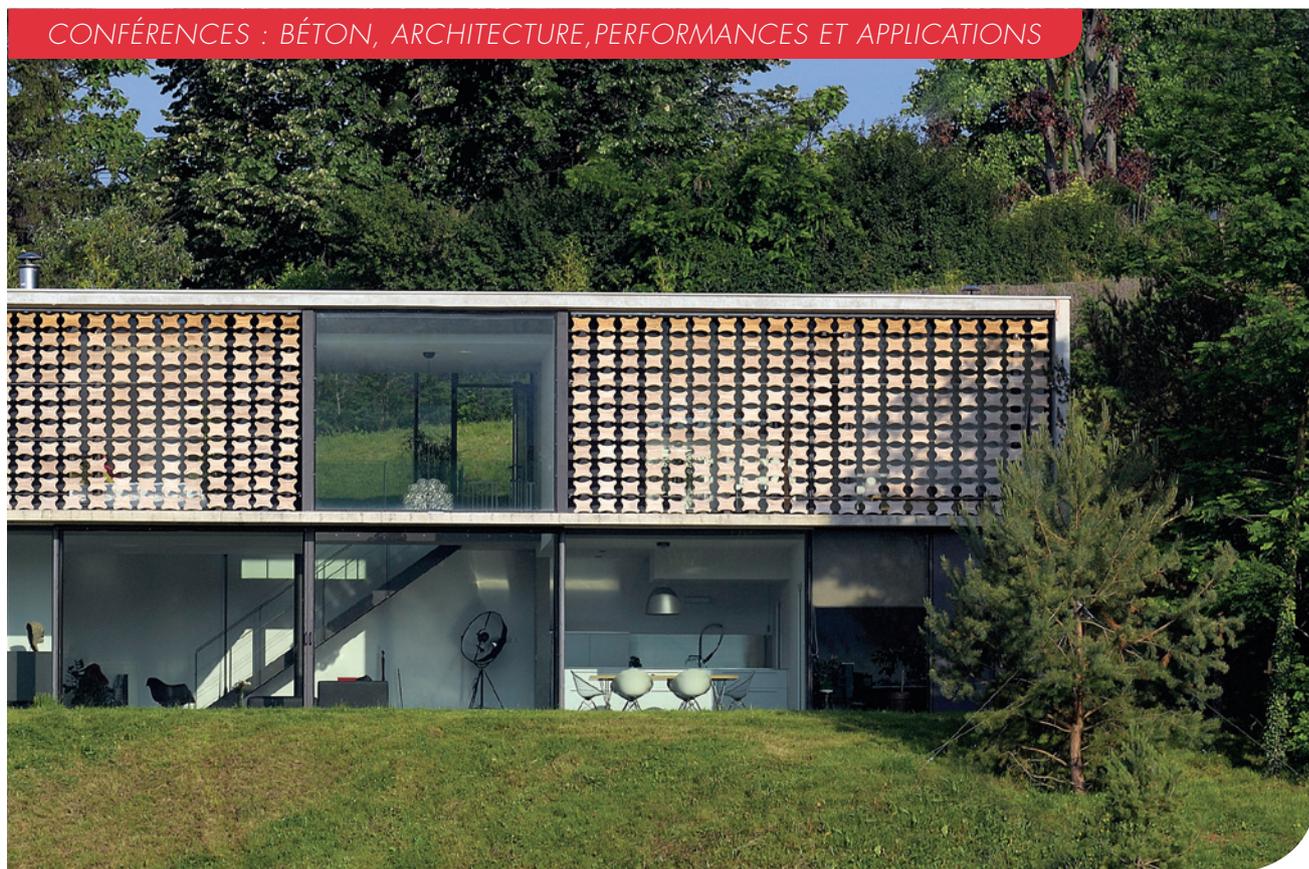


CAHIER DES MODULES DE CONFÉRENCE POUR LES ÉCOLES D'ARCHITECTURE

CONFÉRENCES : BÉTON, ARCHITECTURE, PERFORMANCES ET APPLICATIONS



Maison Biscuit, Rhône, Architecte P. Minassian, Photo E. Sailliet.

BÉTON ET ENVIRONNEMENT

ANALYSE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CONSTRUCTIONS EN BÉTONS



BÉTON ET ENVIRONNEMENT

ANALYSE DES IMPACTS
ENVIRONNEMENTAUX DES
CONSTRUCTIONS EN BÉTON

Avant-propos

● Au-delà des recommandations générales issues de la définition du Développement Durable et de l'actualité scientifique, politique et législative, des outils permettent de mesurer le véritable impact environnemental des bâtiments.

Ces outils d'Analyse du Cycle de Vie (ACV), les Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES), permettent d'opérer un choix parmi les matériaux de construction ou les technologies disponibles pour une application donnée. Ils peuvent par exemple être appliqués au cas simple de la fabrication de trois poutres de bâtiment (béton armé, bois, acier) ou à l'analyse plus complète de bâtiments dans leur totalité.

Sommaire

1. Introduction	6
1.1 - Développement durable et environnement	6
1.2 - Impacts environnementaux et choix européens	7
1.3 - Réchauffement climatique et facteur 4	8
1.4 - Environnement et choix technologiques	9

2. Analyse de cycle de vie: un outil d'aide à la décision	10
2.1 - Définition et méthodologie	10
2.2 - Étape 1 : définition du champ de l'étude	10
2.3 - Étape 2: inventaire du cycle de vie	11
2.4 - Étape 3: évaluation des impacts du cycle de vie	12

3. ACV d'une poutre de bâtiment ou le béton dans la structure	15
3.1 - Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES)	15
3.2 - Analyse du cycle de vie: définition du champ de l'étude	15
3.3 - Inventaire du cycle de vie	15
3.4 - Comparaison poutre béton armé / poutre bois lamellé collé / poutre acier	18

4. ACV d'une enveloppe de bâtiment ou le béton dans l'enveloppe	20
4.1 - Analyse du cycle de vie: définition du champ de l'étude	20
4.2 - Inventaire du cycle de vie et comparaison enveloppe légère / enveloppe lourde	20
4.3 - Analyse du cycle de vie d'enveloppes réelles	24

5. Perspectives de l'industrie du béton: les bétons à faibles impacts environnementaux	27
---	-----------

6. Bilan, conclusions et perspectives	30
--	-----------

1. Introduction

1.1 - Développement durable et environnement

Les objectifs de réduction des émissions de gaz participant au réchauffement climatique, d'augmentation de la part d'énergies renouvelables ou de protection des espèces menacées sont autant de réponses politiques et législatives aux préoccupations de la société civile relatives aux impacts environnementaux de l'activité humaine.

Ces objectifs impactent, de manière générale, nos modes de développement futurs mais aussi, de manière spécifique, nos façons de construire bâtiments et infrastructures. En France, 60 % des logements individuels et 90 % des logements collectifs sont construits en béton¹. Dans un contexte de développement durable, une telle position en terme de fabrication et de consommation fait de la relation du béton avec l'environnement une question majeure. Cette question est cependant particulièrement délicate à traiter. En effet, l'articulation existant entre les différents objectifs environnementaux que nous nous sommes fixés récemment est parfois confuse et leur transposition au domaine des matériaux de construction peut laisser la place à des interprétations très variées.

Dans ce cadre, il devient délicat de s'interroger sans préalable sur la relation d'un matériau comme le béton avec l'environnement. Il semble donc nécessaire de repartir de la définition donnée en 1987 par la commission mondiale sur l'environnement et le développement dans le Rapport Brundtland² de ce que pourrait être un développement durable : « **Un développement durable est un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs** ».

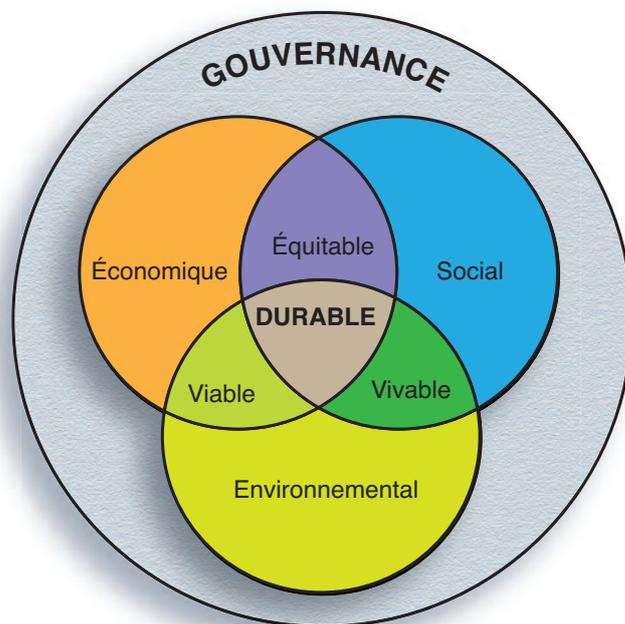


Figure 1. Schéma conceptuel du développement durable : à la confluence de trois préoccupations majeures.

Un développement durable se doit de concilier les aspects économiques, social et environnemental des activités humaines (voir la figure 1). Ces « trois piliers » sont à prendre en compte par les collectivités comme par les entreprises et les individus. À ces trois piliers s'ajoute la gouvernance, indispensable à la définition et à la mise en œuvre de politiques et d'actions relatives au développement durable. La gouvernance consiste en la participation de tous les acteurs (citoyens, entreprises, associations, élus...) au processus de décision.

Le titre de cet exposé étant « béton et environnement » et non pas « béton et développement durable », nous nous focaliserons ici uniquement sur la relation de ce matériau avec les préoccupations environnementales au sein de la construction en ignorant les aspects sociaux ou économiques. Cela signifie que nous n'étudierons pas l'influence des filières béton sur le marché du travail ou sur le développement économique. De la même manière, aucune prise en compte des aspects culturels ou esthétiques n'aura lieu dans ce texte qui,

1. BATI-ETUDES, Chiffres marché 2008.

2. Du nom de Gro Harlem Brundtland, ministre norvégienne de l'environnement présidant la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, ce rapport intitulé « Notre avenir à tous » est soumis à l'Assemblée Nationale des Nations Unies en 1986.

au contraire du développement durable, se focalisera uniquement sur un seul aspect de ce matériau aux multiples facettes.

1.2 - Impacts environnementaux et choix européens

Le volet environnement du développement durable se décline de nombreuses manières. De manière très générale, un développement durable ne doit pas consommer les ressources renouvelables de notre planète plus vite qu'elles ne se régénèrent. Il ne doit pas produire de déchets plus vite que la planète n'est capable de les absorber et, enfin, il ne doit pas menacer certaines ressources considérées comme non-renouvelables telles que la bio-diversité. Une ressource naturelle est ainsi qualifiée de non-renouvelable ou épuisable lorsque le temps nécessaire à sa création dépasse largement le temps d'une vie humaine. Le pétrole en est une bonne illustration. On parle inversement de ressource renouvelable lorsque la consommation n'épuise pas la ressource (énergie marémotrice, énergie éolienne, énergie solaire, biomasse...). Pour tout produit, service ou procédé présent dans un monde en développement durable, il est nécessaire de vérifier les conditions précédentes en évaluant ses impacts environnementaux.

Au sein de ces impacts environnementaux, il est possible de distinguer des catégories d'impact orientées « dommages » tels que l'impact sur la santé humaine ou les impacts sur l'écosystème³. Il est aussi possible de distinguer des catégories d'impact orientées « problèmes » tels que la consommation de ressources énergétiques, la production de déchets ou le changement climatique. Les impacts de type « problème », souvent plus faciles à évaluer, peuvent être transformés en impacts de type « dommage » à l'aide de modélisations scientifiques plus ou moins complexes. Par exemple, il est possible de transformer une valeur d'impact éco-toxicologique (de type « problème »)

en un nombre d'espèces animales menacées (de type « dommage »). Même si l'impact de type « problème » est ici plus facile à évaluer, c'est l'impact de type « dommage » qui est le plus parlant pour le citoyen.

Au sein de l'ensemble de ces impacts, les récentes décisions Européennes, qui vont dans le même sens que la communauté internationale dans sa majorité, ont choisi de mettre en avant deux impacts de type « problème » : la consommation de ressources énergétiques et le changement climatique. Ce choix n'est bien sûr pas arbitraire. Il apparaît en effet évident qu'un principe de développement durable, en introduisant des notions de vitesse de renouvellement, introduit une échelle de temps. Il devient alors possible au prix de prédictions scientifiques parfois particulièrement délicates de déterminer au sein des impacts environnementaux de l'activité humaine ceux dont les conséquences à court terme seront les plus marquées. Dans le cadre d'une telle approche, il a ainsi pu être montré, par exemple, que l'échelle de temps des conséquences du réchauffement climatique était de l'ordre du demi-siècle et qu'il était donc nécessaire de réagir dans cette période⁴. Cependant, il est important de garder en tête que construire un monde en développement durable ne pourra se faire en se focalisant uniquement sur deux objectifs, aussi pressant soient-ils. La plupart des évolutions technologiques ou comportementales réduisant le niveau d'une de ces deux catégories d'impacts risqueraient en effet de se faire sous la forme d'une augmentation simultanée du niveau d'autres catégories d'impact considérées comme moins prioritaires. Ce phénomène de « transfert de pollution » ne générerait pas un monde en développement durable mais un monde oscillant d'une menace environnementale à une autre en fonction de priorités fluctuantes. C'est dans une approche globale prenant en compte l'ensemble des impacts environnementaux que se situe l'essence même du développement durable. Les décisions et législations actuelles focalisées sur deux catégories d'impact majeures constituent cependant des avancées dont nous ne pouvons que nous réjouir.

3. Bare, J.C., P. Hofstetter, D.W. Pennington, and H.A. Udo de Haes. (2000). « Life Cycle Impact Assessment Midpoints vs. Endpoints – The Sacrifices and the Benefits. » *International Journal of Life Cycle Assessment*.

