

Les matériaux de structures du « développement durable » pour l'habitat

Préparé par **Paul Acker, Olivier Baverel,
Laurent Brochard, Guillaume Habert, Mathieu Rivallain,
Robert Leroy et Alain Ehlacher**

Alain Ehlacher est professeur de matériaux à l'École des Ponts ParisTech où il dirige le département Génie mécanique et matériaux. Il est Directeur de recherches de l'Institut Navier, au Pôle de recherche et d'enseignement supérieur (PRES) Université Paris-Est. Il est lauréat du prix Henri de Parville, Arthur du Fay et Mme E. Hamel de l'Académie des sciences de Paris en 2000.

La construction constitue un secteur d'activité très important, représentant 10 % du PIB mondial. Le domaine du bâtiment et travaux publics représente à lui seul 6 % du PIB français (voir aussi le **Chapitre de J. Méhu**) et 28 % des emplois. C'est donc un poids très lourd de l'économie mondiale. C'est aussi, logiquement, un poids très lourd de la pollution mondiale : 40 % de toutes les émissions de gaz à effet de serre en Europe (30 % dans le monde), 40 % de la consommation mondiale d'énergie sont liés à la construction ainsi que 40 % de la consommation des ressources natu-

relles et 40 % de la génération des déchets en volume. C'est ce qu'on appelle le « quatre-quarante ».

Comment agir maintenant pour développer une construction durable ? Le terme « durable » dépasse aujourd'hui son acception première de durée de vie des bâtiments. Il renvoie désormais à l'objectif moderne qui demande à l'activité de construction de se préoccuper de la préservation de la planète. Le cadre de la mission du constructeur se définit donc en fonction des hypothèses sur l'évolution de la planète et de sa population. Il commence par un exercice de prospective.

LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION EST GLOBALEMENT RESPONSABLE DE :

- 40 % de toutes les émissions de gaz à effet de serre en Europe... (30 % dans le monde),
- 40 % de la consommation mondiale d'énergie,
- 40 % de la consommation des ressources naturelles,
- 40 % de la génération de déchets (en volume).

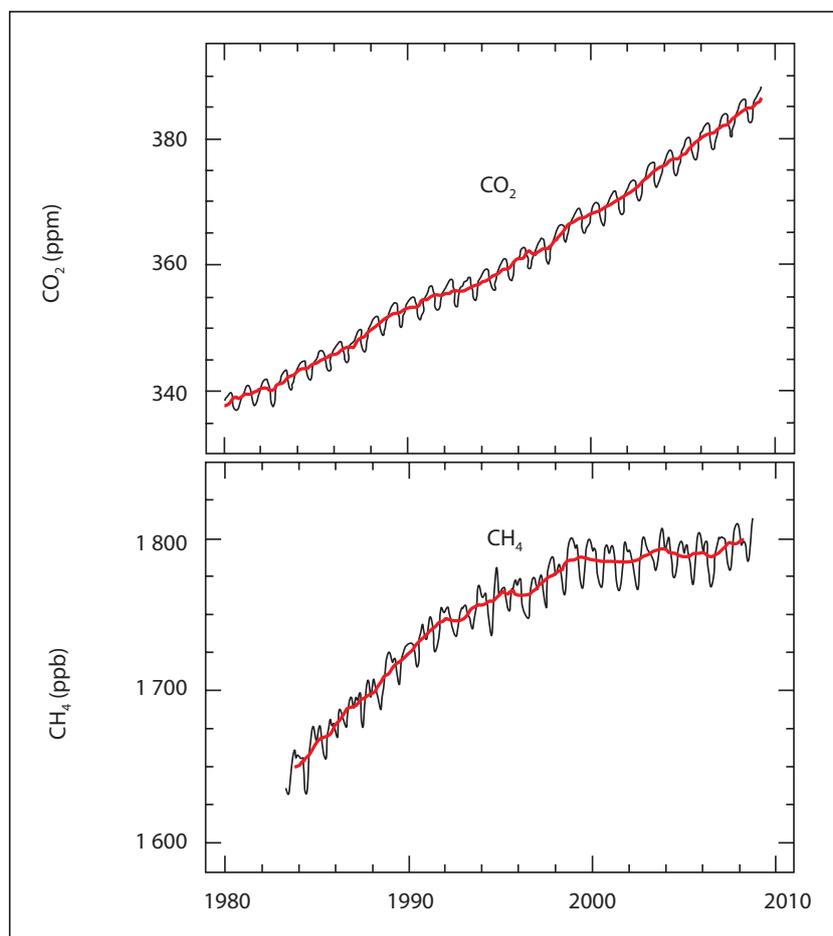
1 Pour quel monde devons-nous maintenant construire ?

1.1. Le changement climatique et ses conséquences

Il faut d'abord citer ses références. Elles proviennent essentiellement de trois documents : les rapports du sommet de Copenhague de 2009 sur le changement climatique,

Figure 1

Évolution des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (CO_2) et en méthane (CH_4) depuis une trentaine d'années.



le rapport intitulé *State of the Future*, rédigé par une réunion de chercheurs internationaux, qui analyse divers aspects de l'évolution de l'humanité et de la planète ; le rapport GT 2030 du ministère de la Défense français, rapport « géostratégique » qui présente une prospective à l'horizon des trente prochaines années¹. Ce dernier rapport donne des éléments d'information assez troublants et parfois quelque peu déprimants...

La **Figure 1**, extraite du rapport qui a servi d'introduction au sommet de Copenhague sur le climat en 2009, rappelle l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4) dans l'atmosphère depuis 1980. Il est maintenant admis que ces augmentations sont dues à l'activité de l'homme et que sa première conséquence est le réchauffement global de la planète. La **Figure 2**, extraite aussi de ce rapport, montre une augmentation de la température de la planète d'environ 1 °C en une centaine d'années. Ramenée à la masse de la planète ou à celle des océans, ce simple degré est considérable en termes d'énergie.

Cette augmentation de température, comme la production de dioxyde de carbone et de méthane (gaz à effet de serre), est toujours active.

1. The Copenhagen Diagnosis (2009). *Updating the World on the Latest Climate science* ; The Millennium Project of the American Council for the United Nations University ; rapport de « Prospective géostratégique à l'horizon des trente prochaines années », GT 2030 du ministère de la Défense.

