



Article : 098

Construction passive et énergie grise: une démarche globale pour économiser l'énergie dans la construction

LEQUENNE Philippe

avr.-16

Niveau de lecture : Facile

Rubrique : Usages de l'énergie

Mots clés : Bâtiment à faible consommation, consommation d'énergie, thermique de l'habitat, usages résidentiels, matériaux, isolation, énergie grise



Fig. 1 : Maison à énergie positive

La problématique du changement climatique incite à réduire fortement la consommation d'énergies fossiles dans tous les secteurs d'activité humaine, notamment celui du secteur du bâtiment qui représente 40 % de la consommation d'énergie totale de l'Union Européenne et au moins le quart de ses émissions de gaz à effet de serre (GES), soit plus d'un milliard de tonnes par an. C'est pourquoi, dans le cadre du "paquet énergie-climat" adopté en décembre 2009 et prévoyant l'objectif des "trois fois vingt" (20 % d'énergies renouvelables, diminution de 20 % des émissions de GES et amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique d'ici 2020), la directive européenne du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments constitue une révolution dont les conséquences dépassent largement le secteur du bâtiment. Cette directive prévoit la généralisation des bâtiments « passifs » ou producteurs d'énergie à l'horizon 2020, avec une obligation anticipée pour les bâtiments publics dès 2018. Dans 25 ans, au moins un quart de nos bâtiments devront non seulement être neutres sur le plan énergétique mais pourront produire de l'énergie excédentaire en ayant recours aux énergies renouvelables.

Dans une perspective d'économie d'énergie, il est important également de prendre en compte l'énergie intégrée dans les matériaux de construction, qu'on appelle énergie grise.

1. Evolution du bâtiment en France

En France, en 2016, le bâtiment représente 20% des émissions de gaz à effet de serre de la France. L'objectif est de réduire la consommation énergétique finale du bâtiment de 50% en 2050 par rapport à 2012¹. Le parc immobilier existant, avec une consommation moyenne de l'ordre de 200 à 250 kWh/m² et par an d'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la ventilation, devra être réhabilité. Pour limiter le réchauffement à 2°C à l'horizon 2050, il est préconisé en France

¹ Énergie primaire et finale

L'énergie primaire est celle qu'on extrait de l'environnement et dont la plus grande partie, aujourd'hui, n'est pas renouvelable. L'énergie mesurée au compteur électrique en kWh est appelée énergie finale. Quand on parle d'énergie primaire on ajoute le suffixe « ep » : ainsi 50 kWh_{ep} signifie 50 kWh d'énergie primaire. L'électricité n'est pas de l'énergie primaire, c'est de l'énergie transformée avec des pertes à la production. L'électricité produite transite dans un réseau qui engendre également des pertes. Pour traduire ces pertes dans des valeurs chiffrées, on a convenu de dire qu'il faut 2,58 kWh d'énergie primaire (2,58kWh_{ep}) pour produire 1 kWh d'électricité. Une famille (sobri) qui consomme entre 1500 et 2000 kWh par an d'électricité hors chauffage et production d'eau chaude consomme en réalité entre 3800 et 5100 kWh d'énergie primaire.

de réduire d'un facteur 4 les émissions de gaz à effet de serre et les consommations d'énergie fossile, c'est pourquoi le concept d'habitat basse énergie vise un objectif de 50 kWh/m² et par an d'énergie primaire. La construction passive, quant à elle, fixe un objectif plus ambitieux de limiter la consommation d'énergie d'un bâtiment à 15 kWh/m² et par an pour le chauffage.

2. Historique

Le concept de Maison Passive vient d'Allemagne (*Passiv Haus*) et a été inventé par le Prof. Wolfgang Feist suite à un voyage d'études en Suède où les maisons basse énergie constituaient le standard des constructions neuves. Des maisons expérimentales ont été construites à Darmstadt dès 1991 et ont confirmé que les objectifs énergétiques de la *Passiv Haus* étaient possibles et réalisables. Depuis, *Passiv Haus* est devenu un label qui permet de garantir la qualité thermique d'un bâtiment. Ses principes ont inspiré la réglementation thermique dans de nombreux pays d'Europe.

Une construction passive utilise les principes de l'architecture bioclimatique pour tirer le meilleur parti des apports solaires qui sont gratuits en période froide et pour s'en protéger en période chaude. Ces deux stratégies s'opposent en théorie. Mais il est possible d'agir intelligemment pour les faire jouer toutes les deux dans le sens d'un plus grand confort.

En 2016, une construction doit répondre à plusieurs fonctions qui se contredisent entre elles (par exemple, une fenêtre au sud est utile en hiver, mais il faut s'en protéger en été), surtout dans les climats tempérés d'Europe :

- apporter suffisamment de chaleur pour le confort d'hiver,
- se protéger contre les fortes chaleurs d'été,
- assurer une température de confort durant les saisons intermédiaires en consommant un minimum d'énergie fossile,
- apporter une lumière naturelle abondante en toute saison dans les pièces où l'on vit durant la journée.

Pour une construction passive, on fixe dès la conception de nouvelles contraintes liées à l'étanchéité à l'air, à l'isolation et à la recherche d'une consommation énergétique minimale. Les apports solaires et internes ne sont pas des dispositifs techniques annexes et surajoutés, mais ils font partie du projet au même titre que l'emplacement, la géométrie et les dimensions d'une fenêtre. Une construction passive commence par quelques règles simples qui doivent être appliquées dès les étapes de conception du projet. La première règle consiste à réduire autant que possible les ouvertures côté nord car les apports solaires y sont négligeables. Il est préférable de placer côté sud les pièces où l'on vit, car la course du soleil estival est haute et donc facile à protéger par des casquettes ou autres avancées mettant les ouvertures à l'ombre sans obturer la vue. À l'est et à l'ouest, le soleil est bas quel que soit la saison et s'en protéger en été revient à obturer ou réduire la vue. En hiver, le bilan des apports à l'est ou à l'ouest est plus faible que celui des apports au sud : pour cette raison, créer des ouvertures au sud-est est opportun en toutes saisons.

3. Vers la sobriété énergétique

Concilier confort et sobriété énergétique est l'enjeu principal de la construction dite passive. Le confort thermique repose sur quelques principes physiques immuables et des règles permettant d'en tirer parti. En climat tempéré comme le nôtre, on chauffe une construction plusieurs mois par an pour avoir une sensation agréable de chaleur. Cette sensation tient aux trois façons que la chaleur a de se propager, par conduction, convection et rayonnement.

3.1. L'étude thermique

Dans les climats tempérés et particulièrement dans les pays d'Europe très dépendants des importations de fioul, de gaz et d'uranium, la qualité thermique d'un logement est devenue une préoccupation inscrite dans la loi. Les réserves d'énergie fossile sont limitées et leur prix, à moyen terme, ne fera qu'augmenter. Ainsi, économiser l'énergie et recourir autant que possible aux énergies renouvelables sont deux objectifs de tout maître d'ouvrage.

La réglementation thermique qui est entrée en vigueur en janvier 2013 ne mentionne pas explicitement la construction passive mais elle s'en inspire dans ses objectifs et recommandations. Cette réglementation fait référence aux notions d'énergie primaire et d'énergie finale définies plus haut.

Elle repose sur trois piliers qui s'inspirent des principes de la construction passive.

- Le premier cherche à quantifier la consommation d'énergie primaire (CEP) d'un bâtiment et de lui imposer une valeur maximale.
- Le second encourage le maître d'œuvre à construire un bâtiment bioclimatique (BBio) qui tire le meilleur parti des apports passifs. On y parvient grâce à une importante surface vitrée au sud permettant de récupérer la chaleur solaire en hiver. Il faut également tenir compte d'une bonne utilisation des apports gratuits : solaires et internes (équipements, activité humaine, ...). L'utilisation d'appareils efficaces - électroménager, informatique, éclairage - est essentielle car la consommation de ces appareils joue sur le confort d'été car ils contribuent à augmenter la chaleur à l'intérieur du logement quand ils sont en fonctionnement.
- Le troisième, enfin, cherche à garantir le confort d'été en imposant une température maximale à atteindre à l'intérieur du logement. Le confort d'été peut être assuré par d'autres moyens que la climatisation : une forte isolation permet d'éviter les surchauffes provenant du rayonnement qui traverse les parois opaques, murs et plafonds pendant les périodes de fortes chaleurs. Le fait de maintenir ces parois à l'ombre est relativement simple au sud, par des dispositifs architecturaux et/ou végétaux. On veillera aussi à réduire les surfaces vitrées sur le côté ouest où le soleil rayonne fortement en été ; si ce n'est pas possible, on prévoira des occultations temporaires en été.

Pour obtenir de tels résultats, une bonne orientation du bâtiment et une conception qualifiée de bioclimatique ne suffisent pas. Il faut également veiller aux points techniques suivants :

- la régulation thermique par "flux d'air" qui permet de ne pas investir dans un réseau de chauffage puissant ; cette attention au système de renouvellement d'air et d'évacuation d'air vicié permet de récupérer les calories sortantes et de minimiser les déperditions entrantes grâce à un système de ventilation performant, plutôt à double flux avec récupération de chaleur ;
- une construction étanche à l'air, corollaire du point précédent doit être vérifiée au moment de l'exécution des travaux ;
- le recours aux énergies renouvelables, un chauffe-eau solaire individuel par exemple : la production d'eau chaude sanitaire représente la moitié de la dépense énergétique d'une maison répondant aux objectifs de la réglementation thermique actuelle.

3.2. Système constructif et isolation

Dans une construction passive, l'objectif principal est de réduire de façon radicale la consommation d'énergie. L'un des facteurs clés de la réalisation de cet objectif est l'isolation. Elle est très importante et permet de conserver la chaleur l'hiver et la fraîcheur l'été à l'intérieur du logement. Dans les climats tempérés comme en France, la saison de chauffe dure de quatre à sept mois. Une excellente isolation va de pair avec un soin particulier pour supprimer tous les ponts thermiques. Une isolation bien réalisée est l'une des clés de la réussite d'une construction sobre en énergie puisque les déperditions par l'enveloppe représentent 50 à 70% de l'ensemble des déperditions.