4. Bernstein L.J., Roy K.C.; Delhotol J.; Harnisch R.; Matsuhashi L.; Price K.; Tanaka E.; Worrell F.; Yamba Z.; Fengqi 2007. Industry. In *Climate Change 2007 : Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

1.3 - Réchauffement climatique et facteur 4

Entre 1990 et 2000, les émissions annuelles de gaz à effet de serre d'origine humaine (à distinguer des émissions naturelles⁵, biomasse et activité volcanique par exemple) ont été en moyenne de 6,4 milliards de tonnes d'équivalent carbone (nous reviendrons plus loin sur cette unité de mesure) et elles ont atteint en valeur moyenne 7,2 milliards de tonnes entre 2000 et 2005. En France, en 2007, 92 % des émissions de CO₂ se répartissaient entre le transport routier (30 %), l'industrie (25 %), les logements et bureaux (21 %) et la transformation d'énergie (16 %)⁶.

Les océans absorbent de l'ordre de 2 milliards de tonnes d'équivalent carbone et environ 1,7 milliards de tonnes supplémentaires sont absorbés par la biosphère continentale (via la réaction de photo-

synthèse des espèces végétales présentes sur nos continents). Cependant, l'écart entre émissions d'origine humaine et absorption naturelle est devenu trop important et plus de 3,5 milliards de tonnes d'équivalent carbone ne sont plus absorbées et contribuent à augmenter fortement l'effet de serre. Le rayonnement solaire à hautes fréquences est à même de franchir les couches de gaz de notre atmosphère réchauffant ainsi notre planète. En contrepartie, cette dernière émet un rayonnement infrarouge à basse fréquence qui ne peut franchir les couches de gaz à effet de serre et participe donc à une augmentation de la température moyenne à la surface de notre planète. Les données accumulées par le GIEC (Groupe Intergouvernemental des experts étudiant l'Évolution du Climat) prévoyaient, début 2007, un réchauffement global compris entre 1,1 à 6,4 °C pour la fin du XXI^e siècle avec une forte probabilité pour une valeur comprise entre 1,8 et 3,4 °C entraînant de graves impacts écologiques, sociaux et économiques⁷.

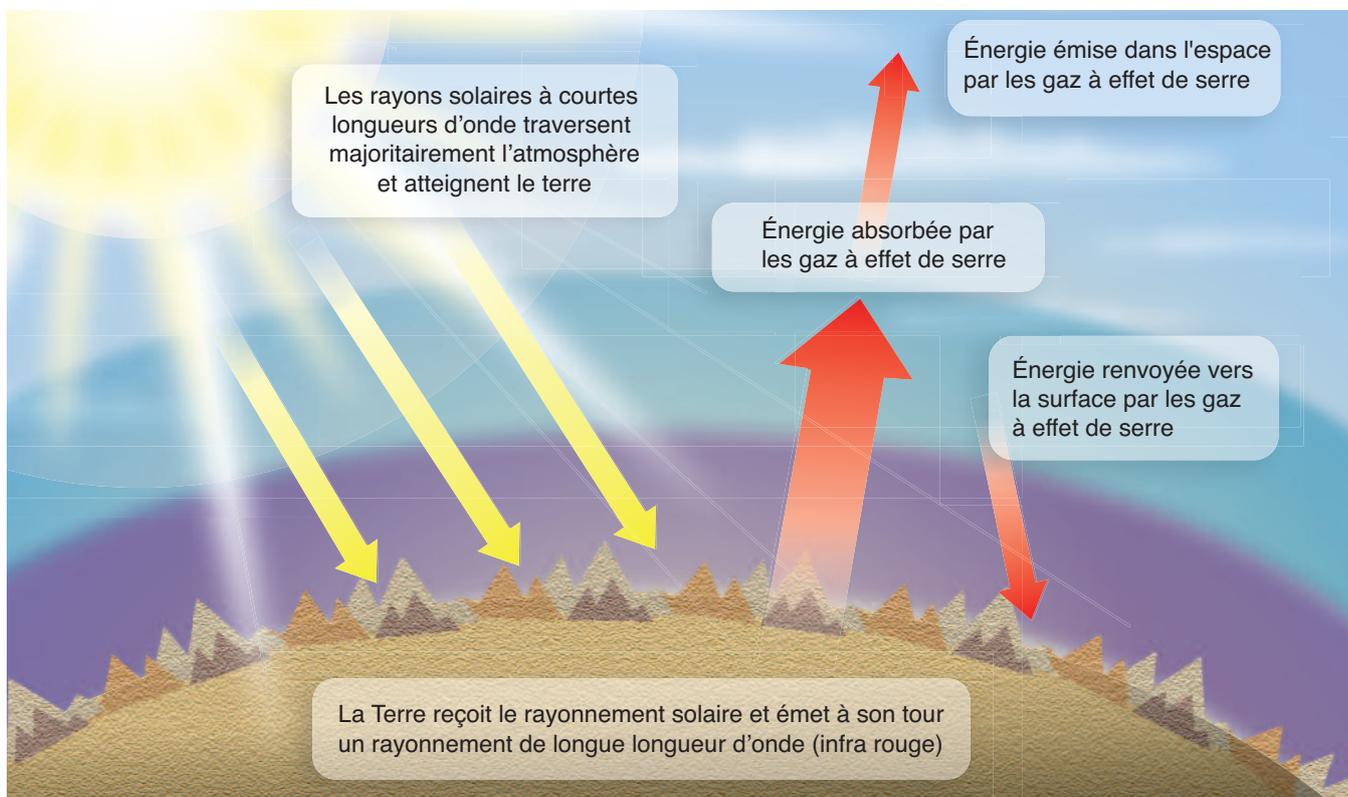


Figure 2. Principe de l'effet de serre.

5. Stuiver, M., Burk, R. L. and Quay, P. D. (1984). 13C/12C ratios and the transfer of biospheric carbon to the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 89, 1731-1748.

6. Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la pollution atmosphérique (CITEPA), <http://www.citepa.org/index.htm>.

7. *Climate Change 2001 : Working Group I : The Scientific Basis (chapitre 12 : les bases scientifiques)*, 2001, GIEC.

Dans le cadre d'un développement durable, il serait nécessaire d'équilibrer production de CO₂ et capacité d'absorption de la planète. Cela signifie diviser par deux le niveau moyen de nos émissions mondiales annuelles. Les données du GIEC permettent d'estimer que cette réduction majeure doit avoir lieu avant 2050 de façon à limiter les conséquences du réchauffement. Cependant, les pays en développement ont une marge de manœuvre réduite; leurs émissions à court et moyen terme ne peuvent que s'accroître de par une évolution rapide et inévitable de leurs modes de vie. Les pays développés se sont donc engagés à prendre à leur charge la majeure partie de l'effort.

D'un point de vue **international**, la gouvernance sur le climat repose sur deux traités fondamentaux: la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC ou UNFCCC en anglais), ouverte à ratification en 1992 et entrée en vigueur le 21 mars 1994, a été ratifiée à ce jour par 189 pays dont les États-Unis et l'Australie. Son traité fils, le protocole de Kyoto, a été ouvert à ratification le 16 mars 1998, et est entré en vigueur en février 2005. Il a été ratifié à ce jour par 172 pays à l'exception notable des États-Unis.

Depuis le début des années 1990, le changement climatique est devenu une priorité de l'agenda politique au niveau **européen**. Alors que le protocole de Kyoto contraint les pays industrialisés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'environ 5 % par rapport aux niveaux de 1990, entre 2008 et 2012, l'Union Européenne a décidé de les réduire de 8 % au cours de cette période. Lancé en 2000, le programme européen sur le changement climatique (PEEC) tente de répondre aux engagements de l'UE dans le cadre du protocole de Kyoto en prenant des initiatives dans de nombreux domaines, dont la promotion des sources d'énergie renouvelables et des mesures d'économie d'énergie pour les bâtiments et les voitures.

La **France** vise, dans ce cadre et à plus long terme, à diviser par quatre d'ici 2050 ses émissions de gaz à effet de serre. Cet objectif a été successivement inscrit dans sa « Stratégie nationale de développement durable » en juin 2003, dans son « Plan climat » de juillet 2004 puis dans la « Loi de programme fixant les orientations de sa politique

énergétique » en juillet 2005, avec confirmation en 2007 dans le Grenelle de l'environnement.

1.4 - Environnement et choix technologiques

Si les objectifs du développement durable font l'objet d'un relatif consensus, c'est son application qui demeure source de débats. La réponse majoritaire actuelle est d'ordre scientifique: à chaque problème environnemental correspondrait une solution technique, solution supposée disponible dans un monde économiquement prospère⁸. L'une des réponses apportées du point de vue technologique consiste ainsi à rechercher la « Meilleure Technologie Disponible » pour un besoin identifié. Cette « Meilleure Technologie Disponible » correspondrait à la technologie permettant de répondre à ce besoin tout en ayant des impacts environnementaux inférieurs à ceux de toutes les autres technologies concurrentes et potentielles.

L'application de ce concept au domaine de la construction permet de se poser la question de la définition d'un éco-matériau de construction (ou de manière plus générale et plus pertinente comme nous allons le voir, d'un éco-produit ou d'un écosystème de construction). Une définition courante⁹, puisqu'il n'existe pas de consensus et encore moins de label, est celle d'un élément de construction dont les impacts environnementaux impliqués dans sa fabrication et son utilisation sont les plus faibles possible. Il semblerait donc qu'un éco-produit de construction corresponde à la « Meilleure Technologie Disponible » pour un besoin identifié.

De façon à pouvoir tenir un discours raisonné et, dans un processus de conception de bâtiment ou d'ouvrages, opérer un choix parmi les matériaux de construction ou les technologies à notre disposition pour une application donnée, il est nécessaire de disposer d'outils de quantification des impacts environnementaux. Seuls ces outils permettront l'identification au sein d'un ensemble de matériaux de construction de ceux que nous pourrions appeler véritablement et de façon raisonnée des éco-matériaux.

8. Aurélien Boutad, *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?*

École Supérieure des Mines de Saint-Etienne (thèse de Science et Génie de l'environnement), Saint-Etienne, 2005.

9. <http://www.economiedenergie.fr>

2. Analyse de cycle de vie : un outil d'aide à la décision

2.1 - Définition et méthodologie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) fournit un moyen efficace et systématique d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Ces impacts sont évalués depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement du produit en fin de vie (recyclage inclus).

Cette méthode, apparue dans les années 70, fait désormais partie des méthodes couramment utilisées en gestion de l'environnement, notamment depuis sa normalisation avec la série des normes ISO 14000 concernant la gestion de l'environnement.

L'ACV procure une évaluation des impacts environnementaux liés non pas au produit lui-même mais à la fonction du produit. En effet, en se limitant aux impacts environnementaux d'une quantité donnée du produit seul, il deviendrait difficile de comparer des produits remplissant la même fonction mais de manière différente et ainsi de déterminer pour une fonction donnée la « Meilleure Technologie Disponible ».

L'ACV est un processus itératif constitué de quatre étapes principales dont la structure est standardisée par la norme ISO 14044. La dernière étape est une étape de contrôle et d'analyse des données que nous ne détaillerons pas ici. Elle est cependant fondamentale pour la qualité et la réutilisation ultérieure des résultats obtenus. Dans le cas de résultats amenant à comparer des produits ou procédés, le rapport d'ACV comporte parfois une revue critique, c'est-à-dire l'examen de l'étude par un expert indépendant de sa réalisation. Cette revue est souhaitable, encore optionnelle, mais tend à se généraliser.

2.2 - Étape 1 : définition du champ de l'étude

Il est tout d'abord nécessaire de définir la fonction du produit ou procédé qui servira de référence à l'étude. Un exemple souvent retenu et que nous reprendrons ici aussi est celui de la peinture murale.

Exemple : quelle est la fonction d'une peinture murale ? Une réponse courante et pragmatique sera de « protéger et colorer un mur ».

De façon à quitter le domaine purement qualitatif, il est ensuite nécessaire de définir une **unité fonctionnelle** qui représente une quantification de la fonction. Comme toute unité, elle se doit d'être précise, mesurable et additive. Dans le domaine de la construction, il est indispensable, à ce stade, de définir une **Durée de Vie Typique (DVT)** pour le produit étudié.

Exemple : dans le cas de la peinture, l'unité fonctionnelle pourrait être de protéger et colorer un m² de mur pendant 10 ans.

Cette étape est bien sûr fondamentale puisqu'il est possible de faire de tout matériau un éco-matériau en choisissant une fonction très limitative. Dans le cas d'un matériau tel que le béton, qui participe à la fois à la structure et à l'enveloppe d'un bâtiment, il est particulièrement facile de définir une fonction permettant d'écarter tous les autres matériaux qui n'ont pas ces possibilités ou des systèmes composites. Une grande attention devra donc être prêtée à cette phase fondamentale pour la validité des conclusions tirées de l'ACV.

Exemple : quelle est la Meilleure Technologie Disponible permettant de parcourir en écoutant la radio très fort 100 km en moins d'une heure ? La seule réponse existante appartiendra à la famille des voitures faisant de la moins polluante d'entre

elles un éco-produit pour cette fonction très (trop ?) spécifique. Cette définition de fonction aura ainsi, de façon indirecte, éliminé les transports collectifs et les vélos. Dans le cas de la peinture, la fonction et l'unité fonctionnelle définies au-dessus sont suffisamment ouvertes pour comparer des peintures entre elles, mais aussi d'autres produits comme du papier peint.

Il est ensuite nécessaire d'identifier le flux de référence (volume, masse, surface...), qui désigne la quantité du produit analysé et de consommables nécessaires pour rencontrer les besoins de l'unité fonctionnelle.

Exemple : dans le cas de la protection et de la coloration d'un mur, le flux de référence pourrait être : 5 kg d'une peinture P1 nécessitant l'application de 2 couches épaisses, ou 7 kg d'une peinture P2 nécessitant l'application de 2 couches fines puis un entretien d'une couche fine tous les 4 ans, ou 1,4 kg de papier peint et 100 grammes de colle.

Une telle démarche prend donc en compte de façon indirecte les performances des matériaux et des procédés.

Exemple : une peinture plus « couvrante » P1 ne nécessitera qu'une couche alors qu'une peinture P2 en nécessitera deux. La meilleure performance de la peinture P1 pourrait donc justifier son appellation en tant qu'éco-matériau même si le bilan environnemental par kilogramme de peinture P1 est moins bon que celui de la peinture P2. À l'échelle de la fonction considérée, c'est en effet le bilan global de la peinture P1 qui sera le plus faible.

