

Didier Roux*

L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS : UN DÉFI STRATÉGIQUE

La prise de conscience, relativement récente, de l'épuisement inéluctable des réserves fossiles et de l'impact de l'activité humaine sur l'environnement a déclenché dans tous les pays développés et les pays émergents une analyse qui conduit à trouver dans les bâtiments une importante réserve d'économie d'énergie. Cette analyse devrait permettre de passer d'une économie basée sur l'accès facile et peu coûteux à une source d'énergie, malheureusement épuisable, à une économie qui s'appuiera sur des sources renouvelables d'énergie. Le monde de la construction est face à un défi exceptionnel, probablement équivalent pour l'Europe à la période de reconstruction qui a suivi les guerres mondiales du siècle dernier. Face à ce défi, de nouvelles solutions techniques doivent être inventées, des mises en œuvre plus rapides et plus précises sont nécessaires et des matériaux nouveaux doivent permettre de répondre aux attentes d'une filière industrielle longtemps considérée comme conservatrice mais avec l'obligation aujourd'hui d'évoluer rapidement.

Une évolution énergétique indispensable qui passe par l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments

Depuis maintenant un peu plus d'un siècle, le monde a consommé à une allure incroyablement rapide des réserves d'énergie fossiles (pétrole, gaz, charbon...) accumulées grâce à la transformation des matières organiques depuis des millions d'années. Même si un débat d'experts toujours renouvelé ne situe pas précisément les dates d'épuisement des réserves naturelles¹, il est acquis que le maximum d'extraction de pétrole (*Peak Oil*) et donc le début du déclin de sa consommation se situera d'ici à une dizaine d'année. Il sera suivi de celui du gaz quelques décennies après et de celui du charbon d'ici à un peu plus de cent ans. Nous entrons donc dès maintenant dans une période où le coût de l'énergie va devenir

* Didier Roux, Directeur R&D et Innovation de Saint-Gobain, est Membre de l'Institut.

inéluçtablement plus cher et la transition vers des énergies renouvelables (biomasse, solaire, hydraulique...) indispensable. Même si l'énergie nucléaire aidera probablement, pour certains pays, à cette transition, il est évident qu'elle ne peut être considérée aujourd'hui comme une solution unique².

Une autre considération plus récente vient renforcer la nécessité de contrôler nos consommations énergétiques : le changement climatique, objet d'un débat là aussi très actif, pourrait avoir une origine anthropique. En effet, il ne fait aucun doute que la combustion en grandes quantités depuis le début du siècle dernier des énergies fossiles a conduit à une augmentation sensible de la quantité de gaz carbonique atmosphérique³. Cette augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère a plusieurs conséquences qui sont perceptibles à l'échelle planétaire⁴. Certaines ne font l'objet d'aucune polémique car elles correspondent à des mesures quantitatives indiscutables : c'est le cas de l'acidification des océans. Cependant, la conséquence la plus emblématique qui a valu que nombre d'Etats se penchent sur cette question, est celle du changement climatique. En effet, comme l'avait proposé dans un modèle déjà ancien Svante Arrhenius⁵ : une augmentation du CO₂ peut éventuellement être à l'origine d'une évolution du climat à l'échelle planétaire par l'augmentation de l'effet de serre. Si les principes physiques sont indéniables, les augmentations mesurées jusqu'à présent sont encore faibles (quelques dixièmes de degrés pour un paramètre appelé « température moyenne de la planète »). Cela ne présuppose pas d'une augmentation future sensiblement plus importante, pouvant avoir des conséquences dramatiques sur les populations de notre planète. La nécessité de modéliser l'impact sur le climat de cette augmentation du taux de CO₂ est donc d'une importance capitale ; c'est ce que les climatologues réalisent grâce à des modèles assez complexes faisant intervenir entre autre une rétroaction sur la quantité d'eau atmosphérique : cette eau atmosphérique est un gaz à effet de serre autrement plus puissant que le CO₂. La prise en compte de cette rétroaction est une clé pour obtenir des amplitudes de plusieurs degrés d'augmentation de la température moyenne : c'est l'objet du débat qui risque de mettre un certain temps avant de pouvoir être tranché définitivement. Si l'amplitude du changement climatique et ses conséquences restent encore du domaine de la modélisation et sont sujets de débat, l'augmentation du taux de CO₂ est elle indiscutable. Elle a des effets négatifs aujourd'hui prouvés et potentiellement dramatiques dans un futur proche. Il est donc nécessaire, autant que possible et indépendamment de certitudes sur l'amplitude du changement climatique, de limiter l'augmentation de gaz carbonique dans l'atmosphère.

L'efficacité énergétique des bâtiments : un objectif majeur de la politique d'économie d'énergie

Lorsqu'on examine les grandes masses des dépenses énergétiques des pays développés (Europe, USA...), on trouve que la répartition se fait à environ 30 % pour l'industrie, 30 % pour les transports des biens et des personnes et de l'ordre de 40 % pour les bâtiments (42 % pour la France). Environ 80 % de ces 40 % dépensés dans nos bâtiments sont liés au chauffage et/ou à la climatisation. Or, dans ces pays qui ont souvent un habitat ancien, la grande majorité de cette énergie est dépensée pour maintenir une température agréable dans des bâtiments construits à une époque où l'on ne se souciait pas des dépenses énergétiques. Si nous étions capables d'amener l'ensemble des bâtiments d'un pays comme la France à une performance comparable à l'exigence du neuf (c'est-à-dire pour aujourd'hui atteindre la performance exigée par la réglementation thermique RT2005) : une économie de l'ordre de 500 millions de TEP⁶ pourrait être réalisée, ce qui correspond à près d'un quart de notre consommation énergétique. Bien qu'il y ait des progrès possibles à la fois dans le transport et dans l'industrie, il est clair que le chauffage des bâtiments correspond à une réserve d'économie d'énergie considérable et, de loin, la plus importante. C'est le constat que tous les gouvernements ont fait depuis une vingtaine d'année et qui est ressorti des débats sur le Grenelle de l'environnement en France. L'enjeu se situe surtout dans la rénovation thermique des habitats anciens et, dans une moindre mesure, pour les constructions neuves (dont le taux de renouvellement est de l'ordre de 1 % par an).

La mise en œuvre d'une politique permettant, à terme, d'améliorer la qualité énergétique des bâtiments passe par une politique vigoureuse de réglementations et d'incitations. Tous les pays progressent rapidement dans cette voie. Mais cette politique ne peut être mise en œuvre que si la filière professionnelle s'adapte et évolue pour répondre aux exigences nouvelles. Il est aussi nécessaire que les solutions techniques, les systèmes à installer et les matériaux utilisés permettent d'atteindre ces performances avec une qualité et un coût compatible avec l'évolution du marché. Ce défi est nouveau, urgent et suffisamment important pour que l'ensemble de la filière industrielle se mobilise dans cette direction.

Pour ce qui concerne les industriels de cette filière, il s'agit de répondre à la fois par une augmentation de l'isolation des bâtiments, par le développement de systèmes plus économes en énergie fossile et par la promotion de solutions d'énergie renouvelable. Nous détaillerons dans la suite de cet article ces trois objectifs.

L'isolation des bâtiments : de nouvelles solutions sont nécessaires

L'isolation des bâtiments existe depuis le début des habitats. Si nos ancêtres avaient découvert que les grottes offraient des abris aux températures relativement modérées, hiver comme été et, que l'inertie du sol permettait d'atténuer les variations climatiques extrêmes, par la suite, la découverte de sources de chaleurs artificielles (le bois d'abord puis le charbon, le pétrole et le gaz ensuite) ont permis de vivre dans des habitats de plus en plus régulés en température mais nécessitant de plus en plus d'énergie pour maintenir cette température. L'isolation thermique d'un bâtiment met en œuvre un principe simple et efficace : l'isolant le moins cher et l'un des plus efficaces, est l'air immobilisé. En effet, la conductivité thermique de l'air (de l'ordre de $0,025 \text{ W/m/K}$)⁷ permet avec des épaisseurs de l'ordre de 20 à 40 cm d'obtenir une isolation remarquable, à condition que cet air soit immobile, c'est-à-dire ne subisse aucune convection, ce qui permettrait, de façon négative, un échange direct entre paroi froide et paroi chaude. Pour obtenir cela, il faut immobiliser cet air dans des cellules assez petites (inférieures à quelques mm pour éviter la convection) : soit dans des mousses de matières plastiques (polystyrène, polyuréthane...), soit par de la laine minérale ou organique (laine de verre, de roche, de chanvre etc.). Le remplacement de l'air par un gaz ayant une conductivité inférieure à celle de l'air (CO_2 , pentane, fluorocarbone ou gaz rares...) permet d'abaisser encore la valeur de la conductivité thermique de l'isolant. Les meilleures performances actuelles, après des années de progrès constant, atteignent des valeurs de $0,025$ à $0,030 \text{ W/m/K}$.

Les enjeux d'une amélioration systématique de l'efficacité des bâtiments demandent une diminution encore plus importante des valeurs de conductivité. Si, a priori, dans la construction neuve l'augmentation d'épaisseur est acceptable⁸, elle commence à poser des problèmes de mise en œuvre lorsqu'on atteint les performances les meilleures (bâtiments basse consommation ou passifs). C'est surtout pour la rénovation que les solutions actuelles montrent leurs limites. En effet, lors de la mise en œuvre de solutions d'isolation par l'intérieur, la perte de surface liée à l'empiètement des isolants sur la surface habitable peut être parfois coûteuse. Les solutions d'isolation par l'extérieur sont des solutions attractives mais la tenue mécanique des isolants pour des épaisseurs de plus en plus grandes, demande des solutions de plus en plus sophistiquées. De plus, certains éléments posent des problèmes techniques (isolation des volets roulants intégrés par exemple) ou n'ont, éventuellement, pas de solutions acceptables avec les matériaux actuels (isolation des sols en rénovation ou isolation des avancées de toit (de type « chien-assis »)).

Il faut donc trouver de nouveaux matériaux permettant d'envisager de descendre à des valeurs de conductivité sensiblement plus basses que celle

de l'air. Il existe deux types de solutions : l'isolation sous vide, les matériaux nano-poreux. Dans le premier cas, il s'agit de supprimer l'air en plaçant le matériau sous vide ; la conductivité thermique étant due à l'agitation moléculaire, il n'y a pas de conductivité dans le vide (à part une conductivité due au rayonnement électromagnétique que l'on peut éviter en utilisant des matériaux réfléchissants). Comme l'élément sous vide doit avoir une tenue mécanique, on le remplit avec un matériau solide le plus léger possible et on arrive ainsi à des valeurs de conductivité thermique de l'ordre de quelques unités (0,004-0,006 W/m/K). La seconde classe de solutions d'amélioration vient d'un effet physique découvert par Knudsen⁹ - appelé l'effet Knudsen - qui voit la conductivité d'un gaz diminuer lorsque qu'il est placé dans des cavités ayant des dimensions d'espacement entre les parois inférieures au micromètre (i.e. plus faible que le libre parcours moyen des molécules de gaz). Il existe aujourd'hui des matériaux à base de silice précipités dans des conditions extrêmement contrôlées qui arrivent à des valeurs de conductivité thermique de l'ordre 0,010-0,014 W/m/K. Des travaux de plus en plus nombreux permettent aujourd'hui d'envisager un développement industriel de solutions à base de ce type de matériau.

