

se loger, se déplacer :

peut-on se libérer de l'addiction aux énergies fossiles ?

*Daniel Quénard travaille au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB, voir le **Chapitre de V. Pernelet-Joly, Encart : « Le CSTB et l'OQAI »**) où il est chef de la division « caractérisation physique des matériaux » dans le département Enveloppe et revêtements. Il co-anime également le programme « solaire et bâtiment » de Tenerrdis, pôle de compétitivité basé en Rhône-Alpes consacré aux nouvelles énergies.*

Face à la pénurie annoncée des ressources fossiles, il est urgent de trouver des solutions efficaces et durables pour réduire notre consommation en énergie et pour répondre à nos futurs besoins, tout en s'efforçant de limiter les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. Un des domaines les plus consommateurs en énergie est celui du bâtiment, mais à l'avenir, ce n'est pas tant le bâtiment en lui-même et les équipements installés (chaudières, climatiseurs...) pour pallier les défauts du bâti (étanchéité, isolation thermique, protection solaire...)

que les équipements utilisés par les occupants dans la vie courante comme la production d'eau chaude sanitaire, l'électroménager ou le multimédia. L'objectif est donc double : d'une part, concevoir, réaliser et faire fonctionner des bâtiments aux besoins énergétiques réduits, voire producteurs, et d'autre part, prendre en compte les consommations liées au mode de vie des occupants.

Loin d'être les seuls responsables d'importantes consommations énergétiques et d'émissions de CO₂, les bâtiments induisent aussi, de par leurs localisations par

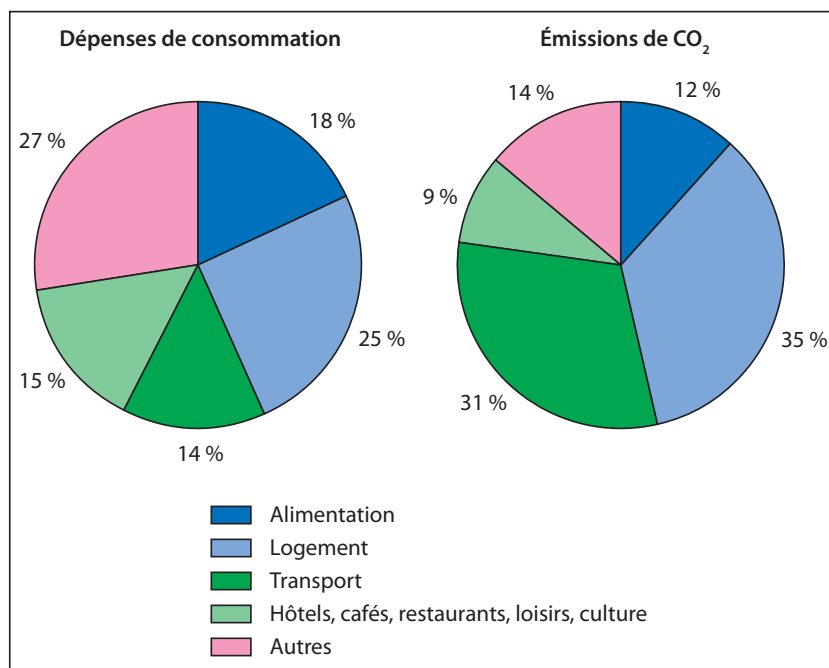


Figure 1

C'est dans le logement et le transport que les 65 millions de Français sont les plus dépensiers.

rapport aux lieux de travail et aux commerces notamment, de nombreux déplacements en voiture dont les impacts sont comparables à ceux du bâtiment. La question du logement et des déplacements induits doit donc être abordée dans sa globalité en parlant de bilan énergétique et CO₂ global, et en prenant en compte non seulement la performance du bâtiment mais aussi sa localisation¹.

Quels seront les bâtiments (résidentiels, tertiaires, industriels et agricoles) et les équipements de mobilité de demain, qui tiendront compte à la fois des besoins énergétiques et des contraintes environnementales ?

1 Bâtiments, déplacements et énergie : quelle réalité ?

1.1. La consommation globale des ménages

Pour avoir une vue d'ensemble dans un pays comme

la France, examinons comment se répartissent les dépenses de consommation des ménages. L'étude réalisée en 2010 par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)² a mis en évidence deux postes pesant particulièrement lourd dans la consommation de ces derniers : le transport et le logement. On observe qu'à eux seuls, ils sont responsables de près de 70 % des émissions de dioxyde de carbone d'un ménage (**Figure 1**). Il est par ailleurs intéressant de noter que la France compte d'un côté environ 33 millions de logements (dont 28 millions de résidences principales ; avec 16 millions de maisons individuelles, représentant plus de la moitié du parc), et de l'autre côté un nombre de véhicules quasiment équivalent, à savoir 31 millions de véhicules.

1.2. Comment consommons-nous à la maison ?

Il ne fait aucun doute que c'est le chauffage qui coûte le plus cher dans nos dépenses énergétiques ménagères. Depuis les années 1980, les dépenses globales des Français pour le chauffage ont régulièrement augmenté, du fait essentiellement du nombre croissant de logements et cela malgré les réglementations thermiques successives depuis 1973. Néanmoins, depuis 2000, la part du chauffage s'est mise à décroître, et l'on peut y voir l'impact de la réglementation thermique 2005 (**Encart : « La réglementation thermique**

1. www.ipsos.fr/ipsos-public-affairs/actualites/observatoire-bilan-carbone-menages

2. www.insee.fr/fr/ppp/comm_presse/comm/DP_ecofra_10.pdf

LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE (RT)

La réglementation thermique française a pour but de fixer une limite maximale à la consommation énergétique des bâtiments neufs. Succédant à celle de 2000 depuis le 1^{er} septembre 2006 et y ajoutant 15 % de performance énergétique supplémentaire, la réglementation thermique 2005 actuellement en vigueur s'applique aux bâtiments neufs (dont le permis de construire a été déposé après le 1^{er} septembre 2006) et aux parties nouvelles, mais pas aux travaux de rénovation. Elle définit des caractéristiques thermiques de référence ainsi que des caractéristiques thermiques minimales à respecter, qui sont : l'isolation thermique, les apports de chaleurs solaires, la perméabilité à l'air, la ventilation, le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage des locaux et la transformation de l'énergie primaire. Les règles de calcul énergétique sont établies par le CSTB.

Son successeur sera la réglementation thermique 2012, rédigée suite au Grenelle de l'environnement (voir le **Chapitre de J.-M. Michel**, et notamment l'**Encart : « Les lois du Grenelle de l'environnement »** de ce chapitre), visant notamment à diviser par trois la consommation énergétique des bâtiments neufs et de développer ainsi des « bâtiments basse consommation ».

Rendez-vous ensuite en 2020 pour une réglementation thermique 2020 pour les futurs bâtiments à énergie positive !

(RT) »). L'électricité spécifique a quant à elle continué à augmenter³ (Figure 2).

1.3. Quelle consommation induisent nos déplacements ?

Les bâtiments n'ont pas seulement un impact du fait de la consommation en chauffage et en électricité. Leur localisation même est un facteur important que l'on oublie souvent de prendre en compte car c'est ce qui va induire des déplacements plus ou moins importants par les habitants, qui doivent par exemple se rendre régulièrement à leur travail et dans les centres commerciaux, et par conséquent autant d'énergie supplémentaire qui sera consommée, tout comme davantage d'émissions de CO₂.

3. www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/donnees-essentielles/societe/menages/la-consommation-d-energie-et-les-emissions-de-co2-dans-lhabitat.html

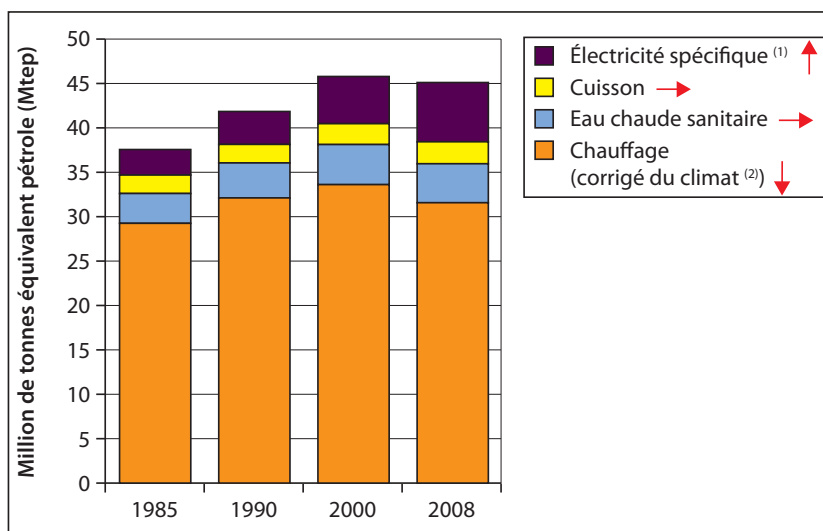


Figure 2

Consommation d'énergie finale par usage dans le résidentiel.

⁽¹⁾ L'électricité spécifique est l'électricité nécessaire pour les services qui ne peuvent être rendus que par l'usage de l'énergie électrique tels que l'éclairage et l'électroménager. Elle ne prend pas en compte l'eau chaude, le chauffage et la cuisson, qui peuvent utiliser différents types d'énergie.

⁽²⁾ Les chiffres corrigés des variations climatiques sont calculés en tenant compte d'un indice de rigueur climatique permettant d'obtenir la consommation correspondant à des conditions climatiques « normales ».

