,17
Vitrage	0,4	2,5	0,9	1,1

Que choisir pour les toitures avec R = 6 m².K/W ou U = 0,17 W/m²/K ?

Isolant	Δ (W/K/m)	Épaisseur recommandée (cm)
Laine de verre	0,035-0,045	24
Laine de roche	0,035-0,045	24
Polystyrène extrudé	0,030-0,040	21
Polystyrène expansé	0,030-0,035	18 à 23
Flocons de cellulose	0,035-0,045	24
Laine de lin	0,039-0,045	25
Laine de chanvre	0,038	23

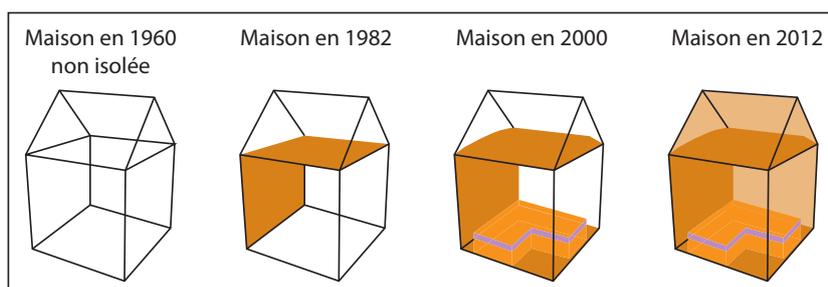
Que choisir pour les murs avec R = 4 ou U = 0,2 (laine de verre ou ouate de cellulose) ?

Type de mur	Épaisseur d'isolation (cm)
Bloc isolant (37,5 cm), isolation externe	4 à 6
Brique silico-calciq (24 cm)	12 à 15
Cloison composite à madrier	16 (R = 6)

4 À titre de comparaison édifiante

Prenons l'exemple d'une maison construite en 1960, en un temps « que les moins de quarante ans ne peuvent pas connaître », où le litre de fioul domestique coûtait moins de vingt centimes (de nouveau franc !), évidemment sans isolation, que ses propriétaires ont progressivement rénovée et isolée, et imaginent remplir un objectif 2012, c'est-à-dire BBC ! (**Figure 16** et **Tableau 6**)

Près de cinq millions de logements sont encore chauffés au fioul ; il y en avait près



de neuf millions avant 1973, ils représentent actuellement plus de 20 % du parc immobilier. Voyons ce que les propriétaires d'une maison telle que celle de l'exemple précédent peuvent dépenser pour atteindre les objectifs 2012, qui sont ou seront très proches du label THPE et même BBC. La réduction

Figure 16

Des étapes nombreuses et coûteuses pour rénover une maison des années 1960 selon les objectifs 2012.

Tableau 6

Comparaisons d'isolations rénovation.

	Maison 1960	Rénovation 1982	Rénovation 2000	Objectifs 2012
Isolation	Non isolée	Combles et murs	Combles, murs, sols	Super isolation
Consommation annuelle	7 200 L fioul (75 000 kWh)	2 150 L fioul (22 500 kWh)	1 050 L fioul (11 000 kWh)	800 L fioul (8 500 Wh)
Prix 2008*	7 200 €	2 150 €	1 050 €	800 €
Prix en € constants*	150 €	2 865 €	900 €	800 €
Solutions mises en œuvre :				
Combles	Sans isolations	R = 2,5	R = 5	R = 6,5
Murs extérieurs	Sans	R = 1,25	R = 2,2	R = 5
Sols	Sans	Sans isolation	R = 2	R = 2 + PSE intérieur
Vitrages	Simple	Double	Double + VIR	Double + VIR + argon
Ventilation	Naturelle	Simple flux	Hygroréglable	Hygroréglable

* Pour les prix du fioul, le choc pétrolier de 1973 a doublé le prix, qui a été à nouveau doublé en 1979 lors du second choc, d'où un facteur quatre entre 1970 et 1982. Après le contre choc des années 1990, les années 2000 sont caractérisées par des fluctuations importantes de plus de 60 % qui amènent le prix du litre de fioul proche de 1 € (2008-2011).

N.B. : Les prix à la consommation générale ont augmenté de 636 % en quarante ans.

des dépenses de chauffage compense-t-elle les investissements consentis pour l'isolation ? Pour le calcul, on prendra l'hypothèse de 96 m² au sol et de 50 m² en étage et de l'ordre de 25 m² d'ouvertures lumineuses. Les prix des matériaux sont des prix moyens 2010, ils peuvent varier suivant les sources, on s'attachera surtout à l'ordre de grandeur :

1) Isolants traditionnels :

Sol – PSE 4 cm :
 $96 \times 7,00 = 672 \text{ €}$.

Murs-cloison placo +
 100 mm. Laine de verre :
 $220 \times 15 = 3\,300 \text{ €}$.

Combles et une partie du
 toit – 200 mm laine de verre :
 $144 \times 7 = 1\,008 \text{ €}$.

Total : 5 000 € + pose
 2 500 € = **7 500 €**.

2) Isolants écologiques :

Sols – laine de roche :
 $96 \times 8,00 = 770 \text{ €}$.

Murs – Panneaux de lin +
 placo : $220 \times 25 = 5\,500 \text{ €}$.

Combles et une partie du
 toit : ouate de cellulose
 $1\,056 + 2\,374 = 3\,430 \text{ €}$.

Total : 97 000 € + 2 500 €
 pose = **12 200 €**.

3) Fenêtres et baies vitrées :

Huissieries et doubles vitrages
 avec couche faible émissivité
 et argon

$25 \times 170 = 4\,250 \text{ €}$ + Pose
 750 € = **5 000 €**.

Investissements et dépenses :
 Cas 1 : **12 500 €**. Après crédit
 d'impôt sur les fournitures
 (2 900) : **9 600 €**.

Cas 2 : **17 200 €**. Après crédit
 d'impôt sur les fournitures
 (4 200) : **13 000 €**.

Par rapport à une maison non isolée, cela permet, si chauffage au fioul, une économie de l'ordre de 6 000 € par an, d'où une rentabilité en moins de deux ans dans le premier cas et d'un peu plus de deux ans dans le deuxième cas (isolants écologiques). Pour la maison rénovée en 1982, c'est une économie de l'ordre de 2 000 € et donc une rentabilité en cinq ans ou six ans. Notons que les dispositions favorables du crédit d'impôt pour les habitations construites avant 1977 ont été abrogées pour 2011. Il est de 25 % sur les fournitures et la pose pour les matériaux d'isolation, sauf pour les vitrages où la pose est exclue (loi de finance 2010).

5 L'évolution et la recherche

En matière d'isolation, la recherche est plus technologique qu'elle n'est par exemple dans le photovoltaïque et le solaire. Les principes d'investigation de base sont la conductivité et l'émissivité. Dans le premier concept, c'est remplacer les éléments solides conducteurs de la chaleur par des espaces fermés emprisonnant un gaz peu conducteur comme l'air ou un gaz rare comme l'argon ou le krypton. Avec le second concept, c'est comment bloquer tout ou partie du rayonnement solaire externe et le rayonnement infrarouge interne pour améliorer le confort ; ceci peut être réalisé par des métaux ré-émetteurs tels que l'aluminium poli ou l'argent et certains oxydes en couche mince, tels que l'oxyde

de gadolinium, qui agissent un peu comme des miroirs sans tain. La recherche a donc porté sur les sujets suivants :

- amélioration des propriétés mécaniques des polymères expansés ou extrudés qui, à facteur R égal, ont maintenant des tenues mécaniques à la compression bien meilleures ;
- protection des fibres naturelles ou minérales portant sur la résistance à l'humidité et à leur tenue au feu. Ceci est réalisé par des revêtements par ensimage qui font barrière à la vapeur d'eau (acétates de vinyle), ou ignifuges (oxyde ou sel de bore), ou encore anti-moisissures et insecticides ;
- recherche de nouveaux produits naturels pour constituer des laines, flocons, feutres à partir de végétaux dédiés ; cela s'apparente davantage à la recherche sur les textiles (voir le **Chapitre de G. Némoz**) et à la recherche agronomique. C'est ainsi qu'ont vu le jour des laines et feutres de lin, de chanvre, de coton, de laines de moutons, de plumes de canard, etc., qui, s'ils sont effectivement d'origine naturelle, exigent cependant pour leur conservation et leur mise en forme des traitements chimiques. Leurs prix restent cependant encore deux à quatre fois plus élevés que les matériaux isolants standard ;
- des composites comportant des aérogels qui sont obtenus par évaporation en phase critique⁶ de gels de silice et donnent des microsphères creuses de silice très légères

6. Un corps se trouve en phase critique lorsqu'on ne peut plus distinguer les états gazeux et liquide.

qui ne peuvent être utilisées seules mais en sandwich avec des polymères ou fibres, et dont la mise en œuvre reste complexe ;

- l'isolant ultime et absolu étant le vide, la construction de panneaux de matériaux nanostructurés et sous vide (PIV) constitue une nouvelle étape ; c'est un peu le principe du Dewar de la bouteille thermos qui est appliqué à la construction. Deux propriétés sont alors mises en œuvre, un polymère contenant des nanopores, de dimensions inférieures au libre parcours moyen des molécules d'un gaz, lequel ne peut alors plus transmettre, par agitation, la chaleur. Le tout est emprisonné dans une enveloppe étanche, constituée de couches de polymères sandwich revêtues d'une mince couche d'oxyde ou de métal, barrière empêchant la diffusion de l'air, de la vapeur d'eau ou du CO₂, puisque l'on fait le vide dans cette enveloppe. On y ajoute aussi un absorbant qui va permettre sur le long terme de maintenir le vide ou au moins une très faible pression. Ce type de panneau est, pour une épaisseur donnée, quatre fois plus isolant qu'un panneau standard ; il est actuellement testé pour l'isolation des ballons d'eau chaude ;

- un nouveau concept est apparu depuis environ cinq ans, c'est celui qui consiste à profiter de la chaleur latente. Lorsque vous chauffez un solide, au cours de sa fusion, il absorbe une certaine quantité de chaleur pour le changement de phase état solide-état liquide, et lors de son refroidissement, il restitue cette

quantité de chaleur pour recristalliser et passer de l'état liquide à l'état solide. L'idée de l'application aux générateurs de chaleur (sels eutectiques) est assez ancienne, mais la réalisation pour l'application à un mur ou panneau de construction est plus récente. On enferme alors une cire à base de co-polymères⁷ et de paraffine⁸ dont le point de fusion est compris entre 22 °C et 26 °C dans un panneau mural ; lorsque la chaleur solaire externe chauffe le panneau, la cire fond et absorbe cette chaleur, et limite donc l'augmentation de température intérieure ; la nuit, lorsque le mur se refroidit, la cire se solidifie et restitue la chaleur latente en limitant la diminution de température intérieure. C'est ce que l'on appelle une structure composite « intelligente » à changement de phase qui régule par elle-même la température de la maison par ses simples propriétés physiques. Les réalisations existent sous forme de panneaux de polymères laminés entre deux feuilles d'aluminium (Energain® de DuPont de Nemours) ou de microbilles de 5 µm contenant la cire, pouvant être dispersées dans

des panneaux de plâtre ou des revêtements (Micronal® de BASF). Des panneaux de ce type de 15 mm ont la capacité thermique équivalente d'un mur de 12 cm, et contribuent remarquablement au confort intérieur.

À côté de cette recherche sur les matériaux, il ne faut pas non plus négliger la recherche architecturale et esthétique, qui devient primordiale puisqu'elle va conduire à proposer des structures multi-matériaux, des liaisons par colles minérales, des panneaux pré-industrialisés, des matériaux bio-sourcés (abordés dans le *Chapitre de D. Gronier*), des couvertures naturelles végétales... La recherche porte aussi évidemment sur la disposition des pièces du logement afin d'améliorer l'aspect bioclimatique. Un point très important pour les années futures concernera la recherche architecturale pour la réhabilitation des bâtiments existants par l'extérieur, qui ne sacrifie pas les surfaces habitables, mais qui va nécessiter des solutions où l'esthétique ne sera pas sacrifiée aux exigences techniques de la réglementation thermique.

7. Un polymère est constitué par l'enchaînement d'une ou plusieurs unités répétitives appelées monomères. Dans ce dernier cas, il est appelé co-polymère.

8. Les paraffines, du latin *parum affinis* (« qui a peu d'affinité »), sont un mélange d'alcane.

Les aides gouvernementales sont-elles bien ciblées ?

Le marché de l'énergie renouvelable est un marché assez porteur et en pleine expansion. Après le Grenelle de l'environnement et l'objectif du « facteur quatre », le Gouvernement, par les lois de finances et les dispositions du crédit d'impôt, souvent relayées par les régions et les départements, a institué des aides appréciables aux particuliers et aux sociétés. Ces aides conduisent, du moins c'est l'espérance des décideurs, à des économies importantes dans la consommation des ressources fossiles qui grèvent notre balance extérieure, et à la diminution de l'émission des gaz à effet de serre.

La question que l'on peut se poser est celle-ci : est-ce que ces aides sont toujours bien dirigées et encouragent-elles des solutions efficaces ? Plaçons-nous dans l'optique d'un propriétaire qui dispose d'une maison partiellement rénovée et isolée en 1982 (exemple précédent de la maison de 150 m²), et qui veut la rénover dans une optique d'éco-citoyen pour aller au-delà des normes du RT 2005, anticiper RT 2012 et viser les labels THPE ou même BBC. Il a le choix entre des travaux de super isolation de sa maison avec des matériaux et systèmes satisfaisant les conditions du crédit d'impôt de la loi de finance 2010, ou l'installation d'un chauffe-eau solaire, ou l'installation de tuiles photovoltaïques remplaçant partiellement une partie de sa toiture, ces deux dernières solutions ouvrant droit non seulement aux crédits d'impôts y afférant mais aussi aux subventions des collectivités territoriales auxquelles peut s'ajouter, pour la solution photovoltaïque, la possibilité de vendre son électricité à EDF à un tarif subventionné. Résumons les solutions et dépenses dans le **Tableau 7**. En prenant un prix du kWh de

l'ordre de 0,08 € (prix moyen heures normales pratiqué par EDF pour un particulier) ou 1 € le litre de fioul (valeurs d'amortissements entre parenthèses), on peut comparer l'efficacité de ces différentes actions (**Tableau 8**).

On peut voir, grâce à ces tableaux, que l'investissement par isolation est à peu près onze fois plus efficace que l'investissement dans les panneaux photovoltaïques et quatre fois plus efficace que celui pour un chauffe-eau solaire. En revanche, les subventions publiques (qui coûtent de l'argent à la collectivité) sont aussi onze fois plus fortes par kWh économisé pour le photovoltaïque et huit fois plus fortes pour le chauffe-eau solaire. Pour être complet, il

Tableau 7

Investissements, dépenses, économies générées de diverses solutions.

Travaux	Investissement en €	Crédit d'impôt en €	Subvention en €	Dépenses en €	Économie d'énergie par an
Photovoltaïque	19 500	4 000	500	15 000	2 000 kWh
Chauffe-eau solaire	6 000	2 500	500	3 000	2 000 kWh
Isolation standard	12 500	2 300	néant	10 200	14 000 kWh
Isolation écologique	17 000	3 300	néant	13 700	14 000 kWh

Tableau 8

Amortissements et efficacités des diverses solutions.

Travaux	Amortissement/ investissement	Amortissement/ dépense	Crédit d'impôt + subvention par kWh économisé/an	Économie réalisée pour 1 € investi
Photovoltaïque	110 ans	93 ans	2,25 €	0,1 kWh
Photovolt. + vente EDF	22 ans	18 ans	2,75 €*	0,1 kWh
Chauffe-eau solaire	47 ans	18 ans	1,50 €	0,30 kWh
Isolation standard	9 ans	7 ans	0,16 €	1,14 kWh
Isolation écologique	12 ans	9 ans	0,24 €	0,8 kWh

faudrait y ajouter la subvention déguisée de $0,58 - 0,08 = 0,50$ € par kWh photovoltaïque accordée par EDF que payent *in fine* tous les abonnés par augmentation du tarif général, et qui monte les subventions à quatorze fois plus fortes ! Il y a clairement une incohérence de la part des Pouvoirs publics, qu'ils soient nationaux ou régionaux ; elle est clairement mise en lumière dans le cas de l'isolation thermique avec des matériaux naturels (donc renouvelables !) qui est neuf fois moins subventionnée que le photovoltaïque (dont on dit qu'il bénéficie surtout à l'industrie des panneaux photovoltaïques chinois, c'est un comble !) On peut craindre que, portés par l'enthousiasme des néoconvertis du Grenelle de l'environnement, soumis aux lobbies des écologistes radicaux et du Syndicat des énergies renouvelables (SER), les décideurs aient cédé à la mode perverse. Celle de subventionner au-delà du raisonnable les mesures les plus visibles et les plus médiatisées en négligeant les plus efficaces mais moins spectaculaires, et en imposant à EDF un prix de rachat déraisonnable de l'électricité de sources renouvelables. Il est maintenant clair que le Comité opérationnel (COMOP) n'a pas vraiment joué son rôle et qu'il importe au plus vite de réorienter la loi vers des mesures plus efficaces pour ne pas gaspiller l'argent public.

Crédits photographiques

Fig. 6B : Licence CC-BY-SA-3.0,
D-Kuru Wikimedia Commons.

Fig. 7 : Licence CC-BY-SA-3.0,
Rasbak.

Fig. 7 : Licence CC-BY-1.2, Stefdn.