

# Échanges thermiques d'une paroi (2/2)

En première partie<sup>(1)</sup>, nous avons abordé les principes de base régissant les échanges thermiques d'une paroi. Les échanges gazeux ont également été définis car ils participent des échanges thermiques. Nous avons terminé l'article par quelques notions de confort thermique.

Dans cette seconde partie, nous essayons de tirer parti au mieux de ces phénomènes physiques, en utilisant des techniques nouvelles ou anciennes, afin de rendre les bâtiments sobres et confortables. Une simulation dynamique entre deux maisons types du parc actuel, avant et après une rénovation thermique classique, clôture l'exposé.

## > Sommaire

- 1 • Propriétés et performances thermiques d'une paroi
- 2 • État du parc de bâtiment existant
- 3 • Grandes solutions de rénovation thermique : tirer parti des échanges thermiques
- 4 • Conclusion

## François-Maxime Fuchs

*Ingénieur généraliste spécialiste en énergie renouvelable et système de production, expert thermicien pour le bureau d'architecture Atba, à Genève, spécialisé dans la construction et la rénovation Minergie. En 2010, il crée la filiale Isolation pour le Groupe Énerco puis, en 2011, la société Archinergie, structure innovante à la fois bureau d'études thermiques et maître d'œuvre spécialisé dans la rénovation énergétique des bâtiments. [www.archinergie.fr](http://www.archinergie.fr)*

## Benoît Raymond

*Président et cofondateur de la société France ITE, spécialisée dans la conception et la mise en œuvre de solutions intégrées d'isolation thermique par l'extérieur. Ingénieur généraliste spécialisé en rénovation énergétique, très impliqué dans la performance et la sobriété énergétique du bâtiment, il participe actuellement aux travaux de mise en place d'un DTU et d'un certificat de qualification professionnelle (CQP) pour l'isolation thermique par l'extérieur. [www.france-ite.fr](http://www.france-ite.fr)*

## 1 Propriétés et performances thermiques d'une paroi

Les parois sont les principaux moyens passifs à notre disposition pour gérer les flux thermiques. Ces parois qui séparent l'environnement extérieur de l'environnement intérieur (l'enveloppe) jouent également un rôle dans le stockage des calories issues de l'énergie solaire, puis dans leur restitution la nuit. Elles font de même avec les calories du système de chauffage et des autres apports internes en hiver. En été, elles absorbent la chaleur, ce qui donne une sensation de fraîcheur.

### 1.1 Différents types de parois

Un bâtiment est composé de parois opaques comme les murs, les toitures, et de parois transparentes comme les vitrages. La figure 1 illustre le rôle des parois dans le comportement thermique d'un bâtiment ancien (à gauche) et d'un bâtiment dit moderne (à droite). Les différences de comportement thermique entre le bâti ancien et le bâti moderne sont abordées dans le paragraphe 2.

On distingue communément trois types de parois opaques : les murs, qui ont très souvent la plus grande surface de contact avec l'extérieur ; les toitures, plus sollicitées thermiquement que les murs ; les sols ou planchers, pour lesquels les exigences thermiques sont moindres.

Les murs se classent en deux grandes familles : les murs maçonnés et les murs à base de bois. Les premiers, plus courants dans les régions du sud de l'Europe, sont mis en œuvre à partir d'éléments minéraux tels que le béton, la pierre, la terre cuite ou encore la terre crue. Avec beaucoup d'inertie, ils sont bien adaptés aux climats à forte amplitude où le confort d'été est important. Le bois

(1) Complément Technique n° 23, novembre-décembre 2011, p. 28-36.

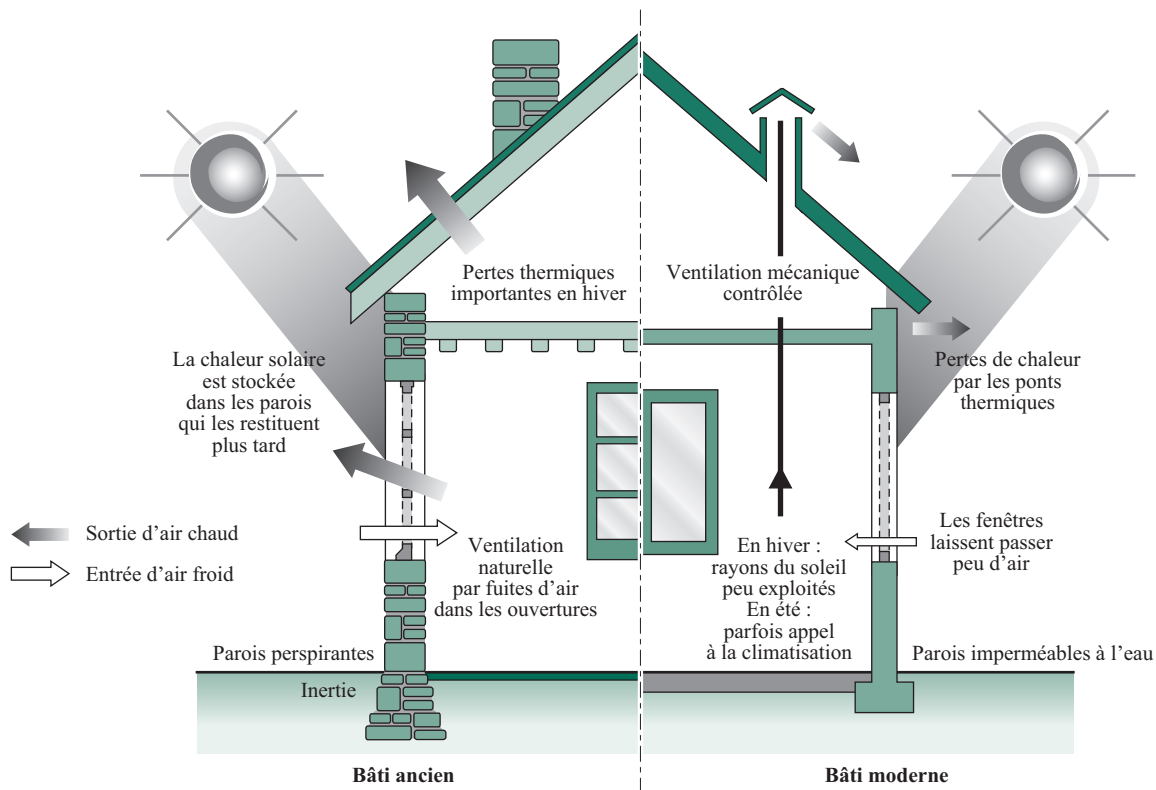


Fig. 1. Comportement thermique du bâti ancien et du bâti moderne.

est présent en Europe du Nord et dans les régions montagneuses, zones pour lesquelles un bon niveau d'isolation est nécessaire en hiver.

Pour les toitures, retenons :

- la toiture dont l'isolant est placé au-dessus de la structure portante ;
- la toiture dont les combles sont perdus, appelée également « toiture froide » ;
- la toiture dont les combles sont aménagés, appelée « toiture chaude ».

La toiture isolée du côté extérieur du bâti offre des performances thermiques intéressantes du fait d'une forte inertie entraînant un confort amélioré. Dans le cas d'une toiture froide, l'isolation horizontale du plancher du grenier génère un espace tampon plus ou moins ventilé qui empêche les surchauffes d'été tout en offrant une séparation du milieu extérieur froid l'hiver, limitant les déperditions. Le confort d'été et d'hiver peut être excellent. La toiture chaude est apparue plus récemment compte tenu d'une demande de volumes habités toujours plus importante. Très souvent, ces espaces de vie plus complexes à gérer thermiquement sont inconfortables, avec des surchauffes en été et des déperditions importantes en hiver.

Les planchers bas ne sont pas développés dans cet article.

## 1.2 Isolation thermique : conserver les calories ou éviter qu'elles ne rentrent

En saison froide, une grande partie des calories s'échappe des bâtiments en traversant par conduction les parois extérieures. Les matériaux isolants permettent de limiter ces pertes.

La figure 2 montre l'épaisseur de matériau nécessaire pour obtenir la même résistance thermique qu'un mur de près de 90 cm de béton plein.



### Remarque

Les matériaux sont soumis en laboratoire à des tests de vieillissement, afin de déterminer la tenue dans le temps de leurs performances, notamment thermiques lorsqu'il s'agit d'isolants. Cependant, lorsqu'ils sont en situation réelle et soumis aux conditions d'exploitation des lieux, il est difficile de s'engager sur la durabilité de leurs performances. Seule la compétence et l'expérience des professionnels permettent de se prémunir contre d'éventuelles contre-performances.

Le mur est la paroi qui présente le plus d'échanges thermiques avec l'extérieur. C'est également la plus complexe puisqu'elle comporte pratiquement tous les passages entre l'intérieur et l'extérieur.