L'isolation d'un bâtiment ne doit plus être considérée comme une solution technique à apporter à une structure portante conçue sans aucune contrainte thermique. Pour atteindre d'excellentes performances thermiques, il faut intégrer l'isolation au système constructif. Il s'agit de ne plus raisonner de façon séparée - par exemple, une structure porteuse qu'on va s'efforcer d'isoler dans une deuxième étape - mais considérer le bâtiment comme un tout. Un système constructif est un ensemble cohérent de matériaux et de procédés de construction. L'isolation doit trouver sa place dans ce système. Ainsi le débat entre isolation par l'intérieur ou par l'extérieur n'a plus lieu d'être s'il s'agit d'assurer la cohérence entre le système constructif et les objectifs thermiques. Dans la pratique, l'architecte et le bureau d'études thermiques doivent travailler ensemble dès les premières phases de conception du projet. En d'autres termes, le bureau d'études thermiques ne doit pas intervenir en aval quand il ne reste qu'à définir les épaisseurs d'isolant à mettre en place. Chaque projet est un cas particulier et doit être abordé comme tel.

Si l'isolation par l'extérieur est préférable à l'isolation par l'intérieur, notamment en rénovation de constructions anciennes, cela dépend, d'une part, de la manière dont se résout le traitement des ponts thermiques et, d'autre part, du mode d'occupation des locaux. L'isolation par l'extérieur est conseillée pour des bâtiments dont l'occupation est permanente, mais dans le cas d'une occupation intermittente (jour/nuit ou saisonnière ou résidence secondaire ou bâtiment d'activité ou tertiaire) il faudra vérifier que les consommations nécessaires à la mise en température d'une éventuelle masse inerte soient réduites. Dans certains cas, il sera préférable d'isoler par l'intérieur pour permettre à la construction d'atteindre plus rapidement une température confortable, ceci d'autant plus que l'inertie de l'enveloppe est importante, ce qui concerne donc avant tout la maçonnerie aussi bien en neuf (béton) qu'en bâti ancien (pierre).

Renforcer l'isolation dans une construction passive signifie d'augmenter de façon significative l'épaisseur mise en place par rapport à ce qui se fait dans des constructions traditionnelles. L'évaluation de l'épaisseur d'isolant est donc impérative. Les ordres de grandeur des épaisseurs d'isolation à mettre en place dans une construction passive sont les suivants :

- 20 à 30 centimètres d'isolant pour le plancher bas selon qu'il est ou non sur terre plein ;
- 25 à 35 centimètres pour les murs verticaux ;
- 35 à 40 centimètres sous la toiture.

Ces épaisseurs indicatives doivent tenir compte, bien entendu, des qualités isolantes des matériaux utilisés : ouate de cellulose, fibres de bois, laine de verre, polystyrène,.... La mise en œuvre de cette isolation doit être très bien réalisée afin d'éviter les pertes de chaleur ou les infiltrations d'air aux joints et raccords entre les parois horizontales et verticales.

3.3. Pourquoi rendre étanche à l'air ?

Le complément d'une forte isolation des parois est l'étanchéité à l'air de celles-ci. Il serait inutile de bien isoler une construction qui fuirait de partout et serait pleine de courants d'air froid en hiver. Un des principes de la construction passive est donc d'empêcher l'air froid extérieur de pénétrer dans le bâtiment et d'éviter les fuites de l'air chaud intérieur à travers les parois.

Dans une construction passive, le chauffage n'est pas prévu pour compenser les pertes de chaleur dues à un manque d'étanchéité comme dans les constructions conventionnelles. L'étanchéité à l'air est un élément qui intervient de façon déterminante dans la qualité de l'isolation. Un isolant est efficace car il emprisonne de l'air dans des interstices constitués, selon sa nature, de petites poches, de pores ou de fibres. Un isolant est plus ou moins perméable à l'air. Pour bien assurer sa fonction, il ne doit pas être traversé par un flux d'air.

Cette étanchéité à l'air va conférer également d'autres qualités au logement :

- le contrôle des apports d'air arrivant dans le logement va améliorer la qualité de l'air intérieur ; l'air entrant pourra être filtré, les polluants éventuels présents dans l'air extérieur ne pénétreront pas ;
- le confort acoustique sera lui aussi amélioré puisque les bruits extérieurs seront fortement atténués ;
- enfin, l'étanchéité à l'air pourra également contribuer à une bonne régulation de l'hygrométrie sur des cycles saisonniers grâce à des membranes « perspirantes », étanches à l'air mais laissant la possibilité d'évacuer et rétrocéder un certain degré d'humidité. En effet, l'air qui traverse les parois d'une construction qui n'est pas étanche à l'air est susceptible de se condenser. Cette condensation peut entraîner la formation de moisissures et dégrader l'isolant. Un tel risque est fortement réduit dans une construction passive qui, de ce point de vue, est également beaucoup plus saine pour ses occupants.

Une construction rendue étanche doit donc être soumise à un test d'étanchéité à l'air qui vérifie la qualité de la construction sur cet aspect : on appelle ce test infiltrométrie ou test de la « porte soufflante » (*Blower door*). L'intérieur de la construction est mis à une pression différente de la pression extérieure grâce à un ventilateur fixé sur une ouverture (porte ou fenêtre), soit en surpression, soit en dépression. Le débit des fuites d'air est mesuré et doit rester en dessous d'un certain seuil (un renouvellement inférieur à 60% du volume en 1 heure à une pression de 50 Pa, équivalent +/- à un vent de 35 km/h, pour le label *Passivhaus*).

3.4. Ouvertures et vitrages

Dans l'état actuel des techniques du bâtiment, une fenêtre, même équipée des meilleurs vitrages, est moins isolante qu'une paroi opaque bien isolée. Mais une ouverture vitrée a l'avantage d'apporter des calories et de la lumière au logement, variables selon sa taille et son orientation. Ainsi, une fenêtre équipée d'un double ou triple vitrage, orientée au sud, à l'est ou à l'ouest apporte davantage de chaleur qu'elle n'en fait perdre : le bilan global montre que les apports de calories en hiver sont supérieurs aux pertes. Cette capacité d'une fenêtre à capter davantage d'énergie qu'elle n'en laisse s'échapper est déterminante dans une construction passive. Néanmoins il est intéressant de faire des comparaisons et des simulations lors des premières esquisses sur les bilans apports/gains de différentes solutions d'ouvertures en comparant leurs positions, leurs dimensions, leur géométrie. Ces simulations, par exemple, permettent de comparer des vitrages verticaux allant du plancher au plafond, des fenêtres tout en longueur sur 1 ou 2 mètres de hauteur ou toute autre configuration. Le travail sur la face d'exposition, la proportion et la taille des vitrages peuvent

apporter des gains allant jusqu'à 15%. Les vitrages de grande taille sont privilégiés pour les expositions au sud.

Pertes thermiques de différents types de vitrages	
Type de vitrage	Pertes thermiques U (en W/m ² .°K)
Simple vitrage	5
Double vitrage épaisseur 4 mm avec lame d'air de 12 mm	2,8
Double vitrage épaisseur 4 mm avec lame d'air de 16 mm	1,1
Triple vitrage épaisseur 4 mm avec lame d'air de 16 mm et couche anti-émissive sur deux faces	0,6

3.5. Ventiler : VMC double flux

Un système de renouvellement d'air, généralement une ventilation mécanique contrôlée (VMC), est obligatoire dans une construction étanche à l'air. En effet, le renouvellement de l'air n'est pas assuré par les fuites. D'autre part, l'ouverture manuelle des fenêtres peut apporter des déperditions trop importantes pour assurer le confort thermique en pleine saison froide. Le système de ventilation le plus courant en construction passive est dit « à double flux ». La VMC introduit de l'air neuf dans le séjour et les chambres et extrait l'air vicié des pièces humides - cuisine, salle de bain- dans un circuit qui va du "propre" au "sale". Un flux d'air circule donc dans le logement selon un schéma conçu dès le départ par l'architecte et le bureau d'études. Sous l'effet des courants de convection, l'air du logement bénéficie d'une température confortable dans toutes les pièces ventilées et réchauffées par cette ventilation mécanique. Si l'étanchéité à l'air n'est pas bonne, des flux parasites vont se créer et perturber le flux initialement prévu. En conséquence, certaines pièces risquent d'être trop ventilées et d'autres pas assez. Une étanchéité à l'air bien réalisée permettra donc d'atteindre un bon niveau de confort thermique sans courants d'air ni flux parasites.

L'idée de chauffer l'air intérieur d'un bâtiment n'est pas nouvelle. Les systèmes de chauffage à air pulsé ont été utilisés couramment au siècle dernier. Ils sont encore utilisés dans les bâtiments qui accueillent du public de façon intermittente comme les halls d'exposition ou les vieilles églises. Mais ils ont été peu à peu abandonnés dans les logements pour les raisons suivantes :

- les ventilateurs entraînent un courant d'air chaud qui met en mouvement et transporte beaucoup de poussières ;
- ce sont des systèmes bruyants ;
- ils sont difficiles à réguler et fonctionnent le plus souvent en « tout ou rien » ;

- ils consomment beaucoup d'énergie.

Dans une construction passive, il faut très peu d'énergie pour assurer et maintenir une température confortable. La ventilation mécanique contrôlée est utilisée comme un système de chauffage principal sans nécessiter d'investissement supplémentaire pour un réseau de chauffage. L'air étant très léger, comparé à l'eau, un système de ventilation bien conçu et dimensionné permet en effet de transporter la chaleur d'une pièce à l'autre en utilisant ce fluide qui se déplace en consommant très peu d'énergie. Les expérimentations conduites en Allemagne ont confirmé cette hypothèse et ont montré qu'il était possible de chauffer l'air d'une construction passive en utilisant une nouvelle génération de systèmes de ventilation très économes en énergie. Ces appareils remplissent ainsi un double objectif : ils renouvellent l'air ambiant et le font circuler à une température régulée. Dans ces systèmes, l'air vicié extrait du logement est utilisé pour préchauffer l'air neuf entrant.

Le seuil de consommation d'énergie pour le chauffage d'une construction passive, établi à 15 kWh/m², repose sur des bases physiques : si l'air est léger, ce n'est cependant pas un très bon vecteur de chaleur. Si l'on souhaite, pour le confort des occupants, que le débit du système de ventilation reste faible, peu bruyant voire imperceptible, il faut réduire les besoins en énergie du logement et donc agir sur les pertes thermiques. Ainsi, la logique d'une construction passive devient compréhensible : grâce aux soins apportés à l'isolation et à l'étanchéité à l'air, il devient possible de se passer d'un système de chauffage complémentaire. La ventilation apporte de l'air tempéré.

Ainsi, une VMC à double flux se distingue d'un système de chauffage à air pulsé par sa faible consommation d'énergie, sa vitesse de circulation lente et son absence de bruit. Les réticences, plutôt d'ordre culturel, qui ont été manifestées en France vis-à-vis des constructions passives et de leur « chauffage à air » viennent peut-être de la méconnaissance des caractéristiques de ces appareils qui consomment très peu d'énergie pour assurer le chauffage du logement. En hiver, il faudra néanmoins réchauffer l'air du système de ventilation car les calories récupérées sur l'air extrait ne suffisent pas. Cet appoint peut être apporté par une petite pompe à chaleur ou au moyen d'une résistance électrique de faible puissance. Un poêle à bois est parfois installé en tant qu'appoint et agrément pour les périodes les plus froides en hiver.

3.6. Ponts thermiques

Les ponts thermiques se produisent à la jonction entre le sol et les murs, entre murs intérieurs et enveloppe, au passage entre les murs et le toit ou encore autour des fenêtres et des ouvertures. Ce sont des endroits où l'isolation n'est plus assurée de façon continue et par où s'échappent les calories engendrant des condensations de la vapeur d'eau se trouvant en contact avec une température plus basse et passant à l'état liquide. On les a longtemps sous-estimés, les pertes de chaleur qu'ils engendraient étaient négligeables au vu des pertes de chaleur à travers les parois et les infiltrations d'air autour des portes et des fenêtres. On rencontre moins de ponts thermiques dans des formes simples et compactes que dans des constructions complexes avec des balcons, des angles rentrants ou des décrochements. Plus on améliore l'isolation des parois et l'étanchéité à l'air, plus les fuites de chaleur par les ponts thermiques deviennent importantes ainsi que les risques de pathologie (moisissures). L'une des caractéristiques d'une construction passive, c'est qu'elle supprime ou réduit de façon radicale les ponts thermiques.

3.7. Chauffage et production d'eau chaude sanitaire

L'énergie solaire est un complément indispensable d'une construction passive. Trois techniques sont utilisables : le chauffe-eau solaire individuel ou collectif, le système solaire combiné, le photovoltaïque. L'orientation et la configuration du bâtiment doivent donc permettre l'installation de ces systèmes qui se présentent sous forme de panneaux rectangulaires, ce qui est plus simple en neuf qu'en rénovation. On trouve aujourd'hui des systèmes mixtes qui produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité.

Un chauffe eau solaire permet de produire de 60 à 70% de l'énergie consommée pour l'eau chaude sanitaire, soit environ 2000 kWh par an (chauffe eau solaire en remplacement d'un chauffe eau électrique installé dans la moitié sud de la France avec 4 m² de capteurs et un ballon de 200 litres²).

L'ajout de quelques modules photovoltaïques permettra au bâtiment passif de devenir « à énergie positive », c'est-à-dire produisant plus d'énergie annuellement qu'il n'en consomme. Dix à quinze mètres carrés de capteurs sur le toit d'un logement permettent de produire annuellement la quantité d'électricité qu'une famille sobre en énergie consomme, hors chauffage et eau sanitaire. Le raccordement au réseau permet de distribuer l'excédent d'électricité produite dans le voisinage. La moyenne européenne d'une famille pour la consommation d'électricité pour d'autres usages que pour le chauffage se situe entre 2000 et 3000 kWh par an, selon le pays et le mode de vie.

Dans les labels suisse *Minergie P* et allemand *Passivhaus*, il est obligatoire d'installer des appareils électroménagers qui, eux aussi, consomment très peu d'énergie. Par contre, même si c'est recommandé, il n'y a pas aujourd'hui de contrainte sur l'installation d'éclairage. Le remplacement des ampoules d'éclairage à incandescence par des lampes de type fluo compact ou des lampes à leds, la suppression des veilles inutiles, l'isolation des canalisations d'eau chaude et de chauffage, etc. sont cependant des actions peu coûteuses et recommandées partout.

4. *Energie grise*

On considère souvent que la principale dépense énergétique d'un bâtiment est due à l'énergie d'usage du bâtiment, c'est-à-dire celle qui est utilisée pour vivre et assurer le confort de ses occupants : chauffage et ventilation des lieux, production d'eau chaude sanitaire et électricité spécifique, celle qui sert à l'éclairage et à faire fonctionner les appareils domestiques. Cette consommation d'énergie est relativement facile à calculer puisque les dépenses d'énergie correspondantes sont comptabilisées par un compteur d'électricité, de gaz ou une facture de fioul.

Cette part d'énergie d'usage étant très importante dans des constructions conventionnelles, on suppose le plus souvent que la part d'énergie nécessaire à la construction du bâtiment est négligeable. Cette énergie intégrée dans les matériaux de construction et leur mise en œuvre est appelée énergie grise. Elle n'apparaît pas dans un bilan annuel de l'énergie nécessaire au logement, mais elle est bien réelle et contribue de façon non négligeable à l'épuisement des ressources naturelles. Dès lors que l'on parle de bâtiment passif ou à très basse consommation d'énergie, on se rend compte que cette part ne devient plus si négligeable que ça, puisque des calculs montrent que, dans certains cas, l'énergie grise peut correspondre à près d'un siècle de chauffage d'une construction passive ! L'évaluation de l'énergie grise devient ainsi un paramètre important des choix de conception. Adopter une démarche globale pour économiser l'énergie signifie donc qu'il faut attacher de l'importance, dès le moment de la conception de son logement, à cette énergie grise. Le calcul de l'énergie grise est un pas vers une approche globale qui permettra de connaître et de comparer l'impact sur l'environnement des matériaux de construction et de leur mise en œuvre.

² Données personnelles pour un logement principal utilisé toute l'année, y compris l'été.

4.1. D'où vient l'énergie grise ?

Pour évaluer l'énergie grise, il faut considérer la totalité du cycle de vie des matériaux de construction sur toutes les étapes. L'énergie grise vient du cycle de vie des matériaux. Ce processus commence avec l'extraction des matières premières, continue avec leur fabrication et leur transport, et s'achève avec leur recyclage ou leur élimination. Toutes ces étapes consomment de l'énergie et des ressources naturelles, pour la plupart non renouvelables. L'idée sous-jacente au calcul de l'énergie grise d'une construction est de pouvoir évaluer les différentes filières du bâtiment et d'orienter ainsi ce secteur de production vers des modes de construction plus économes en ressources naturelles et en énergie.

La réflexion sur cette approche globale des consommations d'énergie et de ressources naturelles a conduit à la création d'un outil appelé *analyse du cycle de vie* (ACV) qui repose sur des normes et des recommandations. Cet outil est complexe à plusieurs points de vue.

- Il pose d'abord, des problèmes méthodologiques. Ainsi, par exemple, pour quantifier l'impact du transport d'un matériau de construction par camion, il est nécessaire de connaître le contenu de sa charge et la quantité de carburant que ce camion consomme. Faut-il s'arrêter là ? Ne faut-il pas également attribuer une part de l'énergie consommée à la construction des infrastructures et à la fabrication du camion ? Comment définir la frontière du système étudié pour ne pas se retrouver à analyser la production de toute la planète ? Un des principes des ACV repose donc sur la définition préalable des limites du système étudié.

- Une deuxième difficulté surgit pour cette évaluation de l'énergie grise : identifier l'énergie contenue dans un mètre cube de bois, de béton ou de polystyrène n'a pas beaucoup de sens si on ne ramène pas ces valeurs à une donnée qui permette de comparer ces matériaux selon leur fonction dans le bâtiment. L'objectif de cette démarche n'est pas d'opposer les procédés de construction les uns aux autres – par exemple, la construction en bois d'un côté et la construction en béton armé de l'autre – mais de prendre en considération la fonction rendue par deux systèmes qui permettent de construire une enveloppe protectrice étanche et isolante. Les normes élaborées sur les ACV ont permis de fixer certaines règles de calcul afin de pouvoir comparer des choses comparables et éviter l'utilisation abusive des données qu'elles contiennent.

- Enfin, les industriels concernés sont souvent réticents à rendre publiques des données qu'ils jugent confidentielles parce qu'elles touchent à leurs procédés de fabrication ou gênantes parce qu'elles révéleraient l'impact négatif de leur production sur l'environnement. Comment garantir la confidentialité de certaines données tout en rendant celles-ci accessibles ?

Pour permettre de réaliser des ACV à partir de données communes et fiables, les pays européens ont élaboré et publié des bases de données (en Allemagne, Suisse, France...). Parmi ces nombreuses bases de données disponibles, celle qui a été élaborée en Suisse a été produite et mise à jour par des membres représentatifs d'intérêts contradictoires, incluant des fabricants, des professionnels, des associations de protection de l'environnement et de consommateurs. Elle a fait l'objet de négociations pour d'aboutir à des valeurs partagées avec un relatif consensus³. Les données rassemblées en France⁴ sont, pour la plupart d'entre elles, établies et publiées par les industriels eux-mêmes et ne font pas l'objet d'un même consensus qu'en Suisse.

4.2. ACV et énergie grise

³ Les données suisses sont consultables sur internet à l'adresse www.kbob.ch.

⁴ Les données recueillies en France sont consultables sur le site : www.inies.fr

Les ACV montrent l'avantage, en terme de faible contenu en énergie grise, des matériaux locaux et biosourcés. Si, par exemple, on utilise une ossature en bois, on mobilise moins d'énergie grise que si l'on construit une maison à partir de ciment, gros consommateur d'énergie. En ce qui concerne les matériaux isolants, si l'on compare deux isolants à performance égale, le polystyrène et la fibre de bois, la fabrication d'un mètre carré de polystyrène consomme jusqu'à 25 fois plus d'énergie que la fabrication de la même surface d'un panneau isolant en fibre de bois fabriqué localement avec peu de transport. La teneur en énergie grise d'un matériau de construction est un élément essentiel si l'objectif est d'économiser l'énergie consommée par le secteur du bâtiment. Calculer l'énergie grise d'une construction est un exercice complexe, même si des bases de données sont disponibles sur la plupart des matériaux de construction. Mais un principe simple, l'utilisation de matériaux biosourcés de provenance locale ou régionale partout où c'est possible, permet de diminuer la teneur d'un bâtiment en énergie grise

4.3. Le bois dans la construction

Le bois, à la fois d'élément de structure et d'aménagement, occupe une place centrale dès que l'on cherche à réduire la consommation d'énergie grise. Beaucoup de constructeurs de maisons en bois s'approvisionnent aujourd'hui auprès de scieries locales qui travaillent les bois régionaux. Des constructions en bois de grande hauteur ont démontré que le bois permettait aussi la réalisation d'immeubles de logements. On construit beaucoup en bois, partout dans le monde, de façon traditionnelle, en amenant sur le chantier le bois découpé au préalable et en assemblant ces éléments pour en faire une structure dont les espaces vides seront ensuite remplis par un matériau isolant.

Les nouvelles exigences thermiques rappelées plus haut, et notamment l'étanchéité à l'air des constructions, demandent aujourd'hui de travailler le bois avec une plus grande précision dans les découpes et les assemblages.

En principe le choix du bois de pays est presque toujours préférable au bois importé, néanmoins la qualité des bois de structure n'est pas toujours facile à trouver localement, tant pour des raisons de qualité que de délais, dans de tels cas il faut soit revoir les principes constructifs permettant d'utiliser des petites sections pas forcément sèches ou alors importer des bois de pays où la filière bois est mieux organisée (Allemagne, Suisse, Autriche) et où le bois massif a été largement remplacé par des assemblages (bois abouté, contrecollés, etc) en raison de leur plus grande stabilité. Les bois sont répartis en différentes classes de risques selon l'exposition à l'humidité, les zones ou les attaques biologiques, à ne pas confondre avec les classes d'aspect et de structure.

Les bois en utilisation extérieure n'étant pas en contact avec le sol ou une source d'humidification prolongée doivent être au moins de classe 3. Les bois ayant naturellement une durabilité de classe 3 sans traitement sont relativement nombreux, mais on peut citer le douglas couramment utilisé en structure ou en bardage, ou encore le mélèze en bardage et parfois en structure si de petite section à cause des nœuds ou encore le châtaignier mais en tenant compte des coulures de tanins.

Si l'on utilise des panneaux composés de lamelles de bois collées et agglomérées, il faut s'assurer auprès du fournisseur que les colles utilisées n'émettent pas de formaldéhyde ni de composés organiques volatils ou que les éléments soient en deçà de la classe minimum d'émission E1, en attendant qu'il existe une classe de tolérances plus faible.

4.4. La construction en paille

Ces dernières années ont vu se développer le recours à d'autres matériaux de construction comme la paille, seule ou associée à du bois. La paille est encore peu utilisée sinon dans des chantiers de maisons individuelles et quelques bâtiments agricoles ou semi industriels. Son utilisation en marché public pose quelques difficultés de validation, bien que la paille ait été récemment reconnue pour la labellisation BBC et que des essais au feu réalisés au CSTB en 2009 aient montré des performances exceptionnelles. Ses avantages sont nombreux : en bottes, la paille est à la fois un matériau qui présente des qualités mécaniques et isolantes. C'est un matériau totalement et rapidement renouvelable sur un cycle annuel, directement issu de l'énergie solaire. Les ressources en paille sont locales et abondantes un peu partout en Europe et elle ne nécessite pas de transport sur de longues distances. Son usage se développera sans doute dans les constructions passives car il est difficile de trouver un matériau de construction dont l'énergie grise, associée au bois, soit plus faible que celle de la paille. Dans certaines constructions préfabriquées en ossature en bois, l'isolation est réalisée en paille⁵.

Les constructions en paille font maintenant l'objet de Règles professionnelles⁶.

4.5. Energie grise et matériaux d'isolation

Dans une construction en bois, il est assez cohérent d'utiliser des isolants également biosourcés ou à faible teneur en énergie grise. Nous distinguons ici trois familles d'isolants naturels à faible teneur en énergie grise qui sont utilisées aujourd'hui en complément de structures en bois :

- la ouate de cellulose que l'on trouve sous différentes formes ;
- les panneaux de fibre de bois, souples ou rigides, parfois imperméables, qui peuvent être utilisés pour isoler les murs et la toiture ;
- la paille, le chanvre et des sous-produits sans valeur marchande comme la laine de mouton. Leur disponibilité est très variable et leur distribution encore peu organisée sinon dans des réseaux locaux.

4.5.1. La ouate de cellulose

La ouate de cellulose est un matériau qui provient du recyclage du papier. Les vieux papiers sont broyés et défibrés pour former des flocons. La ouate de cellulose se présente le plus souvent en vrac, compactée dans des sacs de 10 à 15 kg. Pour la mettre en œuvre, il faut la carder au moyen d'une machine et l'insuffler. Il y a trois façons d'utiliser la ouate de cellulose :

- l'insuffler entre deux parois rigides ou semi-rigides qui lui servent de « coffrage » horizontal ou vertical ;
- la déverser ou l'insuffler en vrac sur une surface horizontale, par exemple pour isoler des combles perdus. Dans cette utilisation, les ponts thermiques sont quasiment éliminés, en particulier dans les angles et les rampants difficiles d'accès ;

⁵ Un exemple d'ossature bois préfabriquée en atelier et associant la paille est donné sur le site : ww.pailletech.be

⁶ *Règles professionnelles de construction en paille*, Editions le Moniteur, 2011, 2014

- l'insuffler par voie humide : les flocons sont humidifiés en sortie d'embout, ce qui permet de leur donner une tenue verticale sans avoir à fermer les deux faces d'un caisson. Cette opération permet une densité plus élevée qu'une insufflation classique et réduit les risques de tassement dans le temps. Cette technique est très utilisée en réhabilitation contre des murs existants, en intérieur ou en extérieur avant protection, mais aussi en construction neuve pour les éléments verticaux. Outre un bon pouvoir isolant, la ouate de cellulose est un sous produit qui bénéficie d'une énergie grise très faible.

4.5.2. Les isolants à base de bois

Des panneaux isolants en fibres de bois sont de plus en plus utilisés en construction passive. Souples ou rigides, ils proviennent des découpes inutilisées dans les scieries et valorisées de cette façon. Ces panneaux sont fabriqués avec des fibres de bois déchiquetées et agglomérées par chauffage grâce à la résine du bois. Pour fabriquer les panneaux souples, il faut ajouter au processus de fabrication un liant naturel, la polyoléfine.

Des panneaux durs en fibre de bois existent avec deux types de fabrication :

- la voie humide : la fibre de bois humidifiée est agglomérée en panneaux de 2 cm d'épaisseur au maximum, grâce à la lignine présente dans le bois ; c'est un procédé de fabrication qui n'utilise que du chauffage et aucun ajout de produit chimique ;

- la voie sèche : on ajoute de la fibre polyoléfine à la fibre de bois ce qui permet d'obtenir des panneaux plus épais, jusqu'à 24 cm d'épaisseur.

Dans les deux cas, une résine naturelle peut être ajoutée pour rendre le produit étanche et l'utiliser à l'extérieur comme pare pluie derrière un bardage en bois.

Tous ces panneaux de fibres de bois se présentent sous forme rectangulaire d'environ 1,20m sur 2,50m permettant de s'intégrer à la plupart des ossatures et hauteurs d'étage. À épaisseur finale égale, il est préférable de monter deux couches croisées de panneaux, plutôt qu'une seule, pour réduire les ponts thermiques. Les caractéristiques thermiques de ces panneaux sont, à peu de choses près, les mêmes que les isolants synthétiques de même épaisseur.

4.5.3. Autres matériaux : chanvre et liège

Le chanvre a des qualités thermiques relativement bonnes, il est généralement utilisé en association à la chaux pour la fabrication de dalles isolantes, de mortier ou d'enduits épais à faible teneur en énergie grise. Celui qui est actuellement utilisé provient le plus souvent de ressources locales situées dans quelques régions de France (Dauphiné, Anjou, Bretagne...), bien que la production tende à se centraliser pour des enjeux industriels. Le chanvre existe également en panneau isolant thermo lié avec du polyester pour donner la stabilité aux panneaux ou rouleaux. La production est devenue très centralisée et quasi monopolistique ce qui conduit à des prix de fourniture plus élevés que ceux d'isolants conventionnels

Le liège est obtenu à partir de l'écorce du chêne liège. Il a un contenu en énergie grise relativement important, en particulier à cause de son transport. Cependant, ses qualités de matériau naturel hydrofuge permettent de l'utiliser ponctuellement en construction passive pour compléter l'isolation d'un sol ou d'un soubassement car il résiste bien à la compression et à l'humidité. On

trouve le liège sous la forme de panneaux rectangulaires (1 mètre X 0,50 m) rigides en différentes épaisseurs de 20 mm à 80 mm. Le liège utilisé en France vient d'Espagne ou du Portugal. On en trouve également en Corse.

Conclusion

Cette rapide présentation montre un secteur du bâtiment en pleine évolution, à la fois sur le plan des systèmes constructifs et des matériaux. Les entreprises du bâtiment évoluent au rythme des nouvelles normes et des attentes de la société sur la transition énergétique. De nouveaux savoir faire sont nécessaires, notamment pour les concepteurs et les artisans. Le rôle de la formation, qui n'a pas été mentionné ici, est donc essentiel pour accompagner ces changements.

Bibliographie complémentaire

- CAUDERAY Pierre, *De la paille pour construire*, dans Tracés, n°17, Bulletin technique de la Suisse Romande, septembre 2009
- COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre, *La conception bioclimatique*, Terre Vivante, 2006-2008, 240 p.
- FLOISSAC Luc, *La construction en paille*, Terre Vivante, 2012, 380 p.
- GUERRIAT Adeline, *Maisons passives*, L'inédite, 2008, 180 p.
- KOLB Josef, *Bois, systèmes constructifs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011-
- MOULIN Jean-Luc, LEQUENNE Philippe, *La construction préfabriquée en bois*, Terre Vivante, 2014, 140 p.
- RIGASSI Vincent, LEQUENNE Philippe, *Habitat passif et basse consommation*, Terre Vivante, 2011, 220 p.
- RIGASSI Vincent, *L'éco-construction ou la valeur du travail*, dans Tracés, n°17, Bulletin technique de la Suisse Romande, septembre 2009