

# LE BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL EN CONSTRUCTION

**Bruno Peuportier**

Le secteur du bâtiment est, en France et dans la plupart des pays européens, le secteur le plus consommateur d'énergie, avec une contribution d'environ 45 % de la consommation totale. La crise pétrolière des années 70 a conduit les pouvoirs publics à prendre des mesures réglementaires ou incitatives dans le but de limiter les consommations de chauffage. A cette époque, une certaine remise en question des pratiques constructives avait permis de redécouvrir les principes de l'architecture vernaculaire. Mais les maîtres d'œuvre ont en général limité leur effort à l'isolation thermique. En fait, la réduction des besoins de chauffage, restreinte à la construction neuve, a été globalement compensée par des consommations supplémentaires liées à l'apparition de nouveaux appareils électroménagers.

Les objectifs de préservation des ressources ont été ensuite élargis à une approche plus globale de développement durable. Dans ce cadre, la consommation d'énergie est analysée également en terme d'impacts environnementaux comme la contribution à l'effet de serre, au phénomène d'acidification, à l'altération de la qualité de l'air, à la production de déchets radioactifs ou non. Le principe de précaution et les engagements qui en découlent pourraient se traduire au niveau du bâtiment par de nouveaux objectifs de performance intégrant ces aspects environnementaux. Pour atteindre ces objectifs, une stratégie de prévention, consistant à agir dès les premières phases du processus de décision, est plus efficace et moins coûteuse que des interventions tardives sur le bâti. Ce principe de prévention peut consister à étudier la réhabilitation d'un bâtiment existant avant de décider de construire, à choisir le site de construction en prenant en compte par exemple les aspects climatiques et les transports, à exiger des performances énergétiques précises dans un programme. Dans une telle démarche, les concepteurs peuvent effectuer un bilan environnemental de leur projet et éventuellement modifier certains choix. L'énergie joue un rôle majeur dans ce bilan, et les préoccupations de qualité thermique redeviennent ainsi d'actualité.

Un des apports des environmentalistes dans ce domaine a été d'introduire la notion de cycle de vie. En complément des aspects

comme le chauffage et l'éclairage liés à l'utilisation des bâtiments, le bilan énergétique porte aussi sur les phases amont de la construction (production et transport des matériaux, de l'énergie et de l'eau), sur les aspects liés à l'entretien, à la rénovation, à la démolition des bâtiments et enfin sur le traitement des déchets et les filières de recyclage. La phase d'utilisation d'un bâtiment, couvrant au moins quelques dizaines d'années, contribue de manière importante au bilan global.

### MÉTHODOLOGIE UTILISÉE : L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'analyse de cycle de vie a été mise en œuvre pour de nombreux produits industriels, et un processus de normalisation est en cours (ISO, 1997). Il s'agit d'une méthode de comptabilité des ressources puisées et des émissions générées dans l'environnement. Nous avons appliqué cette méthode en tenant compte des spécificités des bâtiments : en particulier leur longue durée de vie, leurs liens avec un site et avec des occupants (Polster, 1995).

Nous avons développé des outils de simulation, afin de modéliser la réalité de manière plus précise : la simulation thermique est effectuée sur une année, la simulation du cycle de vie sur une période correspondant à la durée de vie supposée du bâtiment. La période d'analyse peut être plus courte afin de limiter les incertitudes sur des process ayant lieu dans un futur plus éloigné.

Les besoins de chauffage, et éventuellement de climatisation, sont calculés heure par heure, ou avec un pas de temps plus faible si nécessaire, afin de tenir compte du comportement dynamique des bâtiments. Les apports solaires, calculés en fonction de la position du soleil, de l'orientation des façades, des vitrages et des masques éventuels, sont en effet stockés en fonction de l'inertie thermique des locaux. L'occupation peut être intermittente ce qui induit des variations en terme de température de consigne, de ventilation et d'apports internes d'énergie. L'isolation thermique est un autre paramètre important, ainsi que le type d'équipement et d'énergie.