Par ailleurs, une peinture plus « résistante » P3 aura une durée de vie de 10 ans alors que les peintures P1 et P2 n'auront qu'une durée de vie de 8 ans. Il sera donc nécessaire de prendre en compte la deuxième couche de peinture ou l'entretien des peintures P1 et P2 leur permettant d'atteindre la Durée de Vie Typique (DVT) définie dans la fonction. Là encore, à l'échelle de la fonction considérée, le bilan global de la peinture P3 pourrait, grâce à cette propriété de « résistance » être le plus faible.

Une fois la fonction, l'unité fonctionnelle et le flux de référence définis, il convient alors de définir les limites du système qui sera étudié. En effet, le cycle de vie d'un matériau ou d'un produit contient généralement de très nombreux processus élémentaires (transport, ensachage, broyage, malaxage,

cuisson...). En théorie, chaque processus élémentaire ayant un impact environnemental devrait être pris en compte. Cependant, pour un système un minimum complexe, cela amène d'innombrables processus élémentaires, certains ayant une contribution particulièrement faible. Un processus élémentaire dont la contribution est infime peut ainsi être retiré selon des critères d'exclusion à définir.

Exemple : La peinture de la carrosserie du camion transportant la peinture de l'usine de fabrication aux sites de distribution peut être considérée comme étant en dehors du système considéré. Elle sera prise en compte indirectement via l'utilisation de données agrégées concernant les impacts environnementaux du transport par camion.

Les étapes générales à considérer sont alors :

- l'acquisition des matières premières et les sources d'énergie ;
- le transport et la distribution ;
- les étapes de production ;
- l'utilisation du produit et son entretien ;
- la gestion de la fin de vie (recyclage, destruction, entreposage, revalorisation, etc.) ;
- la production/vie/fin de vie des infrastructures nécessaires à toutes ces étapes.



Pré-traitement de bétons de démolition avant leur recyclage.

2.3 - Étape 2 : inventaire du cycle de vie

Lors de l'inventaire du cycle de vie, il est tout d'abord nécessaire de quantifier tous les flux élémentaires associés à chaque processus élémentaire impliqué dans le système à l'intérieur des frontières de l'étude. Pour chaque étape du système, il faut quantifier tout ce qui entre et tout ce qui sort.

Ainsi, le transport de sable par camion par exemple produit 0,05 gramme de CO₂ par kilomètre et par kilogramme de sable.

Une deuxième étape consiste à mettre à l'échelle l'ensemble des flux élémentaires en fonction du flux de référence.

Si le flux de référence étudié est par exemple un mètre cube de béton contenant 800 kg de sable, les émissions de CO₂ dues au transport par camion du sable dans le cycle de vie d'un mètre cube de béton seront de $0,05 \times 800 = 40$ g de CO₂ par kilomètre parcouru par le sable avant son incorporation dans le béton.

Enfin, les données associées à chaque processus élémentaire sont agrégées pour obtenir les flux liés au cycle de vie du produit considéré.

Par exemple, toutes les émissions de CO₂ de tous les processus élémentaires sont additionnées en une seule valeur. Le CO₂ émis lors du transport du sable sera ainsi ajouté à celui émis lors du transport du ciment et du gravier, ainsi qu'à celui émis lors du transport du béton à la livraison du béton sur chantier, mais aussi à celui émis lors de l'extraction des granulats dans la carrière ou au sein des réactions chimiques ayant lieu dans le four de la cimenterie.

Nous avons cité le CO₂ à titre d'exemple dans les paragraphes précédents mais les flux élémentaires sont en fait constitués de tous les flux de matières (ressources minérales, fer, bauxite, eau...) et de ressources naturelles énergétiques (pétrole, gaz, charbon, uranium...) entrant dans le système étudié et des flux sortants correspondants (déchets, émissions gazeuses ou liquides...). Il existe des bases de données d'inventaires de cycle de vie. Elles sont plus particulièrement disponibles dans les domaines des matières premières courantes, de l'énergie et des transports. Ces données sont regroupées dans des bases de données publiques ou payantes (Eco-invent, DEAM, Gabi...).

Par ailleurs, certains groupements ou fédérations professionnelles ont rassemblé des données sur les impacts environnementaux de leurs matériaux et systèmes tout au long de leurs cycles de vie ou sur la partie amont de ces cycles. Ils les mettent à disposition des utilisateurs de ces matériaux afin qu'ils les intègrent dans leurs propres Analyses de Cycle de

Vie. Il peut être utile de garder en tête que les valeurs fournies sont en général des valeurs moyennes nationales et qu'elles ne peuvent rendre compte de certaines pratiques locales ou spécifiques plus ou moins favorables que la valeur moyenne nationale.

2.4 - Étape 3 : évaluation des impacts du cycle de vie

L'évaluation des impacts du cycle de vie vise à transformer les flux obtenus lors de l'inventaire du cycle de vie en une série d'impacts clairement identifiables ou d'impacts potentiels. Tout comme le reste de l'analyse du cycle de vie, l'évaluation des impacts est fondée sur une unité fonctionnelle. La chaîne de cause à effet pour les problématiques environnementales est complexe et certaines substances émises peuvent avoir des impacts multiples dans différentes catégories.

Les catégories d'impact que nous avons déjà évoquées en introduction sont de deux types. Elles peuvent être orientées « dommages » ou elles peuvent être orientées « problèmes ».

- **Le réchauffement climatique** désigne la conséquence climatique des émissions humaines atmosphériques de gaz dits à effet de serre (CO₂, méthane...). Ces gaz perturbent l'équilibre radiatif de notre planète et provoquent une augmentation de la température moyenne de notre planète (voir la figure 2).

- **La destruction de l'ozone stratosphérique** trouve son origine dans les émissions humaines de gaz de type CFC (ChloroFluoroCarbonate) qui réagissent à haute altitude avec l'ozone. L'appauvrissement de la couche d'ozone entraîne alors une augmentation des rayonnements ultraviolets atteignant la Terre avec des conséquences sur la santé humaine et sur le changement climatique.

- **L'acidification** est la conséquence de l'émission dans l'air, l'eau et les sols de substances acides telles que SO₂ et NO_x. Les impacts négatifs sur le sol, les écosystèmes et les organismes vivants peuvent être très variés.

- **L'eutrophisation** est la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, liées en général à un

apport exagéré de substances nutritives telles que azote (nitrates par exemple), carbone (carbonates, matières organiques) et phosphore (phosphates).

- **La formation d'agents photo-oxydants** est la conséquence de l'action du rayonnement solaire sur certains produits chimiques volatiles. Ces agents sont nocifs et sont à l'origine de phénomènes comme le brouillard persistant au-dessus de villes telles que Los Angeles (« Los Angeles summer smog »).

- **L'atteinte des ressources abiotiques** représente la consommation de ressources non vivantes telles que énergie fossile, minerais ou l'énergie solaire. Certaines de ces ressources peuvent être renouvelables. Rappelons ici qu'il existe plusieurs façons de quantifier la consommation de ressources énergétiques. Il est notamment possible de s'intéresser à la consommation brute d'énergie, à l'énergie au niveau de l'extraction et/ou de la production (**énergie primaire**), ou bien à la consommation au niveau de l'utilisateur final (**énergie finale**). À cause des pertes d'énergie lors de la production et du transport de l'énergie, la quantité d'énergie finale est toujours plus faible que l'énergie primaire. La différence est faible pour l'industrie des carburants. En revanche, la différence est très importante pour l'industrie de la production électrique dont les pertes sont de l'ordre de 60 %. Ainsi, en France, 1 kWh d'énergie finale électrique correspond à 2,58 kWh d'énergie primaire.

- **L'atteinte des ressources biotiques** représente la consommation de ressources vivantes telles que la forêt tropicale ou la biodiversité.

- **L'impact éco-toxicologique** regroupe l'ensemble des substances pouvant menacer les écosystèmes aquatiques et terrestres.

- **L'impact toxicologique** regroupe l'ensemble des substances pouvant menacer la santé humaine.

Prenons ici comme objet d'étude le cas des substances participant au réchauffement climatique. Il est généralement admis que le CO₂ est la substance de référence. Toutes les autres substances participant à cet impact vont être ainsi converties en équivalent CO₂ (ou équivalent carbone avec 1 kgEq.CO₂ = 0,2727 kgEq.Carbone) en fonction de leur potentiel d'impact. Il est communément admis que le méthane a un potentiel d'impact 20 fois plus important que le CO₂. Chaque gramme de méthane équivaldra donc à 20 grammes équivalent CO₂. C'est pourquoi il peut être plus intéressant de brûler du bois de déconstruction en

produisant du CO₂ mais en récupérant de l'énergie que de le laisser se décomposer en décharge en produisant du méthane. Cette notion d'équivalence est bien sûr discutable. On caractérise ainsi le méthane (par rapport au CO₂) en fonction de sa contribution à la perturbation du bilan des radiations thermiques de notre planète. Or, le méthane a une durée de vie dans l'atmosphère quinze fois plus courte que le CO₂ (10 ans contre 150 ans). Sur un horizon de 10 ans, il est généralement considéré avec un facteur de 62 par rapport au CO₂ alors qu'à très long terme, 500 ans, ce facteur est ramené à 7,5. Le facteur 20 retenu dans la pratique correspond à une échelle de 100 ans, qui correspond à un choix arbitraire mais qui a l'avantage d'être commun à de nombreuses méthodes d'évaluation des impacts environnementaux.

Les valeurs d'impacts s'expriment alors sous une forme particulièrement peu accessible. Ainsi, le résultat d'une Analyse de Cycle de Vie pourra nous apprendre par exemple que le cycle de vie d'un mètre carré de tuiles béton génère 10,5 kgEq.CO₂ et 720 grammes de déchets non inertes et consomme 120 Mj joules d'énergie primaire¹⁰. Rares sont les professionnels à même d'émettre un avis sur ces chiffres bruts. De façon à donner à ces valeurs d'impacts un sens, il est possible de les « normer », c'est-à-dire de les ramener à des valeurs de référence telles que les valeurs d'impact environnemental d'un citoyen Européen par exemple. Un Européen produit environ 12 tonnes d'équivalent CO₂ et 250 kg de déchets non inertes par an et consomme par ailleurs une énergie primaire de l'ordre de 150 000 Mj joules (environ 42 000 kWh)¹¹. Ce mètre carré de tuiles béton aura des valeurs d'impact normées égales 0,09 % de l'équivalent CO₂ émis par un Européen, 0,09 % de l'énergie primaire consommé par un Européen et 0,29 % des déchets générés par un Européen. Pour être tout à fait correct et pertinent, il serait bien sûr préférable de connaître par ailleurs le nombre de mètres carrés de tuiles béton consommés en moyenne par an par un citoyen Européen. Cependant, le fait que l'impact normé « production de déchets non inertes » soit trois fois supérieur à l'impact normé « énergie » ou « changement climatique » ne dépend pas de ce chiffre qui est lui lié à la consommation. Cette simple normation permet donc de détecter, au sein des impacts environnementaux d'un matériau, les impacts dominants

10. Fiche de Déclaration Environnementale et sanitaire, Tuile béton, CERIB, <http://www.cerib.com>.

11. RECORD, Valeurs de normation pour les indicateurs environnementaux, 2002, 32 p., N°01-1009/1A.

et les impacts négligeables quelle que soit la quantité totale du produit consommé dans nos sociétés. Dans la suite de l'étude de ce produit ou dans une optique de réduction de ses impacts, il conviendrait alors de se focaliser sur la génération de déchets non inertes puisque la normation des impacts du matériau nous apprend que, des trois impacts considérés dans cet exemple, c'est dans ce domaine que le mètre carré de tuile béton a les contributions les plus significatives aux impacts globaux de notre société.

Enfin, il est possible d'agrèger l'ensemble des données en une valeur (ou note) unique. Bien que cette étape soit celle qui amène le résultat le plus lisible, elle est aussi l'une des plus subjectives. L'objectif est de donner des valeurs de pondération à toutes les catégories afin de les agréger en un score unique. Cette étape fait cependant disparaître beaucoup d'informations et se fait par un choix de pondération qui reste subjectif puisqu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthode permettant de déterminer l'impact environnemental le plus menaçant. De façon très simplifiée, les prédictions scientifiques actuelles permettent d'estimer approximativement le temps nécessaire pour qu'un type d'impact affecte nos modes de vie mais il leur est beaucoup plus difficile de fournir une estimation des dommages que cet impact nous infligera. Il semble donc particulièrement délicat de choisir au sein de ces indicateurs les plus importants ou de leur attribuer une pondération dans l'estimation d'une note finale environnementale d'un produit, un service ou d'un procédé. La « note environnementale » finalement obtenue, en dissimulant les hypothèses et la complexité du calcul et en se fixant une pondération discutable des impacts environnementaux ne constituera probablement qu'une réponse abusivement simplificatrice.

Malgré ces réserves, il peut tout de même être intéressant de décrire ici les méthodes existantes de pondération. Elles se divisent en 4 catégories.

- L'évaluation des coûts de prévention: elle consiste à calculer les coûts de prévention (ou de

correction) économiques ou énergétiques pour un impact donné. Ceci reste souvent difficile à évaluer comme évoqué ci-dessus et ceci particulièrement pour les impacts globaux tels que le changement climatique.

- L'évaluation par des experts: elle reste délicate car les experts transversaux restent rares et chacun tend, en toute bonne foi, à privilégier l'impact lié à son domaine d'expertise.

- Le dépassement d'un seuil: elle consiste à fixer des seuils communément acceptés pour chaque catégorie d'impact et à pondérer en fonction de l'écart existant avec ces seuils.

- L'évaluation sociale: elle consiste à interroger les populations sur l'importance relative qu'elles donnent à chacun des impacts (voir la figure 3). En se plaçant dans un cadre de lecture tel que l'analyse culturelle de Marie Douglas¹²⁻¹³, il est possible de distinguer des archétypes de comportement des individus et donc des sociétés qu'ils constituent vis-à-vis de l'environnement. De façon très simplifiée, il semble que le positionnement moyen des Européens soit entre **égalitaire** (tous les impacts mêmes ceux dont les conséquences sont les plus complexes à évaluer sont à prendre en compte) et individualiste (la santé humaine et la qualité des écosystèmes priment sur l'épuisement des ressources).

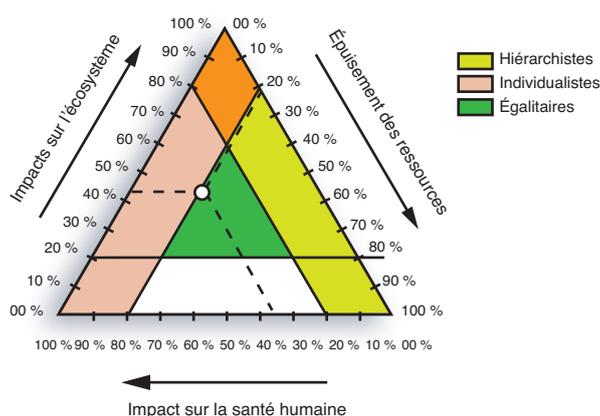


Figure 3. Évaluation sociale des impacts de type « dommage ». Le cercle noir et blanc correspond aux résultats d'un sondage publié en 1999 dans une revue scientifique ¹⁴.

12. Douglas M. (1978), *Cultural Bias*, London, Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, Occasional paper n° 35.

13. Thompson M., Ellis R., Wildavsky A. : *Cultural Theory*. Westview Print, Boulder USA, 1990.

14. Mettler T. : *Der Vergleich von Schutzgutern - Ausgewählte Resultate einer Panel-Befragung*. In : Hofstetter P., Mettler T., Tietje O. (eds.), *Ansätze zum Vergleich von Umweltschäden, Nachbearbeitung des 9. Diskussionsforums Oekobilanzen vom 4. Dezember 1998, ETH Zürich, Switzerland, 1999*

3. ACV d'une poutre de bâtiment ou le béton dans la structure

3.1 - Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES)

Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) fournissent, pour un produit de construction donné (défini par son unité fonctionnelle), des informations sur ses caractéristiques environnementales et sanitaires pour toutes les phases de la vie du produit (production, transport, mise en œuvre, vie en œuvre et fin de vie). La méthodologie est de type Analyse du Cycle de Vie et dix impacts environnementaux ont été retenus, parmi lesquels: la consommation de ressources énergétiques, la consommation d'eau, le changement climatique, la pollution de l'air, de l'eau, des sols, etc. Les résultats obtenus représentent une moyenne nationale des différentes usines et filières disponibles.

La norme AFNOR NF P 01-010 pour les FDES définit les principes applicables à la fourniture d'informations sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction, destinées à être connues et publiques. Elle établit les bases communes pour la délivrance d'une information objective. Ces fiches sont disponibles sur le site du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB, base INIES¹⁵).

Nous utilisons ici les données tirées de la FDES Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II (septembre 2007) réalisée par le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi (SNBPE). Il pourrait nous être reproché d'utiliser des données regroupées par un syndicat industriel directement concerné par la perception environnementale du matériau béton. Cependant, les données regroupées le sont dans le respect d'une norme stricte commune à tous les fabricants de matériaux de construction. Par ailleurs, nous utiliserons aussi dans la suite de ce texte la FDES poutrelle en acier (décembre 2007)

réalisée par l'Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier (OTUA) ainsi que la FDES poutre en bois lamellé collé (septembre 2007) réalisée conjointement par l'institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) et le Syndicat National du Bois Lamellé-collé (SNBL). Ces organismes sont aussi des syndicats industriels qui ne visent, en réalisant ce type de fiche, qu'à une transparence de leurs méthodes de production et des impacts environnementaux associés, transparence nécessaire à l'analyse du cycle de vie du bâtiment dans lequel ce type de matériau sera utilisé.

3.2 - Analyse du cycle de vie: définition du champ de l'étude

Comme décrit précédemment, il est d'abord nécessaire de définir de façon objective la fonction d'une poutre. **La fonction** que nous retenons ici est de supporter des charges de poids propre et d'exploitation pendant 100 ans. **L'unité fonctionnelle** est ainsi de supporter des charges de 350 kg/m² pendant 100 ans et **le flux de référence** considéré est une poutre en béton C25/30 de section rectangulaire 35 x 20 cm et de portée 6,40 m 1 030 kg de béton et 57,6 kg d'armatures sont nécessaires à la réalisation de cet élément constructif.

3.3 - Inventaire du cycle de vie

Nous ne rentrerons pas ici dans le traitement des données nécessaires à l'établissement de l'inventaire de cycle de vie de cette poutre en béton armé. À partir de la FDES de la poutre béton armé qui fournit des impacts par kilogramme de poutre et de la masse de béton donnée ci-dessus, il

15. <http://www.inies.fr/>

devient possible par une série de calculs simples d'obtenir l'intégralité des impacts de type FDES de la poutre que nous étudions ici. Il est alors intéressant de retenir de cet inventaire les points suivants.

Les principales ressources naturelles consommées sont des granulats (sable et gravillons), du calcaire et de l'argile. 99 % en masse des ressources non énergétiques consommées correspondent à des matériaux minéraux extraits pour la production des granulats du béton et la production du ciment. Il est intéressant de noter que, dans de nombreuses autres méthodes d'évaluation d'impact, l'exploitation de ce type de ressources ne serait pas considérée comme un impact. En effet, le stock de calcaire et d'argile accessible à la surface de notre planète est tel que, dans la majorité des approches plus traditionnelles d'ACV, ces matériaux ne sont pas considérés comme des ressources non renouvelables puisque leur exploitation n'affecte que très peu le stock disponible. Ceci n'est pas le cas de la méthodologie FDES qui est un outil spécifique du domaine de la construction, grand consommateur de ce type de matières premières.

L'eau consommée rentre en majeure partie (77 %) dans la production et la composition du béton de la poutre. Recyclée, elle sert au lavage des camions toupies permettant le transport du béton et du malaxeur permettant sa fabrication. Les autres consommations comptabilisées sont indirectes et proviennent d'étapes amont et aval telles que la production d'électricité, le raffinage de carburant pour le transport, la production des matières premières...

Les gaz contribuant au réchauffement climatique sont émis lors de la production (75 %), de la mise en œuvre (17 %), de la fin de vie (6 %) et du transport des matériaux (2 %). À l'étape de production, les principales sources d'émissions sont la production de ciment (87 %), le transport amont (5 %), la production de granulats (4 %) et la production de sable (2 %). Les distances moyennes parcourues sont de l'ordre de cinquante kilomètres. Les composants du béton étant disponibles en

grande quantité un peu partout, le béton est donc un matériau local utilisé à proximité de son lieu de production et la contribution du transport aux impacts du matériau reste faible.

La poutre après mise en œuvre est inerte. En fin de vie, elle est soit valorisée soit mise en décharge agréée. Les principales étapes génératrices de déchets non valorisés et non inertes sont celles de la production et de la mise en œuvre. Pour ces deux étapes, il s'agit essentiellement du béton non mis en œuvre (surplus, retours...). Les principaux déchets générés sont majoritairement des déchets valorisés et des déchets inertes. Dans le souci de ne conserver qu'un nombre d'impacts réduits mais significatifs pour ce type de matériaux, nous ne considérerons cependant dans la suite de cet exposé que les déchets non valorisés et non inertes car ils sont les plus impactant malgré leur volume réduit.

L'ensemble des catégories d'impact de type FDES pour cette poutre en béton armé est représenté sur la figure 4. Comme évoquée précédemment, ces valeurs d'impacts s'expriment sous une forme particulièrement peu accessible et il reste délicat d'émettre un avis sur ces chiffres bruts. De façon à donner à ces valeurs d'impacts un sens, il est possible de les « normer », c'est-à-dire de les ramener à des valeurs de référence telles que les valeurs d'impact environnemental de type FDES d'un citoyen Européen (calculées suivant la norme AFNOR NF P 01-010 à partir de ⁹ et de ¹⁶), (voir la figure 5). Cette simple normation permet alors de détecter au sein des impacts environnementaux de cette poutre béton armé les impacts dominants (épuisement des ressources (1 %), changement climatique (0,9 %) et déchets solides 0,8 %) et les impacts négligeables (destruction de la couche d'ozone). Une autre façon de lire ces résultats consiste à constater que les impacts annuels époussement des ressources, changement climatique et déchets solides d'un citoyen Européen correspondent respectivement à 100, 111 et 125 poutres en béton armé identiques à celle que nous avons étudiée ici.

16. Guinée J.B. (final editor), M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, L. van Oers, A. Wegener Sleeswijk – S. Suh – H. A. Udo de Haes, H. de Bruijn – R. van Duin – M.A.J. Huijbregts, 2001. *Life Cycle Assessment An operational guide to the ISO standards, Volume 1, 2 en 3. Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, the Netherlands*

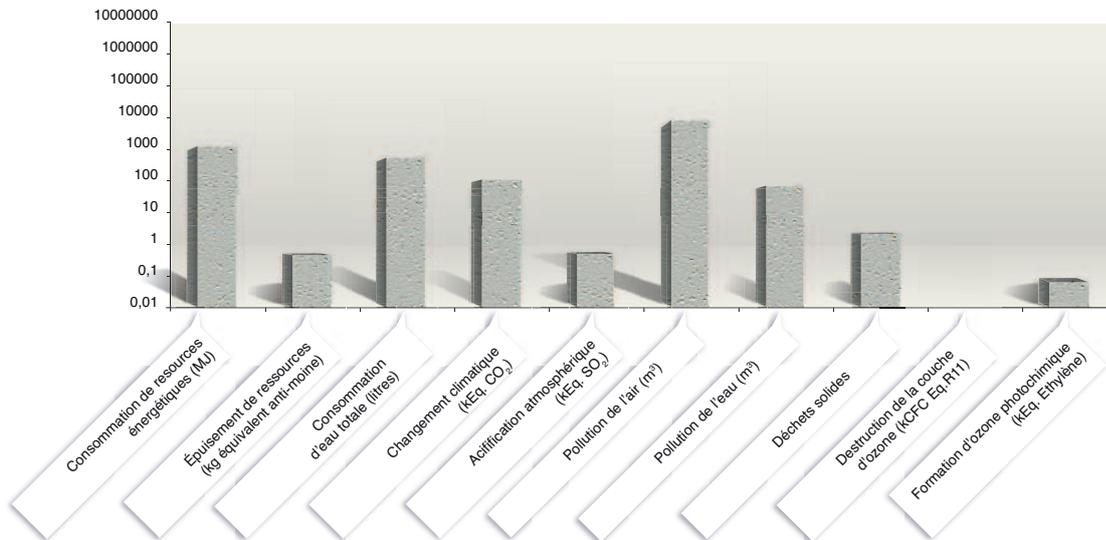


Figure 4. Impacts environnementaux de type FDES pour une poutre en béton armé – échelle logarithmique.

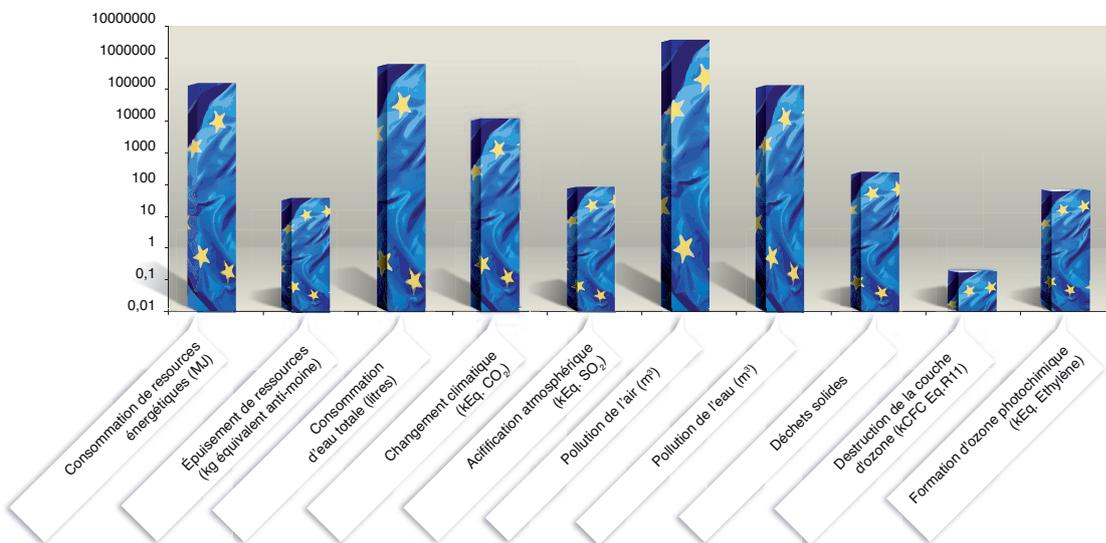


Figure 5. Impacts environnementaux de type FDES pour un citoyen Européen – échelle logarithmique.

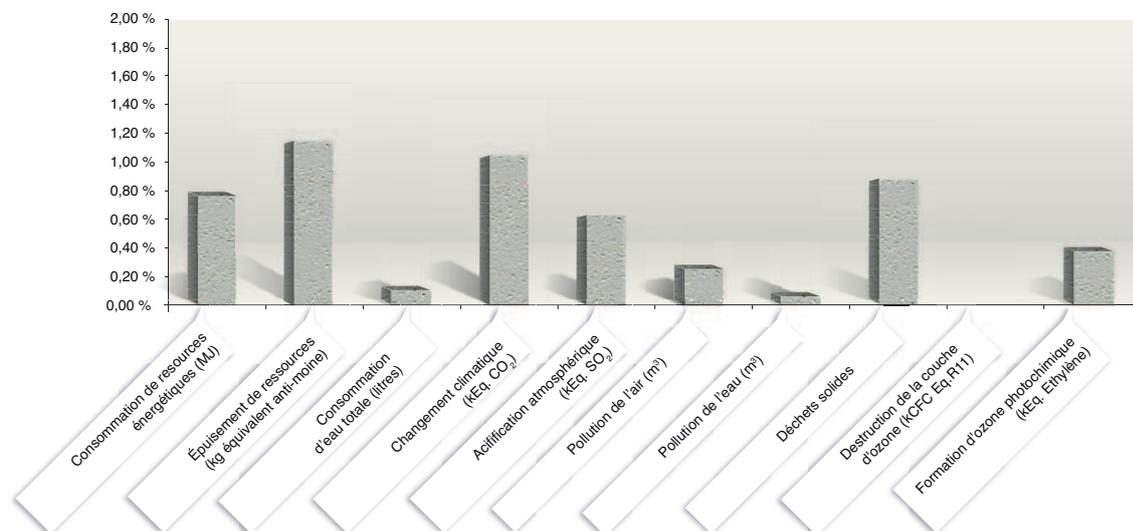


Figure 6. Impacts environnementaux de type FDES normés par rapport aux impacts annuels d'un citoyen Européen pour une poutre en béton armé – échelle linéaire.

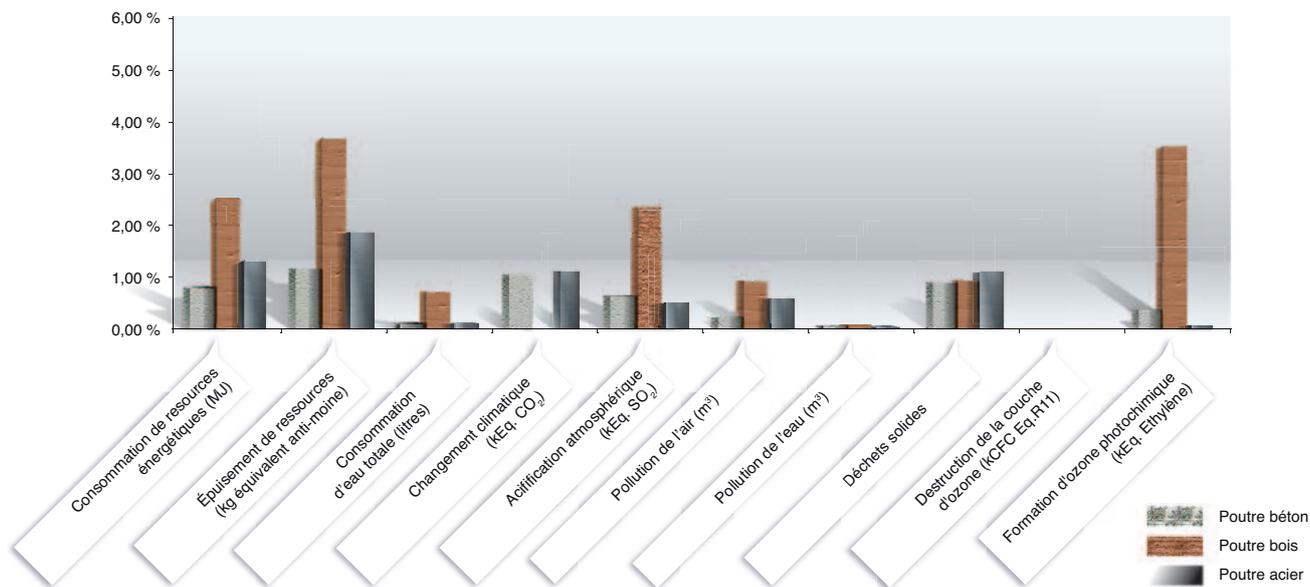


Figure 7. Impacts environnementaux de type FDES normés par rapport à un citoyen Européen pour une poutre en béton armé, une poutre en bois lamellé collé et une poutre en acier.

3.4 - Comparaison poutre béton armé / poutre bois lamellé collé / poutre acier

De façon à pouvoir comparer les technologies poutre béton armé, poutre bois lamellé collé et poutre acier entre elles, nous retenons bien sûr la même fonction et unité fonctionnelle (supporter des charges de service standards (350 kg/m²) pendant 100 ans, portée de 6,40 m et entraxe de 2,5 m). **Le flux de référence** est alors de 330 kg de bois associé à de la colle et de la lasure pour la poutre en bois et 102 kg d'acier pour la poutre en acier avec ses goujons connecteurs. À partir des FDES « poutre en bois lamellé collé » et FDES « poutre en acier », il est alors possible de réaliser le même calcul que dans le cas de la poutre en béton armé. Les impacts obtenus normés par les impacts d'un citoyen Européen sont tracés sur la figure 7.

Alors que les impacts dominants de la poutre béton armé étaient l'épuisement des ressources, le changement climatique et les déchets solides non

inertes, ceux de la poutre en bois lamellé collé sont l'épuisement des ressources, la formation d'ozone photochimique et la consommation de ressources énergétiques. Les impacts dominants de la poutre en acier sont, quant à eux, l'épuisement des ressources, la consommation de ressources énergétiques et les déchets solides non inertes.

Si nous cherchons maintenant à déterminer une possible Meilleure Technologie Disponible et ainsi attribuer un label d'éco-produit associé à la fonction poutre à une de ces trois solutions technologiques, nous sommes face à une difficulté. En effet, aucune de ces poutres n'est meilleure que les deux autres dans l'intégralité des catégories d'impact.

Si nous cherchons à contourner cette difficulté et à donner un coefficient pondérateur de 1 à chaque catégorie d'impact de la FDES, alors les matériaux se classent de la façon suivante : le béton et l'acier sont très proches avec des impacts normés moyens respectivement de l'ordre de 0,5 et 0,7 %. Le bois est troisième avec un impact normé moyen de l'ordre de 1,5 %. Ceci peut sembler en contradiction avec l'image écologique et environnemental du

matériau bois mais, en fait, à l'exception de l'impact changement climatique pour lequel le bois est un excellent matériau, pour tous les autres impacts, il se positionne derrière le béton et l'acier (pour une fonction poutre). Ceci est principalement dû à la longue phase de sylviculture pendant laquelle une quantité très importante d'énergie fossile est consommée par les engins agricoles. Les impacts de cette consommation d'énergie fossile en termes de réchauffement climatique sont compensés par le fait que la croissance du bois piège du CO₂. Ceci n'est pas le cas des autres impacts. Il peut être intéressant de noter que l'attribution d'un coefficient de 1 à toutes les catégories d'impact, même si elle est relativement en accord avec le positionnement fortement « égalitaire » des citoyens Européens, constitue tout de même un choix introduisant une subjectivité dans la méthode d'évaluation et d'agrégation.

Il est aussi possible de considérer le nombre de catégories d'impact où chaque matériau est la Meilleure Technologie Disponible. La poutre en béton gagne ou est à égalité pour la première place dans 6 catégories sur 10, l'acier gagne ou est à égalité pour la première place dans 4 catégories sur 10 et le bois dans 2 catégories sur 10. Même si ce mode de classement semble donner un avantage à la poutre béton, il peut être intéressant de

noter que les catégories où le béton domine l'acier sont des catégories concernant majoritairement l'épuisement de nos ressources, catégories qui ne sont pas considérées comme prioritaires par nos concitoyens Européens face à la santé humaine et à la qualité des écosystèmes.

Le même type de résultat a été obtenu dans le cadre d'une étude consistant à comparer les impacts environnementaux de deux types d'ossature de bâtiments industriels : une solution béton précontraint et une solution mixte béton-bois lamellé collé. Même s'il était impossible d'identifier une éco-solution meilleure sur tous les impacts environnementaux, la solution béton l'emportait dans de nombreux domaines dont celui de la consommation de ressources énergétiques même si la solution bois l'emportait dans le domaine du réchauffement climatique.

Il ne semble donc pas possible d'attribuer, de façon indiscutable, un label d'éco-produit à l'une des solutions technologiques étudiées ici et répondant à une fonction de poutre. Les matériaux associés ont en effet des impacts environnementaux différents et présentent des points faibles et forts spécifiques à chacun d'entre eux. Tout a priori sur une éco-technologie associée à la fonction poutre ne peut trouver de fondements dans les résultats d'un outil tel que l'Analyse de Cycle de Vie et relève donc de la subjectivité.

17. Bilan environnemental comparé, Bâtiment de stockage de 12 000 m², ACOB (<http://www.acob.net/>).

4. ACV d'une enveloppe de bâtiment ou le béton dans l'enveloppe

4.1 - Analyse du cycle de vie : définition du champ de l'étude

Le cas de l'ACV d'une enveloppe est beaucoup plus complexe que le cas d'une poutre de bâtiment. De façon à pouvoir tirer d'une telle étude des informations généralisables, nous allons progresser en augmentant par étapes le degré de complexité du système étudié et ainsi considérer successivement, dans cette partie, deux fonctions différentes.

La première, très simple, que nous appliquerons à l'étude d'une simple « boîte » est de « maintenir dans une enveloppe en zone climatique tempérée une température supérieure à 18 °C pendant 100 ans ».

La deuxième, plus concrète, que nous appliquerons à de véritables maisons individuelles et logements collectifs consiste à « assurer la fonction d'habitation pendant une durée de vie de 100 ans, avec une consommation d'énergie inférieure à 50 kWh d'énergie primaire par m² et par an en zone climatique tempérée ».

Il est tout d'abord nécessaire de noter qu'il est particulièrement difficile d'identifier la meilleure technologie disponible pour de telles fonctions au vu des innombrables matériaux isolants potentiels (laine de verre, polystyrène...) et des possibilités infinies de combinaison avec d'autres matériaux tels que brique, bois ou béton. Nous sommes loin du cas quasiment idéal de la simple poutre de logement collectif pour laquelle, même si nous n'avons pas bien sûr traité toutes les possibilités, nous avons identifié trois grandes familles représentatives des pratiques actuelles.

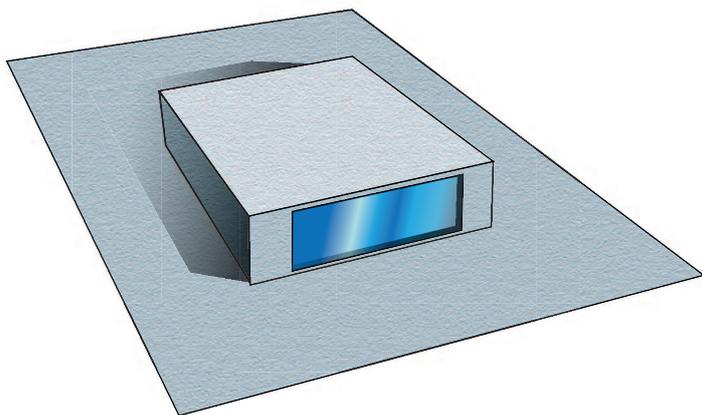
Face à cette complexité, nous n'allons pas chercher ici à déterminer la meilleure technologie disponible,

objectif que nous n'avons de toute façon pas atteint dans le cas de la poutre. Nous allons cependant montrer dans un premier temps comment le béton, qui n'appartient pourtant pas à la famille des matériaux isolants, peut participer fortement à la réduction des impacts environnementaux associés au remplissage de la fonction d'enveloppe évoquée au dessus. Dans un second temps, nous nous livrerons à la comparaison de résultats d'ACV complètes réalisées pour des maisons et appartements réels.

Enfin, il peut être intéressant à ce stade d'insister sur une différence majeure entre l'ACV de la fonction poutre et celle de la fonction enveloppe. Les impacts environnementaux de la fonction poutre ont en effet la particularité d'être majoritairement localisés dans les phases de production, de mise en œuvre et de fin de vie, définis sous l'appellation énergie grise, alors que ceux de la fonction enveloppe se répartissent aussi, comme nous allons le voir, sur la vie en service. Ils font alors intervenir une énergie d'usage conventionnelle qui inclut les impacts environnementaux liés au chauffage, à la climatisation, à l'eau chaude sanitaire, aux ventilations, aux auxiliaires et à l'éclairage.

4.2 - Inventaire du cycle de vie et comparaison enveloppe légère / enveloppe lourde

Nous allons nous focaliser dans un premier temps sur un système modèle : une simple « boîte » de 10 m par 10 m et de hauteur 3 m (surface habitable 100 m²). Nous allons considérer une enveloppe légère et une enveloppe lourde contenant du béton. Ces deux enveloppes présentent une isolation thermique extérieure permettant d'atteindre



**Figure 8. Élément d'étude de référence :
une boîte de 10 m par 10 m et de hauteur 3 m.**

un niveau de consommation énergétique de type BBC (Bâtiment Basse Consommation énergétique)¹⁸. L'enveloppe légère est ainsi composée d'une ossature bois, d'un bardage extérieur de 2 cm de bois et de 11 cm de laine de verre alors que l'enveloppe lourde est composée de 16 cm de béton et de 11 cm de laine de verre. Ces deux enveloppes présentent ainsi la même résistance thermique. Le volume total de béton utilisé est de 51 m³. En façade Sud, des baies vitrées de surface 20 m² (double vitrage à l'argon) permettent de profiter des apports solaires sans diminuer excessivement l'isolation thermique globale du bâtiment. Cette baie est, pour le calcul thermique, considérée comme totalement occultée la nuit pendant les périodes de chauffe et partiellement occultée la journée pendant l'été.

Cette « boîte » est soumise numériquement à un climat français tempéré et son comportement est simulé à l'aide du logiciel Pléiades-Comfie® développé par l'école des Mines. À l'aide de cet outil, il est possible de s'apercevoir que la consommation énergétique de cette enveloppe très simplifiée est de 62 kW_{Ep}. h/m²/an dans le cas de l'enveloppe légère et de 46 kW_{Ep}.h/m²/an dans le cas de l'enveloppe lourde, proches des 50 kW_{Ep}.h/m²/an du label BBC et des recommandations probables de la future Réglementation Thermique 2012 (RT 2012). Même si ces deux valeurs sont basses, il est inattendu qu'elles soient différentes puisque ces deux enveloppes ont la même résistance thermique ou capacité d'isolation. Ce résultat est la manifestation

du rôle marqué de **l'inertie thermique** sur le comportement des enveloppes lourdes vers lesquelles se tournent actuellement de nombreux architectes.

Pour mieux expliquer les effets positifs de l'inertie thermique sur le fonctionnement d'un bâtiment, il est nécessaire de rappeler que, de manière générale, une enveloppe de bâtiment correctement conçue est capable, par ordre de priorité, de **réduire les pertes énergétiques**, de **capter de l'énergie solaire** et enfin de la **stocker** pour la libérer ultérieurement. Une quantité d'isolant importante permet de remplir la première fonction. Cela paraît bien sûr évident mais ce n'est pas le cas de la majorité des bâtiments existants qui consomment près de 43 % de l'énergie consommée en France par an. La consommation moyenne est ainsi de l'ordre de 250 kW_{Ep}.h/m²/an¹⁹, soit, approximativement, cinq fois plus que la « boîte » étudiée ici. Même si ce n'est pas le sujet de cet exposé, il est nécessaire de garder à l'esprit que la rénovation de ces logements à faible performance énergétique constitue une problématique majeure. Récemment, cependant, les capacités d'isolation des bâtiments ont augmenté et la fonction de réduction des pertes énergétiques est désormais remplie par la plupart des enveloppes des bâtiments neufs. Ceci a rendu la seconde fonction (capter) primordiale puisque, grâce à cette isolation renforcée, les apports solaires sont désormais à même de fournir la majeure partie de l'énergie nécessaire à l'enveloppe. Des surfaces importantes de vitrages de qualité permettent de remplir cette fonction. Leur effet est plus marqué au Sud mais les apports des autres façades avec les vitrages dont nous disposons actuellement ne sont pas à négliger. Les deux premières fonctions étant désormais acquises, c'est sur la capacité à stocker les apports solaires pour les restituer ultérieurement que se joue la performance finale de l'enveloppe. Une inertie thermique suffisante de l'enveloppe est alors nécessaire. En effet, les apports solaires ne sont disponibles que sur une période relativement courte de la journée. Il est donc nécessaire de les piéger et c'est dans la masse des matériaux constituant l'enveloppe et le bâtiment que ces apports peuvent être piégés sous forme d'énergie calorifique. Le béton avec sa masse volumique de 2400 kg/m³ est un matériau de stockage idéal dans ce rôle.

18. Arrêté ministériel du 3 mai 2007

19. <http://www.logement.gouv.fr/>.

Une enveloppe lourde n'a pas pour seul avantage de réduire de 30 % la facture énergétique de la « boîte » que nous avons étudiée ici. Elle permet aussi d'amortir les variations de température extérieures et de réduire les surchauffes d'été très fréquentes dans les bâtiments visant une forte récupération des apports solaires. Sur la figure 9 qui représente des variations de températures dans la boîte sans chauffage, il est possible de constater que, alors que les écarts de température extérieure sont de 17 °C, ils sont réduits à 9 °C au sein de l'enveloppe légère et à 1,5 °C au sein de l'enveloppe lourde contenant du béton. La masse de matériau présente permet, en stockant de la chaleur ou de la fraîcheur, d'amortir les variations de température extérieure sur une semaine ou les variations jour/nuit et d'améliorer ainsi le confort du bâtiment. La masse de matériau peut aussi permettre de diminuer les températures dans l'enveloppe en période de surchauffe d'été. Ceci a priori pourrait ne pas sembler avoir de rapport avec la consommation énergétique et les impacts environnementaux. Il est cependant important de garder en tête que la climatisation qui est parfois installée pour contrer ces pics de température est très gourmande en énergie et que l'augmentation de la surface de vitrage permettant de maximiser les apports solaires est souvent limitée et bridée par ces surchauffes. Ainsi, une des nouveautés de la

Réglementation thermique RT2005 est d'imposer, en plus d'une valeur maximale de consommation énergétique, une valeur maximale de la Température Intérieure Conventionnelle (TIC) en été. Là encore, l'inertie thermique apportée par un matériau comme le béton peut participer à l'atteinte de ces objectifs thermiques.

Il pourrait être noté que le béton pourrait être remplacé par des briques ou de la terre cuite, l'objectif des enveloppes à forte inertie étant d'augmenter la masse de l'enveloppe à même de stocker de l'énergie.

Il peut être important de préciser que le résultat des simulations basées sur des lois physiques et un logiciel de simulation thermique utilisés ici peut différer de celui obtenu en utilisant un règlement de calcul normatif comme la RT2005 qui simplifie fortement la prise en compte des effets d'inertie. L'outil de simulation thermique Pleiades Comfie utilisé permet de prendre en compte toutes les subtilités de fonctionnement d'une enveloppe telle que l'inertie thermique. Dans le cas des enveloppes réelles que nous étudions dans la section suivante, elles le seront à l'aide d'un outil de calcul réglementaire ne prenant en compte l'inertie thermique des matériaux que de manière très approximative.

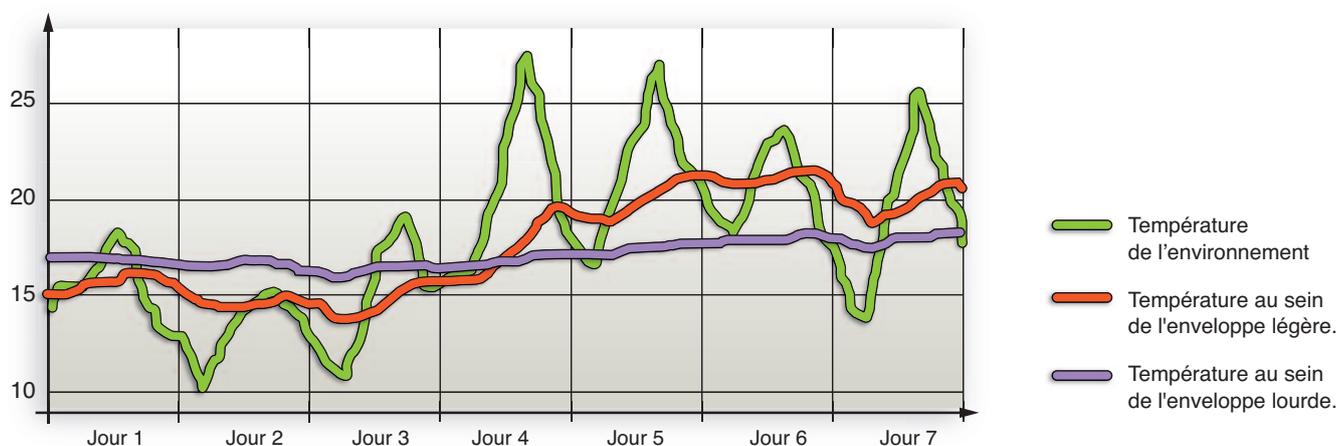


Figure 9. Variations de température d'été « naturelles » (sans chauffage) sur une semaine au sein de l'enveloppe lourde ou de l'enveloppe légère.

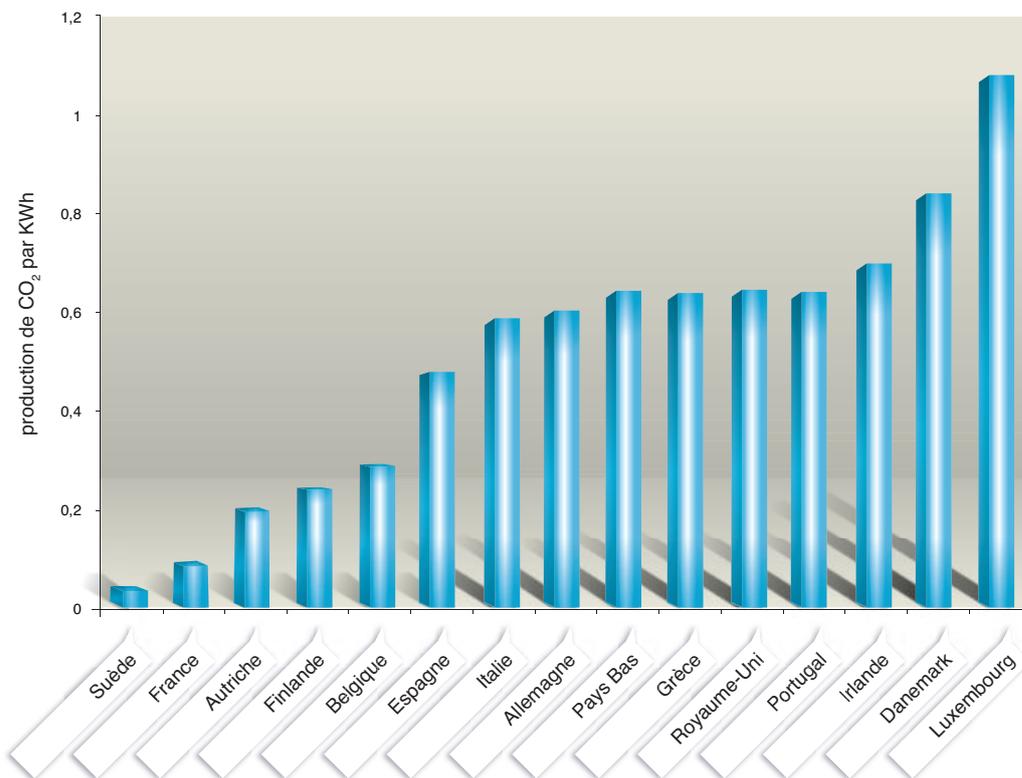


Figure 10. Production de CO₂ en kg par kW. h dans différents pays Européens²⁰.

Le discours actuel sur le cycle de vie des enveloppes est très focalisé sur l'énergie nécessaire au maintien de conditions visées de confort et c'est en effet principalement de l'énergie qui est consommée. Dans la plupart des architectures dites bioclimatiques dans lesquelles le besoin de chauffage d'appoint est très réduit, l'énergie nécessaire à ce chauffage est souvent électrique. Il est alors possible d'estimer en parallèle un autre impact environnemental : celui des émissions de gaz à effet de serre dus aux consommations énergétiques de ce type de bâtiments. Pour cela, les chiffres de la figure 10 qui montrent la grande diversité des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité en Europe peuvent être utilisés. Les pays dont la production d'électricité est la moins polluante (en terme de réchauffement climatique) sont les pays qui disposent soit d'une production d'électricité nucléaire (le transfert de pollution a alors lieu de l'impact changement climatique vers la production de déchets radioactifs) soit de ressources naturelles souvent de types hydroélectriques. La France possède les deux, ce qui explique l'impact « changement climatique » très faible de son énergie électrique.

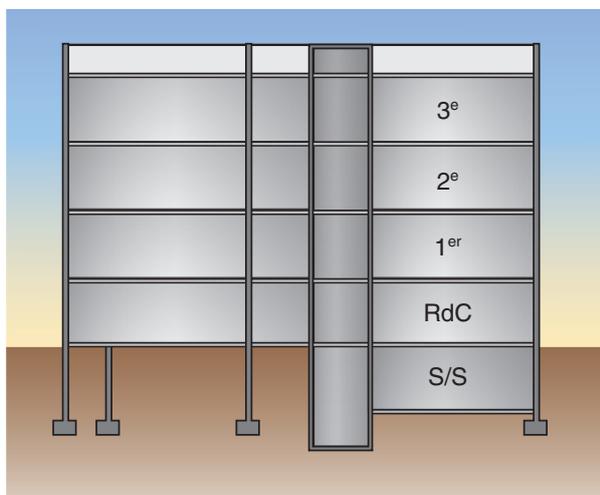
Il est alors possible de réaliser le bilan suivant : pour remplir la fonction « maintenir dans une enveloppe

une température supérieure à 18 °C pendant 100 ans », la boîte à enveloppe lourde nécessite 1 700 000 MJ (équivalent à 11 ans de consommation énergétique d'un citoyen Européen) et émet 42 tonnes de CO₂ (équivalent à 3,5 ans d'émissions de CO₂ d'un citoyen Européen) alors que la boîte à enveloppe légère nécessite 2 230 000 MJ (équivalent à 15 ans de consommation énergétique d'un citoyen Européen) et émet 56 tonnes de CO₂ (équivalent à 4,5 ans d'émission de CO₂ d'un citoyen Européen). À titre de comparaison, les 51 mètres cubes de béton nécessaires à la réalisation de l'enveloppe lourde nécessitent 140 000 MJ (équivalent à 1 an de consommation énergétique d'un citoyen Européen) et émettent 5,5 tonnes de CO₂ (équivalent à 1,3 ans d'émissions de CO₂ d'un citoyen Européen). Les impacts dus à la construction et déconstruction de ces enveloppes constituent l'énergie grise. Cet aspect a été longtemps négligé dans l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment traditionnel mais les réductions actuelles des consommations énergétiques en service rendent ce point plus critique qu'auparavant comme nous allons le voir. Ainsi, même s'il semble tout à fait normal de négliger les impacts dus à la construction dans l'analyse du cycle de vie d'une enveloppe traditionnelle à faible performance, dans le

20. Thermodynamique de l'ingénieur : énergétique - environnement par Francis Meunier et édité chez Dunod.

cas d'une enveloppe de qualité comme celle que nous avons étudiée ici, les consommations pendant la vie de l'enveloppe sont fortement réduites et les impacts au moment de la construction gagnent en importance relative. Ceci est particulièrement marqué dans un pays comme la France où, comme nous l'avons vu, les émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'électricité sont faibles. Ainsi, pour l'enveloppe lourde étudiée ici, le béton nécessaire à la construction de l'enveloppe représente approximativement 8 % du total sur le cycle de vie en termes de consommation de ressources énergétiques et 35 % en termes de changement climatique. Ces chiffres ne sont bien sûr valables que pour la « boîte » étudiée ici mais nous allons voir plus loin qu'ils sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus dans le cas de maisons et d'appartements réels.

Pour conclure sur cette ACV, en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie, l'enveloppe lourde et l'enveloppe légère de cette enveloppe performante sont équivalentes d'un point de vue changement climatique. Cependant, l'enveloppe lourde l'emporte quasiment d'un facteur 2 d'un point de vue consommation de ressources énergétiques, réchauffement climatique et toutes les autres catégories faisant d'elle la meilleure des deux technologies étudiées ici (dans le cas très simplifié de notre « boîte »).



4.3 - Analyse du cycle de vie d'enveloppes réelles

Nous considérons ici les résultats d'une étude des impacts de maisons individuelles et de logements collectifs réels sur l'intégralité de leur cycle de vie²¹. Les différentes variantes de bâtiments étudiés font intervenir plusieurs systèmes constructifs représentatifs du marché. Nous ne considérons ici que les résultats obtenus pour une maison de plain-pied de 100 m² habitables et un immeuble de logements collectifs R+3 de 1073 m² habitables (voir figure 11).

Chacune des enveloppes étudiées a été conçue pour répondre au même objectif consistant à « assurer la fonction d'habitation pendant une durée de vie de 100 ans, avec une consommation d'énergie inférieure à 50 kWh d'énergie primaire par m² et par an en zone climatique tempérée ». Cette fonction correspond à la définition d'une enveloppe BBC (Bâtiment à Basse Consommation). Le label BBC « Bâtiment Basse Consommation » reprend les valeurs définies par le référentiel de l'association EFFINERGIE®, à savoir un objectif de consommation maximale pour les constructions résidentielles neuves fixé à 50 kW.hEp/m²/an. Par ailleurs, dans le cadre des exigences de la marque EFFINERGIE® et ainsi dans celui de cette étude, la perméabilité à l'air du bâtiment doit être inférieure à une valeur seuil. Cette valeur quantifie le débit tolérable de fuite traversant l'enveloppe, exprimé en m³/h.m², sous un écart de pression de 4 Pascals.

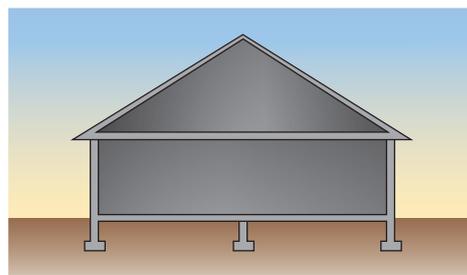


Figure 11. Schémas du logement collectif et de la maison de plain-pied considérés dans l'analyse de cycle de vie.

21. Cette étude et le rapport validé par la commission d'experts indépendants sont disponibles sur le site www.mamaisondurable-beton.com

Pour une maison individuelle, cette valeur seuil est de 0,6 m³/h.m² alors qu'elle est de 1 m³/h.m² pour un logement collectif.

Les hypothèses de travail retenues ont pour conséquence que l'impact environnemental en service (l'énergie d'usage conventionnelle définie précédemment) de l'ensemble des enveloppes étudiées est identique. La seule différence en terme d'environnement réside donc dans les impacts environnementaux liés aux matériaux et procédés de construction et déconstruction (énergie grise). Pour les enveloppes étudiées ici, ces impacts représentent approximativement 20 % de l'énergie primaire totale consommée et environ 50 % des émissions de gaz à effet de serre participant au réchauffement climatique.

Les inventaires et analyses de cycle de vie ont été réalisés par un cabinet d'expert indépendant à l'aide du logiciel TEAM™ Bâtiment. Suite au métré détaillé de ces enveloppes, les impacts ont été calculés à l'aide des FDES ou des bilans environnementaux des systèmes constructifs retenus. Pour chaque élément des solutions constructives, les données issues des FDES ou des modélisations ad hoc présentent des incertitudes (liées notamment aux sources des données). Cette incertitude est estimée à 10 % sur les FDES. Nous considérons donc dans la suite que, pour chaque indicateur retenu, des écarts dans les valeurs d'impacts inférieurs à 10 % ne doivent pas être considérés comme significatifs. Enfin, les résultats de cette étude ont fait l'objet d'une revue critique d'experts indépendants (CSTB, GDF Suez, ATILH, Isover, GINCKO21) conformément à la norme NF EN ISO 14040.

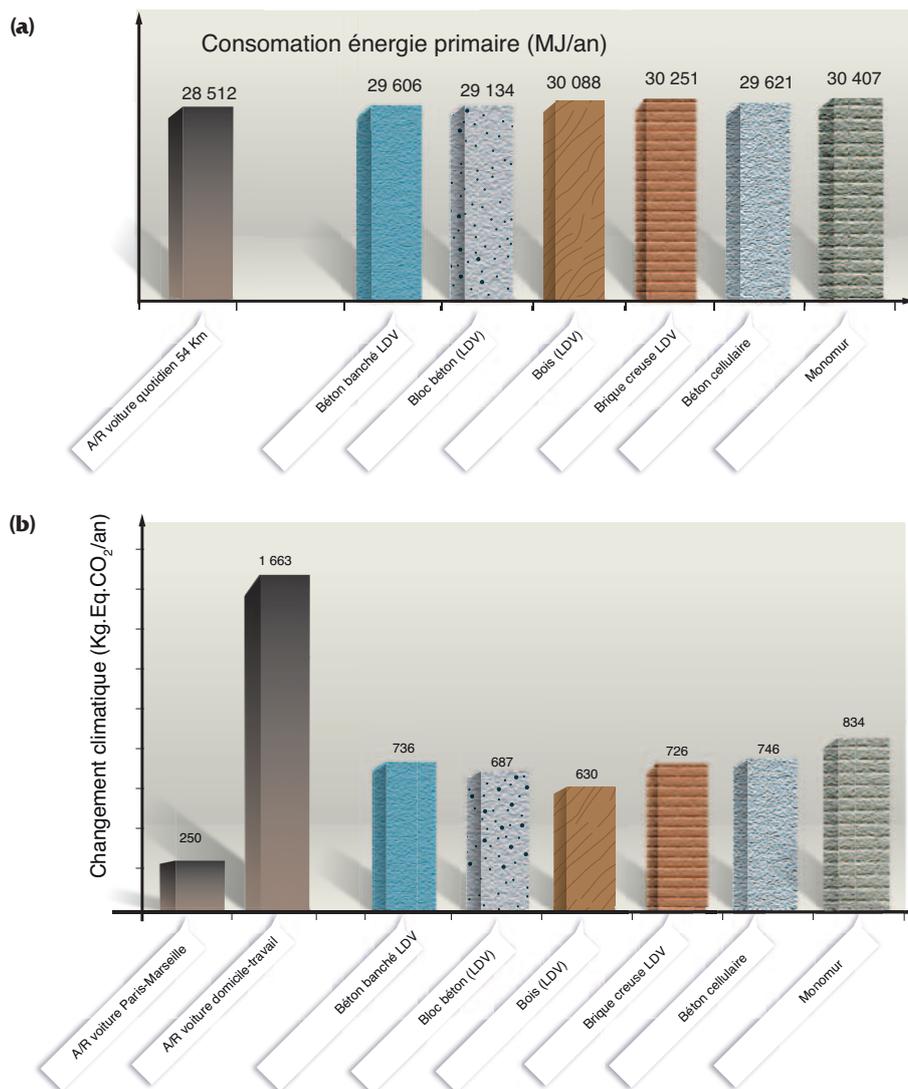


Figure 12. Impacts environnementaux annuels d'une maison individuelle de 100 m² pour une durée de vie de 100 ans et différentes solutions constructives. (a) Consommation d'énergie primaire totale; (b) Changement climatique.

Les résultats de cette étude permettent tout d'abord de comparer différentes natures de paroi et de matériaux et les impacts associés. Nous considérons ici le cas de la maison de plain-pied et nous étudions les enveloppes suivantes :

- mur de béton banché et laine de verre ;
- blocs béton et laine de verre ;
- ossature bois et laine de verre ;
- brique et laine de verre ;
- brique monomur (sans isolant) ;
- béton cellulaire (sans isolant).

Nous nous focalisons ici sur les deux impacts majeurs du Grenelle de l'environnement « consommation de ressources énergétiques » et « réchauffement climatique ». Ces impacts sont rassemblés sur les figures 12 (a) et (b).

Il est tout d'abord possible de noter que les différences entre les diverses solutions constructives en termes d'énergie primaire totale sont inférieures à l'incertitude de 10 % du procédé d'évaluation. Même si cela peut paraître surprenant et que certaines de ces solutions ont des images plus « vertes » que d'autres, les ressources énergétiques nécessaires pour construire, chauffer, refroidir et éclairer ces différentes enveloppes pendant 100 ans sont équivalentes. À titre de comparaison, cet écart, ramené à une année de la vie de l'enveloppe, correspond approximativement à 1 300 MJ d'énergie primaire, soit un aller et retour en voiture Paris Lille (véhicule consommant 6 l aux 100 km).

Dans le cas de l'impact « réchauffement climatique », les conclusions sont similaires. Ainsi, l'écart type de 9 % entre les solutions reste inférieur à l'incertitude de l'évaluation. Même s'il existe un écart de 24 % entre la solution présentant l'impact le plus faible et celle présentant l'impact le plus élevé, il n'est pas possible de générer un classement de ces solutions présentant une différence entre deux solutions voisines supérieures à l'incertitude. Par ailleurs, si l'écart maximal entre les deux solutions extrêmes est ramené à une année, il est possible de constater que cet écart de 200 kg.Eq.CO₂ est équivalent à un aller et retour en voiture Paris Marseille (véhicule consommant 6 l aux 100 km).

Même si les résultats de cette étude ne permettent pas d'identifier une technique constructive ayant des impacts environnementaux plus faibles que les autres, ils permettent de positionner de façon relative les impacts environnementaux liés à une habitation au sein de nos différentes activités. Ainsi, l'énergie primaire totale (énergie consommée pendant les phases de fabrication, construction, démolition et recyclage ainsi que l'énergie d'usage sur l'ensemble du cycle de vie) consommée par une maison individuelle rapportée à un an est équivalente à la valeur énergétique des litres d'essence nécessaires à un adulte occupant cette maison et effectuant quotidiennement en voiture pendant un an la distance moyenne Française de 52 km²² pour se rendre sur son lieu de travail (véhicule consommant 6 l aux 100 km). Par ailleurs, les émissions totales de gaz à effet de serre (sur l'ensemble du cycle de vie) rapportées à un an sont équivalentes à la moitié des émissions de gaz à effet de serre d'un adulte effectuant ce même trajet dans les mêmes conditions.

Les résultats de cette étude permettent enfin d'ouvrir le débat sur les différences entre maison individuelle et logement collectif. Il est alors possible de constater à partir des résultats de cette étude que l'énergie primaire totale nécessaire à la construction d'une maison ou d'un logement collectif varie peu. Il n'y a donc que peu de différence (moins de 20 %) à construire un appartement pour 4 personnes de 100 m² en logement collectif ou une maison individuelle de plain-pied pour 4 personnes. Ceci n'est pas le cas des impacts liés au réchauffement climatique où la différence entre construire un appartement de 4 personnes en logement collectif ou une maison individuelle de plain-pied de 4 personnes peut atteindre 60 % en faveur de la maison individuelle. Cependant, avant de conclure sur un intérêt éventuel des maisons individuelles face aux logements collectifs, il convient de se placer à une échelle plus globale et de garder en tête que des logements collectifs favorisent souvent une densité accrue et diminuent les distances moyennes et les impacts environnementaux de nos transports terrestres. L'ACV adaptée au traitement de ce type de question devra alors se faire à l'échelle urbaine ou régionale et sort du cadre de ce texte.

22. DADS 2004, Insee, <http://www.insee.fr>

5. Perspectives de l'industrie du béton : les bétons à faibles impacts environnementaux

Tous les matériaux de construction ont des impacts environnementaux. Leur fabrication et leur utilisation ne sont jamais neutres. Les acteurs de l'industrie de la construction en béton ont récemment développé un logiciel, Ecoconcrete²³, qui intègre les impacts environnementaux de la construction à travers une démarche d'Analyse de Cycle de Vie et une méthode de calcul des indicateurs environnementaux en conformité avec la norme ISO EN 14040.

La figure 13 illustre les impacts environnementaux relatifs aux composants majeurs du béton, à savoir les granulats, les adjuvants et le ciment. Cette étude est limitée au stade de l'élaboration du matériau ce qui exclut le transport et la vie au sein de l'ouvrage. Cette restriction du système ne permet d'analyser que les effets de la composition du béton d'un point de vue exclusivement matériau. À cette échelle d'observation, il est clair que c'est le ciment qui représente la source principale d'impacts environnementaux.

Dans le cadre des objectifs du facteur 4 de diminution des émissions de CO₂ issues de la fabrication du ciment, différentes possibilités ont commencé à être mises en œuvre par les cimentiers.

La figure 14 synthétise les avancées récentes et les perspectives à moyen terme telles que l'on peut les envisager, en première approximation, si on cherche à diminuer l'impact environnemental tout en maintenant les performances des produits. Ainsi, une tonne de CO₂ par tonne de ciment produit est le niveau classique et représente approximativement la moyenne mondiale. 0,6 tonne de CO₂ par tonne de ciment est le niveau déjà atteint par l'industrie cimentière Européenne grâce à des efforts importants en terme d'amélioration des performances des procédés technologiques de cuisson. De même, l'utilisation de fuels neutres en CO₂, représentant 30 % du combustible utilisé et la substitution du clinker par d'autres matériaux pouzzolaniques, représentant 20 % en moyenne

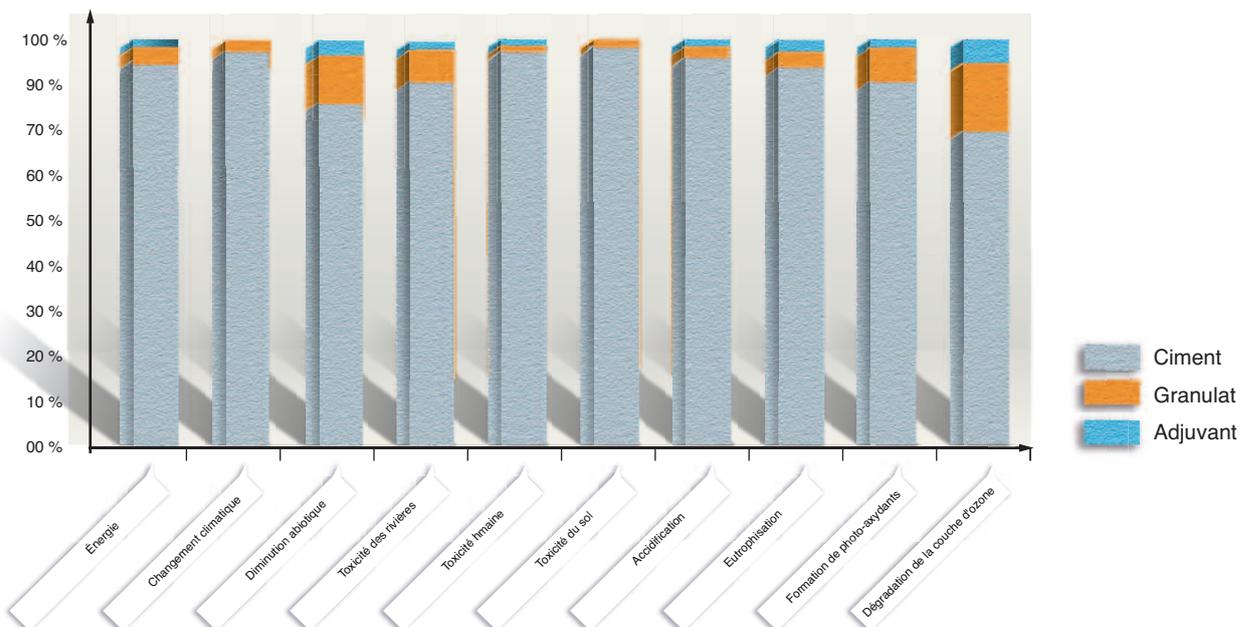


Figure 13. Impact environnemental des composants du béton étudiés avec la méthode CML 2000, avec le logiciel Ecoconcrete.