Afin de ne pas faire de confusion avec la valeur  $R$ , caractéristique intrinsèque du matériau, et pour tenir compte de l'aspect

1,5 cm	Polystyrène extrudé	$\lambda = 0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
2 cm	Panneaux de cellulose	
2 cm	Liège	
2 cm	Laine minérale	
2 cm	Polystyrène expansé	$\lambda = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
2,3 cm	Ouate de cellulose	
2,4 cm	Chanvre en vrac	$\lambda = 0,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
6,5 cm	Béton de chanvre	
7,5 cm	Bois résineux	
8 cm	Béton cellulaire	
17,5 cm	Brique creuse alvéolaire	
28 cm	Brique pleine	
39 cm	Pisé	
42,5 cm	Adobe (terre crue)	
45 cm	Pierre calcaire	
52,5 cm	Parpaing creux	
87,5 cm	Béton plein	$\lambda = 1,75 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
<b>Acier</b>		
$\lambda_{\text{Acier}} \approx 50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$		
26 m pour une résistance équivalente		

Fig. 2. Épaisseur et résistance thermique des matériaux.

composite d'une paroi, le coefficient  $U$  est également utilisé : il caractérise la transmission thermique de la paroi par unité de surface, et vaut  $1/R$  résultant. Plus sa valeur est faible, plus la paroi est isolante.

Le tableau 1 indique le coefficient  $U$  et la résistance résultante  $R$  d'une série de parois courantes. Les calculs sont réalisés conformément à la réglementation française, en incluant la paroi complète avec ses enduits extérieurs, ses parements de plâtre et ses enduits ou lambris de bois intérieurs. La valeur moyenne des performances thermiques progresse au fur et à mesure de l'entrée en vigueur d'une nouvelle réglementation.

Un facteur égal à 20 est relevé entre un mur en aggloméré de béton non isolé et la plus performante des parois opaques ; un facteur de plus de 2 est noté entre la valeur de référence de la RT 2000 et celle de la réglementation thermique 2012 qui entre progressivement en application.

### Exemple

Dans le bâti ancien, il est souvent difficile de connaître la composition d'une paroi et donc son coefficient  $U$  caractérisant sa faculté à résister aux flux de chaleur. Il est possible de déterminer la valeur  $U$  d'une paroi en mesurant les températures intérieure et extérieure et la température de surface intérieure (fig. 3).

En considérant la paroi comme un thermocouple, l'effet Seebeck permet de mesurer la différence de potentiel électrique induite par la différence de température à l'interface entre deux matériaux. D'autres techniques existent pour mesurer ces différentes températures, comme l'infrarouge. Ces mesures peuvent être délicates et ne sont cohérentes que si l'environnement de mesure est correctement maîtrisé (apport, inertie, etc.). Les résultats peuvent diverger dans le cas de parois hétérogènes, comme les murs à ossature bois.

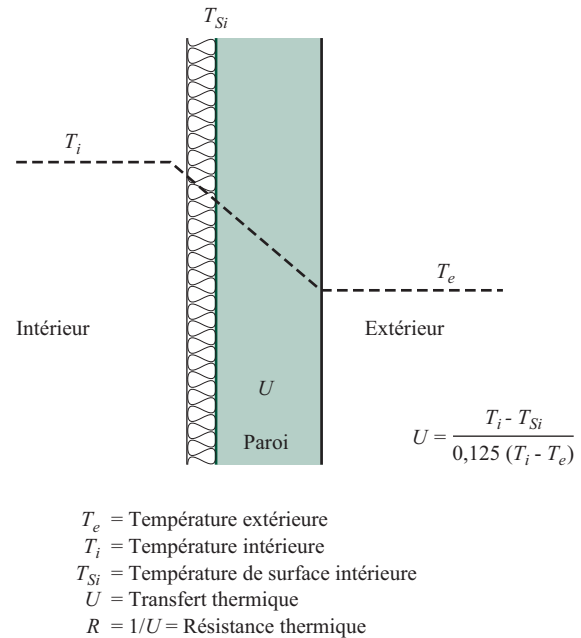


Fig. 3. Principe de mesure de la valeur  $U$ .

La toiture est généralement la paroi la plus sollicitée thermiquement. En hiver, le flux de chaleur a tendance à pousser les calories vers le haut du bâtiment, donc vers sa toiture. En été, son exposition zénithale la place comme le premier récepteur des calories solaires. Pour l'hiver, l'objectif est d'avoir une résistance thermique maximum ; pour l'été, l'isolant doit répondre à deux autres objectifs tout aussi importants : une réduction d'amplitude forte et un déphasage de 8 à 12 heures afin que le front de chaleur arrive à l'intérieur lorsqu'il sera plus facile de le disperser – la nuit par exemple.

Des études conduites en Allemagne où le climat continental offre de fortes amplitudes de températures saisonnières ont permis de définir l'épaisseur optimale afin de maximiser le confort d'été tout en limitant les déperditions l'hiver (tab. 2).

Les résultats confirment notre propos sur le confort thermique des toitures chaudes. Pour certains matériaux courants mis en valeur (en gras) dans le tableau 2, on constate qu'en hiver les épaisseurs peuvent être mises en œuvre sans trop de difficulté ; pour l'été, en revanche, ces mêmes matériaux sont à proscrire tant l'épaisseur à installer est importante : jusqu'à 1,1 m pour les fibres de polyester. Il est très rare de visiter des combles aménagés avec 80 cm d'épaisseur d'isolant de laine de verre.

### Important

Depuis la RT 2005, la réglementation thermique française quantifie le confort d'été d'un bâtiment. En effet, au vu de l'augmentation exponentielle de l'utilisation de la climatisation dans les bâtiments, la réglementation thermique donne une valeur limite de confort à ne pas dépasser. La température intérieure conventionnelle (TIC) est la température atteinte par le bâtiment après une période de 5 jours chauds. Elle ne doit pas dépasser une TIC de référence.

**Tab. 1. Performance thermique moyenne  $U_p$  et résistance résultante  $R$  de différents parois de bâtiment selon la réglementation applicable** (source : *La Conception bioclimatique*).

Types de parois opaques	$U_p$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$R$ résultante (m <sup>2</sup> .K/W)
<b>RT 1974 (performance moyenne)</b>	2,4	0,4
<b>RT 1988 (performance moyenne)</b>	1,5	0,7
Mur en aggloméré de béton 22,5 cm	2,08	0,5
Mur de briques 20 cm + 3 cm vide d'air + doublage de brique 8 cm	1,15	0,9
<b>RT 2000</b>		
<i>Performance de référence moyenne des murs de bâtiment</i>	0,43	2,3
Mur en béton cellulaire 30 cm d'épaisseur ( $p = 400 \text{ kg/m}^3$ )	0,42	2,4
<b>RT 2005</b>		
<i>Performance de référence moyenne des murs de bâtiment</i>	0,40	2,5
Mur en briques auto-isolantes 37 cm (maçonnerie roulée)	0,36	2,8
Mur à ossature bois + briques de chanvre 30 cm	0,34	2,9
Mur en brique isolé avec 10 cm de liège expansé (0,04)	0,32	3,1
Mur en bois massif (10 cm) + 10 cm de laine de bois (0,04) + lambris de bois intérieur	0,26	3,8
Mur en brique creuse 20 cm isolé par l'intérieur avec 10 cm de laine minérale	0,27	3,7
Mur en bloc de béton cellulaire de 20 cm + 12 cm de polystyrène graphité (0,03)	0,24	4,2
Mur en aggloméré de béton 20 cm avec 16 cm de laine minérale à l'intérieur (0,04)	0,22	4,5
<b>RT 2012 (bâtiment basse consommation)</b>		
<i>Performance moyenne des murs de bâtiment</i>	0,20	5,0
Mur à ossature bois et remplissage 20 cm de laine de cellulose (0,04)	0,19	5,3
Double mur porteur en brique 15 cm, 20 cm de laine de verre et parement en brique de 12,5 cm	0,15	6,7
Mur en bloc de béton cellulaire de 36,5 cm + 10 cm de laine minérale (0,04)	0,14	7,1
<b>RT 2020 (maison passive)</b>		
<i>Performance moyenne des murs de bâtiment</i>	0,13	7,7
Mur en béton cellulaire / silico-calcaire 50 cm d'épaisseur	0,12	8,4
Mur à ossature bois et remplissage de paille comprimée à fibres verticales	0,11	9,1
Mur en bloc de béton cellulaire de 36,5 cm + 16 cm de polystyrène graphité (0,03)	0,11	9,1
Ossature bois avec 37 cm de laine de cellulose (0,04) + pare-pluie en feutre de bois	0,10	10,0

Tab. 2. Épaisseurs optimales des isolants de toiture pour le confort d'hiver et d'été (source : DR ingénieur Reinhardt Geisler, Isofloc).