L'éclairage naturel peut être également calculé et, en fonction du niveau d'éclairement désiré au cours du temps, une consommation d'électricité peut être déduite pour l'éclairage artificiel. On peut aussi évaluer l'énergie nécessaire à la ventilation des locaux, et à la production d'eau chaude sanitaire.

Ces quantités représentent des énergies dites utiles : il s'agit par exemple des besoins de chauffage du bâtiment, une quantité d'énergie réellement utile pour assurer le confort des occupants. En fait, l'énergie consommée est en général supérieure. Dans le cas d'une chaudière par exemple, la consommation de gaz ou de fioul est supé-

rieure aux besoins de chauffage car le rendement de cet équipement est inférieur à 1 en considérant le pouvoir calorifique supérieur (PCS), c'est à dire en incluant la chaleur latente récupérable sur les fumées. L'analyse de cycle de vie introduit ensuite le concept d'énergie primaire. Pour fournir la quantité de gaz ou de fioul nécessaire, il a fallu extraire une ressource, la transporter, la transformer et la livrer dans le bâtiment. Ces opérations ont elles-mêmes nécessité de l'énergie. Ainsi pour fournir 1 kWh d'énergie utile, il faut selon la base de données suisse Oekoinventare (Frischknecht, 1995) consommer de l'ordre de 1,6 kWh d'énergie primaire (PCS) pour une chaudière à gaz ou à fioul correspondant à un standard actuel.

Le cas du chauffage électrique est plus complexe, car il faut identifier les différents modes de production d'électricité qui sont mobilisés au cours du temps. Pour des raisons techniques et/ou économiques, les filières hydro-électrique et nucléaire sont plutôt adaptées à une production en base, alors que la filière thermique est plus facilement adaptée aux pointes générées par le chauffage électrique lors des journées les plus froides. Divers scénarios sont alors envisageables en fonction de la durée de l'analyse et des filières choisies lors du renouvellement du parc. Le concept d'énergie primaire peut être défini en fonction du rendement des centrales, des pertes du réseau électrique, de l'énergie nécessaire à la fourniture du combustible, y compris par exemple pour l'enrichissement de l'uranium. Les équivalents obtenus sont alors assez élevés, par exemple 4,6 kWh primaire (PCS) par kWh électrique utile.

Le cas de la production par énergies renouvelables (hydro-électricité, éolien, photovoltaïque) donne également lieu à un débat : doit-on raisonner à énergie primaire nulle en arguant qu'aucune ressource n'est épuisée, doit-on considérer un rendement équivalent à une centrale électrique car l'électricité produite a une valeur (PCS) supérieure à une énergie thermique ? L'Agence Internationale de l'Energie a adopté un compromis en considérant un rendement de 1. Il faut cependant prendre en compte la construction et l'entretien des équipements, et les pertes du réseau. Selon la base suisse citée précédemment, 1 kWh électrique utile produit par hydro-électricité correspond à 1,5 kWh d'énergie primaire, mais peut-on parler d'équivalent PCS, comme pour les combustibles fossiles ?

Etant donné l'aspect conventionnel de cette comptabilité énergétique, certains environmentalistes lui préfèrent des indicateurs comme le potentiel de réchauffement global (GWP), l'épuisement des ressources ou la quantité de déchets radioactifs générée. Le bilan énergétique n'est alors qu'un intermédiaire de calcul pour obtenir un profil environnemental. Il faut cependant savoir que la définition de

ces indicateurs (cf. par exemple Heijungs, 1992), est elle aussi basée sur des conventions et des hypothèses : par exemple, la quantité des ressources disponibles dépend du prix consenti pour l'exploitation de leur gisement. L'intérêt de ces indicateurs est de faire apparaître différentes échelles géographiques, depuis l'échelle planétaire pour l'effet de serre jusqu'à l'échelle d'un local pour les aspects de confort. Le principe de subsidiarité pourrait s'appliquer à la gestion de l'énergie et à la définition d'objectifs de performance pour les constructions. Par exemple, le niveau de confort serait choisi par les habitants, tandis que les émissions de gaz à effet de serre seraient réglementées au niveau international. Des niveaux intermédiaires pourraient aussi intervenir, par exemple pour améliorer la qualité de l'air dans une région ou une ville.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'analyse de cycle de vie considère aussi la phase de fabrication des matériaux de construction. En phase de conception, les quantités de matériaux peuvent être déduites des plans de l'architecte. Une quantité supplémentaire doit en général être approvisionnée sur le chantier, en raison des chutes, des imprécisions de calepinage, etc. L'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux est en général connue par les fabricants, y compris pour les matériaux recyclés. Il existe actuellement des bases de données suisses, hollandaises et allemandes établies selon des informations issues d'industriels. Les écarts entre ces bases peuvent être importants. Les industriels français envisagent de constituer une telle base.

