

Changement climatique, énergie et bâtiments : un défi de société

Par **Didier ROUX**
Académie des sciences

Dans cet article, nous présenterons une brève revue de l'origine des énergies utilisées par l'Homme, en insistant sur la différence entre énergies non renouvelables et énergies renouvelables. Nous examinerons également l'évolution des consommations et nous en tirerons quelques leçons telles que la nécessité de disposer d'un temps suffisant pour faire évoluer le système de production énergétique et répondre ainsi aux défis liés à la transition énergétique. Puis, avant de conclure, nous aborderons le rôle particulièrement important de la filière du bâtiment que nous illustrerons au travers de quelques solutions novatrices qui permettront son adaptation en réponse aux défis précités.

L'Homme a toujours utilisé l'énergie pour permettre aux sociétés humaines d'évoluer et de progresser. D'abord et avant tout, il a eu recours à l'énergie de son corps ou à celle des animaux, mais très rapidement il a réalisé que d'autres sources d'énergie pouvaient remplacer le travail animal. C'est ce qui permet aujourd'hui à l'Homme de produire, grâce à des moyens industriels, et de consommer en moyenne dans le monde environ 10 000 fois plus d'énergie que ce qu'il est capable de produire avec son corps.

Quelles sont ces énergies et d'où proviennent-elles ?

On classe souvent les sources énergétiques utilisées par l'Homme en fonction de leur caractère non renouvelable ou, au contraire, renouvelable. Ces termes indiquent simplement que, dans le premier cas, l'Homme épuise un stock préexistant de ces sources présentes sur Terre et, dans le second cas, qu'il utilise des sources qui se reconstituent au fur et à mesure de leur consommation sur une échelle de temps compatible quantitativement à leur renouvellement.

Ainsi, il consomme, depuis une centaine d'années, un stock d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) ayant mis des centaines de milliers d'années à se constituer dans le passé ; des énergies qui sont consommées en masse et qui seront probablement épuisées à une échelle de temps incompatible avec leur renouvellement. De même, l'uranium, qui est à la base de l'énergie nucléaire, est consommé sous sa forme de minerai présent dans le sol terrestre ; il n'est donc pas renouvelable même si certaines technologies (comme les générateurs à neutrons rapides ou la fusion) ont un potentiel de production qui ne permettrait de consommer qu'une petite partie du stock disponible.

A contrario, l'énergie photovoltaïque ou l'énergie éolienne prélèvent de l'énergie sur des sources qui ne sont pas sensiblement affectées, puisque, issues du soleil ou du vent, elles sont renouvelables (à l'échelle de la vie humaine). Le cas de l'énergie hydraulique en est aussi une parfaite illustration : les pluies de l'hiver permettent de remplir les réservoirs, dont l'eau sera ensuite utilisée pour faire tourner les turbines des barrages par gravité. La biomasse (bois, plantes, etc.) peut aussi être considérée comme renouvelable, à la condition que l'on replante la même quantité de végétal que celle que l'on prélève.

Les sources d'énergies sont, par nature, gratuites et à notre libre disposition : les énergies fossiles sont, depuis des millénaires, stockées dans le sol ; le soleil s'offre à tous, le vent aussi. Le coût de l'énergie n'est donc pas celui nécessaire pour « produire » ces énergies, puisqu'elles sont naturellement disponibles. Le coût de l'énergie correspond en fait au prix de l'accès (le terrain essentiellement) à des énergies gratuites (la rente) et au coût de la transformation et de la distribution de ces énergies (liés à des investissements industriels).

Évolution des consommations énergétiques

Lorsque l'on compare la consommation énergétique mondiale⁽¹⁾ à l'accroissement de la population⁽²⁾, on observe que les deux courbes suivent une croissance quasiment exponentielle depuis le début de l'ère industrielle (XIX^e siècle) et qui est d'une ampleur relativement équivalente. Donc, première observation, la consommation énergétique suit l'accroissement de