Type d'isolant	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité $\lambda$ (W/m.K)	Capacité thermique $pC$ (Wh/m <sup>3</sup> .K)	Épaisseur (cm)	
				Hiver	Été
Panneau isolant de fibres de bois	160	0,04	80	17,3	18,5
Copeaux de bois	90	0,055	63	23,8	24,5
Liège expansé (vrac)	100	0,045	42	19,5	27,1
Ouate de cellulose forte densité	70	0,045	42	19,5	27,1
Ouate de cellulose moyenne densité	55	0,04	33	17,3	28,6
<b>Mousse rigide de polyuréthane</b>	30	0,03	13	<b>13,0</b>	<b>40,5</b>
<b>Perlite expansée</b>	90	0,05	20	<b>21,7</b>	<b>41,6</b>
<b>Laine de mouton</b>	20	0,04	10	<b>17,3</b>	<b>53,5</b>
<b>Polystyrène</b>	20	0,04	8	<b>17,3</b>	<b>59,3</b>
<b>Coton</b>	25	0,04	6	<b>17,3</b>	<b>69,0</b>
<b>Laines minérales</b>	18	0,04	4	<b>17,3</b>	<b>81,5</b>
<b>Fibres polyester</b>	15	0,045	2	<b>19,5</b>	<b>110,0</b>



### Remarque

Les ponts thermiques sont une rupture dans l'enveloppe isolante d'une paroi donnant vers l'extérieur. D'un point de vue pratique, on appelle ponts thermiques toutes les parties de la paroi qui donnent sur l'extérieur et qui n'ont pas pu être isolées. Les ponts thermiques les plus fréquents sont :

- la jonction des parois horizontales (plancher bas, plancher intermédiaire, etc.) et des parois verticales ;
- l'interface entre les murs de refend et les murs extérieurs ;
- les tableaux, linteaux et appuis de fenêtres ;
- l'ensemble des points particuliers ne permettant pas d'isolation.

Les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 25 % des déperditions d'une maison. De plus, les ponts thermiques étant des surfaces froides, ils sont souvent la source de phénomènes de condensation pouvant entraîner la prolifération de champignons et de salpêtre.

## 1.3 Cas particulier des vitrages : capter les calories

Dans un bâtiment, le vitrage joue un rôle de capteur solaire simple et économique. Suivant le contexte de leur utilisation et de leur interaction avec les autres éléments du bâti, les vitrages peuvent couvrir jusqu'à 80 % des besoins caloriques de nos habitations. Les parois vitrées sont pourtant le talon d'Achille de l'enveloppe thermique des bâtiments.

Les innovations technologiques récentes ont permis à la fenêtre de faire des progrès considérables et de devenir l'un des premiers

composants d'enveloppe à présenter un bilan thermique annuel positif. Le bilan thermique est la différence entre les gains solaires et les déperditions. Il dépend de plusieurs paramètres dont :

- la performance thermique, caractérisée par le coefficient  $U_w$  ( $w$  pour l'anglais *window* : fenêtre) ;
- le facteur solaire, qui indique la proportion du flux énergétique que le vitrage laisse passer ;
- l'orientation des vitrages, l'angle qu'il forme avec le rayonnement solaire et ses possibles protections contre le rayonnement ;
- la durée et l'intensité de l'ensoleillement ;
- les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Le tableau 3 donne les bilans énergétiques exprimés en kWh pour 1 m<sup>2</sup> de vitrage sur une saison de chauffage en fonction de son orientation et du type de vitrage utilisé.

Les résultats montrent que les vitrages exposés au nord ont toujours un bilan négatif (valeurs en gras du tab. 3), et qu'une baie vitrée performante de 3 m<sup>2</sup> orientée au sud produit autant d'énergie qu'un radiateur moyen de 1 000 watts fonctionnant durant 375 heures. Les résultats montrent aussi l'importance d'une baie vitrée dans l'équilibre entre déperditions (l'hiver) et apport solaire (à limiter l'été pour les faces est et ouest et à maximiser l'hiver au Sud).

Il est ainsi communément admis qu'une baie au sud remplace un radiateur, alors qu'au nord elle en nécessite un supplémentaire.

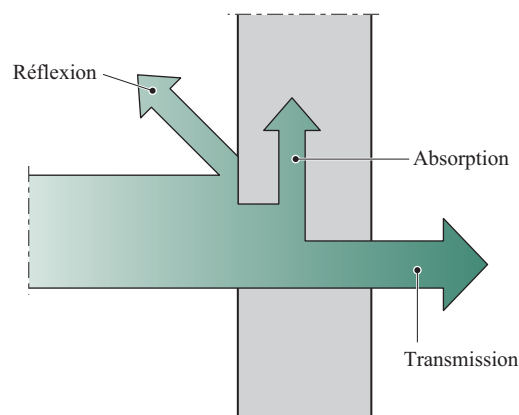


**Tab. 3. Bilan énergétique sur une saison de chauffe pour 1 m<sup>2</sup> de vitrage (kWh)** (source : *Guide de recommandation pour la conception de logements à haute performance énergétique en Île-de-France*).

Type de vitrage	Orientation du vitrage			
	<i>Sud</i>	<i>Sud-Est/Sud-Ouest</i>	<i>Est/Ouest</i>	<i>Nord</i>
<b>Simple vitrage</b> $U_w = 4,95 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	-75	-86	-137	-203
<b>Double vitrage</b> $U_w = 2,95 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	41	30	-22	-87
<b>Double vitrage + volets</b> $U_w = 2,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	81	70	19	-47
<b>Double vitrage à isolation renforcée</b> $U_w = 1,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	107	96	45	-21
<b>Double vitrage à isolation renforcée + volets</b> $U_w = 1,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	125	114	62	-4

### Remarque

Couramment utilisé en Allemagne et en Suisse, le triple vitrage fait débat en France. En effet, ses caractéristiques thermiques en font un vitrage plus isolant mais, de fait, laissant entrer moins d'énergie solaire qu'un double vitrage. Des études ont montré que son usage est totalement justifié pour les parois au nord présentant un bilan énergétique constamment négatif. En revanche, leur bilan par rapport au double vitrage est plus discutable lorsqu'il s'agit de vitrage situé au sud ou dans les régions d'ensoleillement plus important comme en Méditerranée. En termes de confort, le triple vitrage a de meilleurs résultats en diminuant l'effet de paroi froide l'hiver et en contribuant à la maîtrise des surchauffes estivales. Plus cher et plus contraignant à poser que du double vitrage (car plus lourd), il est fréquemment utilisé dans les bâtiments neufs devant répondre à la RT 2012. Son usage dans les bâtiments passifs ou présentant un bilan énergétique positif est incontestable.



**Fig. 4. Comportement thermique d'une surface réceptrice.**

## 1.4 Inertie : stocker et restituer les calories

Dans la première partie, nous avons présenté la capacité thermique associée à la diffusivité et à l'effusivité. En pratique, ces phénomènes sont à l'origine de ce que l'on appelle l'inertie et le déphasage. On parle d'inertie intérieure pour la capacité de la face interne d'une paroi à absorber, stocker et restituer les calories, et d'inertie de transmission pour l'épaisseur totale qui amortit et déphase les variations de température entre l'intérieur et l'extérieur. L'amortissement des variations de température correspond à la réduction d'amplitude évoquée au paragraphe 1.2 dans le cas d'un des objectifs d'isolation des toitures en période estivale.

Les rayons du soleil qui frappent les parois ou entrent dans le bâtiment atteignent une surface qui les réfléchit (fig. 4). Selon la couleur et la nature des matériaux, la partie non réfléchiée des rayons est plus ou moins absorbée sous forme de chaleur. Un matériau très réfléchissant comme l'aluminium poli ne s'échauffe

quasiment pas. À l'inverse, l'ardoise de couleur noire absorbe pratiquement la totalité du rayonnement sous forme de chaleur.

Les matériaux capables d'absorber une quantité importante des calories reçues sont ceux dont la capacité thermique est grande. Les calories solaires absorbées sont gratuites. Aussi l'intérêt de les stocker puis de les restituer est-il évident.

La figure 5 propose un classement des matériaux usuels du bâtiment en fonction de leur capacité à stocker puis restituer les calories.

Le classement est le suivant :

- famille A : matériaux non adaptés à la création de masse inertielle ;
- famille B : matériaux pouvant être utilisés mais qui n'apportent qu'une contribution partielle à l'inertie ;
- famille C : matériaux adaptés à la création d'une inertie quotidienne ou séquentielle.