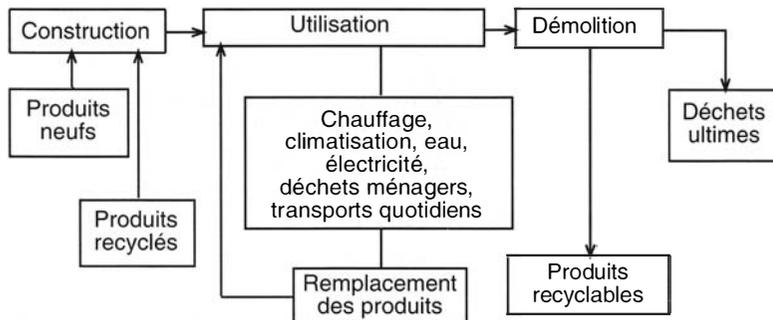
Le transport des matériaux des usines aux chantiers, en fonction des circuits de transformations intermédiaires éventuels et de distribution, constitue une inconnue supplémentaire. Il peut être important pour des produits issus de transformations successives et éloignées entre elles. L'énergie nécessaire au transport doit être évaluée en tenant compte de la construction et de l'entretien du réseau, ainsi que du taux de remplissage des véhicules. Il en est de même pour le transport des personnes. L'énergie primaire considérée est alors supérieure à celle correspondant au seul carburant. Il faut ainsi, selon la base suisse Oekoinventare, 1,4 kWh pour transporter une personne sur un kilomètre. S'efforcer de limiter autant que possible les distances entre domicile et travail lors du choix d'un logement n'est donc pas inutile.

La production et la distribution de l'eau potable peuvent également être prises en compte dans l'analyse. Il faut en moyenne environ 0,5 kWh d'électricité pour fournir un mètre cube d'eau potable dans un bâtiment.

Le traitement des déchets constitue une autre rubrique du bilan, incluant les déchets de chantier, en construction, réhabilitation et démolition, ainsi qu'éventuellement les déchets ménagers si cet as-

pect est inclus. Le transport des déchets, le type de traitement, la valorisation énergétique éventuelle -récupération de chaleur et/ou d'électricité- sont considérés. Le recyclage des matériaux en fin de vie des bâtiments donne lieu à un débat. Les environnementalistes ne souhaitent pas accorder de bonus sur la base d'une promesse de recyclage qui ne sera pas forcément tenue. Le tri, la collecte et le recyclage des déchets ménagers sont par contre plus facilement évaluable.

L'ensemble du bilan peut être schématisé sur la figure suivante.



Simulation avec pas de temps annuel

Le bilan énergétique n'est qu'un élément du bilan environnemental. Les bases de données et le calcul exposé précédemment peuvent être utilisés pour évaluer d'autres indicateurs. Certaines évaluations sont cependant encore très imprécises, surtout en matière d'impacts sur la santé. Les efforts portant sur l'amélioration des bases de données seront utiles : sur les quelques 65 000 substances chimiques commercialisées actuellement recensées, peu sont intégrées dans les bases de données actuelles, et la précision de ces données n'est en général pas connue.

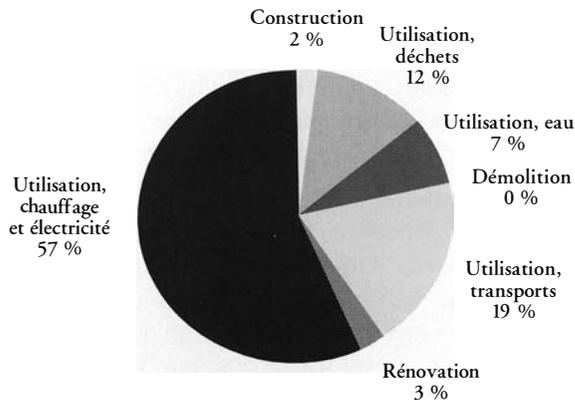
Ce type de comptabilité n'aborde pas les aspects qualitatifs, par exemple l'intégration d'un bâtiment dans un paysage. Certains effets échappent à l'analyse quantitative, comme l'extinction d'une chouette nichant dans les greniers : l'isolation thermique posée sur le plafond du volume chauffé a conduit à une diminution de la température des greniers, ce qui menace cet oiseau lors des grands froids. L'expérience montre cependant que rejeter toute analyse quantitative conduit le plus souvent à apporter une validation peu fondée aux pratiques actuelles.

## EXEMPLE DE RÉSULTAT : LE BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UNE MAISON INDIVIDUELLE

Un exercice d'évaluation de la qualité environnementale portant sur un lotissement de maisons individuelles a été mené au sein d'un atelier de travail mis en place par le ministère de l'Équipement et du Logement. Il s'agissait d'étudier une maison de 88 m<sup>2</sup> située près de Toulouse, construite dans le cadre d'un programme de réalisations expérimentales à "haute qualité environnementale" mais dont le bilan environnemental quantitatif est proche de celui d'une construction standard.

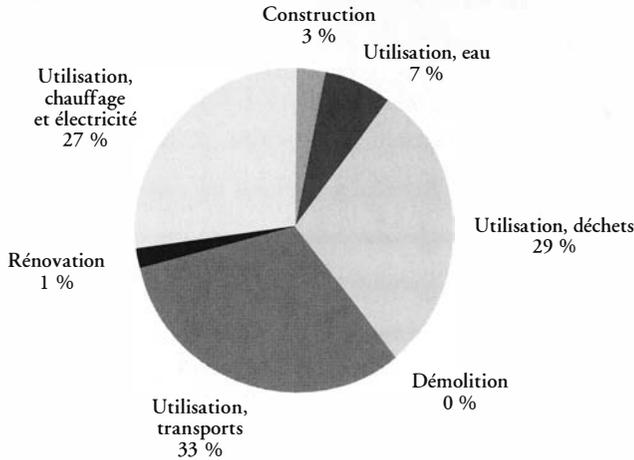
L'analyse inclut les sources d'impact liées aux habitants : transport domicile-travail, consommation d'eau, déchets ménagers. Des valeurs moyennes issues de statistiques françaises ont été considérées : deux des habitants effectuent en voiture un aller-retour par jour ouvrable sur une distance de 12 km ; chaque personne consomme 30 litres d'eau chaude et 120 litres d'eau froide par jour, et génère 1 kg de déchets ménagers dont 40 % de papier (recyclé à 20 %) et 20 % de verre (recyclé à 40 %). Le reste des déchets est incinéré sans valorisation énergétique. La contribution relative des différentes sources d'impact au bilan énergétique est présentée sur le schéma suivant pour l'énergie primaire sur l'ensemble du cycle de vie : la construction (incluant la fabrication des matériaux), l'utilisation (incluant la génération de déchets ménagers, les transports domicile-travail, la consommation d'eau, et l'énergie pour le chauffage, l'éclairage, etc.), la rénovation et la démolition.

### Energie primaire

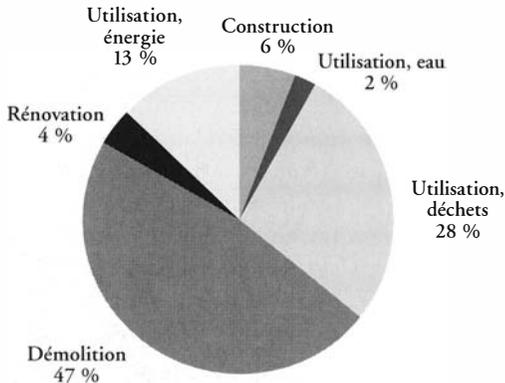


A titre d'exemple, ce même type de répartition entre les sources d'impact est donné pour deux autres indicateurs environnementaux : le potentiel de réchauffement global (GWP calculé sur 100 ans) et la production de déchets.

### GWP 100 (effet de serre)



### Déchets non radioactifs



La phase d'utilisation représente l'essentiel de la consommation d'énergie primaire. La contribution des matériaux peut cependant être importante sur d'autres indicateurs : la phase de fabrication joue un rôle non négligeable sur les aspects de toxicité, et la phase de démolition sur le thème des déchets.

La recherche de qualité énergétique des constructions n'est pas récente. Dans son traité d'architecture datant du premier siècle, Vitruve présente des principes très pertinents sur l'orientation des locaux par rapport au soleil en fonction de leur utilisation. Plus près de nous, Le Corbusier a approfondi la réflexion tant sur l'urbanisme que sur la morphologie des espaces ou les techniques constructives.

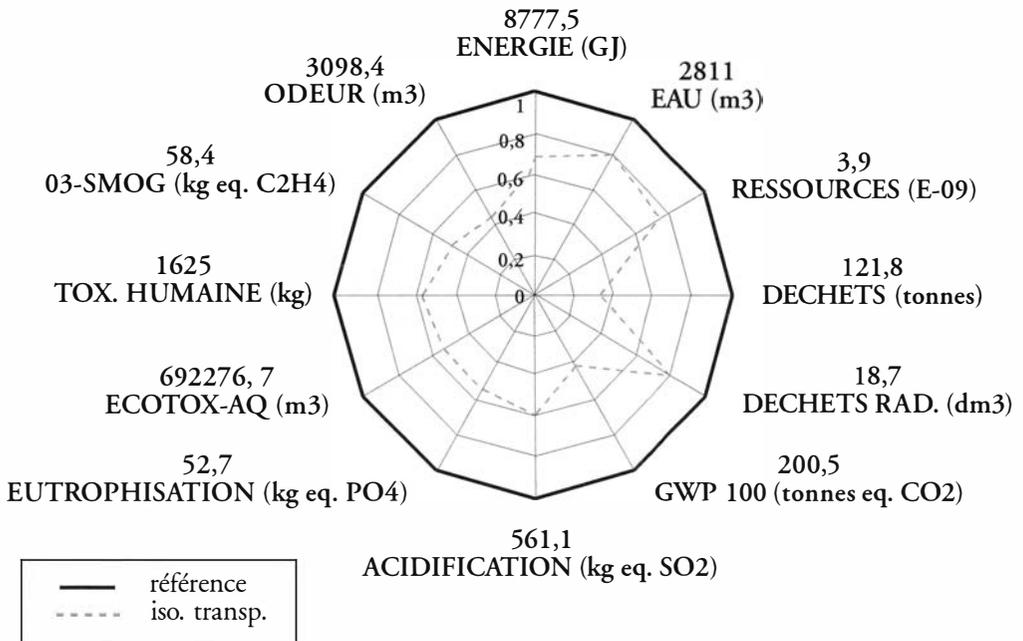
Aujourd'hui, la plupart des architectes délèguent ces compétences à l'ingénierie, qui met alors en œuvre des techniques d'isolation thermique, des équipements de chauffage et éventuellement de climatisation, ainsi qu'un système de ventilation mécanique de manière à assurer la conformité à la réglementation. Cette pratique, qui ne correspond pas à une stratégie de prévention, conduit en général à une surconsommation énergétique et dans certains cas à un inconfort thermique l'été. Une alternative consiste, dès la conception architecturale, à tirer parti du climat pour assurer le confort au moindre coût énergétique et environnemental. Cette approche, qualifiée de bioclimatique ou de climatique selon les auteurs, ne constitue pas une école esthétique : elle peut s'appliquer à tout style architectural.

Dans le cas du lotissement présenté précédemment, l'approche bioclimatique supposerait un traitement d'ensemble du plan masse, avec une remise en question des voiries et des garages attenants aux maisons. Il s'agirait en effet de travailler sur l'orientation des façades les plus vitrées pour maximiser les apports solaires, et sur la gestion des mitoyennetés pour limiter les déperditions. Une telle remise en cause dépasse ainsi le niveau d'un seul bâtiment. Des expériences ont été menées en Allemagne avec des ateliers d'habitants pour examiner ce type de choix, reliant architecture, urbanisme et mode de vie. Les aspects énergétiques sont toujours à relativiser en fonction de contraintes fonctionnelles, esthétiques, économiques, éventuellement acoustiques et sanitaires. La gestion de ces contradictions rend le processus de conception non linéaire et itératif, induisant des interactions entre divers acteurs. Ceci explique en partie pourquoi la stratégie la plus simple et la plus généralisable, basée sur la réduction des déperditions thermiques, est dominante. D'autres approches méritent cependant d'être présentées.

Une maison individuelle située en Ile de France reçoit sur sa toiture et ses façades un rayonnement solaire égal à huit fois ses besoins de chauffage. Au delà du renforcement de l'isolation thermique, il est possible d'améliorer le bilan énergétique des bâtiments en répartissant diverses surfaces captantes sur l'enveloppe, correspondant à diverses fonctions énergétiques : chauffage, éclairage, production d'eau

chaude sanitaire et d'électricité, préchauffage de l'air de ventilation. Le captage peut être associé à un stockage d'énergie, comme dans l'exemple du plancher solaire direct où l'eau chauffée dans des capteurs solaires circule ensuite dans une dalle qui stocke la chaleur, complétant ainsi le chauffage instantané par les vitrages. Les vérandas et atriiums associent apport d'énergie, en particulier si l'air neuf est préchauffé dans ces espaces, et agrément. Un chauffe eau solaire correctement dimensionné assure environ 40 % des besoins énergétiques sur ce poste.

Dans des maisons à ossature bois conçues par l'architecte Jacques Michel (Michel, 1991) et situées à Mouzon dans les Ardennes, des murs solaires ont été équipés d'isolation transparente. Cette synthèse entre isolation thermique et captage solaire, qui s'est inspirée de la fourrure translucide des ours polaires, constitue une piste possible pour l'innovation technique. Dans l'exemple de la maison toulousaine, l'intégration de 13 m<sup>2</sup> de ce type de mur en façade sud permettrait de réduire de 60 % les besoins de chauffage. Un écoprofil comparatif est donné ci-dessous pour une série d'indicateurs fréquemment utilisés en analyse de cycle de vie (Heijungs, 1992), en considérant un chauffage au gaz pour les deux variantes.



Sur chaque axe, l'impact de la maison équipée d'isolation transparente est donné en valeur relative par rapport à la maison de référence. La réduction de la consommation d'énergie primaire n'est que de 30 %, car cet indicateur prend en compte la consommation d'électricité qui reste inchangée. La réduction sur l'effet de serre (GWP) est plus importante car les besoins de chauffage contribuent davantage à cet effet, et parce que l'utilisation du matériau bois permet un stockage de CO<sub>2</sub>. La construction en bois génère d'autre part un tonnage moindre de déchets de démolition.

Le surcoût correspondant n'est cependant pas rentabilisé selon les calculs économiques actuels, qui n'internalisent pas les coûts environnementaux. Il n'est pas certain qu'un système d'écotaxe favorise ce type d'investissement, dans la mesure où une telle taxe serait payée par les occupants du bâtiment, qui ne sont pas forcément les investisseurs. Ceux-ci n'ont alors aucun intérêt à investir dans un dispositif d'économie d'énergie, puisque la réduction de l'écotaxe bénéficierait à d'autres personnes. Des mécanismes financiers appropriés doivent donc être trouvés. D'autre part, l'évaluation d'une telle taxe nécessite de nombreuses hypothèses sur la gestion à long terme des déchets radioactifs, les risques d'accident et les implications réelles de l'effet de serre. Selon les hypothèses effectuées par exemple dans le projet européen Externe, le coût externe de l'électricité produite par la filière nucléaire est égal à celui évalué pour la filière éolienne, et 12 fois plus faible que celui de la filière des turbines à gaz (Chabot, 1998). Mais tous les impacts sont-ils pris en compte, et quel taux d'actualisation considérer sur plusieurs milliers d'années ?

Outre l'isolation transparente citée précédemment, le nombre des matériaux actuellement proposés comme isolants illustre bien ce qu'on pourrait appeler la technodiversité. Chanvre, laine de verre, de roche ou de mouton, cellulose issue de papier recyclé, liège ou roche volcanique expansé, lin, roseau, multi-films réfléchissants, verre cellulaire, plastiques extrudés ou expansés, briques alvéolaires et paille constituent (de manière non exhaustive) une large palette au service des concepteurs. Les matériaux biodégradables et renouvelables sont à l'étude. La durabilité des matériaux et de leurs performances doit être assurée. Il faut mentionner aussi la technique pariéto-dynamique, qui consiste à récupérer les pertes thermiques d'une paroi en y faisant circuler l'air neuf. Notons enfin que la position de l'isolant est importante. L'isolation par l'extérieur permet de réduire les ponts thermiques et d'augmenter l'inertie thermique ce qui, en fonction de l'occupation des locaux, est en général utile pour stocker l'énergie et réduire les variations de température.

Le bois est aujourd'hui promu car il permet de stocker le gaz carbonique et son utilisation comme matériau de construction contribue à réduire l'effet de serre. Il faut cependant dimensionner l'inertie thermique des bâtiments en fonction de leur utilisation, du site et des surfaces transparentes. Le bilan énergétique et environnemental présenté ici permet d'évaluer les performances en terme d'économies d'énergie mais aussi de confort thermique. Une inertie insuffisante induit des risques de surchauffe et dans certains cas limite l'utilisabilité des apports solaires. Le matériau bois doit alors être complété par d'autres composants.

L'innovation technique se manifeste également au niveau des vitrages, qui peuvent être rendus plus isolants, par exemple grâce à des couches limitant le rayonnement infrarouge. Les couches minces ouvrent des perspectives en matière de contrôle des apports (vitrages électrochromes par exemple), voire de production d'électricité photovoltaïque.

En ce qui concerne les équipements, les efforts portent sur les générateurs de chaleur (chaudières à condensation, pompes à chaleur à absorption ou à compression) avec éventuellement une production combinée d'électricité (cogénération, piles à combustibles). Pour satisfaire au mieux la demande au cours du temps, en fonction de l'occupation souvent intermittente des bâtiments, un système à faible inertie est préférable, par exemple un chauffage à air. Ce système, très courant aux USA, est cependant peu répandu en France. L'investissement et les coûts de maintenance liés à un équipement performant se justifient moins si le bâtiment est peu fréquemment occupé ou si les besoins sont très faibles.

Dans les zones climatiques plus chaudes, et en fonction de l'utilisation des bâtiments, la climatisation peut être nécessaire. La consommation correspondante peut être réduite par des techniques de rafraîchissement passif : le contrôle des apports solaires, la ventilation nocturne et l'inertie thermique. D'autres techniques comme l'humidification de l'air, le rayonnement nocturne vers la voûte céleste et des équipements économes sont également proposées.

Au delà du travail de conception, les occupants influencent très fortement les performances effectivement réalisées car ils agissent sur des paramètres très importants : en particulier le contrôle du chauffage, de la ventilation et de l'éclairage, le choix des appareils électroménagers ou bureautiques, la gestion des occultations.

Les aspects énergétiques ne sont, bien entendu, pas uniquement techniques. En France, plusieurs centaines de milliers de familles ne peuvent pas payer leur facture énergétique, en particulier dans des logements mal conçus et chauffés à l'électricité, énergie environ trois

fois plus coûteuse que le gaz. Certains médecins affirment qu'un chauffage électrique est plus sain qu'une chaudière. Mais le chauffage électrique installé à la construction est parfois remplacé, pour des raisons économiques, par un poêle à fioul émettant des composés organiques volatils directement dans l'habitation, avec des effets non négligeables sur la santé.

Des agences locales voient le jour pour sensibiliser et informer le grand public sur les conséquences économiques et environnementales des choix effectués dans la vie quotidienne. Les économies comportementales attendues sont à la hauteur de la difficulté à diffuser cette culture. L'indigence de la formation des professionnels concernés est un autre frein à l'amélioration de la qualité énergétique de la construction. Ces éléments expliquent que certains acteurs préconisent une sévèrisation de la réglementation thermique, justifiée par des arguments écologiques. L'application de nouvelles contraintes dans un secteur en crise peut paraître difficile. Mais les progrès techniques réalisés sur certains composants, par exemple les vitrages à isolation renforcée, laissent espérer une amélioration des performances sans surcoût important. Comme dans l'électroménager, l'affichage des consommations serait un facteur d'innovation technique très efficace. Un tel affichage aurait l'avantage de concerner également le parc existant, prépondérant par rapport à la construction neuve.

L'autonomie énergétique est parfois recherchée. L'exemple de la maison à énergie zéro de Freiburg (Allemagne) illustre l'intérêt d'une façade bien exposée, de sud-est à sud-ouest, remettant en cause le principe de compacité maximale issu d'une réflexion limitée aux seules déperditions. Les apports solaires sont complétés par une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène. Ce combustible est produit l'été par électrolyse de l'eau, en utilisant de l'électricité générée par des cellules photovoltaïques situées en toiture. Mais une très bonne conception de l'enveloppe peut limiter les besoins de chauffage au point de se passer d'un équipement. La disposition de maisons en rangées limite les surfaces déperditives, qui peuvent être très bien isolées et munies de vitrages très performants. Le choix d'un axe est-ouest permet d'orienter les vitrages majoritairement en façade sud et de bénéficier d'apports solaires importants. Un préchauffage de l'air de ventilation dans un échangeur ou une véranda peut apporter une économie supplémentaire. Les besoins de chauffage sont alors très faibles et limités à quelques jours par an, voire même nuls du fait des apports internes : la chaleur dégagée par les occupants, l'éclairage etc.

Maison autonome en énergie ou maison reliée à un réseau efficace, le débat est autant philosophique que technique. Le réseau permet de bénéficier d'une économie d'échelle, par exemple sur les

systèmes de dépollution des chaufferies au bois ou le stockage solaire saisonnier. La densité urbaine est favorable aux réseaux de chaleur, donc à la valorisation énergétique des déchets, et réduit les besoins de transport, par exemple pour la collecte des matériaux recyclables. L'apparition du télétravail recadre cependant le débat sur le transport domicile-travail. Le bilan énergétique des constructions n'a pas pour objet d'établir un optimum unique et généralisable, mais de contribuer à faire évoluer les très nombreuses possibilités techniques et comportementales, au service de la création architecturale et au service du développement durable.

## **Bruno Peuportier**

Ecole des Mines de Paris  
60, Bd St Michel  
75272 Paris cedex 06

### **Références**

**Chabot, Bernard**, Energies renouvelables et développement durable, Systèmes Solaires n°124, mars-avril 1998

**Frischknecht, Rolf et al.**, Ökoinventare für Energie systeme, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1995, 1817 p.

**Heijungs R.**, Environmental life cycle assessment of products, Centre of environmental science (CML), Leiden, 1992, 96 p

ISO, International standard 14040, Environmental management - life cycle assessment - Principles and framework, 1997

**Michel, Jacques**, Application du principe de l'isolation transparente, maisons solaires dans les Ardennes, Séminaire Architecture (bio)climatique, AFME, Sophia Antipolis, 1991

**Polster, Bernd**, Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1995, 268 p.

### Mise en évidence des allergènes de l'environnement intérieur et extérieur

Sources d'allergènes	Méthodes d'identification optique	Méthodes d'identification immunochimique (dosage des allergènes majeurs)	Dosage des marqueurs
<b>Pollens</b>	Comptes polliniques disponibles chaque année en France	Possible (recherche)	-
<b>Moisissures</b>	Comptages atmosphériques possibles mais pas effectués couramment	Possible (recherche)	En cours d'étude
<b>Acariens</b>	Comptes optiques et identification des espèces (nombre d'acariens/g de poussière)	Possible dans certains laboratoires	Dosage semi-quantitatif de la guanine en routine (Acarex-test®)
<b>Chat</b>	-	Possible dans certains laboratoires	-