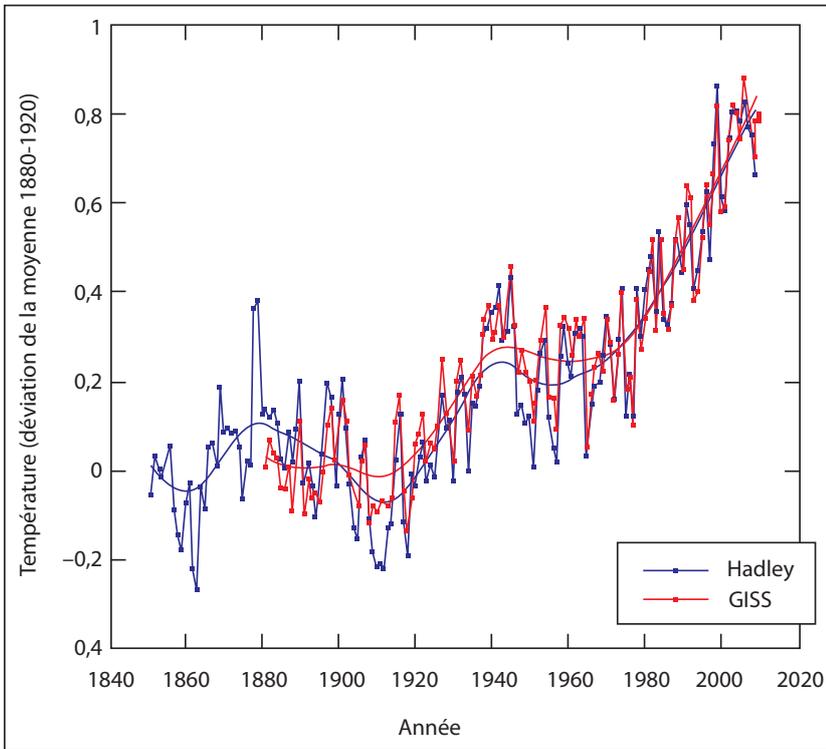


Figure 2

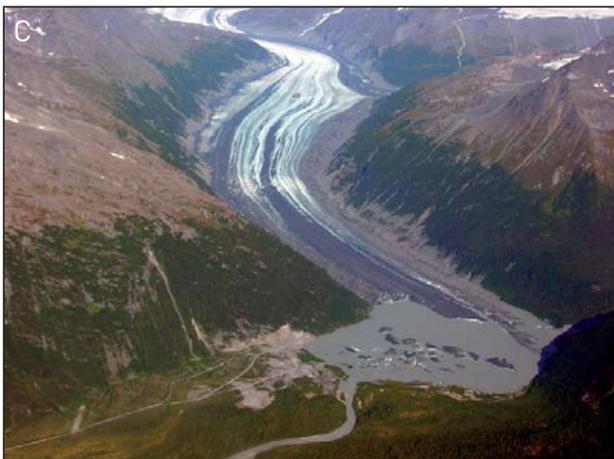
Le réchauffement climatique depuis 1850. Température globale moyenne entre 1850 et 2009 par rapport à la ligne de base de la période 1880-1920, estimée à partir des données de la NASA/GISS et de Hadley.

Les modèles les plus pessimistes prévoient une augmentation de 7 °C en un siècle, les plus optimistes de 2 °C. On peut déjà constater certaines conséquences de ce réchauffement comme la fonte des glaces (**Figure 3**).

Le réchauffement climatique cause une augmentation du niveau des océans (**Figure 4A**), davantage consécutive d'ailleurs à la dilatation thermique de l'eau qu'à la fonte des glaces, qui aura des conséquences graves

Figure 3

Recul des glaciers. A) L'une des conséquences remarquables du réchauffement climatique est la fonte des glaciers. B) Le glacier d'Easton (États-Unis) a reculé de 255 mètres de 1990 à 2005. C) Le glacier de Valdez (Alaska) s'est aminci de 90 mètres au cours du dernier siècle et des sols désertiques sont apparus sur les bords du glacier du fait de son amincissement et de son recul. D) Image de la NASA montrant la formation de nombreux lacs glaciaires aux terminus des glaciers en recul au Bhoutan dans l'Himalaya.



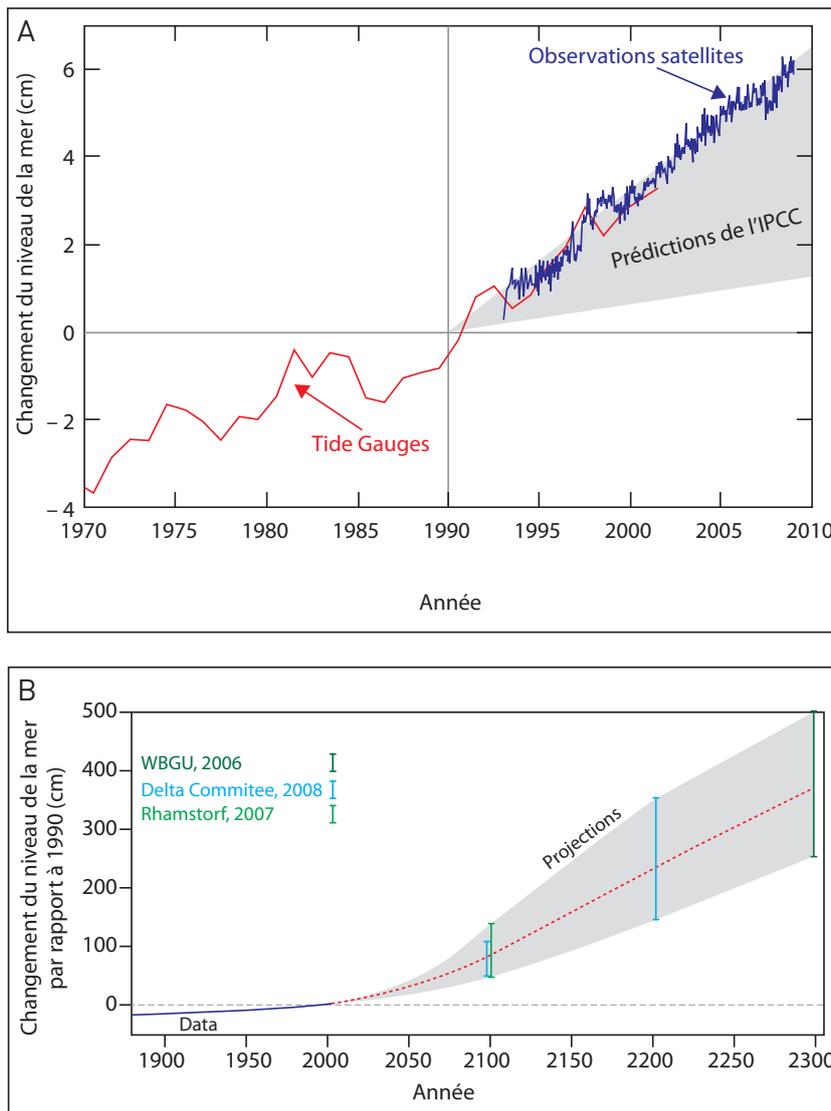


Figure 4

A) Montée du niveau des océans due au réchauffement climatique.
 B) Les prévisions les plus optimistes indiquent que le niveau des océans aura monté de deux mètres en 2300.
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.
 Tide Gauge est une unité de mesure relative du niveau de la mer prise par un instrument appelé marégraphe.

pour l'humanité. Sur la **Figure 4A**, on peut faire la triste constatation que la réalité a été proche de la prévision la plus pessimiste (**Figure 4B**). Si l'on extrapole jusqu'à l'année 2300, la version la plus optimiste prévoit que cette année-là, le niveau des océans aura monté de deux mètres. C'est énorme ; le découpage des côtes en serait profondément modifié, nombre de villes et d'hectares de terres agricoles auront disparu.

Par ailleurs, il est clair pour les experts que cette évolution du climat sera accompagnée de tout un cortège d'événements météorologiques tels

que tornades, sécheresse, inondations ou encore désertification (**Figure 5**).

Que faut-il retenir de tout cela du point de vue de l'activité de la construction ? C'est à la fois la perspective de futurs changements et cataclysmes et la grande incertitude qui demeure sur leur nature exacte et leurs intensités, provenant d'abord de l'incertitude sur le niveau des futures émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre. Toutes les écoles qui forment des ingénieurs doivent sensibiliser la profession – en particulier les futurs ingénieurs – pour que de moins en moins de CO₂ soit émis par la production des matériaux de construction.

1.2. Les besoins démographiques

La construction est destinée à héberger la population ; il faut donc regarder les prévisions démographiques. La **Figure 6B**, extraite de GT 2030, montre de nouveau une forte dispersion des prévisions, mais un fort accroissement pour les cinquante prochaines années : en 1950, la population mondiale était de 2,5 milliards d'individus ; cette année, elle passe le cap des 7 milliards et la plupart des prospectives annoncent un chiffre de 9 milliards en 2050. Incidemment, on peut citer les prévisions du « Millennium Project » qui annoncent que la population pourrait redescendre à 5,5 milliards en 2100. Avec l'allongement de la durée de vie, cela signifierait une proportion énorme de personnes âgées, ce qui peut poser certains problèmes de gestion.



Cette augmentation considérable de la population est très inégalement répartie sur la planète, comme l'illustre la **Figure 6B**. Mais les prévisions démographiques sont des prévisions à long terme. Aujourd'hui, la réalité du monde est que le taux de fécondité s'effondre partout, y compris en Afrique. Peu de pays ont un taux de fécondité au-dessus du seuil de renouvellement, égal à 2,1, et ceci annonce d'assez sensibles diminutions de la population sur notre planète aux alen-

tours de 2050-2100 (**Figure 7**). Ainsi l'Europe pourrait perdre 33 millions d'habitants entre 2010 et 2050.

Le vieillissement de la population concerne directement les questions de construction. La **Figure 8**, qui donne la proportion des plus de 65 ans dans la population, est éloquent. Le vieillissement est le résultat des progrès de la biochimie et de la médecine et n'est pas parti pour s'arrêter ; ainsi en 2009, l'espérance de vie des Français a gagné quatre mois ! Ce chiffre

Figure 5

Tornades, inondations, désertification, sécheresse sont des conséquences du réchauffement climatique, indique la rapport de The Copenhaguen Diagnosis (2009).

Figure 6

A) Prévisions démographiques.
 B) Évolution de la population au Japon, en Russie et en Europe, de 1950 à 2050.

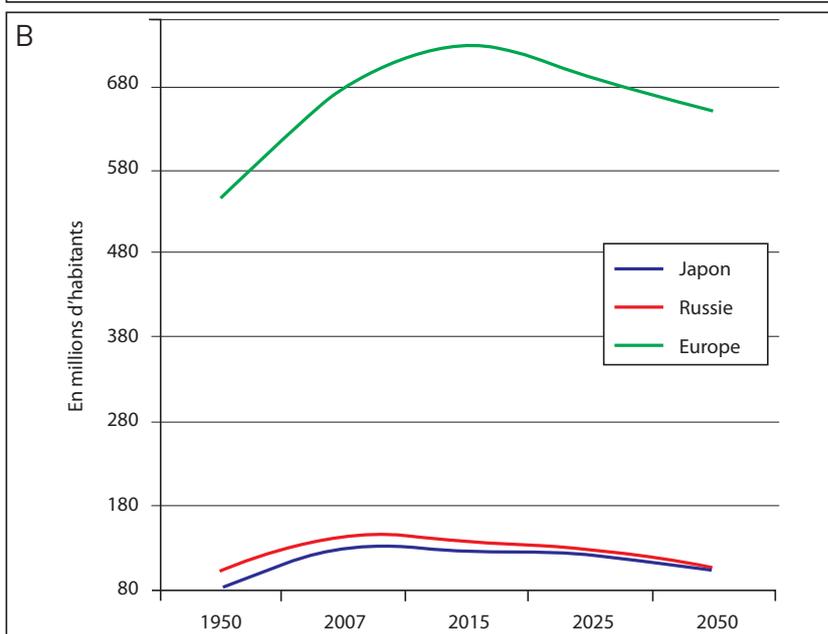
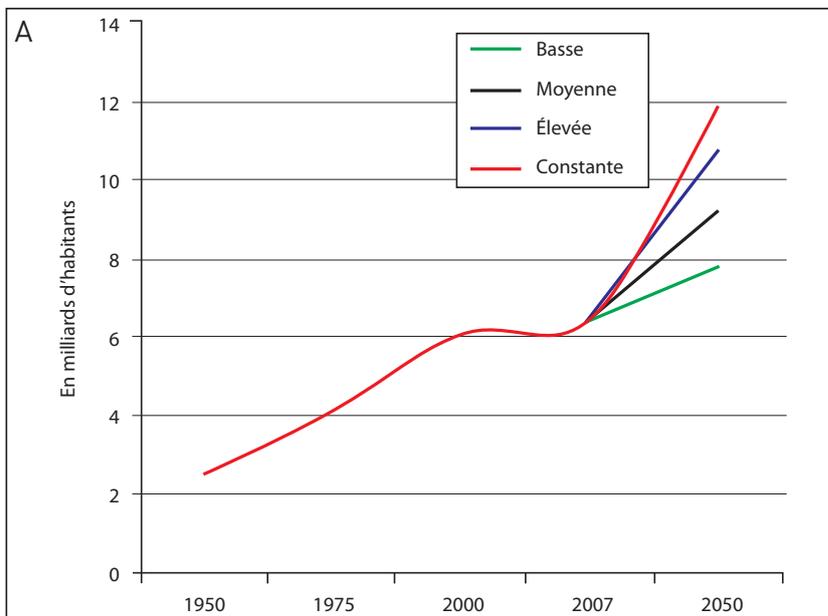
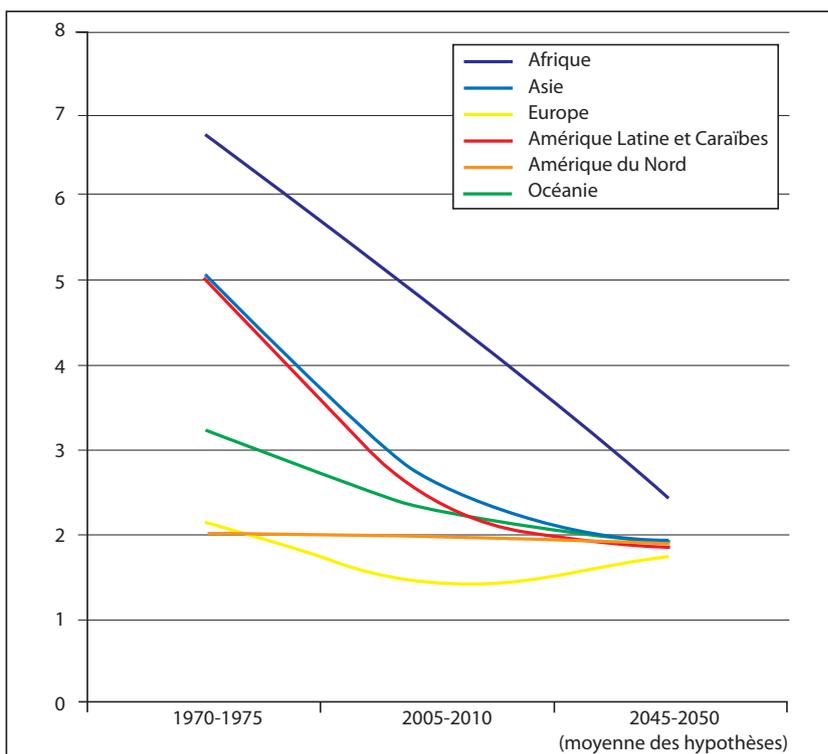


Figure 7

Évolution de l'indice de fécondité dans le monde.



est impressionnant. Il est important de prévoir comment vivra cette population car les technologies de construction à utiliser ne seront pas les mêmes pour les paysans et pour les citadins (**Figure 8**).

En fait, on continuera à avoir affaire à la poursuite du mouvement actuel de sur-urbanisation : l'essentiel des nouveaux habitants ira grossir les villes : on prévoit pour 2015 de nombreuses villes gigantesques à très forte population (**Figure 9**). L'urbanisation à grande échelle entraîne malheureusement la plupart du temps l'apparition de bidonvilles avec ses catastrophes humaines, sécuritaires et sanitaires. On doit donc prévoir la multiplication d'habitats dans des bâtiments de type « tour ». L'impératif sera de faire des constructions à très hautes caractéristiques mécaniques pour permettre les fortes charges qu'impliquent les grandes hauteurs. S'il faut certainement prêter attention aux matériaux bio-sourcés comme le bois, la paille (à propos des matériaux bio-sourcés, voir le **Chapitre de D. Gronier**), la priorité restera tout de même aux nouvelles variantes des bétons.

2 Les matériaux et leur empreinte écologique

2.1. Les principaux matériaux utilisés

La **Figure 10** présente l'ensemble des matériaux utilisés par l'activité humaine. Pour la construction, on utilise essentiellement l'acier,

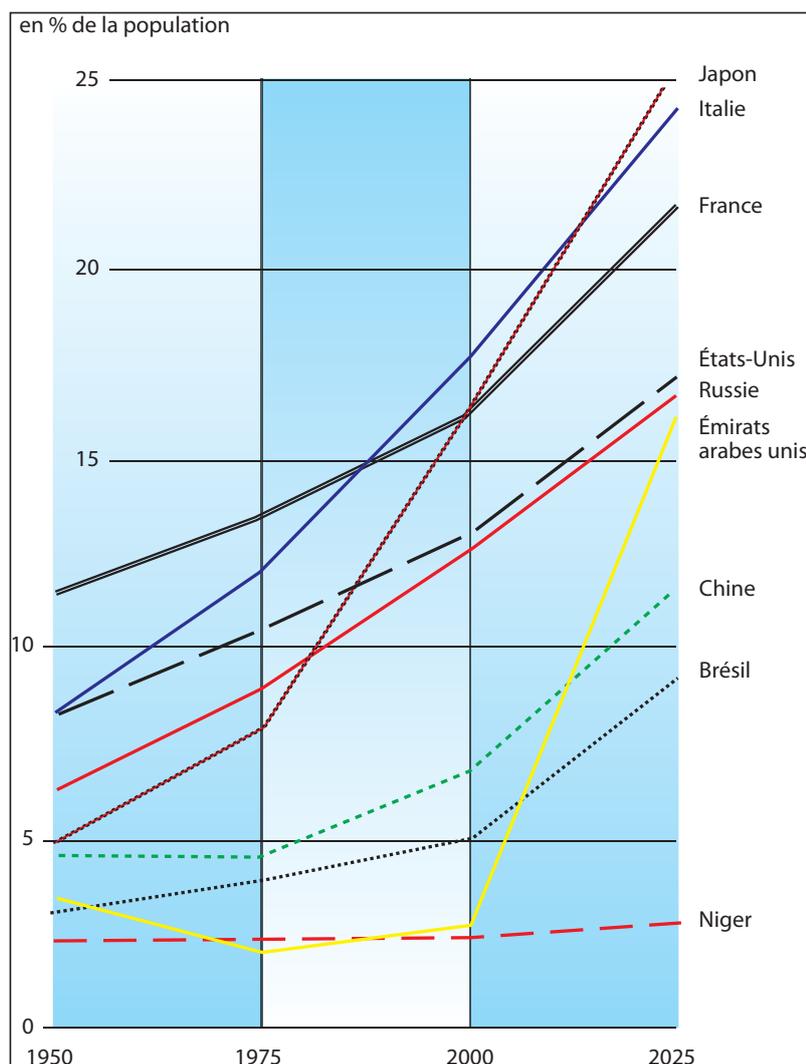


Figure 8

Évolution de la part des plus de 65 ans.

le bois, le verre (le verre est abordé dans le **Chapitre de J. Ruchmann**), mais c'est le béton qui est de loin le matériau le plus utilisé ; on en fabrique la quantité colossale de 25 milliards de tonnes par an mondialement.

Ce qui rend le béton difficilement remplaçable dans la construction, c'est sa résistance à la compression allée à un coût raisonnable (le béton est également abordé dans les **Chapitres de J. Méhu** et **J.-P. Viguier**). La courbe de la **Figure 11A** présente différentes réalisations importantes en béton. En 1988, le pont de l'Île-de-Ré (**Figure 11B**) a été construit

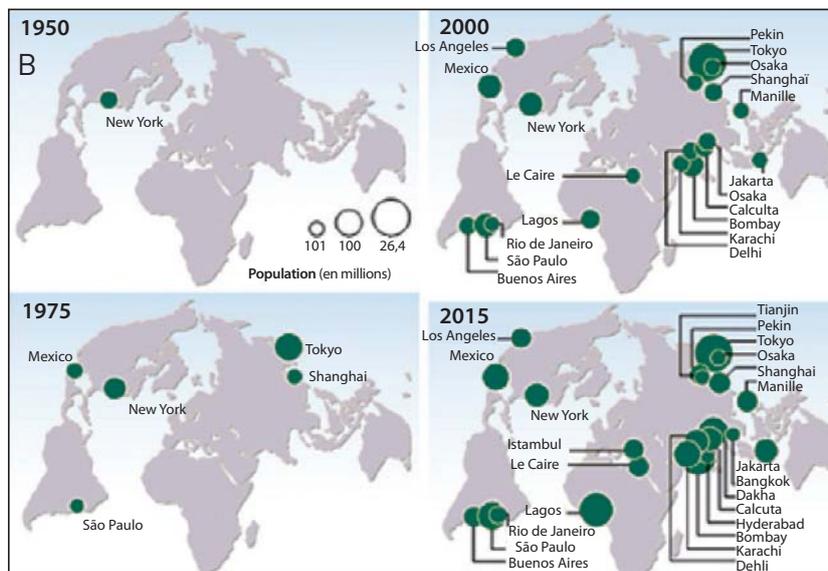
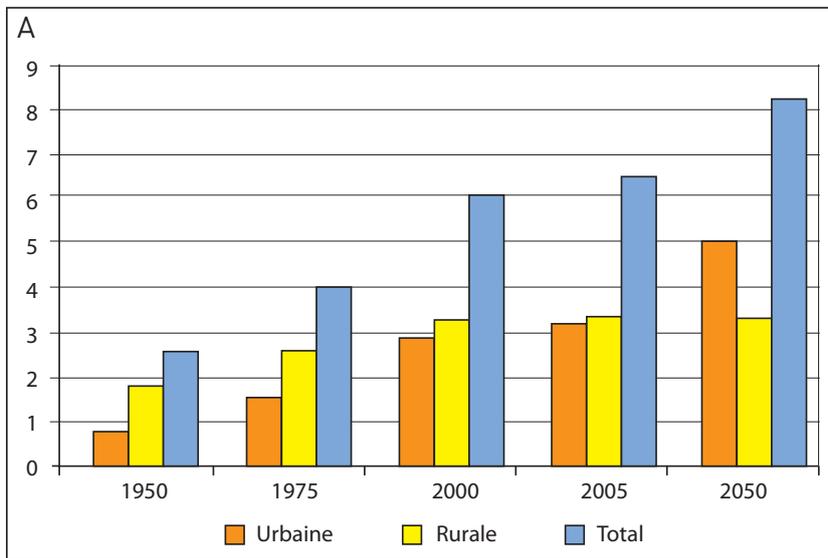


Figure 9

A) Population rurale et urbaine dans le monde, de 1950 à 2030 (en milliards) ; B) Agglomérations de plus de 10 millions d'habitants. (GT 2030)

avec un béton qui atteignait 80 MPa, valeur considérée comme exceptionnelle à l'époque. Le ductal®, qui est un matériau atteignant 200 MPa, a permis de faire la tour aérofrigorante de la centrale électronucléaire de

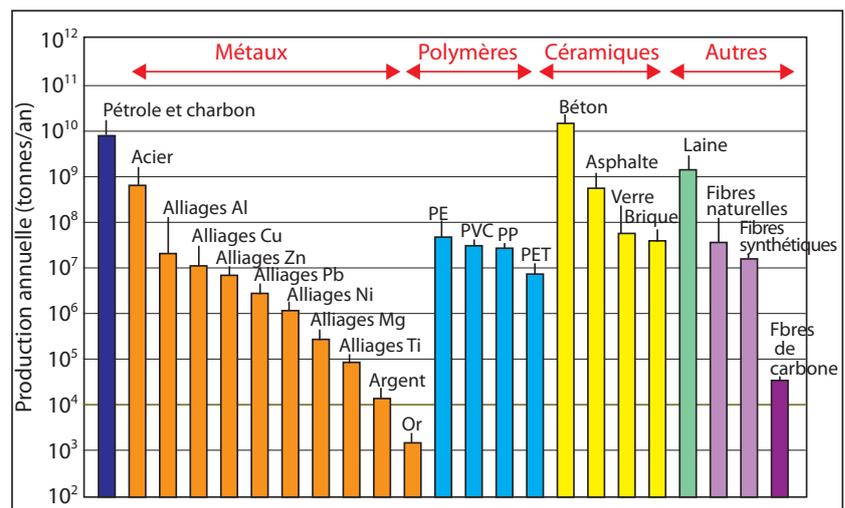
Cattenom. Les recherches continuent et les laboratoires promettent des matériaux de plus en plus résistants, l'avantage étant que de plus faibles quantités sont utilisées pour des performances équivalentes, mais l'inconvénient est qu'aux résistances élevées, le béton est cher. On utilise rarement des bétons à 200 MPa pour faire de la construction ; cependant, les évolutions techniques permettraient d'avoir des résistances de plus en plus élevées, avec des prix de plus en plus élevés.

2.2. Les empreintes écologiques

L'empreinte écologique est le point noir des bétons, devenus très performants du point de vue des constructeurs. Si la construction est responsable de 40 % des émissions de gaz à effet de serre (voir le « quatre-quarante » cité en introduction de ce chapitre), quelle est la part qui doit en être attribuée aux matériaux ? Le bilan énergétique de la consommation moyenne d'un logement en Europe est environ : 50 % dus au chauffage des locaux,

Figure 10

Production annuelle des principaux matériaux utilisés (échelle logarithmique).
 PE : polycarbonate, PVC : chlorure de polyvinyle, PP : polypropylène, PET : polyester.



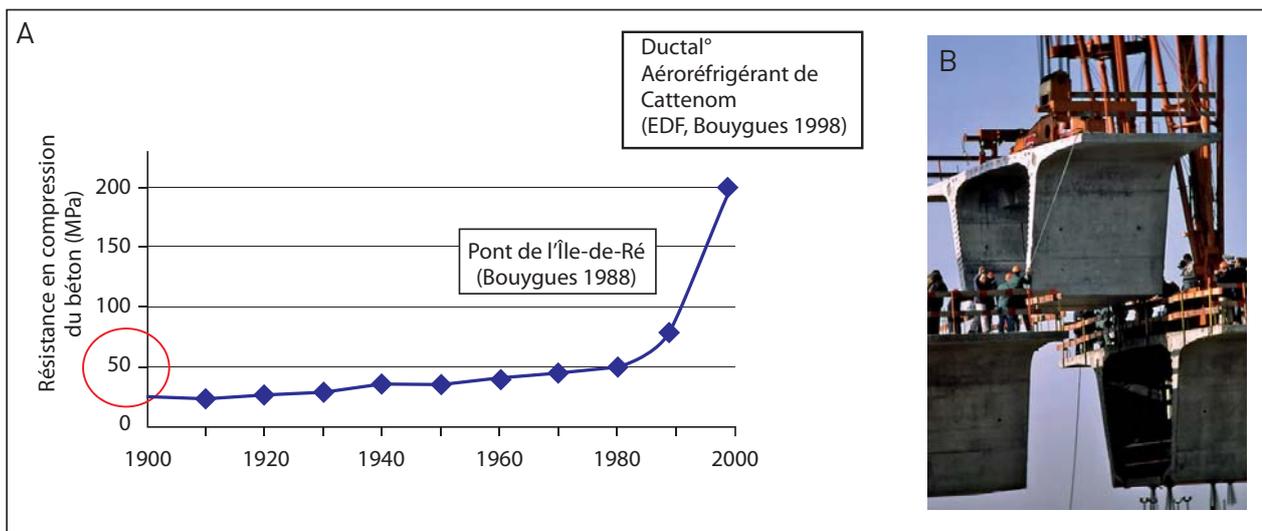


Figure 11

A) Évolution des performances du béton au cours du XX^e siècle. B) Construction du pont de l'Île-de-Ré (1987).

25 % dus au chauffage de l'eau sanitaire et 25 % dus aux divers équipements (voir aussi le **Chapitre de D. Quénard**). En valeurs absolues, il s'agit d'environ 200 kWh par m² et par an. Rapporté à l'énergie cumulée sur cinquante ans, estimation conservatoire car la durée de vie d'un bâtiment est plutôt de l'ordre de cent ans, on trouve que « l'usage » (c'est-à-dire l'exploitation du bâtiment) est responsable de 83 % de la consommation énergétique totale sur tout le cycle de vie (**Figure 12**). L'énergie dépensée pour la fabrication des matériaux ne représente que 12 % ; le chantier ainsi que la maintenance du bâtiment coûtent peu, de même que sa démolition en fin de vie. En résumé, la consommation d'énergie et la production de CO₂ associées au bâtiment sont essentiellement liées au chauffage. Une priorité appelée par l'objectif d'économie d'énergie est donc de développer des « usages » moins coûteux en énergie et donc des matériaux isolants performants.

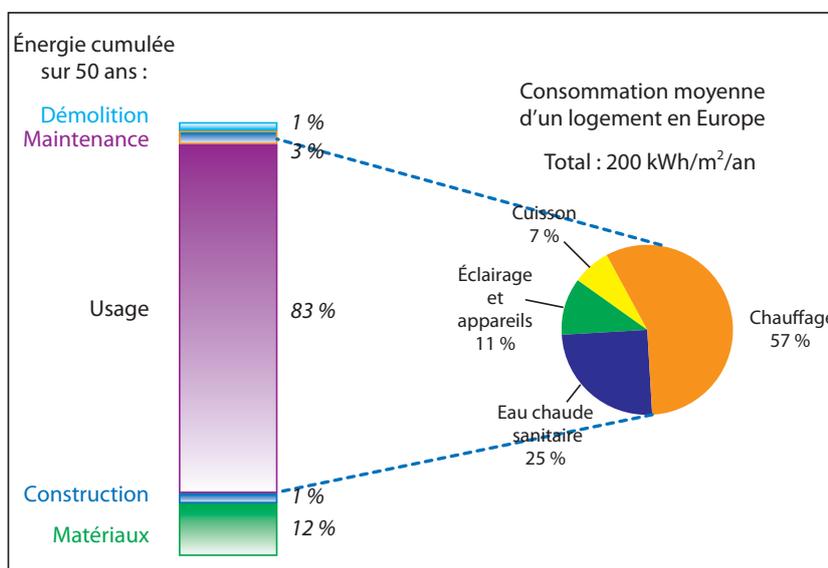
En valeurs absolues, la France totalise plus de 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole

d'énergie dépensée pour le domaine de la construction en 2008. Les bâtiments présentent une moyenne de consommation d'environ 240 kWh/m²/an pour les 31,6 millions d'habitations qui existent en France (dont la superficie est d'environ 670 000 km²). L'objectif de la profession est d'atteindre 15 kWh/m²/an, et l'on en est encore très loin.

À côté de labels « bâtiments basse consommation (BBC) », un label « bâtiment à énergie positive » a été introduit (voir les **Chapitre de D. Quénard** et **J. Souvestre**). L'école nationale des ponts

Figure 12

Détail de la consommation énergétique d'un logement en Europe.



et chaussées construit à côté de son bâtiment actuel à Marne-la-Vallée un bâtiment à « énergie positive » – il correspond à un investissement important, mais représentera un outil exceptionnel pour la formation qui montrera aux jeunes ingénieurs que l'on peut construire un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme.

La réalité de la situation de la construction en France, et dans les pays occidentaux d'une manière générale, est qu'elle est dominée par le grand nombre de constructions datant de l'après-guerre – environ 21 millions. Pour les bâtiments construits entre les années 1949 et 1974, la consommation n'est pas de 240 kWh/m²/an, mais de 350 kWh/m²/an. C'est donc en traitant ce stock de logements que l'on pourra espérer tenir les objectifs environnementaux, à savoir diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Pour comparaison, rappelons qu'actuellement, on ne renouvelle annuellement que moins de 1 % du parc. La priorité pour les pays développés est ainsi la réhabilitation du parc ancien, et les industriels travaillent actuellement d'arrache-pied à l'invention de nouveaux matériaux – à l'exemple des prometteuses « mousses de gel » – pour l'isolation. À ce stade, on peut citer les résultats de modélisations thermiques qui quantifient l'importance des ponts thermiques. Ils montrent qu'en divisant par trois la conductivité thermique du matériau de façade, on économiserait 35 % de l'énergie nécessaire au chauffage du bâtiment ; le renforcement de

l'isolation des façades apparaît ainsi comme particulièrement important.

En dehors de l'Europe, certains pays ont des croissances extrêmement élevées et leur besoin prioritaire va vers des constructions nouvelles. Par exemple en Chine, on construit deux milliards de mètres carré par an, soit 50 % de la construction nouvelle mondiale, et les besoins chinois continuent à croître au rythme considérable de 22 % par an. D'autres pays ne sont pas en reste : au Brésil, les besoins ne sont pas au même niveau, mais croissent tout de même au rythme de 8 % par an – et en l'occurrence pour des habitations qui ont des critères de confort comparables aux nôtres. Pour la construction dans les pays émergents, la priorité se porte vers la sélection de matériaux de structure que l'on va vouloir « écologiques » (à faible émission de CO₂) et pas seulement de matériaux d'isolation comme c'est le cas dans les pays développés.

Béton et émission de CO₂

Comme nous l'avons vu, pour ses propriétés mécaniques, le béton reste le matériau chéri de la construction. Son inconvénient est d'être fabriqué à partir d'un matériau « peu écologique », le ciment. À vrai dire, une tonne de béton ne contient qu'un kilogramme de ciment et c'est quelque peu injustement que le béton est stigmatisé (*Figure 13*).

Le caractère « peu écologique » du béton prend sa signification quand on considère les énormes quantités

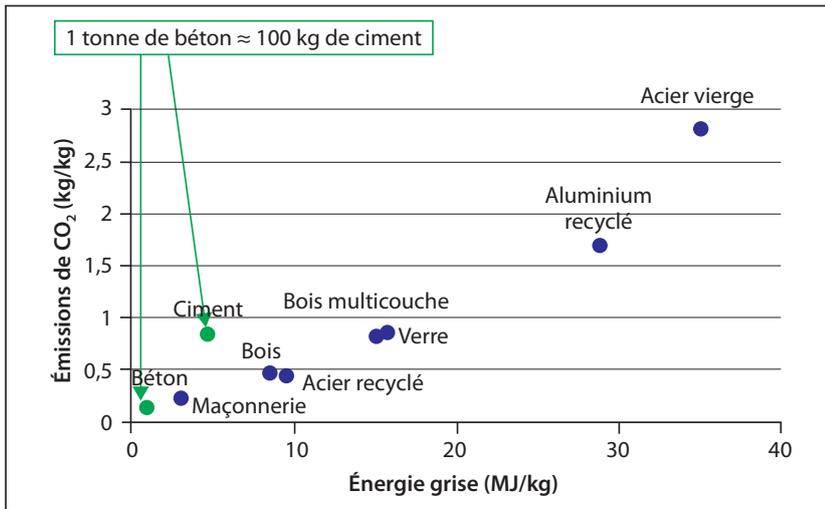


Figure 13

Émissions de CO₂ en fonction de l'énergie grise. L'énergie grise correspond à la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, la fabrication, l'utilisation et le recyclage des matériaux ou produits industriels.

qui en sont produites, qui représentent actuellement environ 1 m³ de ciment par an et par personne sur la planète, à comparer aux 200 kg d'acier. D'après des chiffres cités par le GIEC, l'industrie du ciment présente 6,97 % des émissions mondiales de CO₂, et l'industrie de l'acier 4,83 %. La forte émission de CO₂ associée à l'industrie du béton provient pour partie de la forte consommation en énergie du procédé de fabrication, qui est un procédé à très haute température et pour partie du procédé lui-même qui fait intervenir une réaction chimique qui produit du CO₂ – la décomposition du calcaire sous l'effet de la chaleur en chaux et en CO₂. Pour faire une tonne de ciment, on émet dans l'atmosphère 400 kg de CO₂, qui s'ajoutent aux émissions liées au chauffage du système. Au total, c'est l'importante quantité de 850 kg de CO₂ qui est émise par tonne de ciment.

Comment résoudre ce problème du dégagement de CO₂ qui semble inévitable, au vu des besoins croissants en béton ? La première idée est de

recupérer le CO₂ produit dans les usines de fabrication de ces matériaux et de le stocker.

3 Le stockage du CO₂, espoir, difficultés et risques

Malgré la nocivité du CO₂ dans l'atmosphère du point de vue du changement climatique, on ne peut envisager de se passer d'en rejeter, en dépit des efforts qui sont faits pour remplacer les procédés qui en produisent par des procédés écologiques. Ainsi, il existe de grandes réserves de charbon sur la planète, suffisantes pour plusieurs siècles et situées dans des pays en train de se développer comme la Chine, et qui vont bien entendu le consommer. Il y a donc lieu de chercher à neutraliser l'effet nocif des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère.

Le stockage du CO₂, technique encore à l'étude, est développé dans cet objectif. Le principe en est très simple : le CO₂ produit en grande quantité dans une installation industrielle est d'abord récupéré puis débarrassé des fumées et des gaz qui

l'accompagnent ; on le stocke ensuite dans des réservoirs souterrains, où l'on espère qu'il va y rester pendant environ un millier d'années. Le GIEC, dans son rapport GIEC3, estime qu'il y a une fourchette entre 15 et 55 % de l'ensemble des réductions d'émissions de CO₂ à l'horizon 2100 qui pourraient être faites grâce aux techniques de stockage.

Le CO₂ fait déjà l'objet de stockages à titre expérimental dans le monde, mais l'on rencontre de très nombreux obstacles qu'il faut résoudre avant d'en faire un procédé industriel :

- comprendre la faisabilité et les impacts du stockage à long terme (typiquement un millier d'années). La technologie nécessaire pour réaliser les opérations est à développer. L'un des points importants est de pouvoir séparer le CO₂ en usine, sans que cela ne coûte trop cher en énergie ;
- assurer l'étanchéité du réservoir. S'agissant d'un millier d'années, on comprend bien que ce n'est pas simple à réaliser et à garantir. Les espoirs initiaux d'utiliser les réservoirs ayant contenu du pétrole ou du charbon se heurtent à des difficultés techniques ;
- dresser un bilan des sites d'injection possibles et estimer la capacité de stockage de CO₂ sur la planète, aujourd'hui très mal connue.

Voici quelques exemples de recherches qui sont menées au laboratoire de l'École nationale des ponts et chaussées autour du stockage de CO₂. On étudie les comportements des bouchons en ciment, destinés

aux très grands réservoirs dans lesquels on veut stocker le CO₂ et en particulier aux réservoirs de type « veine de charbon ». Dans un autre programme, on étudie les stockages par carbonatation bactérienne² puisque c'est une façon alternative de stocker le CO₂. Le concept en est inspiré par l'observation des roches calcaires qui nous entourent et qui sont produites par l'activité vivante ; ces roches peuvent être vues comme des sites de stockage de CO₂.

Pour un exemple un peu plus détaillé, on peut considérer le stockage du CO₂ dans une formation de charbon. Le charbon est une roche qui contient des nano-pores sur lesquels les gaz viennent s'adsorber. Le CO₂ introduit chasse le méthane qui occupe généralement ces formations, ce méthane étant récupéré et utilisé. Le CO₂ n'a pas la même action sur la roche que le méthane et exerce une pression physique qui voudrait dilater la roche. Or les zones dans lesquelles on veut stocker sont des zones profondes où elle ne peut pas se dilater. Elle doit donc gonfler et referme ses fissures, provoquant une perte de perméabilité. À l'issue de ce processus, la veine étant devenue imperméable, on ne peut plus introduire de CO₂. Des recherches sont actuellement conduites pour comprendre le fonctionnement des sites de stockage.

2. Voir aussi l'ouvrage *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*. Chapitre de S. Blain. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009.

Un stockage de CO₂ est une installation potentiellement dangereuse, eu égard à la très grande quantité de gaz concernée. Il faut évidemment travailler cette question qui conditionne l'appropriation sociale de cette technique de lutte contre l'effet de serre. La maîtrise du risque est donc un sujet de préoccupation tout à fait essentiel, au point qu'elle constitue maintenant un domaine scientifique très actif et régulièrement appliqué au stockage du CO₂.

4 Des matériaux « bio-sourcés » pour limiter l'empreinte écologique

La thématique « matériaux et écologie » conduit à évoquer les matériaux « bio-sourcés » (voir aussi le **Chapitre de D. Gronier**). Le bois est un excellent matériau et largement utilisé, y compris pour des bâtiments de plusieurs étages. Sa limitation vient de ce que l'état des ressources en bois est très inégalement réparti sur la planète. D'après un rapport de l'United nations environment programm (UNEP), on consomme mondialement environ 400 kg de bois par an et par personne. Remplacer 1 m³ de béton par du bois rajouterait, à ces 400 kg, 700 kg par an et par personne ; la ressource en bois est simplement insuffisante et ne peut être retenue pour construire les grands bâtiments nécessaires pour héberger en zones urbaines les milliards de personnes qui vont venir grossir la population de la planète. Le bois reste naturellement un matériau de choix, même s'il

ne peut prétendre satisfaire tous les besoins. Le **Chapitre de J.-P. Viguier** présente ainsi une construction entièrement en bois comme création moderne.

À l'École des ponts, on apprécie particulièrement l'association du bois avec du béton, de préférence du béton de très haute performance. La **Figure 14** illustre le type de poutre que l'on y fabrique. Le bois résiste très bien aux tractions, le béton très bien aux compressions. Pour le laboratoire, on fabrique de très grandes poutres sur lesquelles sont pratiqués des essais de rupture. Le mécanisme de ruine apparaît sur la **Figure 15**. L'analyse des courbes efforts-déplacements de ce genre de poutre convainc aisément que l'association du bois et du béton est une excellente solution pour les constructions d'avenir.

On a parlé de construction en paille, on a évoqué le torchis de nos anciens (voir le **Chapitre de J.-C. Bernier**), mais il y a beaucoup plus simple encore. Des recherches menées par l'École des ponts en

Figure 14

Poutre mixte bois-béton.



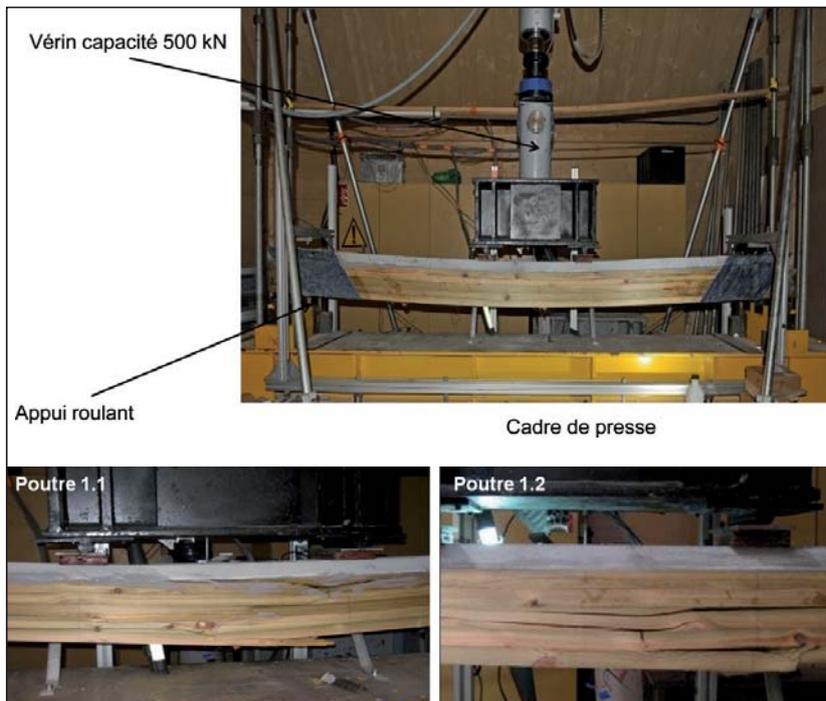


Figure 15

Des essais de rupture sont pratiqués au laboratoire sur de très grandes poutres en bois, ce qui permet d'étudier les mécanismes de ruine.

Figure 16

Petit bâtiment prototype avec des murs en paille, réalisé par des élèves du professeur Olivier Baverel.



association avec l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble ressuscitent et modernisent ce vieux concept. Le bâtiment prototype est un simple empilement de bottes de paille que l'on recouvre de terre (Figure 16). On équipe ce bâtiment de toute la panoplie de capteurs nécessaire et l'on obtient le confort absolu : régularité thermique, régularité hydrique, ce qui donne un excellent habitat. La question de la durée de vie du bâtiment se pose légitimement, mais la réponse issue de l'expérience profonde des vieux murs de terre et de paille est très positive. Pour les bâtiments de faible hauteur, cette solution est en fait tout à fait pertinente : si vous avez des bottes de paille, construisez votre pavillon avec cela !

Tableau 1

Composants minéralogiques du ciment.

Formule chimique	Formule abrégée	Dénomination
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Silicate tricalcique – Alite
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Silicate dicalcique – Belite
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminate tricalcique – Celite
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Aluminoferrite tétracalcique
$3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	C_3MS_2	Merwinite
$2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	C_2MS_2	Akermanite
$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	C_2AS	Gehlenite
$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	CS	Wollastonite
$\text{CaO} \cdot \text{SO}_3$	CS	Anhydrite

Même la bonne vieille terre pourrait ainsi, par certains côtés, être considérée comme matériau de construction moderne, mais elle ne se prête pas à la construction de bâtiments de grande hauteur, pourtant rendu nécessaire par l'évolution démographique et ne peut être considérée sérieusement. Qu'on le veuille ou non, il faut recourir au béton, et l'on n'a pas le choix !

5 Des liants hydrauliques alternatifs

La cohésion entre les éléments de construction qui assurent la solidité du bâtiment et son étanchéité est assurée par des « liants hydrauliques » qui sont mis en forme à l'état liquide ou pâteux et sont préparés directement sur le chantier.

Le liant hydraulique le plus utilisé est le simple ciment (voir aussi le *Chapitre de J. Méhu*), qu'on appelle aussi le « clinker ». Il est fait d'un mélange de 80 % de calcaire et 20 % d'argile, que l'on fait chauffer dans des fours qui tournent lentement. Au cours de cette étape, des réactions chimiques se produisent, dont la principale est la décarbonatation du carbonate de calcium, qui donne de la chaux vive et du CO_2 . L'argile elle-même se scinde en silice et en alumine. Ces trois composés, qui sont les trois principaux de pratiquement tous les matériaux de construction, se combinent pour donner des silicates et des aluminates de chaux. C'est cette dernière étape qu'on appelle la « clinkerisation ». Ce clinker, broyé finement, se dissout facilement dans l'eau et

donne naissance à une variété d'hydrates qui précipitent et forment des cristaux qui s'enchevêtrent et se gênent dans leurs mouvements : c'est le mécanisme de base de la cohésion du matériau. Du point de vue du développement durable, ces transformations produisent malheureusement 850 kg de CO_2 par tonne de ciment produit – 400 kg liés à la décarbonatation et 450 kg à l'énergie de fabrication.

Pour comprendre plus en détail les propriétés des matériaux de construction, il faudrait aller au-delà de leur composition chimique et considérer aussi leur état minéralogique, qui joue un rôle très important (*Tableau 1*). La silice et l'alumine peuvent s'associer de très nombreuses façons, dont le *Tableau 1* montre les majoritaires dans le ciment anhydre avant l'hydratation.

À partir de la synthèse de base, produisant les composés de base, chaux, silice et alumine, il existe une variété de liants hydrauliques. On peut par exemple rajouter du

sulfate de calcium : on appelle le résultat CSA, d'utilisation courante.

Un liant hydraulique particulièrement intéressant est produit à partir du laitier granulé de haut fourneau. Ce produit contient de nombreux constituants, mais principalement, là encore, de la chaux, de la silice et de l'alumine. Il ressemble donc beaucoup à nos clinkers, à la différence près qu'il cristallise très facilement et devient alors inutilisable. L'une des raisons de l'intérêt de l'utilisation du laitier est en fait artificielle et liée à la façon dont on calcule les bilans CO_2 . Le laitier est un déchet de la fabrication de l'acier et, en tant que « déchet », il ne lui est affecté aucun bilan carbone (émission zéro) ; par convention, le bilan carbone correspondant est en effet affecté à l'acier, produit principal du haut fourneau et non à ses déchets de procédé. Si dans la fabrication du ciment, on remplace le clinker, qui produit du CO_2 , comptabilisé comme tel, par du laitier, on peut économiser – du fait des conventions de calcul des émissions de CO_2 – jusqu'à 95 % de l'émission de CO_2 attribuée au ciment. On produit environ 250 millions de tonnes de laitier par an dans le monde, c'est-à-dire à peu près 10 % de la production actuelle de ciment.

L'introduction de laitier dans le ciment fait de très beaux matériaux, ressemblant au ciment blanc. Les compositions des différents produits contenant plus ou moins de laitier, plus ou moins de clinker sont très similaires ; il y a là un moyen d'agir finement sur la composition chimique du ciment, la limite des variations étant

de conserver la possibilité de leur mise en œuvre. Ceci ne va pas de soi, car le laitier ne se dissout pas simplement dans l'eau : quand il se refroidit, il vitrifie et stocke donc l'énergie qui le sépare de l'état cristallin. Cette énergie permet ensuite de dissoudre le laitier dans une eau – qui incidemment doit être alcalinisée. Après dissolution du laitier, on observe des précipitations de composés sous forme d'hydrates. Cette précipitation fait bien sûr baisser la concentration de certains éléments, d'où nouvelle dissolution, nouvelle précipitation et ainsi de suite. La formation du squelette cimentaire en résulte. Selon la manière dont on essaye de dissoudre le laitier, on peut obtenir toutes sortes de cristaux très spectaculaires.

Parmi d'autres concepts de liants hydrauliques, on pourrait citer les cendres volantes qui contiennent de la silice et de l'alumine mais pas de chaux, et partagent avec les laitiers la propriété d'être produites en très grandes quantités (780 millions de tonnes de cendres volantes sont produites chaque année dans le monde, dont on n'utilise que 14 %, tout le reste étant mis en décharge) et d'être affectées d'un bilan carbone nul puisqu'elles sont considérées comme des déchets (voir aussi le [Chapitre de J. Méhu](#)).

On peut aussi citer les géopolymères³. À partir de produits

3. Voir par exemple : Joseph Davidovits (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. *Geopolymer*, Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia.

à base de silice et d'alumine, au lieu de faire des cristaux qui, comme on l'a vu, s'enchevêtrent et frottent, on est capable de les assembler par polymérisation. Les géopolymères sont ainsi des ensembles de groupes $\text{SiO}_3/\text{AlO}_3$ accolés par un atome d'oxygène pour former des chaînes.

Quand le rapport Si sur Al est légèrement supérieur à 2, un réseau de polymérisation se forme et fournit une matrice solide. De très hautes propriétés mécaniques, jusqu'à 50 MPa, peuvent être atteintes avec un produit radicalement différent du béton dans lequel on a affaire à un enchevêtre de cristaux⁴.

Le défi des matériaux de structure se présente bien

Il n'est plus guère d'hésitation sur la nécessité de contrôler les émissions anthropiques de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ; tous (presque) admettent que les évolutions démographiques à venir et l'accroissement prévisible du niveau de vie des populations vont être cause d'une dangereuse dégradation du climat si aucune mesure n'est prise pour réduire les émissions. Le secteur de la construction, responsable de 40 % des émissions de gaz à effet de serre en Europe, ne peut rester passif devant cette situation. Le concept de « matériau écologique » imprègne maintenant tous les professionnels du bâtiment. Il s'agit d'orienter le choix des matériaux de construction d'une part en fonction d'une relativement faible émission de CO_2 – apprécié sur toute la vie du matériau – et d'autre part en veillant à l'économie des ressources naturelles. Le ciment classique, dont la fabrication demande une grande quantité d'énergie, est malheureusement peu « écologique ». Devant cette situation, les laboratoires ont travaillé sur de nouvelles façons d'utiliser le bois – par exemple en conjonction avec

4. Cette famille de matériaux est particulièrement étudiée à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), par Guillaume Habert.

le béton. Ils ont aussi développé de nouvelles formulations à base de silice ou d'alumine et fournies sous forme de laitier ou de cendres volantes. Ces « matériaux écologiques » ne sont pas uniquement de faibles émetteurs ; ils se révèlent également tout à fait performants pour la qualité des constructions.

Pour aller plus loin :

UNEP Sustainable Building and Climate Initiative, 2006.

Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency – Key Insights from IEA Indicator Analysis (2008). IEA. (Fichier pdf accessible sur : http://iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2026.)

UNEP Industry and environment, 2003.

OECD Measuring material flows and resource productivity, 2008. (Fichier pdf accessible sur : www.oecd.org/dataoecd/46/48/40485853.pdf.)

Commissariat Général au Développement durable - Service de l'Observation et des Statistiques : www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (2005). Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz B., Davidson O., de Coninck H.C.,

Loos M., Meyer L.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.

Vandamme M., Brochard L., Lecampion B., Coussy O. (2010). Adsorption and strain: The CO₂-induced swelling of coal. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **58** : 1489-1505.

Évaluation et maîtrise des risques de Captage, Transport et Stockage de CO₂ (CTSC) : méthodes, pratiques et perspectives. Paris, 4 au 5 novembre 2010.

Vital Forest Graphics, 2009. Rapport de l'UNEP, 68 p.

Gartner E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete Research*, **34** : 1489-1498.

Divet M.L., Leroy M.R., Fabien M.C., Parkin J. Projet : CEMROC 2005-2006, Synthèse des Résultats de la 2^e Campagne, Étude de l'effet de la durée de la cure sur la durabilité des bétons CEMROC, 6 juillet 2006.

Weil M., Dombrowski K., Buchwald A. (2009). Life-cycle analysis of geopolymers, in: Provis J.L., van Deventer S.J. (eds.). *Geopolymers, structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead publishing Ltd, Cambridge, UK, 194-210.

Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., van Deventer J.S.J. (2007). Geopolymers technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, **42** : 2917-2933.

Rowles M., O'Connor B. (2003). Chemical optimization of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite. *Journal of Materials Chemistry*, **13** : 1161-1165.

Anger R., Fontaine L. (2009). Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture. Belin, Cité des sciences et de l'industrie.

Crédits photographiques

Fig. 1, 2 et 4 : source : The Copenhagen Diagnosis (2009). *Updating the World on the Latest Climate science.*

Fig. 5B : CNRS Photothèque - Thery Hervé.

Fig. 6B, 7, 8 et 9 : source : GT 2030 du ministère de la Défense.

Fig. 10, 11A, 12 et 13 : source : Paul Acker (2010). *Clé des innovations dans la construction*, Science-driven engineering of concrete.

Fig. 11B : Licence CC-BY-SA-1.0., TCI.

Fig. 14 et 15 : équipe de R. Leroy à l'École des Ponts ParisTech.