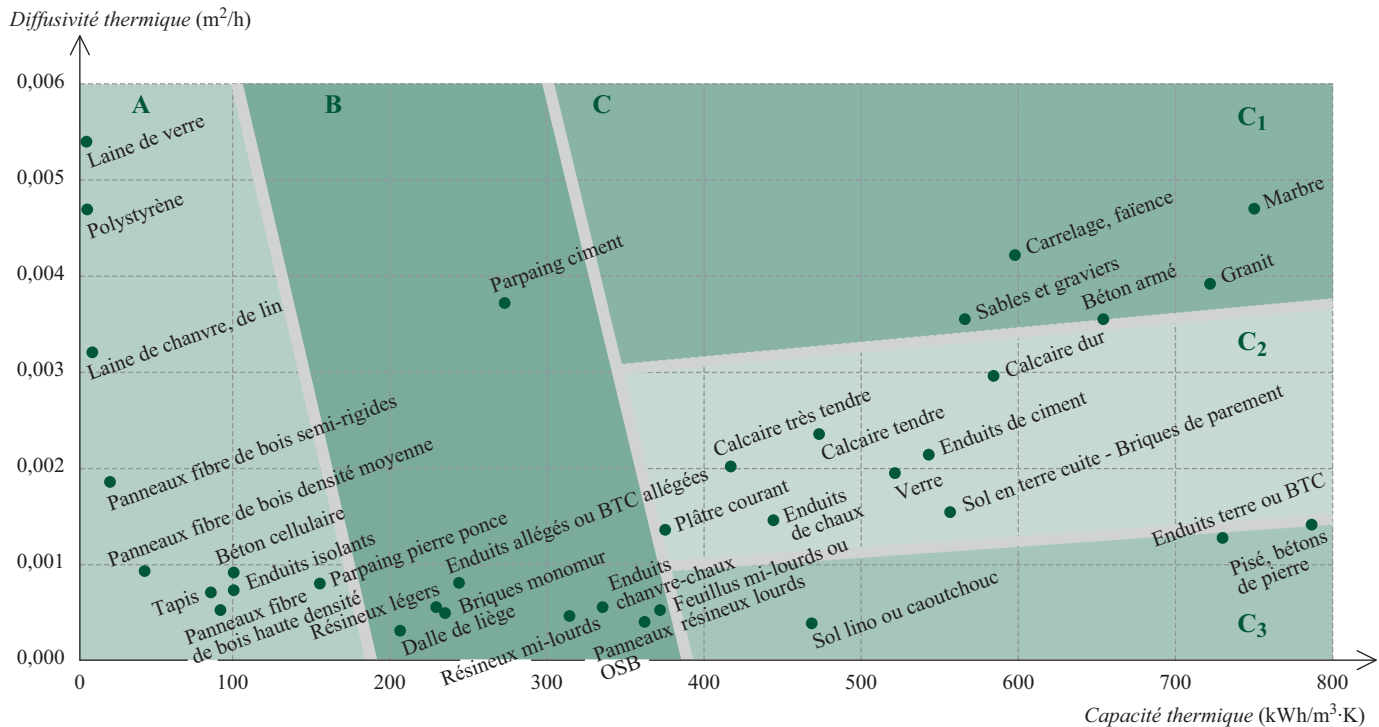


Fig. 5. Capacité thermique et diffusivité de divers matériaux (source : *L'Isolation thermique écologique*).

L'inertie thermique de transmission concerne principalement les parois recevant le plus de calories solaires, suivant les saisons. Sous nos latitudes, il s'agit généralement du mur exposé au sud en hiver et de la toiture en été. L'inertie thermique de transmission est principalement caractérisée par le temps de déphasage, exprimé en heure, entre le moment où les calories arrivent au contact de l'extérieur du bâti et celui où elles pénètrent dans le bâti. En général, un déphasage jour/nuit est recherché, de sorte que les rayons solaires de la journée soient transmis sous forme de chaleur à partir du début de soirée, ce qui correspond à des valeurs de déphasage de 8 à 10 heures. Pour l'été, ce même temps de déphasage permet de laisser entrer la chaleur lorsque la température extérieure a commencé à diminuer, ce qui limite le risque de surchauffe en ventilant, par exemple.

La figure 6 indique l'épaisseur d'un matériau pour un temps de déphasage défini.

Le bois se révèle être un matériau très intéressant puisque, avec 15 cm d'épaisseur, il présente déjà un déphasage de 7 à 8 heures. Des essais ont été réalisés avec des murs à eau, à titre expérimental pour le moment parce que leur mise en œuvre et surtout leur entretien sont contraignants. Le béton cellulaire, utilisé massivement après la Seconde Guerre mondiale, a un temps de déphasage trop faible pour jouer un rôle dans le confort d'été, à la différence de la terre ou de la brique, que l'on retrouve fréquemment dans les constructions plus anciennes.

## 1.5 Étanchéité à l'air

D'un point de vue sanitaire pour les occupants mais aussi pour la structure d'un bâtiment, le renouvellement de l'air intérieur y est essentiel. Si les anciennes constructions trouvaient leur équilibre à l'aide de la ventilation naturelle par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe, les nouvelles constructions cherchent à limiter ces fuites d'air afin de diminuer les déperditions de chaleur. L'air vicié est alors extrait à l'aide d'une ventilation mécanique simple ou double flux.

Pour optimiser les performances des systèmes de ventilation d'un bâtiment, il est nécessaire de maîtriser les entrées d'air neuf et les extractions d'air vicié. Pour cela, il faut extraire la juste quantité nécessaire d'air vicié en apportant l'équivalent en air neuf, et ainsi limiter les flux d'air non désirés. C'est pour cela que la performance énergétique des bâtiments passe aujourd'hui par l'étanchéité à l'air des enveloppes. Les normes d'étanchéité des bâtiments n'ont cessé d'évoluer, jusqu'à être aujourd'hui contrôlées, après la construction, dans le cadre du label « Bâtiment Basse Consommation ».

Cette nouvelle façon de concevoir l'enveloppe d'un bâtiment révolutionne les techniques connues. Elle nécessite le respect des DTU, un soin particulier dans le traitement des interfaces (dalle/mur, paroi opaque/paroi translucide, mur/toiture, etc.) mais aussi dans la pose des membranes d'étanchéité comme les pare-vapeurs.

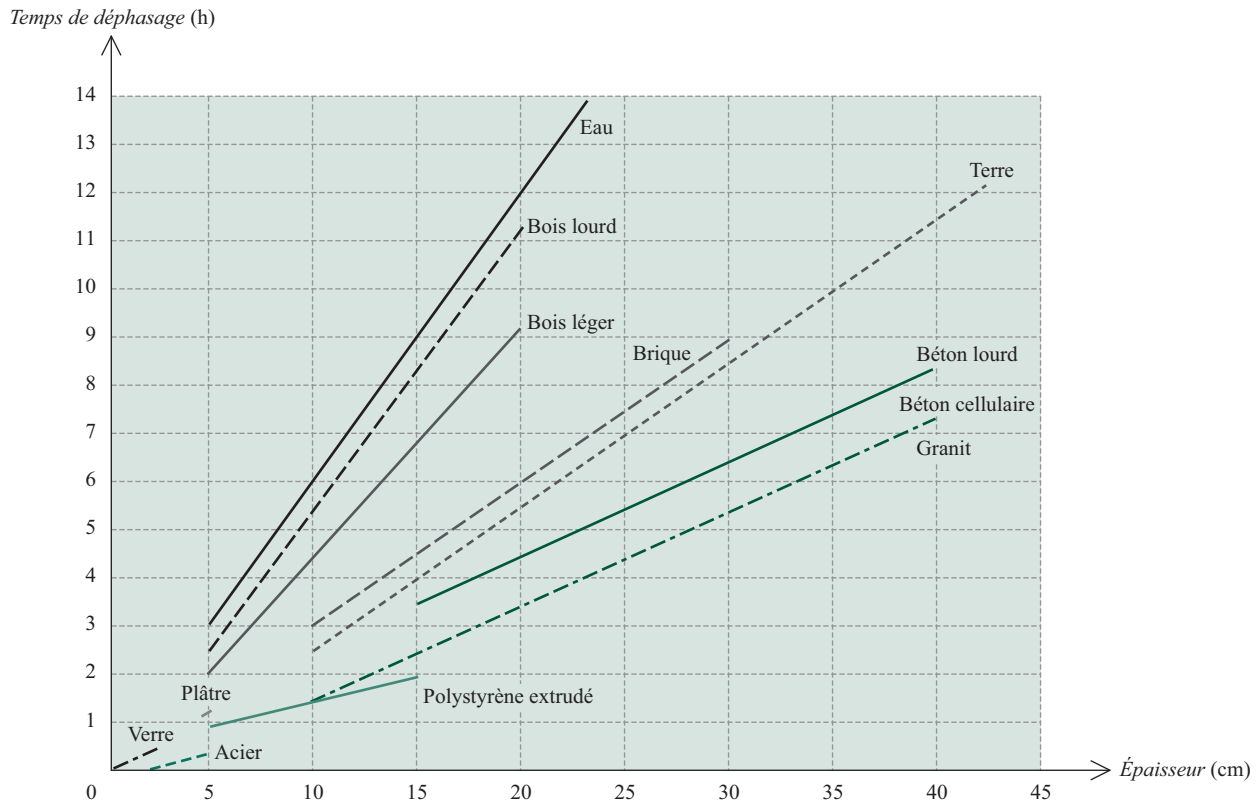


Fig. 6. Temps de déphasage en fonction du matériau et de son épaisseur (source : *La Conception bioclimatique*).

### Exemple

L'étanchéité à l'air d'une construction caractérise la sensibilité de l'enveloppe vis-à-vis des écoulements aérauliques parasites causés par les défauts d'étanchéité. Elle est caractérisée par le débit de fuite traversant l'enveloppe sous un écart de pression donnée : 4 Pa en France (50 Pa en Suisse). Ce coefficient de perméabilité est un débit de fuite par m<sup>2</sup> de surface déperditive (hors plancher bas) sous 4 Pa, exprimé en m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.h). D'un point de vue pratique, un test d'étanchéité à l'air revient à mesurer la quantité de fuite du bâtiment en le mettant en pression puis en dépression. Lors de ce test, il est également possible de déterminer la surface de fuite équivalente en m<sup>2</sup>, mais aussi de localiser les fuites à l'aide d'une caméra thermique ou d'une machine de distribution de fumée.