⁽¹⁾ https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption

⁽²⁾ https://en.wikipedia.org/wiki/World_population

la population, ce qui n'est pas étonnant. Cependant, lorsque l'on calcule la consommation énergétique mondiale par habitant⁽³⁾, on s'aperçoit, et c'est là ma deuxième observation, qu'elle augmente aussi de façon quasi exponentielle. Plus généralement, il y a une très forte corrélation entre l'évolution du produit intérieur brut (PIB), en augmentation forte depuis le début du XIX^e siècle, et celle de la consommation énergétique⁽⁴⁾. Si l'on regarde pays par pays, il est intéressant de noter que si, en moyenne, on retrouve cette même corrélation, il y a cependant une grande dispersion entre les courbes et que, pour un même PIB, certains pays peuvent consommer presque trois à cinq fois plus d'énergies que d'autres. On peut en conclure que, de façon non surprenante, la consommation énergétique est liée à l'activité économique, qui est déterminée à la fois par la taille de la population et par la « production » de richesse. Mais l'on observe aussi qu'il existe des différences notables entre des pays aux caractéristiques à peu près identiques : des différences culturelles peuvent être à l'origine de ces différences importantes dans la consommation énergétique d'un pays. Suivre l'exemple des pays, qui pour un même PIB, consomment sensiblement moins d'énergie que d'autres, est certainement une piste intéressante à emprunter, sans pour autant parler de décroissance.

Intéressons-nous maintenant aux évolutions de l'utilisation dans le temps des différentes sources énergétiques. La première source d'énergie utilisée par l'Homme en dehors de sa propre énergie, a été le bois, et plus généralement la biomasse. La découverte des énergies fossiles a été une révolution liée à leur abondance et à leur facilité en termes d'accès et d'utilisation. Le charbon a été, dès le début du XIX^e siècle, une source importante d'énergie et a largement contribué à l'industrialisation tout d'abord de l'Europe, puis du reste du monde. L'examen de l'évolution des consommations des différentes formes d'énergies fossiles est intéressant⁽⁵⁾. La montée en puissance de l'utilisation du charbon s'est faite sur une durée de près de cent ans, avant de plafonner récemment. Puis, le relai a été pris par le pétrole, dont l'utilisation n'a pas cessé de croître tout au long du XX^e siècle. Plus récemment (à partir de la moitié du XX^e siècle), le recours au gaz naturel s'est développé, et son utilisation est toujours en train d'augmenter. L'électricité qui, historiquement était produite avec des énergies fossiles, a vu ses sources de production se diversifier : l'hydroélectricité, tout d'abord, avec la construction de barrages, qui s'est échelonnée en France des années 1930 jusqu'aux années 1970 ; puis, juste après la Seconde Guerre mondiale, est apparue une nouvelle forme de production de l'énergie électrique liée à l'essor du nucléaire. Des réacteurs nucléaires civils ont été construits et la France a, dès les années 1960, pris la décision (laquelle a été renforcée par les crises pétrolières des années 1970) de développer fortement cette technologie, qui a abouti à une pleine puissance

de production à la fin des années 1990, soit 30 à 40 ans après la décision du lancement du programme nucléaire français. Ces exemples permettent d'illustrer le fait que la mise en place et les évolutions d'une stratégie d'utilisation des ressources énergétiques à l'échelle d'un pays s'opèrent sur des temps très longs, typiquement plusieurs dizaines d'années. C'est donc un domaine où il faut penser les évolutions longtermes à l'avance, faute de quoi une réaction dans l'urgence conduit à des difficultés qui peuvent être majeures.

On peut tirer de l'ensemble des chiffres évoqués ici quelques idées simples : la consommation finale d'énergie, au niveau mondial, se compose aujourd'hui à 84 % d'énergies fossiles (70 % pour la France), nous sommes donc globalement encore consommateur d'une énergie très majoritairement d'origine fossile et donc carbonée (c'est-à-dire émettant du CO₂ en excès). Les temps caractéristiques d'évolution des consommations énergétiques sont de l'ordre de 30 à 40 ans. On perçoit donc que tous les discours expliquant que l'on peut viser à atteindre d'ici 10 à 20 ans la neutralité carbone grâce un changement profond de nos modes de production et de consommation énergétiques conduisant à supprimer les énergies fossiles sont d'un optimisme extrême, pour ne pas dire irréalistes.

Le bâtiment, une cible privilégiée pour économiser l'énergie

Actuellement, le bâtiment est responsable d'un peu plus de 25 % de nos émissions de CO₂. Si l'utilisation de la géothermie, de la biomasse ou de l'électricité décarbonée peut être envisagée, il faudra au préalable investir massivement dans le changement de nos moyens de chauffage.

Sur le temps court (10-30 ans), il est certain que le plus sûr moyen pour diminuer nos émissions de CO₂ sera de faire des économies sur notre consommation énergétique ; à ce niveau, le plus gros réservoir de possibilités est certainement dans le bâtiment.

Examinons de plus près la situation au niveau des dépenses énergétiques dans le bâtiment.

Avec une population mondiale de l'ordre de 7 milliards d'habitants, en augmentation constante, dont 56 % vivent dans les villes et le reste en milieu rural, le monde est confronté à des défis importants en termes de logement. Les projections des démographes pour 2050 envisagent une population mondiale de près de 10 milliards d'habitants, dont 66 % vivront en milieu urbain. Un rapide calcul montre que la conséquence sera qu'entre 2010 et 2050, la population des villes doublera. C'est-à-dire qu'il faudra construire en ville autant de bâtiments que ce qui existe déjà. Il faudra donc doubler à l'échelle de la planète la capacité d'hébergement des villes. Cela se passera principalement en Asie et en Afrique. Le monde occidental est confronté à un autre défi : celui de la rénovation des bâtiments déjà existants. Pour comprendre l'importance d'agir sur les bâtiments pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux qui nous attendent,

⁽³⁾ <https://ourworldindata.org/energy>

⁽⁴⁾ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/correlation-of-per-capita-energy>

⁽⁵⁾ <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>

il faut se rappeler qu'aujourd'hui, dans les pays occidentaux, le secteur de l'immobilier est le plus gros pôle de consommation énergétique et l'un des plus gros émetteurs de CO₂. Ainsi, en Europe, il représente 42 % de la consommation d'énergie (contre 26 % pour les transports et 32 % pour l'industrie), c'est donc presque la moitié de l'énergie que nous consommons qui est utilisée pour chauffer ou refroidir les bâtiments où nous vivons et où nous travaillons. Pour bien comprendre l'enjeu, il faut avoir en tête que la moyenne de la consommation des bâtiments anciens est environ de l'ordre de 300 kWhEP/m²/an (EP signifiant que le calcul est exprimé en énergie primaire, comme la réglementation le demande). Par comparaison, un bâtiment d'habitation construit en France et répondant à la réglementation thermique en vigueur (la RT2012 et bientôt la RE2020) doit consommer pour son chauffage de l'ordre de 40 kWhEP/m²/an. La consommation moyenne des bâtiments existants est donc presque dix fois supérieure à celle des bâtiments neufs. Une autre façon de voir est de se dire que si nous ramenions la consommation moyenne à 100 kWhEP/m²/an, cela permettrait d'économiser pratiquement la même quantité d'énergie que celle utilisée pour les transports. On comprend donc la réserve d'économie énergétique que constitue le parc actuel de bâtiments.

Tous les gouvernements occidentaux ont conscience de cette situation et ont promulgué en réaction deux sortes de mesures : l'adoption de réglementations thermiques pour les bâtiments neufs et l'élaboration de plans de rénovation des bâtiments anciens. En effet, il faut bien comprendre qu'en raison du très faible taux de renouvellement des bâtiments anciens (de l'ordre de 1 % en France), on ne peut pas compter sur les seules réglementations thermiques applicables aux bâtiments neufs pour améliorer la situation.

Plusieurs technologies permettent de diminuer le besoin en énergie des bâtiments. Les technologies d'isolation thermique sont les principales (une gestion active des bâtiments y contribue également). L'air immobilisé dans un matériau poreux léger est la technique la plus accessible pour isoler un bâtiment⁽⁶⁾. On peut ainsi utiliser des fibres légères enchevêtrées (laine de verre, laine de roche, laine de bois...) ou des mousses synthétiques (polyester, polyuréthane...). Compte tenu des exigences de plus en plus grandes liées à l'augmentation des performances des bâtiments, l'épaisseur des isolants dans les murs va en augmentant, pouvant se situer entre 30 et 50 cm selon les climats. Si de telles épaisseurs sont acceptables pour des bâtiments neufs, cela pose de plus en plus de problèmes pour la rénovation, en particulier pour l'isolation par l'intérieur, où l'on perd de fait de la surface habitable. Il y a donc besoin de trouver des isolants plus performants permettant, en offrant des résistances thermiques équivalentes, d'atteindre des épaisseurs sensiblement plus faibles. Deux technologies peuvent être mise en œuvre en ce sens : les isolants sous vide et les aérogels.

⁽⁶⁾ À travers la porosité, l'objectif est d'empêcher la convection, qui, en mettant l'air en mouvement, augmenterait fortement les échanges thermiques, ce que l'on veut éviter.

Si l'amélioration de l'isolation des murs est nécessaire, cela ne suffit pas. Il faut aussi améliorer l'isolation des parois vitrées. En la matière, l'apparition du double vitrage avec l'introduction d'un gaz (Argon, Xénon...) entre les parois a permis de faire des progrès notables. C'est aujourd'hui la norme en Europe. D'autres progrès, plus récents, ont également permis l'amélioration des performances. L'introduction de verres sur lesquels sont déposées une série de couches très fines (de quelques nanomètres) de matériaux conducteurs (l'argent, le plus souvent) et de matériaux diélectriques, a permis de transformer la vitre en véritable interféromètre laissant passer librement le rayonnement visible, mais réfléchissant les infrarouges (qui transportent une grande partie de l'énergie de radiation thermique). Ce verre « bas-émissif » permet aussi d'économiser de l'énergie en hiver comme en été. Très récemment, sont apparues des vitres dont la transparence peut être contrôlée par une différence de potentiel entre deux plaques de verre rendues conductrices. Ces vitres électrochromes sont des piles contenant des ions métalliques, qui en fonction de leur degré d'oxydation, absorbe ou non la lumière⁽⁷⁾.

Indépendamment de l'amélioration des performances des parois, il est nécessaire de mesurer l'effet de l'introduction de ces technologies sur le bâtiment final. Si la physique du bâtiment permet de calculer assez précisément ce que l'on peut espérer obtenir en termes de performances théoriques d'un bâtiment bien construit, il est étonnant de constater que peu de techniques de mesures globales quantitatives ont été développées à ce jour. La performance de chacun des matériaux entrant dans une construction est bien sûr mesurée et contrôlée. Par contre, pratiquement aucun contrôle de performance n'est réalisé sur le bâtiment final. Une des raisons tient à la difficulté relative de la mise au point de techniques rapides et légères de mesure, même si depuis quelques années elles font leur apparition. Leur principe est simple mais leur mise en œuvre demande un peu d'astuce. Il s'agit de considérer un bâtiment comme un circuit électrique (se composant d'au moins une résistance et un condensateur) et d'utiliser des méthodes de perturbation pour mesurer la résistance thermique et la capacité calorifique du bâtiment⁽⁸⁾ et ⁽⁹⁾.

Conclusion

Si l'on fait le bilan des liens entre la consommation d'énergie et l'impact de celle-ci sur le climat et s'il est un fait que les émissions de CO₂ proviennent principalement de la production énergétique, il est alors clair qu'il faut jouer sur les deux tableaux suivants : réduire notre consommation d'énergie et décarboner la production

⁽⁷⁾ https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_glass

⁽⁸⁾ MANGEMATIN E., PANDRAUD G. & ROUX D. (2012), "Quick measurements of energy efficiency of buildings", *C.R. Physique* 13, pp. 383-390.

⁽⁹⁾ BOISSON P. & BOUCHIÉ R. (2014), "ISABELE method: In-Situ Assessment of the Building Envelope performances", in 9th International Conference on System Simulation in Buildings – SSB2014, Liège, Belgium, pp. 302-320 (P17), <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/183783>

énergétique. De ce point de vue, on peut se réjouir que, depuis 1990, le rapport production énergétique/PIB a baissé de 30 % environ au niveau mondial, tout comme les émissions de CO₂ par habitant. Malheureusement, au niveau mondial, le PIB ainsi que la population augmentent plus vite que ces baisses relatives, ce qui fait que, loin de diminuer, la consommation énergétique mondiale et les émissions de CO₂ s'accroissent dans l'absolu. Pour la France, il faut observer que les objectifs de sa stratégie bas-carbone sont très ambitieux. Ils visent pour 2050 la neutralité carbone du pays en baissant d'un facteur 6 les émissions et en compensant le reste par des puits de carbone. Des objectifs bien

trop élevés si l'on se réfère au passé récent, lequel nous a montré que notre pays, comme bien d'autres d'ailleurs, s'était fixé des objectifs moins ambitieux qu'il n'a pas pu respecter⁽¹⁰⁾. On peut donc légitimement se poser la question du réalisme des ambitions de notre pays comme de celles du reste du monde face au défi climatique.

⁽¹⁰⁾ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone>