

# QUELLES SOLUTIONS POUR AMÉLIORER LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DANS L'HABITAT ?

Sandrine Steydli

## Partie des programmes de physique-chimie associée

Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale (en vigueur à partir de la rentrée 2020) : Partie Énergie – conversion et transferts (transferts thermiques ; flux thermique, résistance thermique)  
Programme de sciences physiques, complément des sciences de l'ingénieur de terminale générale (en vigueur à partir de la rentrée 2020) : Partie Énergie – conversion et transferts (transferts thermiques ; flux thermique, résistance thermique)  
Programme maths-PC en STL (en vigueur à partir de la rentrée 2020) : Partie Énergie – conversion et transferts (bilan énergétique ; dissipation et transferts thermiques.)

**Mots-clés :** habitat, thermique, isolation, matériaux

## INTRODUCTION

La maîtrise de la consommation d'énergie est au cœur des enjeux du XXI<sup>e</sup> siècle, et devient une préoccupation majeure pour les citoyens d'une planète confrontée à des problématiques d'épuisement des ressources et de changement climatique. Dans un pays comme la France, le bâtiment est responsable de près de la moitié de la facture énergétique et constitue donc un levier important pour réduire la consommation globale d'énergie. Quelles pistes peuvent être explorées pour améliorer ses performances ? En particulier, comment peut-on rénover le bâti existant ?

Consommation énergétique en kWh/m<sup>2</sup>/an

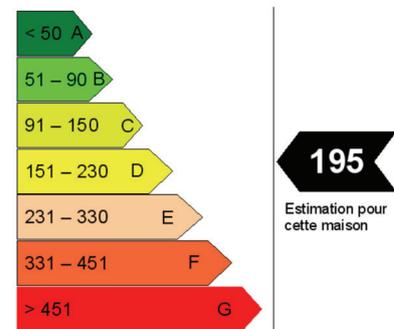


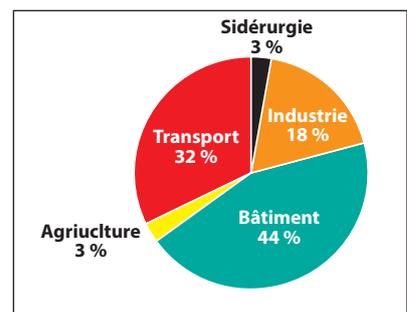
Figure 1 – Depuis 2006, Le DPE (diagnostic de performance énergétique) doit obligatoirement être fourni par un propriétaire lors de la vente ou de la mise en location d'un bien immobilier. L'une des deux étiquettes énergétiques fait état de la consommation d'énergie du logement, en kWh/m<sup>2</sup>/an. La deuxième étiquette – non représentée ici – évalue également son impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre.  
Source : DPE – EPDB français, Wikimedia Commons.

## UN SECTEUR EN (DISCRÈTE) MUTATION

### Le bâtiment est un gros consommateur d'énergie...

On pourrait spontanément penser qu'il s'agit des transports, mais le bâtiment est également un des secteurs le plus gourmand en énergie et représente en moyenne en Europe environ 44 % de la consommation en 2011 (Figure 2).

Figure 2 – Consommation finale d'énergie par secteur en Europe en tep<sup>1</sup> en 2011 (corrigée des variations climatiques).  
Source : base de données Pégase, SOeS.



1. tep (tonne d'équivalent pétrole) : unité de mesure de l'énergie, correspondant au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole « moyenne » (soit 41,868 GJ).

De plus, la consommation dans le bâtiment a plutôt tendance à augmenter, alors qu'elle stagne ou diminue dans les autres secteurs comme l'industrie (Figure 3).

En 2017, les consommations énergétiques relatives transport et habitation étaient de 46 Mtep<sup>2</sup> pour le transport et 41 Mtep pour l'habitat et le tertiaire.

Par ailleurs, près des trois quarts des besoins énergétiques dans le bâtiment sont liés au chauffage, lequel mobilise des sources d'énergie globalement « moins propres » que les autres secteurs. En effet, 56 % de l'énergie consommée dans ce secteur provient du gaz et du pétrole, la part des énergies renouvelables étant réduite (Figure 4).