En application de la réglementation thermique RT 2012, la taille de fuite équivalente d'une maison contemporaine représente la taille d'une carte de crédit ; pour une maison des années 1970, la surface de fuite équivalente peut varier entre 2 et 8 m<sup>2</sup>, soit l'équivalent d'une baie vitrée ouverte en permanence.

## 2 État du parc de bâtiment existant

L'évolution des modes constructifs a connu une période charnière entre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Cette période va de 1870 (fin de l'architecture haussmannienne) jusqu'à l'apparition d'une production de plus en plus industrialisée qui débute

entre les deux guerres, prend son envol à partir de 1948<sup>(2)</sup> pour se terminer, en 1974, après le choc pétrolier, par la publication de la première réglementation thermique (RT) applicable aux bâtiments d'habitation (fig. 7).

Durant cette période charnière, nous sommes passés d'une architecture qui, avant 1948, prenait en compte l'environnement climatique, à une architecture souvent ignorante des caractéristiques climatiques locales puis, à partir de 1975, à une architecture soutenue par une réglementation thermique toujours plus exigeante.

Les comportements thermiques de ces trois types de bâti sont très différents du fait de leur mode constructif.

### 2.1 Constructions anciennes ou traditionnelles antérieures à 1948

Le bâti ancien représente un tiers des logements en France, soit près de 10 millions d'habitations. Issu de modes constructifs élaborés au cours des siècles avec des matériaux locaux, il bénéficie d'une conception bioclimatique. Les principaux matériaux anciens (pierre, bois, mortier, terre crue ou cuite, etc.) présentent

(2) Début des Trente Glorieuses.



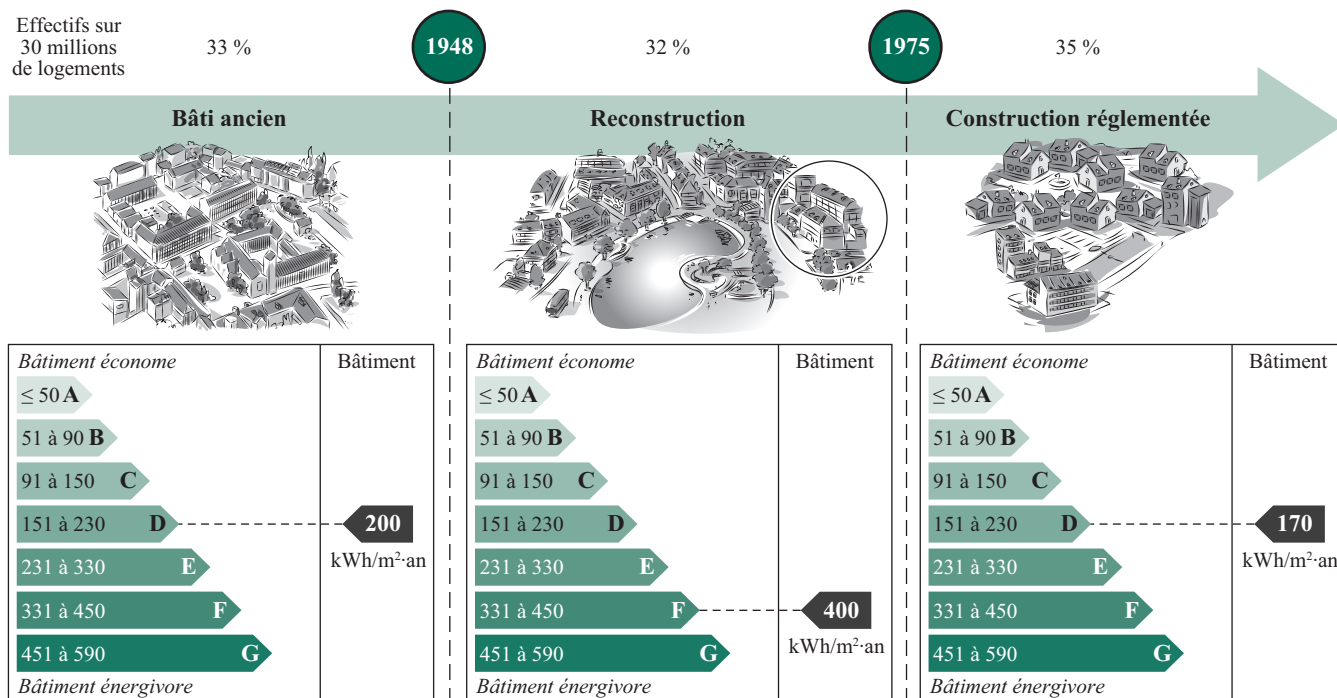


Fig. 7. Trois périodes constructives aux comportements thermiques distincts.

un équilibre hygrothermique subtil : ils sont très sensibles aux conditions d'humidité et laissent transiter la vapeur d'eau. Dans le bâti ancien, l'accent est mis sur le rôle d'une paroi plutôt que sur ses caractéristiques thermiques.

Le bâti ancien est très diversifié, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain. Une étude pour comprendre le comportement thermique des bâtiments anciens a été conduite entre 2004 et 2007 sur un échantillon de 10 logements très différents et représentatifs. Il en ressort que les performances thermiques d'hiver de ces logements parfois vieux de trois cents ans sont très similaires à celles des bâtiments conformes à la RT 2000, prise pour référence.

Le système structurel du bâti comporte généralement des maçonneries porteuses lourdes ayant une forte inertie thermique. Le phénomène d'inertie mesuré sur les bâtiments de l'échantillon de l'étude a mis en évidence des déphasages thermiques atteignant 8 heures avec un écart de température de 6 °C. Grâce à ce déphasage et à cet amortissement, le bâtiment conserve tout au long de la journée des conditions de confort d'été très satisfaisantes. En hiver, la capacité thermique élevée des murs permet de stocker et de réguler les apports gratuits en autorisant une gestion intermittente du système de chauffage.

Qu'ils soient en milieu urbain ou rural, la plupart des logements anciens sont traversants. En l'absence de moyens artificiels, les logements sont ventilés de façon naturelle : la position, la taille et l'orientation des ouvertures permettent des apports solaires en hiver. Le faible ratio d'ouvertures par rapport à la surface totale de l'enveloppe limite les déperditions thermiques en hiver.

L'organisation intérieure du bâtiment ancien favorise son comportement thermique, été comme hiver. Les espaces cloisonnés en différentes zones créent des ambiances thermiques différentes appropriées à leur utilisation : les pièces de vie sont du côté ensoleillé et les pièces de service du côté « froid ». Les espaces tampons sont courants.

### Exemple

Sur la figure 8, les dispositions constructives particulières du bâtiment ancien réduisent tout effet de pont thermique entre la façade et le plancher du bâtiment.

## 2.2 Constructions récentes antérieures à la première réglementation thermique

1948-1974 : thermiquement, c'est la période noire pour le bâtiment en France. 32 % des logements sont concernés, soit 10 millions d'habitations. Les systèmes constructifs de cette période sont conçus pour répondre à l'essor démographique et faire face à la reconstruction du bâti après la Seconde Guerre mondiale. Contrairement aux bâtiments anciens, des plans types d'appartement ou de maison sont généralisés et assemblés pour former des volumes habitables, indépendamment de l'environnement proche. Les apports climatiques potentiels sont souvent négligés. L'implantation est aléatoire, les ouvertures sont réparties sans toujours tenir compte de l'ensoleillement. Standardisées, les parois ne sont plus différenciées selon leur rôle thermique.

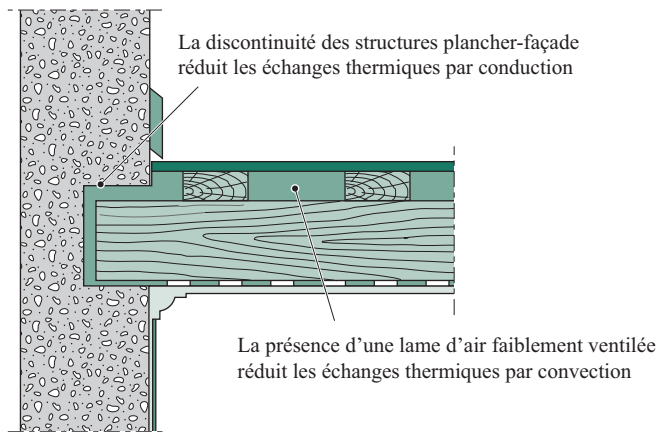


Fig. 8. Exemple d'un plancher complet : poutres encastées, enfermées dans un caisson en plâtre.

Les préfabriques lourdes apparues avant les années 1980 sont truffées des ponts thermiques importants. Il en résulte que les logements collectifs construits pendant cette période représentent à eux seuls plus de la moitié de la consommation de chauffage dans les bâtiments d'habitation, alors qu'ils correspondent à 40 % du nombre de logements, et surcroît en collectif où les surfaces d'échange avec l'extérieur sont en proportion plus faibles que celles des maisons individuelles. Il n'est donc pas étonnant que les classes énergétiques de ces logements soient les plus mauvaises des trois périodes constructives.

## 2.3 Constructions depuis les réglementations thermiques

Les bâtiments construits à partir de 1975 systématisent l'isolation des parois opaques et voient l'arrivée des doubles vitrages.

Depuis 1974, des réglementations thermiques ont été établies afin de réduire progressivement la consommation d'énergie de la construction neuve. Depuis 2000, la réglementation affiche une augmentation progressive des exigences de performances énergétiques des bâtiments en construction neuve, au taux de 10 % tous les cinq ans par rapport à la référence précédente, qui s'est renforcée à 15 % à l'étape de 2005, dite RT 2005, applicable depuis septembre 2006, avec un saut de 50 % en 2012, puis l'apparition des bâtiments dit à énergies positives en 2020.

La réglementation thermique concerne les qualités du bâti et de ses équipements. En ce qui concerne leur comportement thermique (fig. 9), elle se fonde sur des scénarios types de présence et d'usage.

En France, c'est l'isolation thermique par l'intérieur qui a été le plus souvent utilisée depuis la première réglementation thermique. Les épaisseurs d'isolant ont suivi l'augmentation des exigences thermiques. Or, une forte isolation thermique par l'intérieur peut provoquer l'été une forte élévation de la température des parois opaques exposées au soleil. Les écarts nuit/jour et été/hiver peuvent entraîner l'altération des mortiers des maçonneries anciennes ou bien, pour les constructions modernes<sup>(3)</sup>, une dilata-

(3) Un bâtiment est dit moderne si son mode de construction est fondé sur le béton, généralisé massivement à partir de 1948.

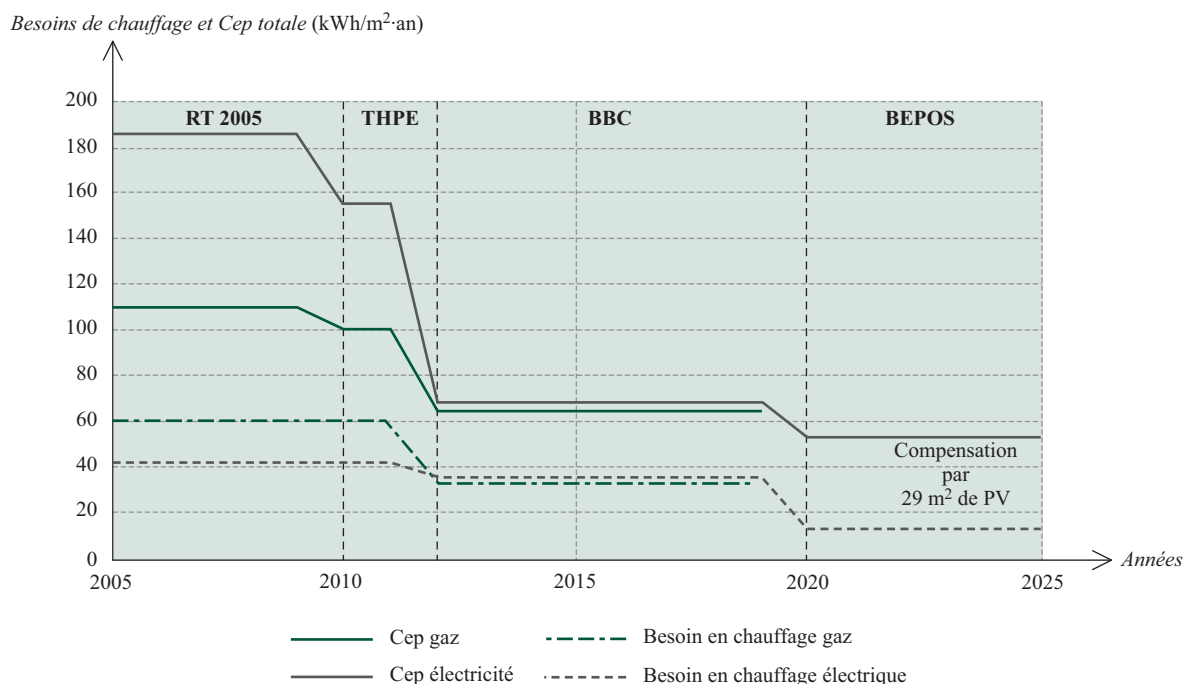


Fig. 9. Évolution des besoins et consommations des constructions neuves depuis 2005.

tation importante des dalles ou poutres en béton avec formation de fissures.

D'autre part, les premières exigences ont concerné l'isolation d'hiver. Or, aussi bonne soit-elle, cette isolation d'hiver ne garantit pas que le bâtiment est confortable l'été. Appliquée à la plupart des logements construits à cette période, l'isolation par l'intérieur empêche de profiter de l'inertie des murs. Pour que l'isolation joue un rôle favorable dans le confort d'été, la solution la plus appropriée est l'isolation par l'extérieur. Souvent pratiquée chez nos voisins européens, elle existe trop peu en France.

## 2.4 Cas de l'Allemagne

L'Allemagne dispose d'un parc de 39 millions de logements. Les bâtiments construits depuis les années 1980 intègrent des critères de performance énergétique.

Le type de construction dominant en Allemagne est la maison traditionnelle. Les maisons préfabriquées connaissent une progression importante et, dans une mesure moindre, celles à ossature bois. L'essor des maisons préfabriquées vient de l'argumentaire commercial des constructeurs, fondé sur les aspects énergétiques.

Le tableau 4 présente les niveaux d'isolation requis dans les différents programmes de bâtiments basse consommation et le compare au niveau réglementaire.

Pour atteindre de tels résultats, des prescriptions techniques et organisationnelles doivent être respectées : par exemple, les portes extérieures sont toujours isolées. Les systèmes constructifs utilisés font la chasse aux ponts thermiques. Sur le plan technique, cela impose de désolidariser les balcons des murs. Le concepteur analyse les détails constructifs en amont des projets. L'enveloppe du bâtiment n'est pas conçue uniquement en décrivant les épaisseurs des isolants ou leur résistance thermique : une analyse fine des jonctions entre parois est nécessaire. De fait, pour chaque bâtiment, est définie une vingtaine de détails constructifs relatifs aux caractéristiques thermiques, hydriques et d'étanchéité à l'air. Ces détails fournissent des solutions concrètes utilisables et permettent de vérifier la qualité de leur réalisation sur site. La

thermographie infrarouge en hiver est très utilisée en phase de réception.

L'isolation s'effectue généralement par l'extérieur, sauf dans les cas de rénovation de bâtiment ayant des façades protégées, où l'isolation est mise en œuvre par l'intérieur. Cela conduit à conserver une bonne inertie thermique et limite les risques d'inconfort d'été. Les maisons à basse consommation sont généralement compactes, avec une forte proportion de fenêtres orientées au sud. Les surfaces de fenêtres sur les autres orientations sont limitées à ce qui est nécessaire pour l'éclairage naturel. Des arbres sont plantés pour permettre un ombrage en été et obtenir un microclimat. Dans la partie nord, des espaces tampons sont mis en place et les zones d'usage restent limitées.

## 2.5 Cas de la Suisse

Comme en France, aucune législation sur l'isolation thermique des bâtiments n'est en vigueur en Suisse au moment de la première crise pétrolière. C'est à partir de 1974 qu'est mis en route le développement d'une législation fédérale sur la consommation énergétique des bâtiments.

La plupart des architectes suisses ne revendiquent pas la performance énergétique de leurs réalisations mais la qualité d'exécution sans ponts thermiques, garante de la préservation à moyen et à long terme des qualités du bâti, assurant le gain de confort. Le détail, l'artisanat font l'objet d'un soin particulier ; un savoir-faire constructif bien germanique est revendiqué.

La première publication, en 1983, du *Manuel Énergie Suisse* constitue une étape décisive. Ce manuel de référence propose un état des lieux énergétique du marché de la construction. Il passe en revue des réalisations exemplaires en la matière, les innovations dans le domaine des matériaux de construction, des modes de mise en œuvre, des installations techniques. On y trouve un résumé des législations en vigueur, des caractéristiques thermiques des matériaux de construction, des valeurs limites et cibles relatives aux indices énergétiques, des données climatiques, un glossaire intégrant les termes nouveaux, etc. Cet ouvrage permet

Tab. 4. Niveau d'isolation requis en Allemagne dans les différents programmes BBC.

Coefficient de performance	Réglementaire	Maison 3 Litres <sup>(1)</sup>	Maison passive	Maison à énergie positive
<i>U mur</i>	0,25 à 0,50	0,15 à 0,25	< 0,16	0,12
<i>U toit</i>	0,20 à 0,40	0,10 à 0,20	< 0,15	0,12
<i>U fenêtres</i>	1,20 à 1,40	0,80 à 1,20	< 0,8	0,70

(1) C'est un des concepts de réhabilitation énergétique des bâtiments anciens les plus novateurs, élaboré par BASF en Allemagne puis exporté en Europe, en Amérique du Nord et même en Asie. Après rénovation, la consommation d'une habitation qui brûle en moyenne 20 litres de fuel par mètre carré et par an fond à 3 litres. Ainsi, pour une superficie de 120 m<sup>2</sup>, les coûts de chauffage chutent de 1 200 à 180 euros par an et les émissions de CO<sub>2</sub> sont réduites de 80 %.

aux professionnels du bâtiment de se tenir à jour dans ce domaine à très forte innovation.

L'un des progrès techniques les plus notables a été réalisé au niveau des fenêtres et des vitrages. À coûts pratiquement égaux, l'indice  $U$  des doubles vitrages disponibles sur le marché suisse a chuté d'un facteur 3 en 15 ans. D'autre part, en intégrant d'importantes épaisseurs d'isolant thermique dans l'enveloppe des bâtiments, la construction en bois se profile parmi les secteurs les plus innovants en matière d'isolation thermique.

En Suisse, la plupart des publications techniques et architecturales de référence ont critiqué l'isolation thermique des façades par l'intérieur, à cause des ponts thermiques ainsi créés : une telle approche semble en effet incompatible avec des standards de haute qualité énergétique tels que Minergie.

### Remarque

Minergie est un label de qualité destiné aux bâtiments neufs et rénovés en Suisse. Il désigne et qualifie des biens et des services qui permettent l'utilisation rationnelle des ressources énergétiques et le recours aux énergies renouvelables, en améliorant la qualité de la vie et en maintenant la compétitivité.

## 3 Grandes solutions de rénovation thermique : tirer parti des échanges thermiques

Pour diminuer la consommation de calories dans un bâtiment, limiter les pertes est le moyen le plus efficace, caractérisé par le meilleur retour sur investissement. Pour les parois, les deux caractéristiques thermiques à améliorer sont l'isolation thermique (ponts thermiques inclus) et l'étanchéité à l'air.

Avec deux tiers des logements non isolés et un tiers thermiquement très mauvais, l'enjeu réside dans le bâti existant et concerne la rénovation thermique.

### Remarque

Les techniques présentées dans cet article ne sont pas toutes exclusives à la rénovation.

Les murs existants peuvent être isolés par l'intérieur ou par l'extérieur. Le choix dépend de considérations urbanistiques, patrimoniales, esthétiques, spatiales, mais aussi des coûts et de la facilité de résolution des ponts thermiques.

Les toitures plates ne sont isolées que par l'extérieur, tandis que les techniques utilisées en toiture inclinée dépendent de la qualité de la couverture.

### Recommandation

Intervenir sur l'isolation de l'enveloppe d'un bâtiment existant exige de tenir compte des possibles conséquences sur la qualité de l'air et la salubrité du bâtiment : une amélioration de la qualité thermique de l'en-

veloppe va de pair avec son étanchéisation. Ainsi, la possibilité d'organiser une ventilation permanente doit être étudiée pour chaque projet de rénovation, thermique.

### 3.1 Isolation des toitures

Suivant le type de toiture, il existe plusieurs grandes techniques d'isolation (tab.5).

#### Important

Il peut être tentant d'isoler une toiture terrasse par l'intérieur, en mettant un isolant contre le plafond du dernier étage. Interdite par les règles de l'art, une telle disposition est à proscrire absolument.

### 3.2 Isolation des parois verticales

En rénovation, il existe deux grandes techniques d'isolation des parois verticales donnant sur l'extérieur : l'isolation thermique rapportée par l'intérieur, qui consiste à placer l'isolant sur la face interne de la paroi, et l'isolation thermique par l'extérieur, sur la face externe de la paroi.

Le tableau 6 dresse la liste des avantages et inconvénients de ces deux techniques.

Le point critique se situe dans les cas où l'isolation par l'extérieur n'est pas acceptée en rénovation. Pour répondre à ce défi, un effort important de recherche et développement est fait en Suisse et en Allemagne, et depuis peu en France, en vue de développer des isolants à partir du vide d'air (le meilleur isolant connu). Ils seront dès lors très performants et de faible épaisseur : on évoque des résistances thermiques 6 à 8 fois supérieures. Ces isolants permettront d'obtenir des isolations thermiques par l'intérieur présentant des valeurs de  $U$  équivalentes à l'isolation thermique par l'extérieur de forte épaisseur. Si l'inertie est cependant recherchée, elle restera toujours délicate à obtenir à faible épaisseur par l'intérieur.

#### Remarque

L'un des principaux sinistres dans les bâtiments vient du remplacement des anciennes fenêtres qui permettaient la ventilation du logement par défaut d'étanchéité. Les fenêtres neuves et étanches sans entrée d'air ne permettent plus de l'assurer. Il y a alors apparition de condensation, de moisissures et d'autres champignons. En cas de remplacement des fenêtres, il est conseillé d'opter pour des fenêtres équipées d'entrées d'air s'il n'existe pas d'autre entrée d'air dans la pièce. Pour les fenêtres orientées au sud, il est important de choisir des vitrages avec des facteurs solaires élevés afin d'avoir autant d'apports solaires que possible en hiver.

### 3.3 Renforcement de l'étanchéité à l'air

Porter uniquement un gros pull en laine l'hiver lorsqu'il y a du vent ne permet pas de garder les calories de notre corps ; mettez par-dessus un vêtement étanche à l'air et tout change. C'est le

Tab. 5. Synthèse des grandes techniques disponibles pour l'isolation des toitures.

Type de toiture	Techniques	Description
<b>Comble perdu ou toiture froide non praticable</b>	Isolation du plancher en rouleaux ou panneaux	Des rouleaux sont étendus sur le plancher. Lorsqu'il a un pare-vapeur, l'isolant ne doit pas être en contact avec le bois : il faut le poser sur un litzonnage interrompu de temps à autre pour permettre une ventilation dans toutes les directions. Des épaisseurs d'isolant adaptées au confort d'été sont possibles.
	Isolation du plancher en rouleaux ou panneaux entre solives	Une première couche d'isolant est déroulée entre les solives et une seconde au-dessus, perpendiculairement, afin de minimiser les ponts thermiques. Dans le cas d'un faux plafond de plâtre sur lattes de bois en entrevous, il ne faut pas mettre le pare-vapeur au contact du bois, au risque d'engendrer un pourrissement. Des épaisseurs d'isolant adaptées au confort d'été sont possibles.
	Isolation en vrac	Le principe est le même que celui des deux cas précédents. Il est souhaitable de recouvrir entièrement les solives d'isolant afin d'éviter les ponts thermiques. Des épaisseurs adaptées au confort d'été sont possibles.
<b>Comble perdu ou toiture froide praticable</b>	Isolation du plancher entre solives avant la pose du sol	Cette technique consiste à isoler entre les solives avec des rouleaux, des panneaux ou de l'isolant en vrac, puis à poser ou reposer le sol sur les solives, s'il était déjà posé. Dans le cas d'un faux plafond de plâtre sur lattes de bois en entrevous, il ne faut pas mettre le pare-vapeur au contact du bois, au risque d'engendrer un pourrissement. Les épaisseurs sont limitées par les dimensions des solives ; l'isolant n'est pas continu, d'où la présence de ponts thermiques.
	Isolation du plancher entre solives avec un sol déjà posé	
<b>Comble aménagé, aménageable ou toiture chaude</b>	La couverture est vétuste : isolation de la toiture par l'extérieur posée sur la charpente ( <i>sarking</i> )	Un isolant en panneaux rigides est posé au-dessus des chevrons ; il supporte la couverture. Il existe des isolants manufacturés qui comprennent un parement intérieur et un isolant moulé. Ces composants peuvent également comporter des liteaux ou des chevrons intégrés.
	La couverture est en bon état : isolation de la toiture par l'intérieur	Généralement, l'isolation sous rampants est réalisée en deux couches : une première entre les chevrons, complétée par une seconde posée sur un contre-chevronnage, indispensable pour obtenir une lame d'air suffisante avec l'épaisseur d'isolant préconisé. Inutile sous les toitures en chaume car elles ont déjà une résistance thermique élevée.
<b>Toiture terrasse</b>	Isolation sur étanchéité « toiture inversée »	L'isolant est disposé sur une étanchéité existante, éventuellement réparée, ou sur une étanchéité neuve. Selon l'accessibilité, cette couche d'isolant est recouverte d'une couche de gravier ou d'un dallage sur sable. Cela présente l'avantage de protéger l'étanchéité.
	Isolation sous étanchéité	L'isolant est mis en œuvre au-dessus de la dalle puis recouvert par l'étanchéité. Le complexe peut être complété d'une protection lourde : en gravillons pour les toitures non accessibles, ou en dallage lorsqu'une circulation est prévue.



Tab. 6. Critères de sélection d'un mode d'isolation des murs.

Mode d'isolation	Avantages	Inconvénients
Par l'intérieur	Coût moindre. Aspect extérieur maintenu.	Risque de condensation interne. Refroidissement et humidification du mur, risque de détérioration de l'isolant par la pluie et l'humidité ascensionnelle. Risque de fissuration suite aux variations thermiques du mur. Perte d'inertie et de confort d'été. Ponts thermiques non résolus. Perte de surface au sol. Finitions intérieures à remplacer. Continuité du pare-vapeur difficile à assurer. Installations électrique et de chauffage à revoir. Risque de gel des conduites dans les murs.
Par l'extérieur	Supprime les risques de ponts thermiques locaux. Protège le mur du gel et de la fissuration. Protège de la pénétration de la pluie battante. Améliore l'aspect en cas de revêtement abîmé. Conserve l'inertie. Conserve les finitions intérieures.	Les retours des ouvertures doivent être isolés, les seuils et appuis remplacés, etc. Éventuellement, problèmes d'alignement des façades au droit des gouttières, mitoyens, etc. L'exécution de ce mode d'isolation doit être confiée à une entreprise spécialisée.

même principe qui s'applique à nos habitations avec le pare-vapeur. Des études l'ont même quantifié : une fente de 1 mm de large sur 1 m de long pour une surface d'isolant de 1 m<sup>2</sup> divise par 4,8 le pouvoir isolant de celui-ci.

Lors de la rénovation d'un bâtiment, il est donc essentiel de maîtriser les fuites d'air parasites en rendant l'enveloppe étanche. Les techniques diffèrent selon le type de paroi :

- parois opaques aux points courants : suivant les systèmes constructifs, l'utilisation d'une membrane pare-vapeur, outre bloquer le passage de la vapeur dans les murs, assure l'étanchéité à l'air de l'enveloppe ; la mise en œuvre doit être très soignée, avec une parfaite étanchéité aux jonctions ;
- parois translucides : selon leur état et leur conception, les menuiseries d'un bâtiment peuvent être la source d'importantes fuites d'air ; de plus, un soin tout particulier doit être apporté dans le montage de ces menuiseries : l'utilisation du joint « compribande », tel que spécifié dans les DTU, et la jonction avec les pare-vapeurs des parois opaques sont notamment déterminantes pour obtenir une enveloppe étanche ;
- points singuliers : une attention particulière doit être portée sur le traitement de l'étanchéité des points singuliers et l'interface

entre les différentes parois. Pour cela, il est indispensable de se référer aux règles de l'art et aux DTU.

### 3.4 Étude de cas : simulation thermique dynamique avant et après une rénovation

Cette simulation thermique dynamique est effectuée avec le logiciel de référence PLEIADES + COMFIE d'Izuba (tab. 7). Deux maisons individuelles représentatives du mode constructif actuel ont été choisies : l'une est située à Mâcon, en Bourgogne, l'autre à Ajaccio, en Corse. Ces deux maisons, qui font l'objet d'une rénovation thermique, sont soumises à la simulation sur une année complète avant et après travaux.

La simulation thermique dynamique consiste à déterminer par le calcul, à partir d'une série de données climatiques horaires et de scénarios d'utilisation, le comportement thermique d'un bâtiment au fil du temps. Cela permet de connaître les besoins en chauffage l'hiver, l'inertie thermique du bâtiment en période chaude et l'évaluation du déphasage et de la température maximum relevée à l'intérieur du bâtiment (tab. 8 et tab. 9).

Tab. 7. Caractéristiques des maisons pour la simulation thermique dynamique.

Situation	Mâcon	Ajaccio
Surface habitable	116,5 m <sup>2</sup>	117 m <sup>2</sup>
Hauteur sous plafond	2,5 m	3,5 m
Type	Maison de plain-pied avec comble perdu sur sol en terre-plein	Maison de plain-pied avec toiture en rampant sur terre-plein
Occupation	Famille de 4 personnes : – 1 personne en journée la semaine – 4 personnes la nuit et le week-end	
Ventilation	Taux de renouvellement d'air : 0,6 vol/h	
Température	Chauffage : 16 °C la nuit et 20 °C le jour Climatisation : aucune	
Occultation	Fermeture des volets battants en bois la nuit	
Composition dalle	Béton plein de 20 cm avec carrelage sur terre-plein	
Menuiserie	1 porte d'entrée en bois au nord 5 fenêtres 1,15 × 1 m au nord, à l'est et à l'ouest 4 portes-fenêtres 1,15 × 2 m au sud	1 porte d'entrée en bois au nord 8 fenêtres 2 × 1,20 m au nord, à l'est, à l'ouest et au sud

Tab. 8. Hypothèses pour la rénovation thermique de la maison de Mâcon.

Base : Maison non isolée			Variante 1 : Maison isolée		
Mur extérieur	Enduit extérieur	R = 0,3	Mur extérieur	Enduit extérieur	R = 4,4
	Bloc de béton creux 20 cm			Polystyrène expansé 16 cm	
	Plâtre intérieur			Bloc de béton creux 20 cm	
				Plâtre intérieur	
Plafond	Plafond BA13	R = 0,04	Plafond	Laine de roche 30 cm	R = 7,36
				Plafond BA13	
Menuiserie	Double vitrage 4/6/4	U <sub>w</sub> = 2,96	Menuiserie	Double vitrage 4/16/4 argon	U <sub>w</sub> = 1,73
	Bois			PVC	

Tab. 9. Résultats pour la rénovation thermique de la maison de Mâcon.

	Base	Évolution	Variante 1
Besoin en chauffage	53 373 kWh	– 79 %	11 294 kWh
Besoin en chauffage/m <sup>2</sup>	461 kWh/m <sup>2</sup>	– 79 %	98 kWh/m <sup>2</sup>
Puissance de chauffage	28,7 kW	– 55 %	12,8 kW
Température maximale	28,5 °C	– 3,5 °C	25,0 °C

Tab. 10. Hypothèses pour la rénovation thermique de la maison d'Ajaccio.

Base : Maison non isolée			Variante 1 : Maison isolée		
Mur extérieur	Enduit chaud Pierre calcaire 40 cm	$R = 0,46$	Mur extérieur	Enduit extérieur Fibre de bois 16 cm Pierre calcaire 40 cm	$R = 3,79$
Plafond	Laine de verre 10 cm entre chevrons	$R = 2,65$	Plafond	Fibre de bois 12 cm Laine de verre 10 cm entre chevrons	$R = 5,15$
Menuiserie	Simple vitrage bois	$U_w = 4,08$	Menuiserie	Triple vitrage 4/16/4/16/4 argon bois	$U_w = 1,1$
Ventilation	Toute l'année	0,6 vol/h	Ventilation	Surventilation nocturne l'été	3 vol/h
Occultation	Fermeture par volets	nuit	Occultation	Fermeture par volets	Jour pendant l'été

Tab. 11. Résultats pour la rénovation thermique de la maison d'Ajaccio.

	Base	Évolution	Variante 1
Température maxi	29,6 °C	- 3,6 °C	26,0 °C

### 3.4.1 Maison de Mâcon

Les travaux entrepris dans cette maison sont l'isolation thermique par l'extérieur des murs avec du polystyrène expansé de 16 cm d'épaisseur, l'isolation des combles avec 30 cm de laine de roche, et le remplacement des fenêtres à double vitrage dites de première génération par un double vitrage aux performances moyennes du moment.

Le besoin en chauffage baisse de près de 80 %, avec une puissance de chaudière divisée par deux. La mise en œuvre de l'isolant des murs à l'extérieur des parois permet de profiter de leur inertie et limite les ponts thermiques. Ainsi la température maximum atteinte durant l'été baisse de 3,5 °C entre les deux scénarios (tab. 10 et tab. 11).

### 3.4.2 Maison d'Ajaccio

Les travaux entrepris dans cette maison sont l'isolation thermique par l'extérieur des murs avec 16 cm de fibre de bois (excellent déphasage), l'isolation des combles avec 12 cm de fibre de bois associée à 10 cm de laine de verre, et le remplacement des fenêtres à simple vitrage avec un triple vitrage à hautes performances.

Pour cette maison, nous nous intéressons aux résultats de la saison d'été. Là encore, la mise en œuvre de l'isolant des murs en pierre à l'extérieur des parois permet d'augmenter la résistance thermique tout en conservant leur inertie importante. Ainsi la température maximum atteinte l'été baisse de 3,6 °C entre les deux scénarios, sans avoir eu recours à une climatisation. La ventilation

nocturne joue un rôle important : en effet, il est nécessaire de bien ventiler la nuit lors des périodes chaudes afin d'évacuer les calories absorbées pendant la journée. Cela est d'autant plus vrai que les murs étant isolés par l'extérieur, ils ont tendance à empêcher les calories de sortir par leur face extérieure.

## 4 Conclusion

Avec les échanges thermiques des parois pour fils conducteurs, nous avons pu caractériser leur comportement thermique. Prenant un peu de hauteur, nous avons placé ces parois en situation dans l'enveloppe du bâtiment, et avons touché du doigt la performance thermique des bâtiments tant anciens que modernes. Ce voyage dans le temps et dans l'espace a mis en évidence que les anciens savaient plus de choses que nous à ce sujet. Nous avons construit massivement des épaves thermiques pendant près de 40 ans. Pendant ce temps, les Allemands et les Suisses ont innové ; ils détiennent aujourd'hui un savoir-faire indéniable en matière de performance thermique des bâtiments.

En France, aujourd'hui, le niveau de performance thermique, été comme hiver, des bâtiments neufs, va faire un saut spectaculaire avec la RT 2012. Le problème est que plus de la moitié du parc des bâtiments existants présente des lacunes thermiques. L'enjeu majeur concerne ainsi la rénovation thermique et donc ses différentes techniques. Pour illustrer notre propos, un logiciel de simulation thermique nous a permis de mesurer l'impact de deux rénovations thermiques appelées, nous l'espérons, à se banaliser.