Si l'isolation des parois opaques est la base de l'amélioration de l'énergétique d'un bâtiment, les parois transparentes sont des éléments clés. Non seulement la qualité des fenêtres et du vitrage permettent d'atteindre une très bonne qualité d'isolation, proche de celles des parois opaques, mais elle contribue, en plus, à l'économie d'énergie par un apport direct de chaleur à travers le rayonnement qui pénètre dans l'habitat. Les progrès spectaculaires des verres à couches qui permettent de filtrer ce rayonnement pour optimiser cet apport solaire ainsi que l'amélioration des cadres de fenêtres avec la bonne utilisation de triple vitrage, vont permettre de compléter l'arsenal technologique permettant d'atteindre des objectifs de plus en plus exigeants.

L'isolation d'un habitat ne peut pas être imaginée sans une gestion rigoureuse de la ventilation. En effet, un bâtiment échange en permanence de l'air avec l'extérieur : si cela permet d'assurer une gestion saine de l'atmosphère intérieure, cet air froid, en hiver qui pénètre dans le bâtiment doit être amené à température ambiante et une partie non négligeable de l'énergie consommée par le chauffage est utilisée pour réchauffer ce gaz. L'idéal pour la gestion énergétique est d'utiliser une ventilation à double flux qui, en échangeant de l'air entre l'intérieur et l'extérieur, permet en même temps de réchauffer l'air extérieur par les calories stockées dans l'air intérieur. Ce simple échangeur thermique est la façon la plus efficace d'assurer une bonne ventilation : c'est une économie importante de chauffage. Pour une très bonne efficacité de la ventilation (en particulier double flux), il faut étanchéifier l'ensemble de l'enveloppe de l'habitat.

Cela est réalisé avec des membranes et des joints de plus en plus élaborés.

Economiser les énergies fossiles

Des technologies actuelles permettent de faire de substantielles économies d'énergie. Nous en aborderons trois qui seront amenées à se développer rapidement : le puits canadien, la pompe à chaleur et la pile à combustible.

Les puits canadiens permettent d'exploiter de façon simple l'inertie thermique du sol. Il s'agit de prélever l'air de l'extérieur en le faisant transiter par le sol ou il est amené à échanger des calories. En hiver, alors que la température extérieure peut être négative, l'air qui entre dans le bâtiment est réchauffé par le sol pour atteindre une température située entre 5 et 10°C. Au lieu d'avoir à réchauffer l'air extérieur de la température atmosphérique (-5°C par exemple) à une température de l'ordre de 20°C, il faudra simplement le réchauffer à partir de cette température plus proche de la température de consigne. Une version symétrique permet en été de rafraîchir un habitat.

Une solution sensiblement plus technologique permet d'aller encore plus loin dans les économies d'énergie : la pompe à chaleur. Basée sur la thermodynamique et fonctionnant comme un réfrigérateur, il s'agit d'extraire des calories d'un réservoir de température (appelée source froide : le sol par exemple) pour les amener à réchauffer une source chaude (le bâtiment). Ce transfert de calories d'une source froide vers une source chaude se fait en fournissant un travail. D'un point de vue pratique, ce travail est fourni par un compresseur qui permet par une succession de détentes et de compressions d'assurer l'extraction et la réinjection de calories. Le coefficient de performance (COP) est le rapport de la quantité de chaleur fournie au bâtiment sur la quantité de travail consommée par le compresseur. Les pompes à chaleur ont fait des progrès remarquables et le COP qui était historiquement de 2 ou 3 atteint maintenant des valeurs supérieures à 4. C'est-à-dire que pour un kW/h de travail (le plus souvent électrique) consommé on peut obtenir plus de 4 kW/h de chaleur.

Enfin, notre dernier exemple a trait à une technologie sur laquelle de nombreux industriels travaillent intensément et qui devrait déboucher dans les quelques années à venir : la pile à combustible. Il s'agit d'un dispositif permettant de produire de l'électricité à partir d'un gaz combustible avec un rendement sensiblement meilleur que les dispositifs traditionnels. Comme base de comparaison, on peut partir du rendement d'une turbine à gaz qui est de l'ordre de 30 % (50 % si on utilise la cogénération). Une pile à combustible permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 50 % pouvant atteindre 80 % en utilisant la cogénération. Bien qu'en principe applicable

pour produire de l'électricité dans des centrales (et donc visant à remplacer les turbines à gaz), on voit se développer des solutions basées autour de la chaudière électrogène : ce qui aura le double mérite d'être plus accessible techniquement et d'utiliser de façon systématique la cogénération. Le principe est de fabriquer une « petite » pile à combustible d'une puissance de l'ordre du kW et de produire à la fois de l'électricité (soit pour les besoins du bâtiment, soit pour alimenter le réseau) et de la chaleur pour les besoins en eau chaude par exemple. Le principe d'une pile à combustible est de produire de l'électricité en isolant dans des compartiments séparés le carburant (typiquement de l'hydrogène pouvant provenir de la décomposition du gaz naturel), du comburant (l'oxygène). La séparation spatiale des espèces chimiques permet de faire circuler les électrons échangés par les atomes lors de la combustion dans un circuit externe (et donc à produire de l'électricité comme pour une pile classique) tout en dégageant la même quantité de chaleur que la combustion directe. Bien qu'il existe de nombreux démonstrateurs, le développement industriel butte actuellement sur deux difficultés technologiques : le coût des composants et leur fiabilité (en particulier au cœur de la pile où les réactions chimiques à haute température ont lieu). Des progrès récents sur les matériaux céramiques permettent d'espérer que ces deux obstacles pourront être prochainement levés.

Une source d'énergie renouvelable pour le futur : l'énergie solaire

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie hydraulique et la biomasse sont utilisées depuis longtemps, plus récemment l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont en croissance forte. Le propre des énergies renouvelables est de ne pas amener une réponse universelle à la problématique énergétique mais, compte tenu de contraintes qui leurs sont propres, de participer partiellement au mix énergétique d'un pays. Pour autant, l'énergie solaire est la seule pour laquelle on peut envisager un développement à un niveau permettant, à terme, un remplacement total des énergies fossiles. En effet, compte tenu du rayonnement reçu par la terre et de la capacité de conversion en chaleur et/ou électricité, cette hypothèse est envisageable mais à condition de résoudre des problématiques techniques importantes (tel que, par exemple, le stockage de l'énergie). D'ores et déjà et bien qu'il soit encore nécessaire de compter sur des aides des gouvernements pour les développer, les technologies disponibles commencent à être compétitives dans certaines circonstances et le seront de plus en plus dans un avenir proche.

L'énergie solaire se décline en trois grandes applications : le solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire, le solaire à concentration pour produire de l'électricité industriellement, le solaire

photovoltaïque pour une production diffuse d'électricité.

Le solaire thermique permet de produire de l'eau chaude à température modérée pour les besoins sanitaire d'un habitat. C'est une technologie classique qui se développe facilement et ne pose pas de problématiques particulières, sauf peut-être dans sa version couplée avec le photovoltaïque (voir plus loin).

Le solaire à concentration (ou solaire thermodynamique) est une technologie qui concentre le rayonnement solaire sur un liquide caloporteur (qui transporte la chaleur) et le chauffe à relativement haute température (plusieurs centaines de degrés). Avec cette chaleur transportée par ce liquide, on peut évaporer de l'eau et alimenter une turbine fabriquant de l'électricité comme avec toute autre source de chaleur (gaz, fioul, charbon, nucléaire...). Plusieurs techniques utilisant des miroirs plans ou courbés peuvent être utilisées. Les projets se développent, pour des raisons économiques, principalement dans les pays où l'ensoleillement est important et la surface au sol facilement accessible, par exemple les pays de l'arc méditerranéen.

Le solaire photovoltaïque est certainement le domaine où l'on peut espérer les progrès scientifiques et technologiques les plus significatifs dans les années à venir. Il a été développé sur la base de l'effet photoélectrique (pour l'explication duquel Albert Einstein a eu le prix Nobel en 1921), dans les années 50-60 afin d'avoir une source d'électricité pour alimenter les satellites. C'est le seul exemple où l'énergie électromagnétique du rayonnement du soleil est transformée directement (sans passer par un mouvement mécanique) en énergie électrique. Le rendement actuel (i.e. le pourcentage d'énergie électromagnétique transformée en énergie électrique) des différentes cellules varie énormément de quelques % à plus de 40 % en laboratoire dans le meilleur des cas. Il n'y a pas de limites théoriques à l'amélioration de ce rendement et les cellules dites « multijonctions » ont fait des progrès spectaculaires. Cette technologie de production électrique a une particularité qui la rend quasiment unique : il n'y a pas de gain financier en concentrant la production de cette électricité (pas d'économie d'échelle). On peut installer des panneaux photovoltaïques indifféremment sous la forme d'usine de production en équipant des champs de panneaux solaires mais aussi en produisant localement à partir de petites unités disposées sur les toits ou le sol. Ces panneaux installés dans des unités locales permettent, soit d'alimenter un équipement non relié au réseau, soit de produire de l'électricité de façon diffuse en alimentant ainsi le réseau avec des sources disséminées. Ce caractère diffus de la production est une particularité qui permet à la fois de varier les sources de production sur un réseau mais aussi de faire appel à l'investissement direct des citoyens. Pour avoir une réalité économique durable ne nécessitant pas

d'aides des Etats, il faut baisser encore fortement les coûts des modules et de leur installation. L'objectif est d'arriver à un coût de production d'électricité par des panneaux photovoltaïques identique à celui du prix d'achat de l'électricité sur le réseau ; notons que dans certains cas nous n'en sommes pas loin (c'est le cas de certains pays où l'électricité est chère et le soleil abondant). La technologie largement dominante utilise du silicium mono- ou poly-cristallin, elle a été développée au départ pour les satellites. De nouvelles technologies apparaissent sur le marché, qui permettront, à terme, de faire baisser les coûts. Les nouvelles technologies les plus avancées sont celles nommées couches minces qui permettent, en déposant sur un support rigide ou flexible quelques microns de film d'un matériau semi conducteur, de réaliser des cellules. Pour le moment, les technologies « couches minces » industrielles sont celles à base de silicium amorphe, de CdTe (tellure de cadmium) et de CIGS (mélange cuivre - indium - gallium et sélénium). Notons que d'un point de vue scientifique, on peut encore s'attendre dans le domaine des couches minces photovoltaïques à des ruptures technologiques. En effet, nous sommes loin d'avoir exploré (et même découvert) tous les matériaux semi conducteurs ayant des propriétés adaptées au photovoltaïque ; le cas du CIGS à quatre constituants est de ce point de vue emblématique car il préfigure (comme pour les supraconducteurs hautes températures) que des alliages composés de plusieurs constituants (>2) peuvent avoir des propriétés bien meilleures que des corps purs ou des mélanges binaires. Compte tenu du développement de nouvelles techniques d'échantillonnage à haut débit particulièrement adaptées aux films minces composés de mélanges, de nouvelles découvertes sont possibles permettant de trouver éventuellement de nouveaux semi conducteurs à très bon rendement et fabricables industriellement à des coûts faibles. Plus récemment, de nouvelles technologies basées sur des molécules organiques (polymères conducteurs) ou mixtes minéral/organique (cellules dites de Grätzel) donnent aussi l'espoir de développer des procédés de fabrication peu coûteux.