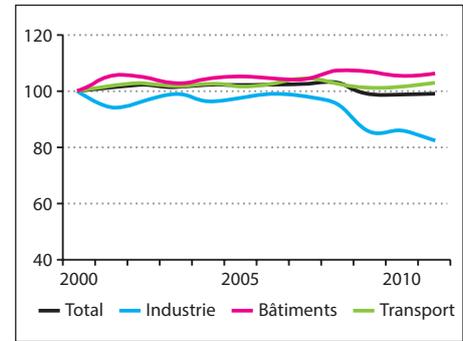


Figure 3 – Évolution de la consommation d'énergie finale par secteur en Europe (base 100 : année 2000).  
Source : base de données Pégase, SOeS.

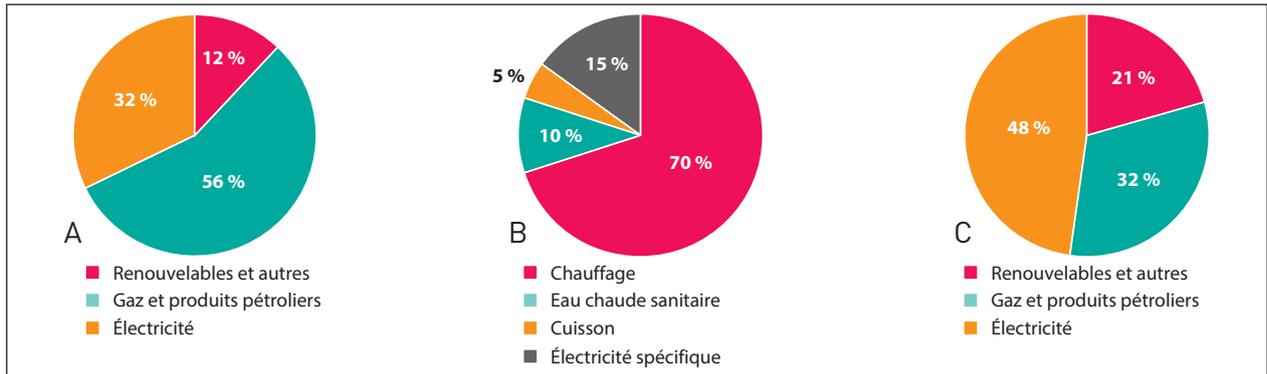


Figure 4 – Le chauffage dans les bâtiments d'habitation. (A) Consommation d'énergie finale du chauffage par source ; (B) consommation d'énergie finale par usage dans le résidentiel en Mtep ; (C) consommation d'énergie finale des autres usages par source.

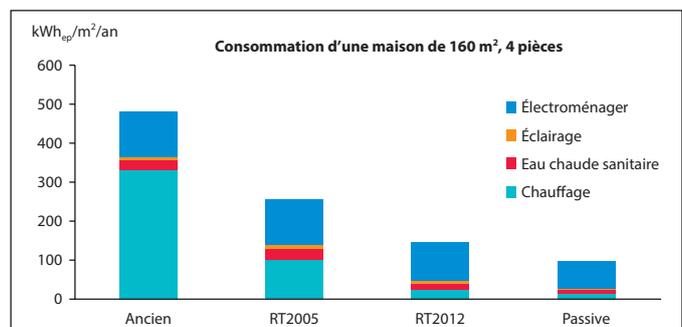
### ... mais qui fait des efforts

Par le passé, les grandes avancées dans le domaine du bâtiment ont été liées à de nouveaux modes de construction, tel le développement des bâtis en béton à partir de 1906 en France. On a ainsi vu se multiplier des constructions dont la réduction de la facture énergétique n'était pas la première priorité. Mais depuis quelques dizaines d'années, cette question a pris une place grandissante et est désormais indissociable de toute perspective d'évolution dans le bâtiment.

Les innovations actuelles répondent à une demande croissante des populations, et sont facilitées par le développement des technologies de l'information et de la modélisation des données du bâtiment<sup>3</sup>. Par ailleurs, conscients des enjeux environnementaux et économiques liés à l'innovation dans l'habitat, les gouvernements de nombreux pays ont fortement soutenu l'adoption de normes de plus en plus contraignantes en termes d'efficacité énergétique.