23. Meijer J., Ecoconcrete Tool, INTRON BV, 2004.

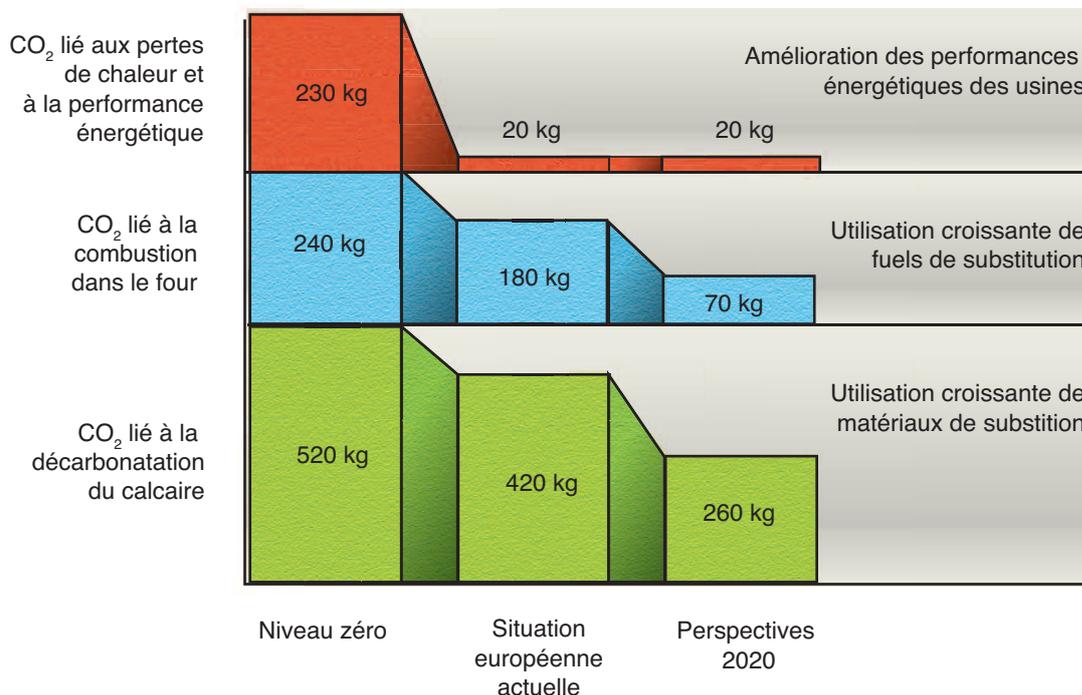


Figure 14. Diagramme simplifié présentant l'évolution des émissions de CO₂ (en kg) par tonne de ciment produite et les cibles atteignables à moyen terme. Seules trois sources d'émissions sont illustrées. Les émissions du fait d'une technologie peu efficace engendrant des pertes de chaleur, les émissions provenant du fuel servant à cuire le cru dans le four et les émissions provenant de la décarbonation du calcaire.

du ciment produit, ont permis d'autres économies substantielles de CO₂. En s'appuyant sur les expériences pilotes menées, entre autre, dans les pays du Nord de l'Europe, il semble possible d'atteindre 0,35 tonne de CO₂ par tonne de ciment, en utilisant massivement les fuels de substitution (à hauteur de 70 %) et l'incorporation de déchets d'autres industries en substitution du ciment²⁴.

Ces perspectives d'amélioration de l'efficacité environnementale pourraient permettre de diminuer d'un facteur de l'ordre de 3 l'impact de type changement climatique (kgEq.CO₂) d'un mètre cube de béton. Il semble cependant raisonnable de se demander si cet effort en terme d'efficacité technologique au service de l'environnement est suffisant pour répondre aux critères de stabilisation des températures décrit en introduction, à savoir diminuer d'un facteur 2 d'ici 2020 les émissions de gaz à effet de serre (ce qui correspond à un facteur 4 en 2050).

En effet, pour évaluer les perspectives de l'industrie du béton, il est fondamental de prendre en compte les perspectives de consommation. Sur le long terme (sans tenir compte des fluctuations telles que le boom récent de la construction ou la crise économique actuelle), la consommation totale de matière pour la construction augmente²⁵. En prenant en compte l'évolution de l'efficacité environnementale en fonction de la consommation totale de ciment en France, il apparaît que l'évolution de l'impact total du ciment en terme de gaz à effet de serre, jusqu'à maintenant, bien plus contrôlée par les variations de la consommation que par les améliorations technologiques (cf. figure 15, partie historique).

La figure 15 indique que les perspectives d'amélioration dans l'industrie du ciment que nous avons évoquées dans les paragraphes précédents peuvent suffire à absorber l'augmentation de la consommation de ciment induite par une croissance

24. Habert Guillaume et Rousset Nicolas, *Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental ? Annales du BTP*, août 2008, 12-16.
25. IFEN, Institut Français de l'Environnement. « L'environnement en France » Edition IFEN, 2006, octobre 2006. 500pp.

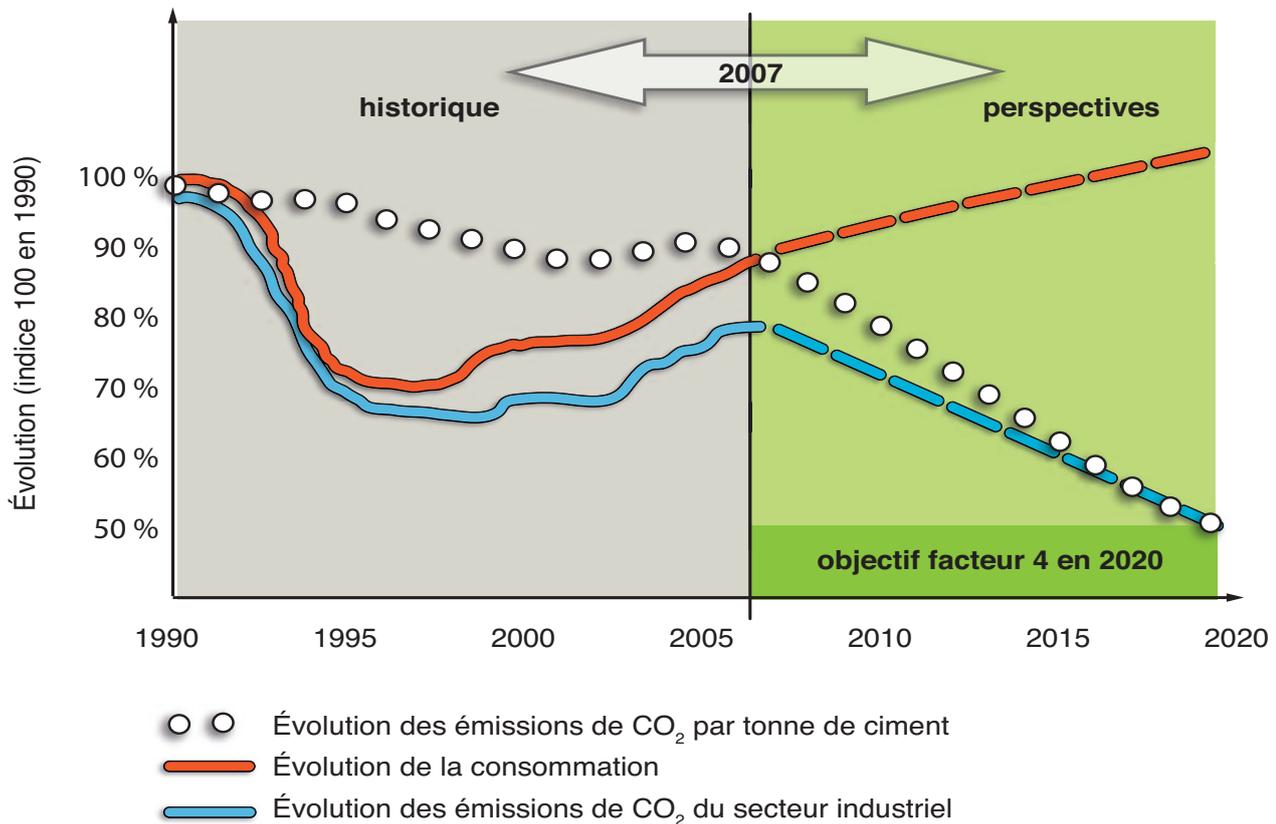


Figure 15. Évolutions passées et potentielles de la production de ciment, des émissions de CO₂ de l'industrie cimentière et émissions de CO₂ par tonne de ciment ²⁶⁻²⁷⁻²⁸. Une hypothèse haute de croissance maximale de la demande de 2 % par an est envisagée.

économique maximale dont les années 2008 et 2009 nous ont déjà éloigné. En moyenne sur une longue période d'observation, il a pu être constaté qu'une croissance du PIB de 1 % entraîne une augmentation de la consommation de matériaux de construction de l'ordre de 0,4 %²⁹. Ainsi, la croissance de la consommation de ciment de 1,6 % envisagée dans la figure 15 serait équivalente à une croissance économique de 4 % ce qui semble être une borne maximale haute en France et en Europe dans le contexte actuel. Il apparaît donc

que, à un horizon d'une vingtaine d'années, les marges de progression technologique dans le domaine du béton et de sa production permettront de respecter les objectifs du facteur 4³⁰. À plus long terme, pour respecter les objectifs particulièrement ambitieux de 2050, il sera nécessaire de mettre au point des liants dérivés de nos technologies actuelles. La recherche industrielle et publique se penche déjà depuis plusieurs années sur ces questions et c'est aujourd'hui dans les laboratoires que sont inventés les bétons de demain.

26. SFIC, Syndicat français de l'industrie cimentière, Activity report 2000. 2001.

27. SFIC, Syndicat français de l'industrie cimentière, « La contribution de l'industrie cimentière à la réduction des émissions de CO₂. » Collection comprendre, 2003, vol. 2, 12pp.

28. Lafarge, 2006. Rapport de développement durable. Groupe Lafarge. <http://www.lafarge.com>.

29. IFEN, Institut Français de l'Environnement. « L'environnement en France » Edition IFEN, 2006, octobre 2006. 500pp.

30. Habert Guillaume et Roussel Nicolas, Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, Cement & Concrete Composites, 31 (2009) 397-402.

6. Bilan, conclusions et perspectives

Après avoir positionné clairement la question des éco-matériaux et de l'environnement dans le paysage complexe et transversal du développement durable, nous nous sommes dotés d'un outil rigoureux d'évaluation des impacts environnementaux d'un matériau ou d'une technologie répondant à une fonction précise : l'Analyse du Cycle de Vie.

À partir de cet outil, nous avons étudié deux fonctions fondamentales d'un bâtiment : sa structure via l'étude d'une poutre de logement collectif et son enveloppe via l'étude d'une simple « boîte » et celle d'enveloppes réelles. Dans les deux cas, nous avons comparé des solutions techniques différentes. Les réponses que nous avons pu tirer ne s'appliquent qu'aux fonctions étudiées ici et ne doivent pas être généralisées trop hâtivement. Il semble cependant possible de retenir que, dans le domaine de la structure où trois matériaux (béton, bois et acier) sont à même de remplir des fonctions de portance, il est difficile d'identifier une « meilleure technologie disponible ». En effet, aucune de ces technologies n'est meilleure que les deux autres dans l'ensemble des catégories d'impact environnementaux. Dans le cas de l'enveloppe simple étudiée à l'aide d'un logiciel de simulation thermique, la solution à forte inertie semble l'emporter de façon systématique, montrant l'intérêt qu'il peut y avoir à utiliser du béton pour stocker des apports solaires et réduire nos consommations énergétiques. Nous avons vu aussi que d'un point de vue consommation de ressources énergétiques ou changement climatique, les solutions constructives les plus répandues sur le marché actuel étaient toutes équivalentes.

Nous avons traité ces questions à l'aide de FDES fournissant des valeurs moyennes nationales et des distances moyennes de transport des matériaux et systèmes constructifs. Il est bien sûr nécessaire de garder à l'esprit que des solutions locales, dont le transport pénaliserait l'ACV à une échelle nationale, peuvent, au niveau d'une région, constituer des solutions particulièrement attractives d'un point de vue environnemental.

Nous avons décrit, dans une dernière partie, les marges de progression disponibles permettant de réduire encore les impacts de la production de béton sur l'impact spécifique du changement climatique et démontré que, à un horizon d'une vingtaine d'années, il semble possible, au prix d'investissements importants et malgré une croissance probable de la demande en béton, de respecter les objectifs de réduction des gaz à effet de serre que la France et l'Europe se sont fixés.

Enfin, et pour conclure, il est important de garder à l'esprit que, à l'échelle du projet et de la conception, certains choix et leurs conséquences sur les impacts environnementaux ne peuvent être traités à l'échelle du bâtiment comme nous l'avons fait ici. Ainsi, comme nous l'avons évoqué dans la section traitant des enveloppes, le choix entre maison individuelle et logement collectif reste ouvert au débat sans une réflexion et une analyse réalisée à l'échelle d'une ville ou d'un territoire. Une telle analyse pourrait permettre de mettre en compétition les impacts plus élevés en termes d'énergie grise du logement collectif et la réduction des impacts liés aux transports terrestres dus à une densité plus élevée. Récemment, des outils de la famille des éco-comparateurs permettant d'apporter des éléments de réponse quantitatifs à une telle question ont vu le jour³¹.

31. Logiciel CARBONeco®, Cabinet Carbone 4.

Crédit photographique

Tous droits réservés.

Graphiques et illustrations

David Lozach, Amprincipe, droits réservés.

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris — R.C.S. Paris B 389 103 805

Mise en page couverture

Minibus

CIM *Béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr



ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON

7, place de La Défense
92974 Paris-La-Défense CEDEX