Conclusion : un habitat utilisant des hautes technologies basées sur des principes physiques ancestraux

Nous venons de décrire quelques technologies qui en progressant permettront de répondre aux défis de l'efficacité énergétique des bâtiments. Ces technologies ont un but commun : permettre à nos sociétés de s'adapter aux contraintes énergétiques et environnementales. De façon intéressante, on peut remarquer que certaines de ces technologies avaient leurs racines dans des habitats traditionnels que nos ancêtres avaient conçus à une époque où l'énergie était rare et que chauffer un bâtiment était difficile, voire impossible.

On peut ainsi citer les cavernes qui utilisaient, à l'époque la plus lointaine de l'habitat, l'inertie thermique du sol pour éviter les températures extrêmes en hiver comme en été. On retrouve ce principe dans la description du puits canadien.

L'igloo est probablement la version la plus sophistiquée de cet habitat qui, sans apport d'énergie, permet de vivre dans des climats particulièrement rudes. Fait d'un matériau isolant poreux léger, la neige, il permet d'immobiliser de l'air dans un volume parfois important. Cet air est immobilisé même en cas de grands vents par le fait qu'une membrane imperméable à l'air se constitue naturellement grâce à la chaleur des habitants ; celle-ci fait fondre une couche superficielle de neige à l'intérieur qui se solidifie sous forme de glace au contact du reste de la neige. Ceci permet d'avoir l'équivalent d'un montage d'isolants avec une membrane permettant d'obtenir l'isolation doublée de l'étanchéité nécessaires aux habitats performants et permet de conserver l'atmosphère intérieure de l'igloo à une température de l'ordre de zéro degré : bien que cette température intérieure soit moins rude que la température extérieure, elle reste cependant assez basse. Un autre phénomène permet d'améliorer le confort des habitants de ces igloos. En effet, la neige est composée de petites particules de glace qui diffusent fortement le rayonnement électromagnétique (la couleur blanche de la neige est due à ce phénomène). Une personne placée à l'intérieur d'un igloo produit un rayonnement électromagnétique de l'ordre de quelques microns de longueur d'onde lié à la température du corps (37°C), ce rayonnement est redirigé vers lui-même par les parois diffusantes de l'igloo et le chauffe en retour. Ce phénomène permet d'atteindre une température effective de l'ordre de 15°C, bien supérieure au zéro ambiant et qui permet d'avoir un confort relatif sans apport énergétique supplémentaire.

Nous voyons donc que les nouvelles contraintes énergétiques et environnementales amènent à redécouvrir des principes physiques permettant de minimiser la consommation énergétique des bâtiments en utilisant au mieux l'environnement et certaines propriétés physiques des matériaux qui avaient été utilisés dans le passé. Pour autant, de nouvelles technologies arrivent, par exemple la production d'électricité par des modules photovoltaïques.

Notes :

¹ Des dates précises dépendent de nombreux facteurs dont la quantité de réserves disponibles et la vitesse de consommation sont deux paramètres qui peuvent faire changer sensiblement les dates supposées d'épuisement des réserves.

² La technologie aujourd'hui en exploitation, dit à neutrons lents, épuisera les réserves d'Uranium combustibles en quelques dizaines d'années, selon les modèles de consommation. La technologie à surgénérateurs, dites à neutrons rapides, ne sera au point industriellement que dans une cinquantaine d'années environ.

³ De 260 ppm en moyenne sur des périodes de plusieurs centaines de milliers d'années à près de 400 ppm récemment.

⁴ C'est-à-dire qui ne sont pas localisées à l'endroit de leur production mais peuvent avoir des conséquences sur l'ensemble de la planète.

⁵ Svante Arrhenius, 1896, *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (fifth series), April 1896. vol 41, pages 237–275.

⁶ TEP : Tonne d'Equivalent Pétrole.

⁷ Par comparaison le bois et le béton ont des valeurs respectivement de 0,140 et 1 W/m/K.

⁸ Avec cependant des contraintes mécaniques de plus en plus sévères lorsque l'on va vers des épaisseurs importantes.

⁹ M. Knudsen, *The Kinetic Theory of Gases*, Methuen, London, 1950.