Dans le neuf, les réglementations thermiques permettent ainsi de compresser significativement la consommation d'énergie primaire par le chauffage : en effet, la facture de chauffage d'une maison ou d'un bâtiment dans l'ancien avec la réglementation thermique de 2005 est entre 3 à 10 fois plus élevée que pour les bâtiments respectant la réglementation thermique récente (Figure 5).

Figure 5 – Évolution de la consommation d'une maison de 160 m<sup>2</sup> (4 pièces) en fonction des réglementations successives.  
Source : Saint-Gobain.



2. Mtep ( mégatonne d'équivalent pétrole ) : unité de mesure de l'énergie, correspondant au pouvoir calorifique d'un million de tonnes de pétrole « moyenne ».  
3. Modélisation des données du bâtiment ( ou BIM pour Building Information Model ) : processus qui implique la création et l'utilisation d'un modèle 3D intelligent pour prendre de meilleures décisions concernant un projet et les communiquer. Cela permet notamment aux équipes de concevoir, visualiser, simuler et collaborer plus facilement tout au long du cycle de vie du projet.

QUELLES SOLUTIONS POUR AMÉLIORER LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DANS L'HABITAT ?

Par conséquent, plus de 40 % de la facture énergétique collective du pays pourrait être comprimée d'un ordre de grandeur entre 3 et 10 !

L'application systématique de ces réglementations thermiques va donc permettre d'édifier de nouvelles constructions bien moins énergivores, mais la question se pose pour le bâti existant, qu'il s'agira de rénover afin d'en réduire également la consommation.

## UNE PRIORITÉ : L'ISOLATION DU BÂTI EXISTANT

### Les solutions actives sont-elles pertinentes ?

À l'heure où les avancées technologiques mettent la domotique à portée de tous, on peut penser que la révolution de la performance énergétique du bâtiment passe nécessairement par l'utilisation de ces solutions actives, avec une multiplication de capteurs. En effet, on peut déjà trouver de nombreux systèmes sur le marché pour aider à optimiser la facture d'énergie, par exemple en éteignant automatiquement la lumière ou le chauffage quand on quitte une pièce.

La généralisation de tels dispositifs est effectivement intéressante dans le cas de bâtiments utilisés quelques heures par jour, comme des écoles ou des bureaux. En revanche, dans l'ensemble du parc résidentiel occupé la nuit, les quelques économies ainsi réalisées sont infimes par rapport aux gains liés aux solutions passives, qui consistent à améliorer l'isolation du bâtiment.

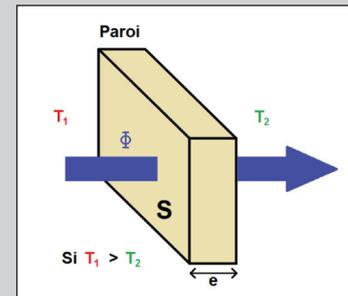
### Le choix des matériaux isolants

#### Conductivité et résistance thermiques

##### Transferts thermiques

Lorsqu'un corps, ou une paroi, sépare deux zones à des températures différentes telles que  $T_1 \geq T_2$  par exemple, il s'établit un transfert d'énergie sous forme de chaleur par conduction à travers la paroi, de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide, et ce jusqu'à ce que l'équilibre thermique  $T_1 = T_2$  soit atteint.

Figure 6 – Le flux thermique  $\Phi$  à travers une paroi plane se fait spontanément de la zone chaude vers la zone froide.  
Source : www.methodemaths.fr.

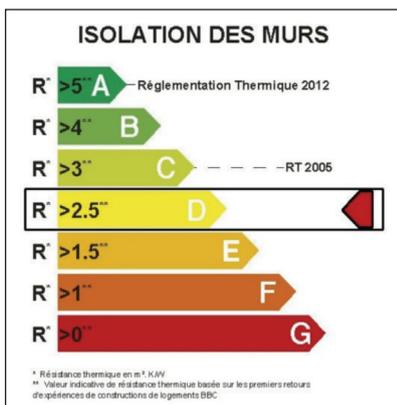


Le flux thermique  $\Phi$ , qui traduit la quantité d'énergie transférée pendant un intervalle de temps, s'exprime en Watt (W) et a pour expression :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} \Delta T,$$

avec :

- ▶  $\lambda$ , conductivité thermique de la paroi, exprimée en Watt par Kelvin et par mètre ( $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ) ;
- ▶  $e$  l'épaisseur de la paroi en mètres (m) ;
- ▶  $S$  la surface de la paroi plane traversée par le flux en mètres carrés ( $\text{m}^2$ ) ;
- ▶  $\Delta T = T_1 - T_2$  la différence de température en Kelvin (K).



La grandeur qui caractérise la performance d'un matériau d'isolation est donc sa conductivité thermique : plus la valeur de  $\lambda$  est faible et moins le matériau est perméable aux flux thermiques, donc meilleure est l'isolation.

Pour comparer les propriétés de différents panneaux d'isolation disponibles sur le marché, il est à noter que l'étiquette énergétique du matériau ne fournit pas la donnée de sa conductivité thermique  $\lambda$  mais de sa résistance thermique surfacique  $R_s$ , qui s'exprime en mètre carré Kelvin par Watt ( $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$ ) (Figure 7).

Figure 7 – Étiquette d'un panneau de laine de verre de 10 cm d'épaisseur ( $R_s = 2,65 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ ). Source : www.leroymerlin.fr.

La résistance thermique étant définie par la relation :  $R = \frac{\Delta T}{\Phi}$ , avec  $R = R_s \times S$ , la résistance thermique surfacique  $R_s$  est donc liée à la conductivité thermique  $\lambda$  par la relation :  $R_s = \frac{e}{\lambda}$ .

Il s'agit dès lors de privilégier un matériau de grande résistance thermique pour obtenir une meilleure isolation.

## Les matériaux existants

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
Hélium		0,15
Argon		0,017
Krypton		0,010

Le Tableau 1 regroupe quelques valeurs de conductivités thermiques pour différents matériaux.

On peut noter par exemple que la laine de verre, l'un des principaux matériaux isolants utilisés en France, a une conductivité thermique plus de 20 fois plus faible que celle du béton (Figure 8). Ainsi pour obtenir la même qualité d'isolation qu'avec une couche de 20 cm de laine de verre, il faudrait un mur en béton de plus de 4 mètres d'épaisseur !



Figure 8 – La laine de verre, la laine de roche, les mousses, etc., permettent de limiter les déperditions de chaleur dans les bâtiments, que ce soit au niveau des murs, des vitrages, des combles ou des sols.

Source : Fotolia.com – Cyril Comtat.

De manière générale, le choix va se porter vers des matériaux très peu denses, et/ou enfermant un volume important d'air ou de gaz. On constate en effet que les gaz ont une faible conductivité thermique, y compris l'air. L'idée est donc de les utiliser pour l'isolation des bâtiments, soit en les enfermant entre 2 lames de matériaux (c'est le cas des fenêtres à double ou triple vitrage), soit en piégeant l'air à l'intérieur même des matériaux. C'est le principe à la base des isolants les plus courants : les mousses, la laine verre ou de roche, et le polystyrène.

Le polystyrène, qui est le plus utilisé, se trouve sous deux formes : expansé<sup>4</sup> [PSE] avec des porosités ouvertes, et extrudé<sup>5</sup> avec des porosités fermées. Dans les deux cas, il contient plus de 95 % d'air ( $\lambda_{\text{air}} = 0,026 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ) ou de pentane ( $\lambda_{\text{pentane}} = 0,013 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ) immobilisé dans ses pores (Figure 9).

Figure 9 – Le polystyrène est un excellent isolant thermique grâce à ses 95% d'air ou de pentane emprisonnés.



4. Polystyrène expansé : c'est la forme la plus courante du polystyrène, il se présente sous forme de petites billes blanches et est utilisé pour protéger des chocs ou comme isolant thermique ou phonique.