Une étude réalisée sur Lille Métropole⁴ compare, pour une famille de trois personnes vivant dans 100 m² et utilisant du gaz naturel, les impacts respectifs du logement et des déplacements dans différents cas de figure (Figure 3). Il est tout d'abord flagrant de mesurer à quel point l'émission de CO₂ pour une famille vivant dans un bâtiment ancien en zone périurbaine est nettement supérieure (soit quatre fois plus) par rapport au cas

4. www.lillemetropole.fr/index.php?p=1279&art_id=

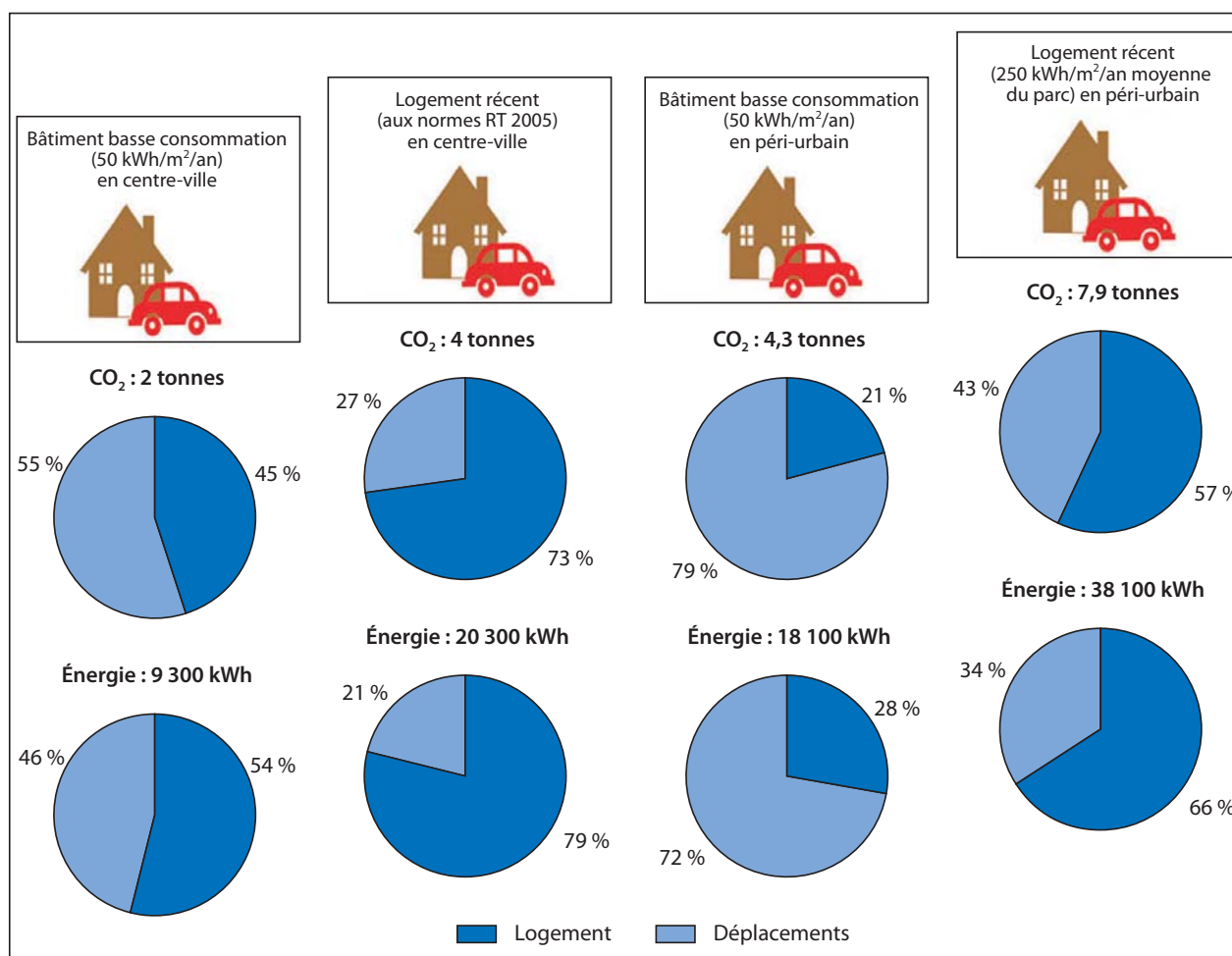


Figure 3

Impact annuel respectif des logements et des déplacements pour une famille de trois personnes vivant dans 100 m² au gaz naturel (Source : Lille Métropole).

Un bâtiment basse énergie, c'est mieux, encore faut-il dans le même temps limiter les déplacements par voiture !

de figure opposé d'une famille qui vit dans un bâtiment basse consommation récent et en centre-ville. Dans ce dernier cas, le logement et les déplacements pèsent de manière équivalente dans la consommation totale en énergie. Si l'on reste en centre-ville mais cette fois dans un logement aux normes de 2005, la part du poids du logement augmente sensiblement, passant aux deux tiers. Le rapport est inversé si l'on habite un bâtiment basse consommation mais en zone périurbaine... mais la consommation globale reste inchangée ! Ainsi la question de la localisation doit être prise en compte dans le calcul global de la consommation d'énergie, tout autant que sur l'évaluation de l'émission

totale de CO₂ par les familles. Aujourd'hui, avec le mode de déplacement dominant qu'est la voiture thermique, construire basse consommation « un peu plus loin » ne conduira pas forcément à une réduction des émissions de CO₂ d'un ménage.

1.4. Quelle idée nous faisons-nous de notre consommation ?

Comment les citoyens perçoivent-ils leur consommation ? Deux enquêtes ont été menées, l'une en France et l'autre en Allemagne, auprès de personnes à qui on a posé la question suivante : « D'après vous quels sont vos principaux postes de consommation ? » Les réponses ont

révélé un écart de perception considérable des consommateurs avec des réponses assez proches dans les deux pays (**Figure 4**). Dans les deux cas, on observe une sous-estimation nette des consommations pour le chauffage et la voiture, alors que dans le même temps les consommations électriques sont tout autant surestimées, révélatrice d'un certain « électrocentrisme » : les citoyens ont l'impression d'utiliser beaucoup d'électricité ; peut-être à cause d'une utilisation intense d'équipements électriques en tout genre à travers leurs diverses activités journalières. S'intéressent-ils réellement au détail de leur consommation ou manquent-ils d'informations ? Les chiffres en kilowatt-heure par mètre carré (kWh/m²) par an sont-ils finalement assez parlants ?

2 Le problème des énergies fossiles

2.1. La dépendance aux énergies fossiles

Depuis la révolution industrielle, la consommation en énergie dans les pays industrialisés n'a cessé d'augmenter pour répondre d'une part à la demande industrielle, et d'autre part à des besoins accrus en énergie dans les logements pour satisfaire les besoins de confort des occupants et assurer leurs déplacements (contraints ou volontaires). Cette consommation massive de ressources naturelles fossiles comme le charbon, puis le pétrole et le gaz naturel, résulte de l'utilisation de deux inventions de

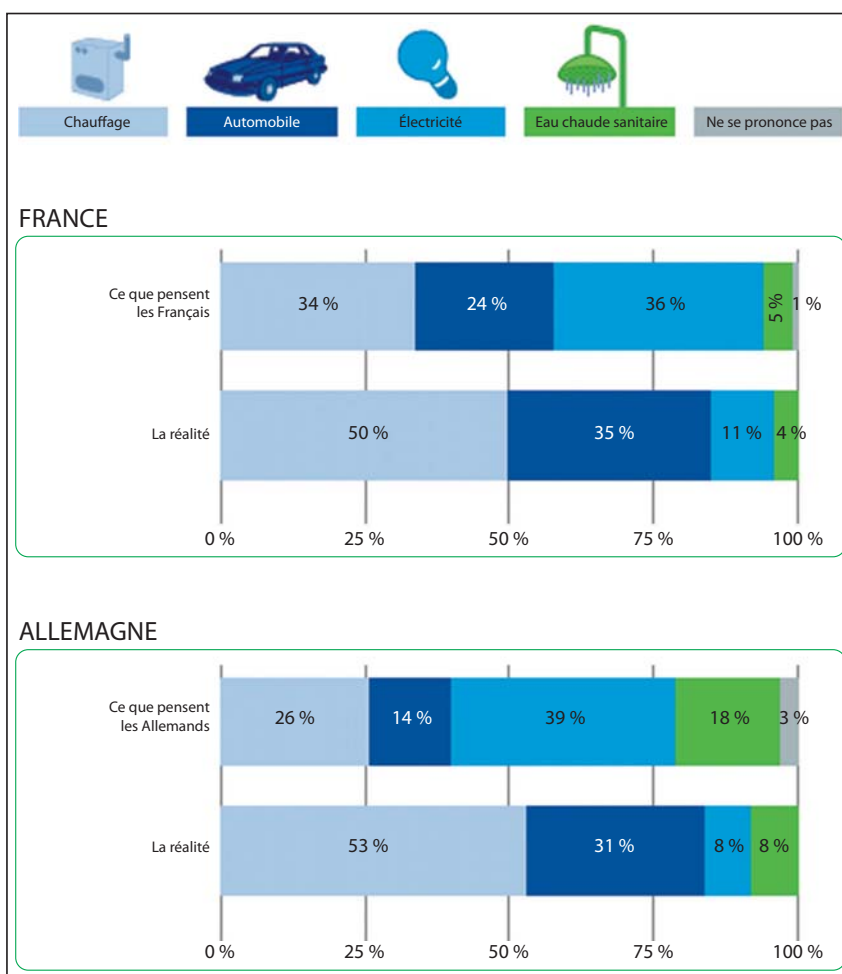


Figure 4

Usages et perception des consommateurs sur leur consommation d'énergie : on observe un écart de perception entre les Français et les Allemands et une méconnaissance générale des consommations réelles.

cette époque : la chaudière et le moteur à combustion interne qui, à l'entrée, brûlent des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et émettent à la sortie gaz à effet de serre et polluants. À cet égard, les chiffres du ministère de l'Industrie sont éloquentes : pour l'année 2006, les bâtiments (résidentiel et tertiaire) et le transport consomment à eux deux près de 70 % de l'énergie totale. Il faut tout de même noter que l'habitat présente un mix énergétique beaucoup plus varié que celui des transports. En effet, dans l'habitat, gaz, fioul et électricité (principalement nucléaire et hydraulique en France) sont dominants, environ à parts égales, alors que pour les transports, les moteurs des véhicules ne brûlent quasiment que du

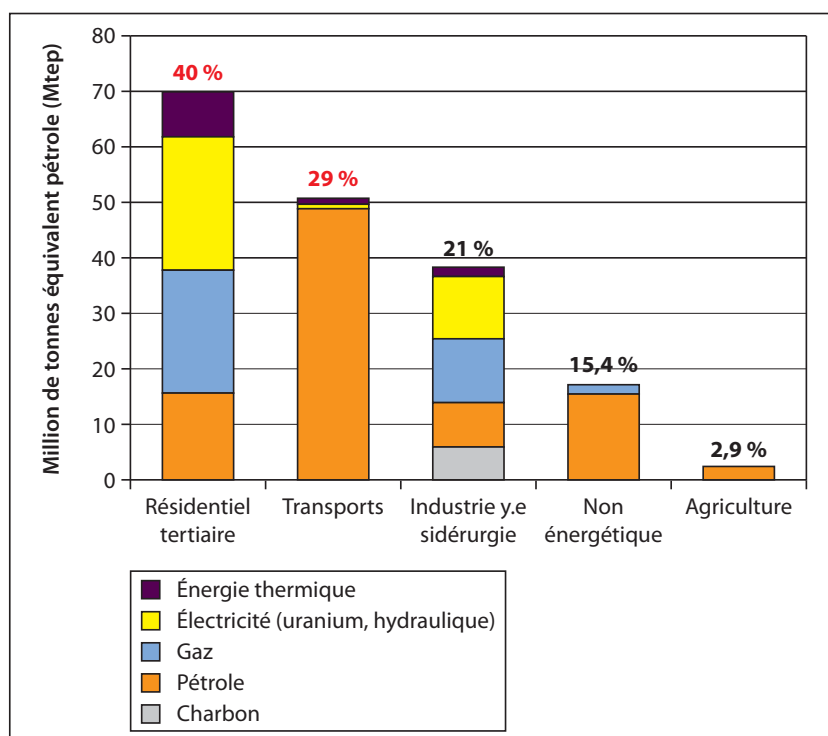


Figure 5

Répartition de la consommation de l'énergie finale (177,1 Mtep) corrigée du climat. Chiffres de 2006.

pétrole [98 %] (**Figure 5**). Dans l'habitat, on remarque une proportion non négligeable d'énergies renouvelables (principalement le bois de chauffage) et 70 % de l'énergie est aujourd'hui consacrée au chauffage et à l'eau chaude sanitaire.

Aujourd'hui, nous savons que ces ressources fossiles, consommées en masse depuis deux siècles, se font de plus en plus rares... Il faut donc imaginer de nouvelles solutions (technologiques,

comportementales et organisationnelles) pour limiter, voire supprimer le recours à la combustion d'énergie fossile.

2.2. Les énergies fossiles : quelles émissions dans l'environnement ?

2.2.1. Les émissions de gaz à effet de serre

Mais ce n'est pas le seul problème. La combustion des énergies fossiles non seulement consomme des ressources, mais produit aussi des gaz à effet de serre (GES) et ce, de manière croissante. Les principaux responsables de ces émissions sont le bâtiment et le transport, qui sont les deux seuls secteurs économiques en croissance importante et qui totalisent 45 % des émissions de gaz à effet de serre (**Figure 6**).

2.2.2. Les émissions de polluants

Un autre impact considérable de la combustion des énergies fossiles est l'émission de polluants à travers les pots d'échappement, les cheminées, etc. (il n'y a pas de feu sans fumée !) (**Figure 7**). Quels sont les secteurs les plus

Figure 6

Émission de gaz à effet de serre en France (y compris DOM-COM) en 2004, par secteur (entre parenthèses est indiquée l'évolution depuis 1990). PFC : perfluorocarbures, HFC : hydrofluorocarbures.

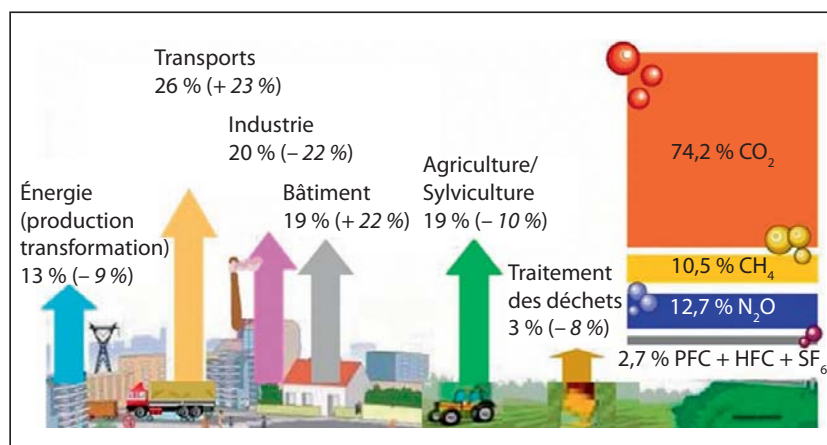




Figure 7

L'utilisation massive des énergies fossiles, notamment pour les transports et les bâtiments, conduit à d'importantes émissions de polluants atmosphériques, en plus du bruit engendré par les moteurs.

polluants ? Une estimation a été réalisée en Île-de-France en 2000 sur les contributions des différents secteurs d'activité aux émissions de polluants. Elle montre du doigt encore une fois le bâtiment et le transport, qui totalisent 60 % des émissions en particules (de diamètres inférieurs à 10 µm) et 60 % des émissions en oxydes d'azote (NOx). Face à ce constat, le ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement a décidé de développer des Zones d'action prioritaire pour l'air (ZAPA), la ministre Nathalie Kosciusko-Morizet déclarant en décembre 2010 : « La pollution de l'air diminue l'espérance de vie de neuf mois pour chaque Français et l'exposition aux particules fines causerait 40 000 décès chaque année. C'est un enjeu de santé public »... Ce chiffre dépasse de loin les décès par accident de la route !

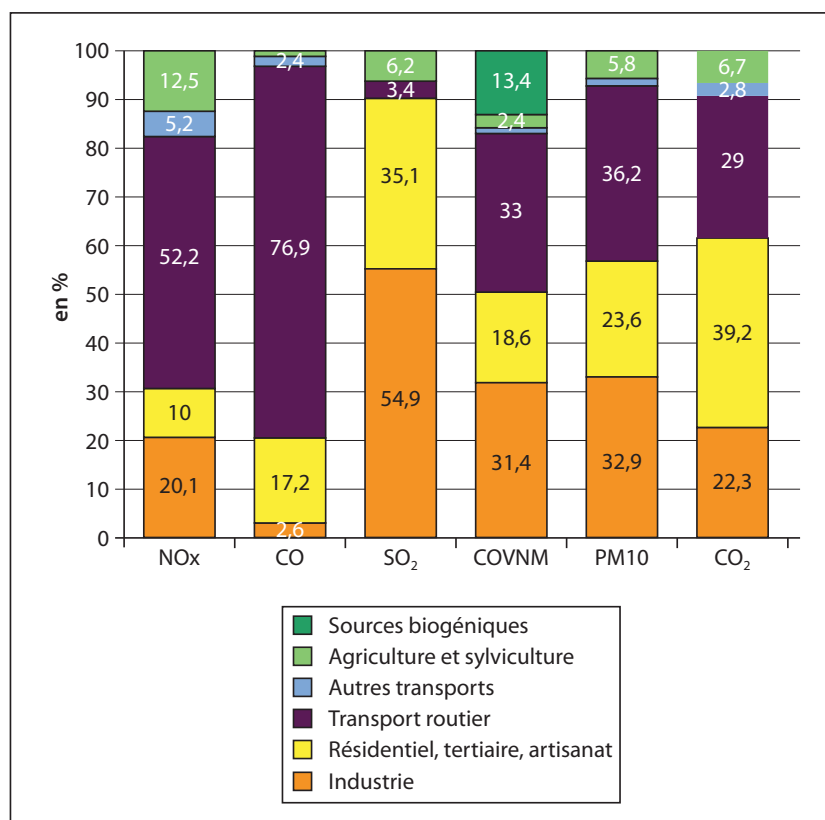
3 Quelles solutions pour l'habitat de demain ?

Face aux problèmes environnementaux et sanitaires causés par l'utilisation massive d'énergies fossiles, et à la

suite du Grenelle de l'environnement (voir le **Chapitre de J.-M. Michel**), les politiques publiques incitent de plus en plus à l'économie d'énergie et à la recherche de solutions alternatives. Un appel important est lancé aux scientifiques, notamment aux chimistes, pour trouver des solutions durables dans le domaine de l'habitat en particulier. Quelles sont les solutions préconisées ?

Figure 8

Contribution des différents secteurs d'activités aux émissions de polluants en Île-de-France.



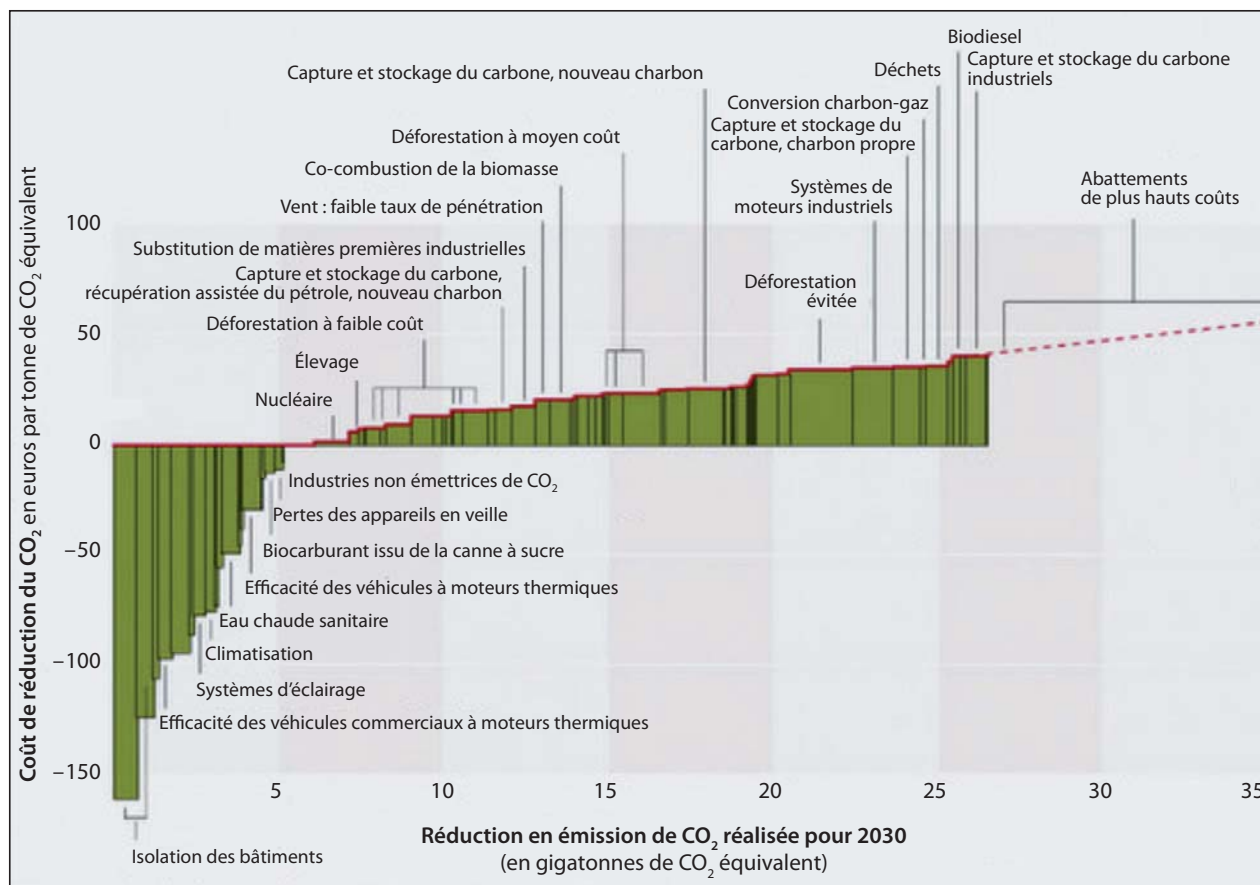


Figure 9

Les nouvelles technologies pour réduire les émissions de CO_2 : quel coût ?

$\text{Coût de réduction} = (\text{coût de la solution alternative} - \text{coût de la solution de référence}) / (t\text{CO}_2 \text{ pour la solution de référence} - t\text{CO}_2 \text{ pour la solution alternative})$

Le coût correspond à un coût total : construction + usage.

3.1. Développer de nouvelles technologies

La courbe dite des « coûts de réduction » (en € par tonne de CO_2 économisée), proposée par le cabinet McKinsey, classe les technologies en fonction de ces coûts. On constate que travailler sur l'efficacité énergétique pour réduire les émissions de CO_2 est économiquement le plus intéressant (Figure 9). Ainsi, isoler les bâtiments, utiliser des systèmes efficaces pour l'eau chaude sanitaire et l'air conditionné, installer un éclairage efficace, etc., toutes ces technologies nouvelles présentent un coût négatif et sont par conséquent les plus rentables.

3.2. Objectif principal en Europe : la rénovation aux nouvelles normes

Au vu du potentiel d'économie d'énergie dans le bâtiment, l'Europe doit miser sur la rénovation avec les réglementations thermiques à venir. Elle

compte aujourd'hui 210 millions de bâtiments, avec 60 % dans le résidentiel et 40 % dans le tertiaire. On constate aussi que le nombre de bâtiments construits avant 1973 est équivalent au nombre de constructions après cette date qui correspond au premier choc pétrolier, époque où sont apparues les premières réglementations thermiques (Tableau 1 et voir l'Encart « La réglementation thermique (RT) »). Ce sont ainsi cent millions de bâtiments en Europe qui n'ont jamais été soumis à aucune réglementation thermique ! Un chiffre important comparé à celui de la construction neuve qui ne représente que 1 % des bâtiments.

Il faut donc construire dès à présent du neuf très performant (pour réduire le nombre d'entrants énergivores dans le stock) et miser sur la rénovation, dont on peut mesurer le poids avec, en France, environ vingt millions de logements construits avant

Tableau 1

Nombre et catégories de bâtiments construits en Europe, avant et après 1973, sur un total de 210 millions de bâtiments, sur environ 53 milliards de m².

Type de bâtiment		Nombre de constructions avant 1973	Nombre de constructions après 1973	Pourcentage du stock total
Résidentiel	Résidences individuelles privées	42 840 000	28 560 000	34
	Immeubles d'appartements privés	17 640 000	11 760 000	14
	Logements sociaux	16 800 000	8 400 000	12
Tertiaire	Immeubles commerciaux	18 900 000	44 100 000	30
	Immeubles publics	5 040 000	11 760 000	8
	Autres (loisirs, industries)	1 890 000	2 310 000	2
Totaux		103 110 000	106 890 000	100

1975. Depuis cette date, les réglementations thermiques successives ont eu un impact notable sur la consommation d'énergie par logement, avec un effort massif sur le chauffage – poste numéro 1 avec l'eau chaude sanitaire, soit 70 % de la consommation énergétique totale (voir la *Figure 11*). Rappelons que la réglementation thermique porte sur cinq postes : le chauffage, la ventilation, la climatisation, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage, mais il en existe d'autres, en particulier la consommation électrique des ménages (électroménager et multimédia), l'énergie grise⁵ et la mobilité qui ne sont pas

pris en compte... (voir le paragraphe 3.4). Le label BBC (bâtiment basse consommation) qui préfigure la prochaine RT 2012 montre une consommation équivalente pour les trois principaux postes que sont le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité spécifique (éclairage/systèmes électriques du type pompes et ventilateurs...).

3.3. Objectif bâtiments basse consommation et à énergie positive

Le cap est aujourd'hui la RT 2012 (BBC) qui sera suivie de la RT 2020 avec l'apparition des bâtiments dits à énergie positive (BEPOS). Afin d'encourager les efforts de réduction de consommation énergétique, des labels ont été créés depuis le milieu des années 1990, les labels Minergie (Suisse), Passivhaus (Allemagne) et plus récemment BBC-Effinergie en France (*Figure 10* et voir le *Chapitre de J. Souvestre, Encart « Les labels énergie »*).

5. Pour un composant d'ouvrage, l'énergie grise est l'énergie primaire procédée consommée tout au long de son cycle de vie. Pour un ouvrage complet tel qu'un bâtiment, elle correspond à l'énergie primaire procédée nécessaire à la mise à disposition de ce bâtiment : construction (dont préparation du terrain et mise à disposition des produits/matériaux/équipements), entretien/maintenance et démolition/déconstruction (dont gestion des déchets et remise en état du terrain).

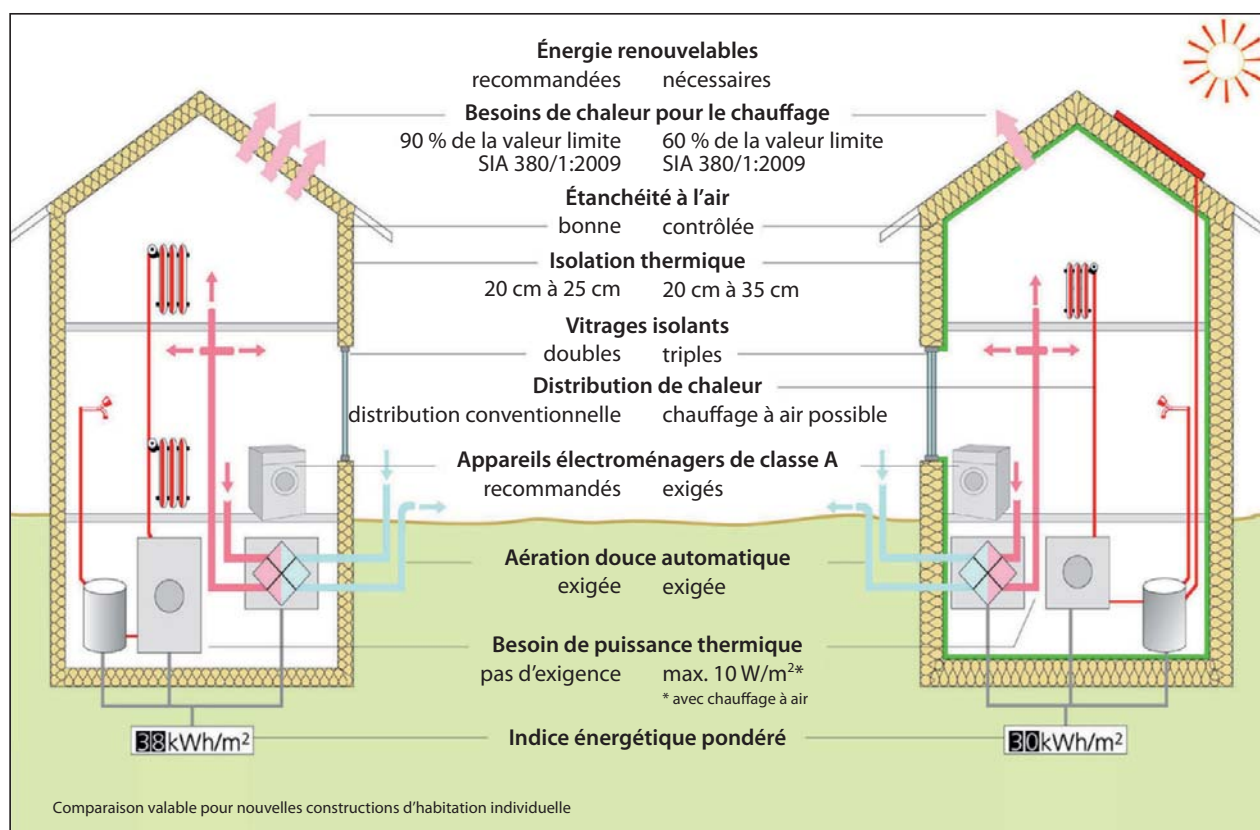


Figure 10

L'objectif 2012 est au bâtiment basse consommation : un effort sera porté sur l'enveloppe des bâtiments (étanchéité à l'air, isolation thermique et triples vitrages).

Le label Passivhaus présente la particularité de s'intéresser à toutes les consommations énergétiques du bâtiment, électroménager et multimédia compris, et inclut donc les apports internes pour ces derniers. On constate d'ailleurs que pour un ménage occupant une maison labellisée Passivhaus, la moitié des consommations est due à l'électroménager et au multimédia. Par ailleurs, il impose un critère très exigeant sur les besoins de chauffage qui doivent être inférieurs à 15 kWh/m²/an.

Comment atteindre les objectifs d'un bâtiment basse consommation ? La première chose à faire est de travailler sur l'enveloppe : isolation performante, étanchéité à l'air, vitrages performants, autant de moyens pour réduire très fortement les besoins énergétiques (voir aussi les **Chapitres**

de J.-C. Bernier, J. Souvestre et J. Ruchmann). On obtient des bâtiments étanches qui induisent alors des exigences de ventilation pour assurer un air de bonne qualité aux occupants, ventilation avec récupération d'énergie bien sûr. Les efforts doivent ensuite être portés sur des équipements à haute efficacité énergétique tels que la chaudière à condensation (voire demain à absorption) ou la pompe à chaleur, ce qui permet encore d'abaisser la consommation énergétique.

3.4. Vers les bâtiments à énergie positive

Si l'on pousse encore les efforts, on peut descendre autour des 30 kWh/m² par an pour les besoins et atteindre alors le niveau des maisons passives (label Passivhaus).

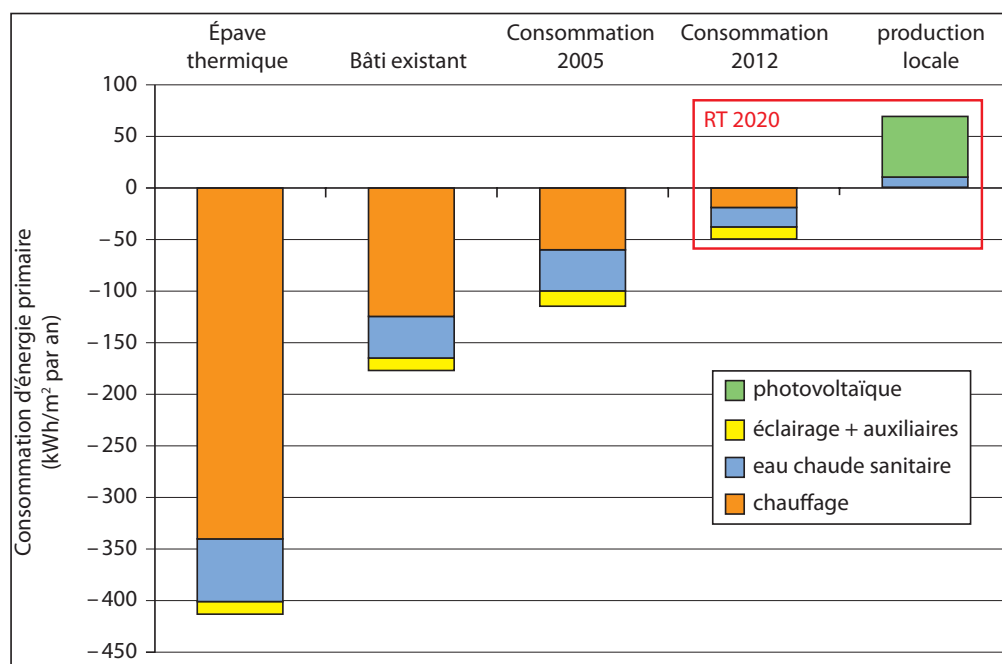


Figure 11

Ordres de grandeur des consommations et productions locales d'énergie pour un logement en France.

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, des progrès massifs ont été réalisés sur le chauffage.

En ajoutant la production locale d'énergie, nous entrons dans la vision 2020 des bâtiments à énergie positive (**Figure 11**). La tendance qui émerge aujourd'hui est la production locale d'électricité, notamment grâce aux panneaux photovoltaïques installés sur les toits ou en façades (voir les **Chapitres de D. Lincot** et de **D. Plée**), électricité que l'on revend aujourd'hui à EDF avec un tarif de rachat très avantageux. EDF a d'ailleurs réalisé une étude parue en 2008 dans la revue *Futuribles*, envisageant des efforts combinés sur les économies et la production d'énergie ; le « triptyque traditionnel », qui consiste à réduire les besoins, utiliser des équipements à haute efficacité énergétique et favoriser les énergies renouvelables. Cette étude montre que l'on pourrait répondre aux besoins des bâtiments sans énergies fossiles vers 2050 en utilisant des systèmes performants du type pompe à chaleur, de la bio-

masse et de l'énergie solaire pour l'eau chaude sanitaire... avec un investissement certes élevé, mais envisageable (**Figure 12**) !

« Dans un pays tempéré tel que la France, disposant de biomasse, une diffusion réaliste de technologies existantes d'isolation thermique, de pompes à chaleur, de biomasse et de solaire permet de supprimer les usages directs des fossiles dans le secteur bâtiment. »⁶

Quelle estimation pouvons-nous faire de la production locale photovoltaïque en France ? Nous disposons d'environ 51 447 km² de zones artificialisées sur lesquelles nous comptons 8 142 km² de sols bâtis, ce qui représente 1,5 % du territoire. Or, nous consommons environ 550 TWh/an d'électricité (chiffre de 2008). Si l'on envisage d'installer des panneaux photovoltaïques ayant

6. Extrait de : Les bâtiments sans énergie fossile. Étude EDF, *Futuribles*, juillet-août 2008, n° 343.

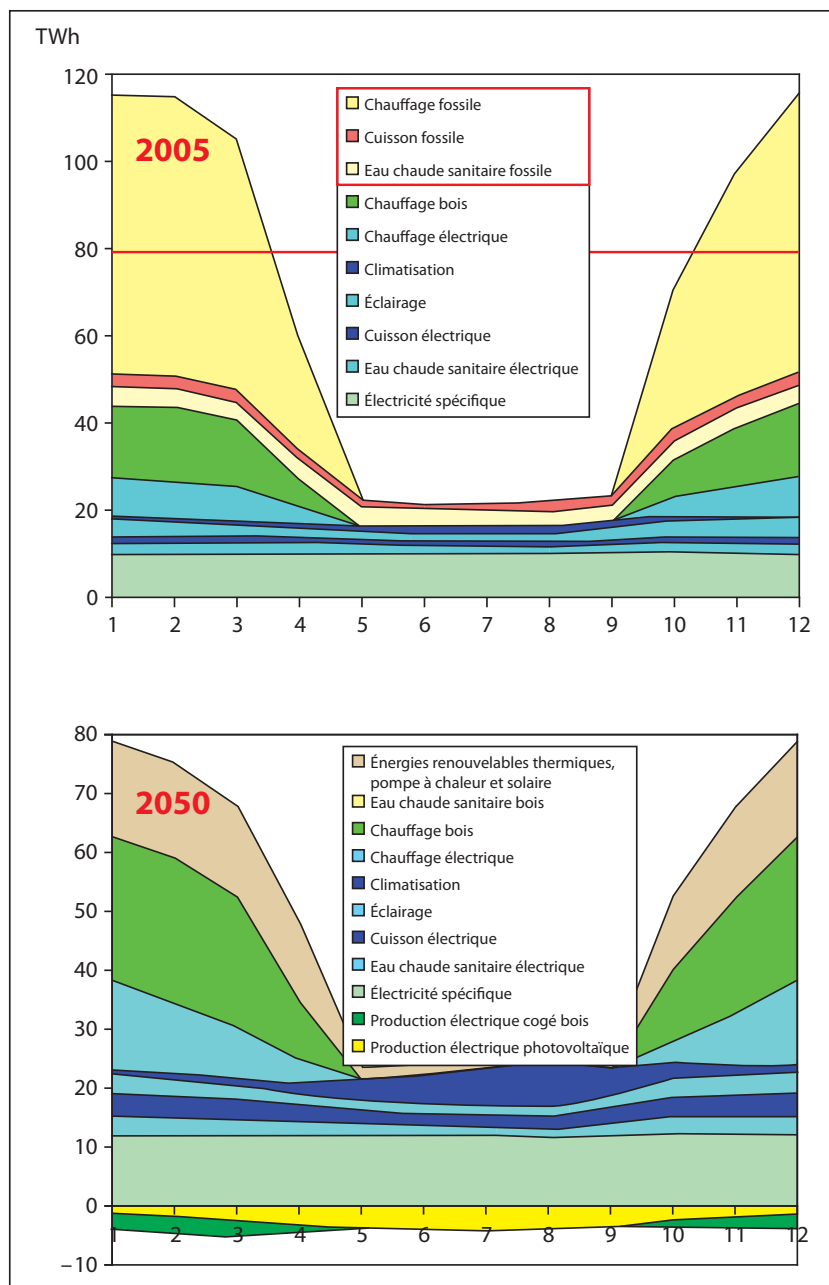


Figure 12

Le triptyque pour l'objectif 2050 en termes de consommation annuelle d'énergie :

1. réduire les besoins de chauffage : rénovation thermique + bâtiment basse consommation neuf ;
2. développer les énergies renouvelables solaires (chauffe-eau solaire, photovoltaïque) ;
3. fournir les besoins de chauffage et appoints d'eau chaude sanitaire : systèmes performants (pompes à chaleur/biomasse).

des rendements de 10 %, les calculs montrent qu'il faudrait équiper environ 60 à 70 % des surfaces bâties ou 10 % des sols artificialisés pour couvrir ces besoins de consommation électrique. Est-ce envisageable ? La réponse nous sera donnée avec les futurs panneaux photovoltaïques qui seront plus rentables, comme l'annoncent les *Chapitres de D. Lincot* et de *D. Plée*.

Au niveau européen, l'estimation est équivalente : sur

une surface au sol d'environ 22 000 km² couverts de bâtiments, on estime possible de couvrir 40 % des toitures et 15 % des façades en panneaux photovoltaïques, ce qui permettrait de couvrir 40 % de la consommation électrique en Europe (*Encart : « Objectif production locale d'énergie »*).

N'oublions pas que d'autres énergies renouvelables peuvent être ajoutées comme l'éolien, la géothermie et la biomasse, qui peuvent aussi être installés localement.

Récemment, une étude comparative a été réalisée en Suisse entre la capitale Zurich et le canton de Fribourg pour évaluer les surfaces potentielles sur lesquelles pourraient être installés des capteurs solaires thermiques (*Encart : « Quelle production locale possible en Suisse ? »*). La conclusion en est que 70 % des besoins thermiques pourraient être couverts pour 50 % des bâtiments d'habitation de Fribourg, contre seulement 12 % de ceux de Zurich. Ce résultat peut s'expliquer d'une part par le nombre important d'étages en ville, et d'autre part par le nombre plus important de toits orientés de manière optimale pour recevoir l'énergie solaire, en province.

À travers cet exemple, on réalise que même si la densification des villes peut être intéressante pour réduire la consommation d'énergie liée aux déplacements, la potentialité de production d'une ville dense peut cependant être plus faible que celle d'une ville plus étalée. Ainsi dans l'optique, peut-être lointaine, d'une

OBJECTIF PRODUCTION LOCALE D'ÉNERGIE

En France

Sur 543 965 km² :

- 8 142 km² de sols bâtis (1,5 %),
- 51 447 km² de zones artificialisées (9,4 %).

Consommation électrique française : 550 TWh/an, soit l'énergie solaire reçue par un carré de sol d'environ 25 km sur 25 km.

Avec des cellules photovoltaïques ayant un rendement de 10 %, cela correspond à environ 5 000 km², soit 61 % des sols bâtis ou 10 % des zones artificialisées.

Source : www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr.

En Europe

Il y a environ 22 000 km² de sols bâtis.

40 % des toitures et 15 % des façades sont adaptées pour l'installation de panneaux photovoltaïques.

Avec un rendement de 15%, la production potentielle est de 1 400 GWh, soit 40 % de la consommation d'électricité en Europe.

Source : European Photovoltaic Industry Association (EPIA).

Remarque : Les calculs sont en énergie cumulée sur un an et non pas en puissance disponible.

« société post-carbone », il sera nécessaire de penser en termes de surfaces nécessaires pour produire de l'énergie avec des ressources renouvelables (solaire, éolien, biomasse...) et non pas penser uniquement à la réduction des consommations d'énergies fossiles. De plus, la densification peut faire apparaître d'autres problèmes comme les « îlots de chaleur », des zones de fortes pollutions...

3.5. Vers le stockage de l'énergie

Il existe d'autres moyens auxquels on ne pense pas toujours et qui permettraient pourtant des gains importants en énergie. Nous évoquons en effet les consommations à l'inté-

rieur des bâtiments – appareils électriques, électroménagers et multimédia –, mais il y a également la mobilité, un poste qui pèse relativement lourd dans le budget des ménages. Aujourd'hui la consommation d'énergie pour une voiture est supérieure à celle du chauffage pour un ménage français moyen (**Figure 13**). S'agissant de la consommation électrique des ménages en France, environ 3 000 kWh sont consommés chaque année par les occupants d'un logement. Avec l'évolution des usages entre 1990 et 2000, on voit augmenter très fortement l'impact de l'audiovisuel et des postes informatiques qui étaient quasiment inexistantes auparavant, et qui au final ont contrebalancé les économies

QUELLE PRODUCTION LOCALE POSSIBLE EN SUISSE ?

Surface de toit potentiellement utilisable pour le solaire thermique :

- 32,1 m²/100 m² pour le canton de Fribourg,
- 31,6 m²/100 m² pour la ville de Zurich.

Surfaces de captage d'orientation optimale (orientée au sud et inclinaison moyenne) :

- 11,7 m² pour 100 m² de surface habitable chauffée – Fribourg,
- 4,8 m² pour 100 m² de surface habitable chauffée – Zurich.

Avec des bâtiments basse consommation (Minergie) + 100 litres de stockage par m² de capteur solaire, 70 % des besoins (chauffage, eau chaude sanitaire) sont alors couverts pour :

- 50 % des bâtiments d'habitation de Fribourg,
- 12,5 % des bâtiments d'habitation de Zurich.

Un « potentiel solaire thermique » nettement plus élevé à la campagne qu'en ville !

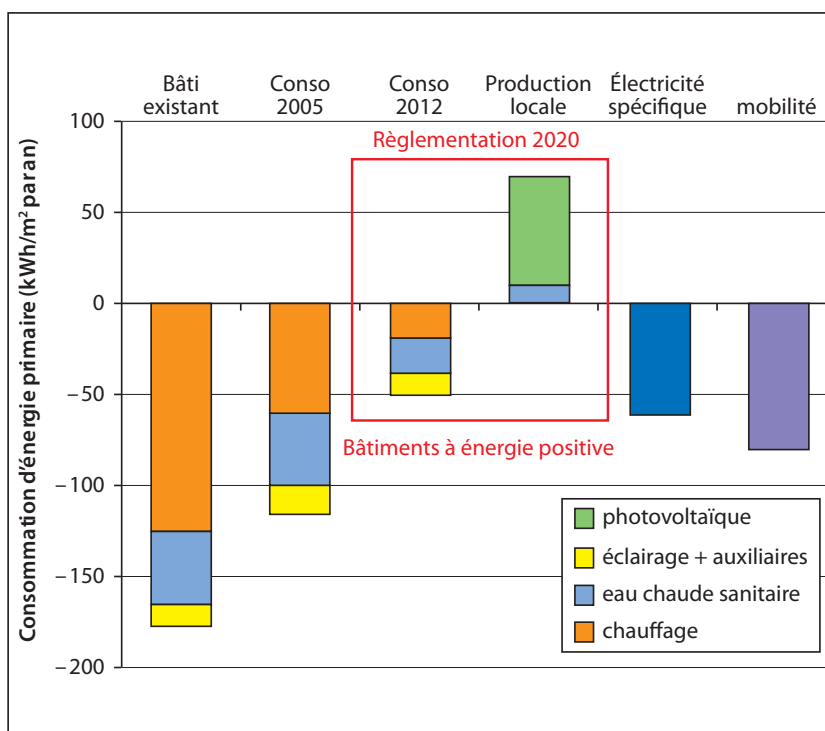
« Cette étude montre que dans les zones d'habitation qui sont situées dans des zones rurales, plus de la moitié des bâtiments d'habitation économes en énergie seraient en mesure de couvrir leurs besoins thermiques exclusivement au moyen d'une installation de captage solaire, éventuellement complétée par un petit chauffage à bois. Le chauffage de bâtiments d'habitation reposant exclusivement sur des énergies renouvelables, préservant le potentiel de la biomasse qui est limité, est donc à notre portée. »

Sources : Le Moniteur, 2011 et : www.admin.ch/aktuell/00089/index.html?lang=fr&msg-id=36622.

* Les capteurs solaires thermiques transforment l'énergie solaire en chaleur grâce à un fluide caloporteur.

Figure 13

Des bâtiments économes et producteurs d'énergie... des usagers « énergivores ».



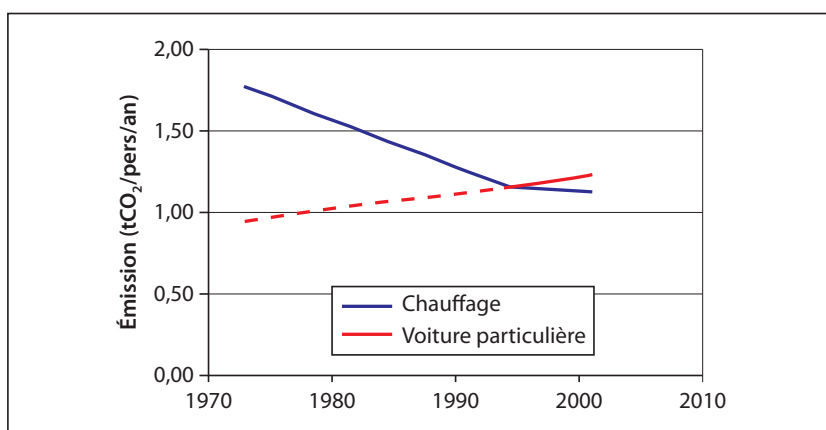


Figure 14

Un effort de 80 kWh/m² par an est annulé par 20 km parcourus en véhicule particulier par jour..., ce qui pose le problème de l'urbanisme et du lien bâtiment/transport !

que nous avons fait sur le réfrigérateur, ce qui nous fait rester au même niveau de consommation électrique !

Nous l'avons vu, les déplacements en véhicules particuliers sont également très consommateurs en énergie et conduisent à d'importantes émissions de CO₂. Pour un ménage, on réalise que les efforts réalisés sur le chauffage, après quarante ans de réglementations successives,

peuvent être annulés par la consommation d'énergie de la voiture particulière avec l'accroissement des distances parcourues pour les déplacements domicile/travail et domicile/commerces. En effet, une économie de 80 kWh/m² par an est annulée par 40 km parcourus par jour (**Figure 14**) ! Cette estimation montre bien l'importance de prendre en compte la localisation des habitats et

Figure 15

Des bâtiments à énergie positive... mal localisés ?



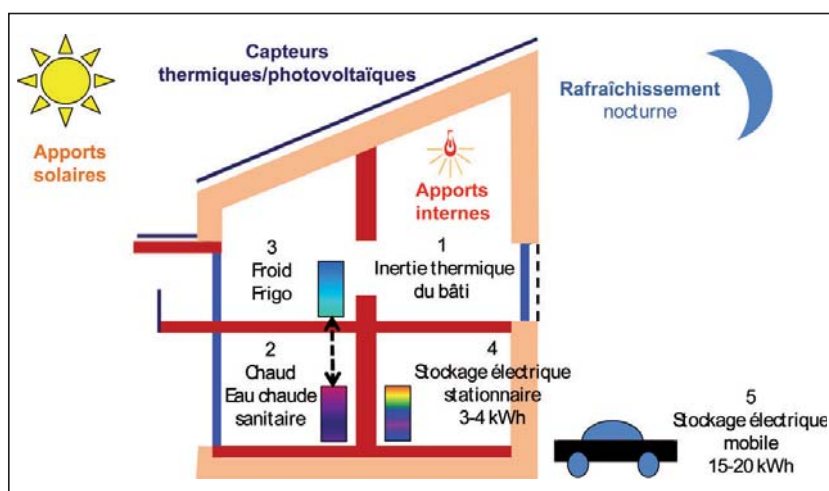


Figure 16

Comment mutualiser les équipements et tirer profit de leur multifonctionnalité pour assurer production/consommation/stockage et partage ? Pour le stockage thermique, on peut utiliser l'inertie du bâtiment, le froid domestique, les ballons d'eau chaude sanitaire... ; pour le stockage électrique, on peut réaliser un stockage stationnaire ou un stockage mobile, par exemple via la voiture électrique. Une mutualisation de certains équipements est aussi envisageable : climatiseur et eau chaude sanitaire, serveurs informatiques et eau chaude sanitaire...

les transports induits dans le calcul global (**Figure 15**).

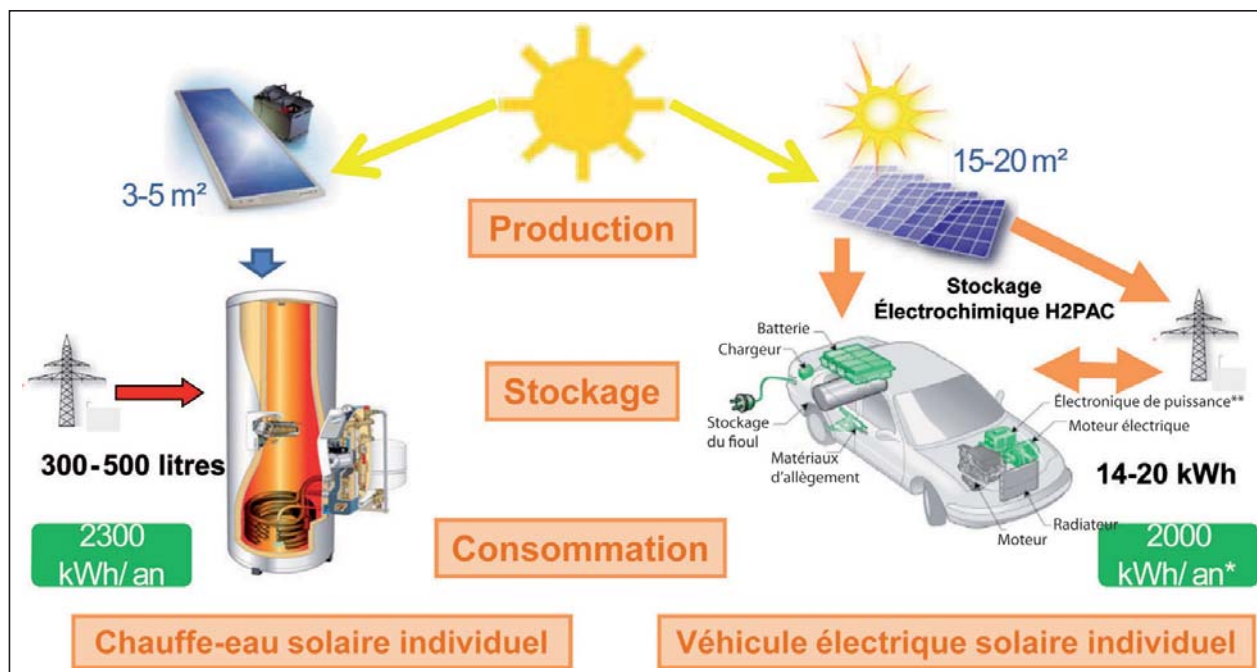
Cependant, il est possible de construire des bâtiments et de se déplacer en utilisant judicieusement l'énergie : il s'agit de trouver un équilibre entre économie d'énergie, production locale, stockage et partage. Sans vraiment y faire attention, nous stockons déjà du « froid » dans nos réfrigérateurs et du « chaud » dans nos ballons d'eau chaude. N'oublions pas non plus que le bâtiment lui-même qui, par son inertie thermique, peut l'hiver et en mi-saison stocker de la chaleur pendant les journées ensoleillées et la restituer en fin de journée, et l'été stocker de la fraîcheur grâce à la ventilation nocturne et contribuer ainsi à maintenir une température intérieure de confort satisfaisante... si la protection solaire n'est pas oubliée. Ces atouts – apports solaires, protections solaires, fraîcheur nocturne, ventilation nocturne – doivent aujourd'hui être mieux pris en compte au moment de la conception des bâtiments.

Mais demain, on pourra encore faire mieux pour répondre à notre utilisation

croissante d'électricité en intégrant dans l'habitat le stockage d'électricité. Certains équipementiers comme General Electric proposent des systèmes de stockage électrique de quelques kWh (3 à 5 kWh) pour stocker une partie du surplus de production locale et écrêter la consommation. Des expérimentations de stockage local (3 à 5 kWh) sont en cours dans le cadre du projet Premio⁷, dans le sud de la France. Poussons maintenant les projets pour l'avenir : pour être encore plus efficace, certains envisagent d'utiliser les batteries d'un véhicule électrique comme système de stockage, le véhicule électrique devenant ainsi une sorte de « banque mobile d'énergie » ! Ce sont donc autant de possibilités intéressantes pour stocker de l'énergie afin de répondre aux intermittences de production et de consommation, et de satisfaire l'augmentation des consommations électriques des ménages (**Figure 16**).

Les bâtiments de demain seront aussi ceux où les équipements seront mutualisés. Par exemple, l'énergie dégagée par un climatiseur ou des eaux usées pourra être récupérée pour préchauffer l'eau. On a même pensé à tirer profit des systèmes de refroidissement des ordinateurs en récupérant la chaleur libérée pour chauffer l'eau, et pourquoi pas le plancher. Ainsi des entreprises comme IBM travaillent sur l'idée de faire des Datacenters les « nouvelles chaufferies » de demain, quand on sait que l'usage

7. www.projetpremio.fr



des ordinateurs et serveurs ne fait que croître et que ces appareils sont en fonctionnement tout le long de l'année, assurant sans discontinuer des échanges de données tout autour de la planète. À Zurich, par exemple, IBM récupère la chaleur d'un Datacenter pour chauffer une piscine⁸.

3.6. Vers une convergence bâtiment/transport

À l'avenir, on pourrait imaginer le scénario « solaire » suivant : un capteur solaire chauffe l'eau sanitaire (c'est le CESI : chauffe-eau solaire individuel), qui est alors stockée pour servir à la douche du matin, puis on se rend sur le lieu de travail ou à la gare la plus proche pour prendre le train électrique... en utilisant son équipement de mobilité électrique (vélo, scooter, quadricycle, voiture... ou véhicule électrique solaire individuel (VESI)), lequel a pu être rechargé par les capteurs photovoltaïques installés à la maison, au travail ou sur le parking relais (**Figure 17**).

C'est un scénario envisageable quand on sait que la moitié des salariés en France travaillent à moins de 10 km de leur domicile, distance qui reste très inférieure aux autonomies annoncées pour les véhicules électriques, de l'ordre de la centaine de kilomètres. En France, d'après l'INSEE, le trajet domicile-travail est en moyenne de 25,9 km (la distance médiane est de 7,9 km). En Europe, 87 % des personnes parcourent moins de 60 km par jour en voiture. Il faut aussi prendre en compte les temps d'arrêt des véhicules, en moyenne de plusieurs heures, temps pendant lequel ils peuvent être rechargés. On constate alors que les voitures ne sont utilisées que 5 % du temps ; il reste ainsi près de 95 % du temps pour les recharger. D'après une étude réalisée aux États-Unis par l'Electric Power Research Institute (EPRI) sur le stationnement pendant une semaine, il a été montré que plus de 80 % du temps, les véhicules sont garés à proximité d'un bâtiment, d'où l'idée émergente de la convergence bâtiment/transport.

Figure 17

Une convergence bâtiment/transport pour un maximum d'économie d'énergie !

*Pour un véhicule électrique avec une consommation de 150 Wh/km parcourant 13 000 km/an.

**L'électronique de puissance convertit l'énergie électrique en une autre forme d'énergie.

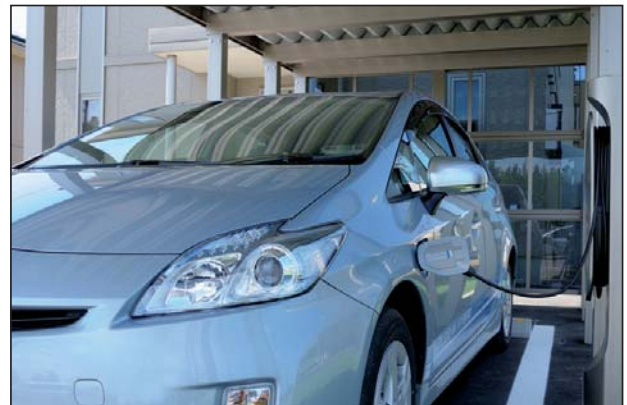
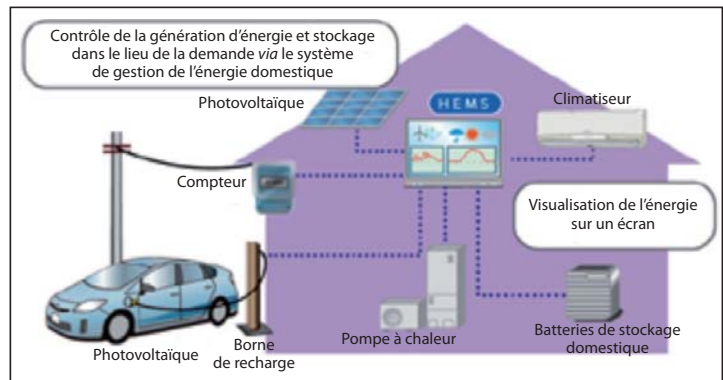
8. www.zurich.ibm.com/news/08/zed.html

Figure 18

Projet de démonstration dans le village de Rokkasho par Toyota-Panasonic-Hitachi.

La voiture électrique, bientôt un équipement de la maison pour stocker l'énergie ?

HEMS = système de gestion de l'énergie domestique (« home energy management system »).



Quelques premiers retours d'expérience (Berlin, Londres, New York) montrent très clairement qu'il est plus intéressant pour les utilisateurs – y compris financièrement – d'utiliser des bornes de recharge proches des bâtiments ou des maisons individuelles que dans les lieux publics. Aussi 95 % des utilisateurs américains préfèrent la recharge « à la

maison » indique le rapport de l'EPRI, ce qui conduit à favoriser l'installation de prises chez l'habitant, un investissement qui semble plus efficace. À Londres et à Berlin, des expérimentations en cours montrent que les utilisateurs utilisent très peu les bornes de voiries et les places réservées à cet effet servent plutôt de stationnements gratuits ! Paradoxe-

ment, cette analyse est à tempérer par le fait qu'un réseau dense de bornes publiques serait considéré par les Londoniens comme un signe de confiance de la part des Pouvoirs publics et un moyen d'éliminer l'anxiété des utilisateurs pour la « panne sèche » ... ou plutôt la « batterie vide ». Mais on pourrait se demander si, pour éviter des équipements publics onéreux et peu utilisés, ne faudrait-il pas mieux impliquer les assureurs, comme ils le font déjà avec les véhicules thermiques, pour rassurer les utilisateurs des véhicules électriques en offrant de nouveaux services (dépannages, prêts de véhicules...) ?

Au Japon, le président de Toyota Home, filiale de Toyota, Senta Morioka, a déclaré en décembre 2010 : « *l'intégration totale entre résidence et voiture est enfin arrivée* ». C'était le jour de l'inauguration d'un site d'expérimentation basée sur l'idée de la voiture électrique considérée comme un nouvel équipement de la maison pour stocker l'énergie et effacer les pics de demande, ce qui pourrait réduire considérablement le besoin en centrale de production d'énergie comme le montre un rapport de la Federal Energy Regulation Commission aux États-Unis (*Figure 18*).

Un nouveau paradigme pour l'énergie de demain

Les bâtiments de demain seront plus économes voire producteurs d'énergie grâce à l'intégration des énergies renouvelables avec par exemple le développement de nouvelles technologies comme le photovoltaïque (voir les *Chapitres de D. Lincot* et de *D. Plée*).

Aussi, que ce soit dans le domaine des matériaux d'isolation (voir les *Chapitres de J.-C. Bernier*, de *J. Souvestre* et la partie « *Matériaux et habitat* » de cet ouvrage), dans celui des carburants ou celui de la conversion et du stockage de l'énergie, la chimie est présente à chaque étape où il est crucial d'innover pour améliorer la qualité de nos bâtiments, de nos équipements et de nos véhicules en termes d'économie d'énergie et d'impact environnemental. À titre d'exemple, il serait préférable

d'utiliser le pétrole pour fabriquer des isolants thermiques pour notre maison au lieu de brûler ce pétrole dans une chaudière qui fume. Ce raisonnement est valable pour l'ensemble des ressources, y compris le bois. Transformer est souvent préférable à brûler.

Demain, nous allons progressivement migrer d'une énergie de stock, qui demande des millions d'années pour être reconstituée et que nous utilisons avec une efficacité réduite par sa combustion, vers une énergie de flux qui demande le développement de systèmes performants de conversion (photovoltaïque, pompe à chaleur...), mais avec des ressources inépuisables (soleil, vent...) à l'échelle humaine (**Figure 19**).

Au-delà des progrès technologiques, la gestion de l'énergie constitue aussi un enjeu stratégique essentiel, notamment pour éviter d'importants gaspillages. À l'heure actuelle, le photovoltaïque se développe selon un modèle économique de rachat dont la pérennité n'est pas assurée. Que ce soit pour le photovoltaïque ou pour l'éolien, des efforts doivent avant tout se porter sur le développement d'une gestion intelligente de la production et de la consommation d'énergie, à l'image du réseau de transport électrique (**Figure 20**). L'intégration des systèmes de stockage stationnaire ou mobile (via le véhicule électrique) comme nouvel équipement du bâtiment permet d'envisager de

Figure 19

L'avenir est tourné vers le développement d'une énergie de flux avec des ressources inépuisables comme le soleil ou le vent. Que ce soit pour le photovoltaïque ou pour l'éolien, des efforts doivent se porter sur le développement d'une gestion intelligente de la production et de la consommation d'énergie.



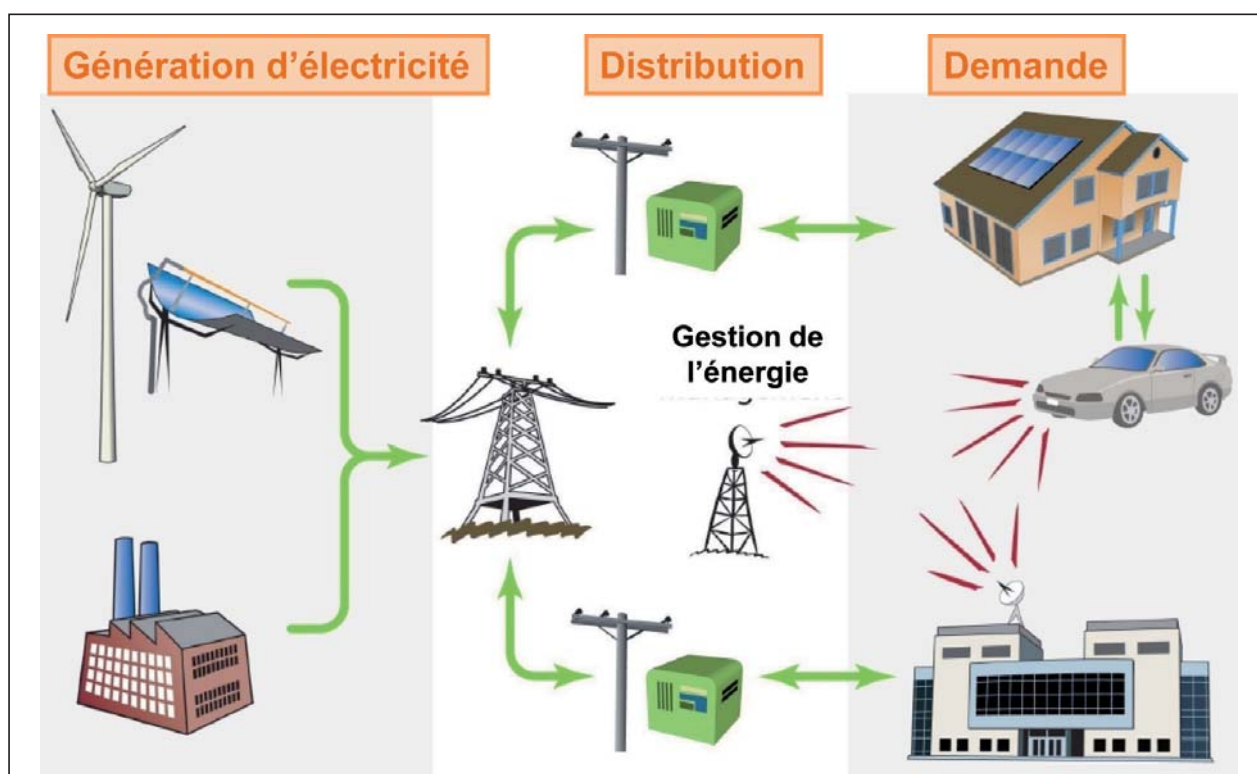


Figure 20

Un nouveau paradigme pour une gestion efficace de l'énergie ?

nouveaux scénarios de production et consommation locales de l'électricité, avec le soutien du réseau. En redécouvrant, même partiellement, les exigences de la production, le consommateur devenu alors « prosumer » devrait radicalement changer ses rapports avec l'énergie : quand on en produit soi-même, on s'en préoccupe forcément plus et mieux !

Nous avons là un nouveau paradigme qui pourrait permettre d'aller vers des territoires durables, moins énergivores et plus respectueux de l'environnement et des personnes. Ces territoires durables pourraient être caractérisés par des indicateurs, dans un premier temps énergétiques, qui associeraient à chaque bâtiment identifié sur le cadastre sa performance et sa localisation. La performance pourrait être décrite par le classement en consommation énergétique, en émission de CO₂ et en potentialité de production photovoltaïque... ; quant à la localisation, elle indiquerait les distances par rapport aux lieux de travail, aux transports en commun, aux écoles, aux centres commerciaux et de loisirs...

Crédits photographiques

Fig. 2 : source : Ceren.

Fig. 4 : sources : France : enquête BVA pour « Isolons la Terre contre le CO₂ » et statistiques DGEMP ; Allemagne : enquête EMND pour l'Agence allemande de l'énergie (DEA).

Fig. 6 : source : CITEPA/Inventaire SECTEN/Format, février 2006.

Fig. 8 : source : ZAPA – Ministère – airparif. Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Estimation de l'impact

lié à l'exposition chronique aux particules fines sur l'espérance de vie. Afsset, 2005. Estimations 2000.

Fig. 14 : d'après J.-P. Traisnel, CNRS.

Fig. 15 : Rolf Disch SolarArchitecture.

Fig. 18 : source : <http://corporatemedia.toyota.eu>

Fig. 20 : source : NREL – D. Armstrong & T. Penney.