5. Polystyrène extrudé : c'est un isolant de couleur bleue réalisé à partir de polystyrène et de gaz. Il prend souvent la forme de panneaux à bords lisses ou bouvetés. Il est utilisé pour isoler des chapes ou des sous-planchers.

## Le développement de nouveaux matériaux pour l'isolation

Beaucoup de recherches sont encore menées pour améliorer les performances de ces matériaux.

Sur l'exemple de la laine de verre qui est un matériau extrêmement complexe, on développe ainsi de nouveaux matériaux en modifiant la taille, la composition ou l'origine des fibres qui les constituent, ainsi que la nature des liants utilisés : certains sont maintenant organiques et non issus de produits pétroliers.

Les chimistes ont également mis au point de nouvelles générations de matériaux d'isolation biosourcés<sup>6</sup>. Ces matériaux biosourcés sont à l'heure actuelle un peu moins rentables car il faut également prendre en compte d'autres facteurs telle la résistance aux contraintes mécaniques, au feu ou à l'humidité, mais ils répondent à une demande sociale importante et ouvrent de grandes perspectives.

Par ailleurs, d'autres nouveaux matériaux plus isolants que la laine de verre sont déjà disponibles et utilisés notamment dans l'électroménager. Leur efficacité repose sur le même principe : emprisonner de l'air ou un gaz, ou mieux encore du vide !

► *Première idée : c'est la quantité d'air emprisonné dans les pores qui crée l'isolation.*

Par conséquent, pour emprisonner la même quantité d'air dans un volume deux fois plus petit et ainsi réduire l'épaisseur du panneau d'un facteur 2, il faut diminuer la taille des pores et les remplacer par des nanopores. C'est sur ce principe qu'ont été conçus les aérogels<sup>7</sup>, dont les conductivités thermiques atteignent des valeurs entre 0,012 et 0,017 W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>, donc largement inférieures à celle de l'air immobile lui-même ! (Figure 10A).

L'aérogel le plus connu, à base de silice amorphe<sup>8</sup>, a déjà été exploité par la Nasa dans les années 1970 pour ses équipements spatiaux, mais son coût de fabrication élevé en a limité les applications. De nombreux autres aérogels ont été élaborés, à base de carbone ou de polyuréthane par exemple, et la recherche se poursuit également dans le domaine des aérogels biosourcés, à base de riz, d'agar-agar ou d'amidon. Les objectifs conjoints étant de réduire les coûts de production et d'améliorer certaines propriétés (notamment mécaniques).

► *Deuxième idée : les gaz sont très isolants, mais l'isolant ultime et absolu est le vide.*

On a ainsi conçu des panneaux sous vide, qui atteignent des performances encore supérieures, au prix de contraintes d'utilisation plus importantes (Figure 10B). Mais les panneaux sous vide ne peuvent être encore utilisés dans le bâtiment car il est par exemple impossible d'y planter un clou !

La recherche se poursuit donc dans ces deux directions. Il y a encore d'autres pistes, comme l'exploitation des changements de phase des matériaux, pour permettre de réguler la température interne des bâtiments et pour réduire les consommations énergétiques pour les besoins de climatisation et de chauffage.

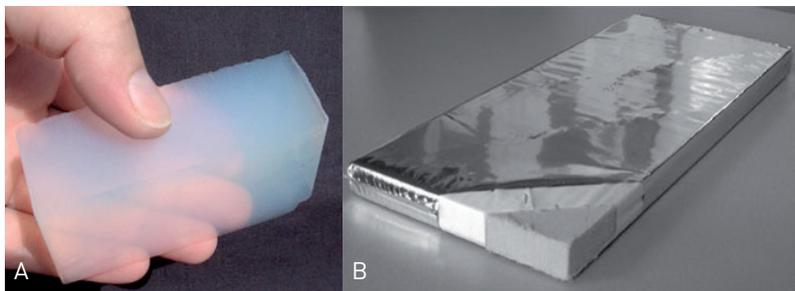


Figure 10 – Nouveaux matériaux pour l'isolation thermique. Des super isolants, déjà largement utilisés dans l'électroménager, aux propriétés isolantes 2 à 8 fois supérieures à la laine de verre : (A) des aérogels de silice ; (B) des panneaux sous vide. Source : Saint-Gobain.

6. Matériau biosourcé : matériau issu de la biomasse d'origine animale ou végétale. Dans le bâtiment, les matériaux biosourcés les plus utilisés sont le bois, la paille, la chènevotte (chanvre), la ouate de cellulose, le liège, le lin et la laine de mouton. On parle parfois aussi de biomatériaux ou d'agrossourcés.

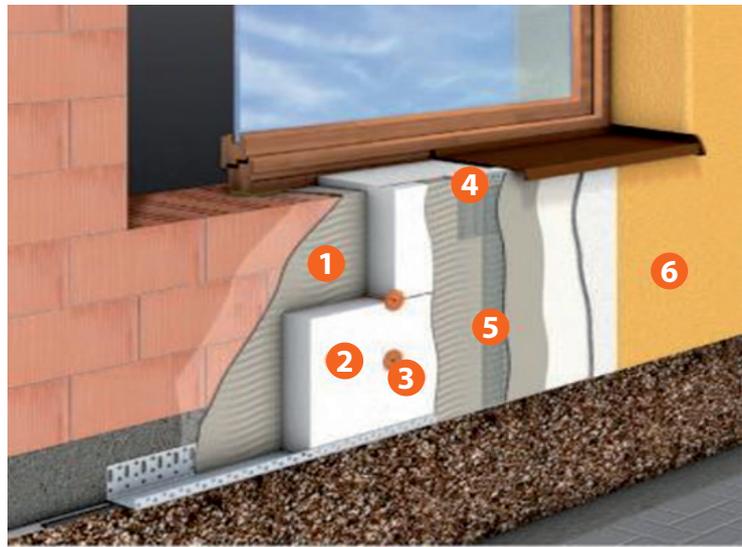
7. Aérogel : matériau nanostructuré qui ressemble à un gel mais où le composant liquide est remplacé par du gaz.

8. Amorphe : se dit d'un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés.

## L'apport de l'isolation par l'extérieur

Au-delà de l'augmentation de la performance des matériaux, les ingénieurs travaillent sur des systèmes de plus en plus complexes, comme le traitement de l'étanchéité à l'air des bâtiments avec l'utilisation de membranes ou de mortiers chimiquement très élaborés. On peut également citer le problème des ponts thermiques, c'est-à-dire la déperdition de chaleur à l'interface entre deux parois (due par exemple à un lien métallique entre deux parois).

Afin d'éviter de perdre trop de précieux mètres carrés de surface habitable, on voit se développer l'isolation par l'extérieur (l'ITE11), et notamment l'isolation par façade ventilée. Ces systèmes, qui combinent des isolants traditionnels (laines minérales, mousses) et des mortiers isolants (Figure 11), ont des propriétés bien identifiées, conçues en matière de résistance à l'eau, de respiration et évidemment d'isolation.



- 1 Colle
- 2 Isolant
- 3 Fixation mécanique
- 4 Renforcement
- 5 Sous-enduit
- 6 Enduit

**weber**  
SAINT-GOBAIN



Figure 11 – Éléments constitutifs d'une Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) (colle, isolant, armature, renforcement, sous-enduit, enduit).

Grâce aux nouveaux matériaux, on sait maintenant développer des systèmes ITE en préservant l'esthétique des bâtiments. L'image par caméra thermique de la Figure 12B montre les gains en termes de déperdition.

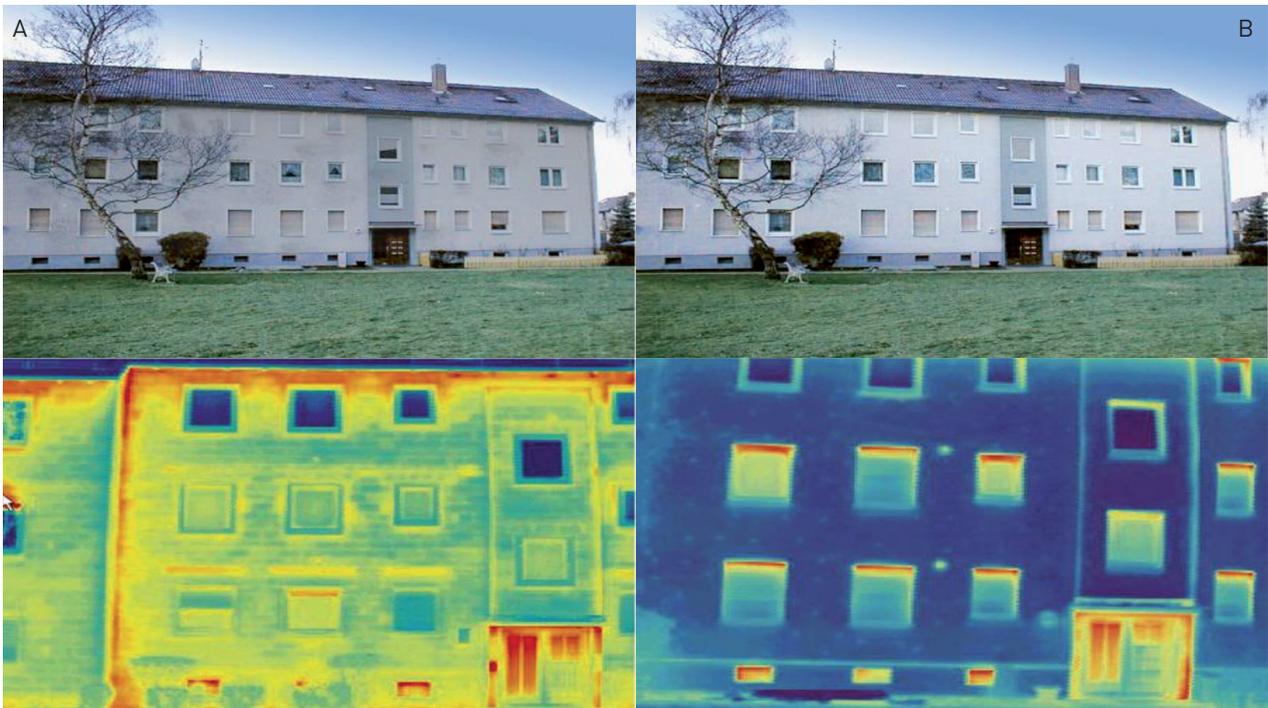


Figure 12 – Effet de l'installation de systèmes d'isolation thermique par l'extérieur (ITE). (A) Bâtiment avant isolation par l'extérieur ; (B) bâtiment après isolation par l'extérieur. En bas figurent les images thermiques du bâtiment.

Source : Saint-Gobain.

## CONCLUSION

Grâce aux avancées scientifiques et technologiques, le secteur de l'habitat est en passe d'améliorer sa performance énergétique, en assurant notamment une meilleure isolation thermique aux constructions existantes. Cette rénovation passe par le choix de techniques et de matériaux de plus en plus élaborés, et qui ne cessent d'évoluer. La recherche sur les matériaux biosourcés par exemple laisse à penser que tout en utilisant des ressources moins nocives pour l'environnement, on parviendra à réduire le coût encore prohibitif des matériaux d'isolation les plus performants actuellement. Et peut-être dans un futur pas si lointain verra-t-on se développer des maisons à énergie positive, y compris parmi les anciennes qui ont été rénovées ?

## SOURCES PRINCIPALES

La chimie et les grandes villes, EDP Sciences, 2017, ISBN : 978-2-7598-2134-1, « La discrète révolution de la performance énergétique des bâtiments » par François Michel,  
[https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Ville\\_p17?.pdf](https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Ville_p17?.pdf)

La chimie et l'habitat, EDP Sciences, 2011, ISBN : 978-2-7598-642-3, « Isolation dans l'habitat : la chimie pour ne pas gaspiller de calories ! » par Jean-Claude Bernier,  
[https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie\\_habitat\\_75.pdf](https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie_habitat_75.pdf)

**Sandrine Steydli** est professeure agrégée de physique-chimie

**Comité éditorial** : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen