

Quatorzième édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Sherbrooke, Québec, Canada  
22-23 août 2013

## LE BETON SOUTENABLE : RISQUE OU OPPORTUNITE ?

G. Escadeillas

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université Paul Sabatier / INSA, Toulouse, France

**RÉSUMÉ** : Le béton est actuellement le matériau de construction le plus décrié. La faute à des immeubles construits trop vite dans des grandes villes et qui sont devenus de véritables ghettos, à des constructions anarchiques qui ont envahi et dénaturé le littoral de très nombreux pays et surtout, plus récemment, à la problématique du réchauffement climatique qui a stigmatisé la forte production de CO<sub>2</sub> du ciment Portland. A en entendre certains, il y aurait donc un risque pour l'humanité à persister dans son utilisation...

C'est oublier un peu trop vite que le béton est le principal matériau de construction au monde et qu'il permet aussi bien de réaliser des ouvrages d'art, des bâtiments structurants et des logements à la fois durables et esthétiques pour le bien-être de la plupart d'entre nous. Alors que d'ici quelques décennies 70% de la population mondiale habitera dans des villes, vouloir le remplacer totalement semble une utopie. Il faut donc le rendre plus soutenable, en prenant en compte en toute connaissance de cause les enjeux environnementaux et les besoins de la société, ce qui est une réelle opportunité pour les nombreux chercheurs qui travaillent sur ce matériau ! Encore faut-il bien connaître ses impacts environnementaux pour prendre les bonnes décisions, ce qui est l'objet de cette communication.

### 1. INTRODUCTION

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde (environ 6 milliards de m<sup>3</sup> mis en œuvre par an). Produit à partir d'eau, de matériaux minéraux naturels locaux (sable, gravillons) et artificiels (ciments Portland), il présente l'avantage de se prêter à froid à toute mise en forme même complexe, d'être résistant mécaniquement après durcissement et d'être durable.

Malheureusement, il est aussi souvent très décrié. En cause, dans un premier temps, l'utilisation qui en a été faite après la deuxième guerre mondiale : de grands bâtiments ont été construits en béton dans les banlieues des grandes villes pour offrir des logements décentes à des ouvriers qui venaient travailler pour la reconstruction ou la réindustrialisation. Avec le temps, ces quartiers sont devenus de véritables ghettos et le béton a souvent été associé à cette mauvaise image... De même, avec les congés payés et le besoin de logements pour le tourisme et les loisirs, le béton a envahi le littoral de la plupart des pays. Avec du recul, on constate que ces constructions ont totalement modifié des écosystèmes locaux... et une fois de plus, dans la conscience populaire, c'est le béton qui est en cause et non ceux qui ont autorisé ces constructions ! Plus récemment, ce sont les experts qui travaillent sur le réchauffement climatique qui ont pointé du doigt l'impact significatif de la construction sur les émissions de gaz à effet de serre (le quart des émissions) et plus particulièrement de la production du ciment (7% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, à raison d'une tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker) et stigmatisé la profession.

En conséquence, de nombreux chercheurs envisagent depuis quelques années de remplacer ce matériau et il n'est pas rare d'entendre dans des colloques des propositions pour le supprimer totalement. Outre le fait que les solutions de remplacement peuvent rester discutables sur le plan environnemental (comme les géopolymères par exemple), il paraît utopique de vouloir remplacer totalement le premier matériau de construction dans les prochaines décennies d'autant plus que la population devrait devenir majoritairement urbaine et que les besoins mondiaux devraient augmenter (besoin de logements décents pour la moitié de la population mondiale). Il convient donc de rendre plus soutenable le béton que nous connaissons aujourd'hui de manière à limiter ses impacts environnementaux sans réduire ses extraordinaires capacités, ce qui représente une véritable opportunité pour les chercheurs en matériaux cimentaires que nous sommes (Escadeillas, 2006).

Cependant, lorsque l'on veut étudier les impacts environnementaux du béton, on est confronté à la problématique de l'existence et de la fiabilité des données (selon la zone géographique, le type de procédé industriel utilisé, la période de recueil des données...). Le risque est aussi de se limiter au seul changement climatique et d'occulter les autres impacts de demande énergétique, de consommation d'eau, de pollution de l'air et de l'eau...

L'objectif de cette communication est de voir comment utiliser les données environnementales disponibles (analyse de cycle de vie ou module d'information environnementale) pour aider à la prise de décision afin de diminuer l'impact du béton et le rendre ainsi plus soutenable. Elle s'appuie sur une approche objective d'études des impacts environnementaux du prélèvement de la ressource à l'arrivée au chantier (du berceau à la porte ou *cradle to gate*), telle que menée actuellement en France au sein du groupe DIOGEN ("Bases de données d'impacts environnementaux des matériaux pour les ouvrages de génie civil") de l'AFGC (Association Française de Génie Civil).

## **2. ANALYSE DE CYCLE DE VIE ET MODULE D'INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES**

### **2.1 Analyse de cycle de vie (ACV)**

L'ACV est une méthode normalisée d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un produit ou d'un procédé sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le constituent jusqu'à son élimination en fin de vie (*cradle to grave*). C'est une méthode d'évaluation globale et multicritère qui résulte de l'interprétation du bilan quantifié des flux de matières et d'énergies liés à chaque étape du cycle de vie, exprimée en impacts potentiels sur l'environnement. Les plus couramment retenus sont le changement climatique (gaz à effet de serre), l'épuisement des ressources naturelles, l'acidification atmosphérique, mais aussi la consommation d'énergie primaire et la quantité de déchets générés.

Le principal enjeu d'une ACV est donc d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux en donnant une vision globale des impacts générés afin de pouvoir fournir aux décideurs des éléments d'aide à la décision sur des choix techniques ou organisationnels dans une démarche d'éco-conception par exemple. Les produits présentant les impacts les plus faibles peuvent être ainsi valorisés dans une démarche commerciale ou d'écolabellisation. Cependant, les résultats reflètent souvent la complexité des systèmes étudiés et il n'est pas rare de constater que si un des impacts est diminué en changeant de procédé, les autres peuvent augmenter : limiter ainsi les impacts à la production de gaz à effet de serre, comme c'est généralement fait, peut s'avérer non pertinent et amener des conclusions contraires au bon sens...

La série des normes ISO 14040, parue à partir de 1997, décrit la méthodologie et la déontologie que doivent suivre les études ACV. En France, pour les produits de construction, c'est la norme NF P 01-010 qui fait référence. Une ACV est ainsi articulée en quatre étapes : la première définit les objectifs et le champ d'étude, la deuxième correspond à l'inventaire des flux ramenée à l'unité fonctionnelle, la troisième à l'évaluation des impacts potentiels et la quatrième à l'interprétation des résultats obtenus. Pour être reconnus, les résultats d'une ACV doivent être présentés de manière détaillée et transparente et faire l'objet d'une revue critique par un expert indépendant.

## **2.2 Module d'informations environnementales**

Le problème majeur des ACV est lié à l'évaluation des impacts sur la totalité de la durée de vie du produit ou du procédé une fois mis en œuvre (va-t-il durer 20 ans, 50 ans, 100 ans ?) et à son devenir en fin de vie (recyclage, mise en décharge, ...?). De fait, pour éviter de prendre en compte des hypothèses trop optimistes voire même erronées, ou lorsque le matériau doit encore être transformé, une tendance récente dans le domaine de la construction est de ne prendre en compte que les données couvrant la production jusqu'à la sortie de l'usine (cas des ciments et des granulats) voire le transport jusqu'au chantier (cas du béton).

Cette approche, appelée aussi « du berceau à la porte », permet aux utilisateurs suivants (entreprise de gros œuvre, préfabricant, ...) de bien connaître l'impact des produits et matériaux achetés et d'optimiser leur transformation et leur usage en fonction des impératifs environnementaux. Ainsi, nous commençons en France à voir des appels d'offres performantiels dans lesquels les entreprises doivent présenter avec leur proposition technique et financière un inventaire du cycle de vie qui sera utilisé pour l'évaluation finale de leur offre (stade de Nice par exemple).

## **2.3 Travaux du groupe DIOGEN (AFGC)**

Les premiers retours sur l'évaluation des impacts d'ouvrages du Génie Civil ont montré une très grande hétérogénéité des résultats qui rendait impossible leur comparaison. Les écarts venaient pour l'essentiel des données d'entrées du fait de différence de procédés, d'origine géographique ou temporelle.

Devant cette difficulté, l'Association Française de Génie Civil (AFGC) a mis en place le groupe de travail DIOGEN (Données d'Impact pour les Ouvrages de GENie civil) chargé de collecter auprès des fournisseurs les impacts environnementaux de matériaux utilisés en France métropolitaine dans la réalisation des ouvrages de génie civil puis d'évaluer, en termes d'indice de confiance selon une méthodologie spécifique, les fiches proposées (l'indice de confiance est basé sur l'évaluation des frontières, de la fiabilité et de la complétude des données ainsi que de leurs corrélations temporelle, géographique et technologique). Ces données sont ensuite mises en ligne et utilisables par tous les acteurs du génie civil qu'ils soient donneurs d'ordre, concepteurs, réalisateurs ou chercheurs.

## **3. DONNÉES ENVIRONNEMENTALES FRANÇAISES « DIOGEN »**

### **3.1 Données sur les ciments**

En 2011, l'ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques) a édité un module d'informations environnementales de la production de ciments courants en France métropolitaine, conforme aux prescriptions de la norme NF P 01 010. 9 types de ciments courants ont été retenus et les données d'entrée ont été fournies par l'ensemble des cimenteries françaises métropolitaines.

L'unité fonctionnelle de référence est la tonne de ciment produite, les données sont des données moyennées relatives à l'étape de production du ciment, c'est-à-dire de l'extraction des ressources naturelles jusqu'à la sortie de la cimenterie. Les données d'inventaire venant directement des cimenteries sont la consommation des ressources naturelles (énergétiques et non énergétiques), les émissions dans l'air, l'eau et le sol, la production de déchets (valorisés ou éliminés) et les distances de transport. Les autres données génériques comme le mix énergétique viennent de bases de données (ECOINVENT, DEAM) ou de fournisseurs.

Les données ont ensuite été traitées via le logiciel de calcul TEAM<sup>TM</sup>. Une revue critique indépendante a ensuite été réalisée.

Les tableaux suivants présentent la contribution des différents types de ciments aux impacts environnementaux. Pour faciliter la discussion, les impacts des ciments comprenant des additions sont présentés en écart relatif par rapport au ciment CEM I (sans addition). Le tableau 1 regroupe les ciments renfermant du laitier alors que le tableau 2 regroupe les ciments composés (type II).

Tableau 1. Impacts environnementaux relatifs des différents types de ciment au laitier (ou laitier et cendre pour le CEM V).

Catégorie d'impact	Unité	CEM I	CEM II / A-S	CEM III / A	CEM III / B	CEM V
		52,5	52,5	52,5 et 42,5	42,5 et 32,5	42,5 et 32,5
Energie primaire totale (EP)	MJ	5950	-10,5%	-37,5%	-56,9%	-36,5%
Energie primaire totale non renouvelable	MJ	5483	-10,4%	-36,8%	-55,9%	-36,1%
Energie primaire totale renouvelable	MJ	467	-12,6%	-45,4%	-69,2%	-40,9%
Epuisement ressources non-renouvelables	kg Sb eq	2,12	-11,8%	-42,0%	-64,6%	-39,6%
Consommation d'eau totale	l	1523	-4,9%	-17,7%	-28,3%	-28,2%
Déchets solides	kg	37,87	-8,8%	-31,4%	-46,6%	-31,8%
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	866	-13,0%	-46,8%	-71,5%	-42,0%
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq	2,39	-13,0%	-46,4%	-70,7%	-41,4%
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	33197	-13,7%	-45,6%	-68,3%	-40,7%
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	25	-4,0%	-16,0%	-28,0%	-24,0%
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC 12 eq	1,44E-09	-3,5%	-12,5%	-19,4%	-11,1%
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0,117	-11,1%	-40,2%	-61,5%	-37,6%

Tableau 2. Impacts environnementaux relatifs des différents types de ciment composés (L : calcaire, V : cendres volantes et S : laitier).

Catégorie d'impact	Unité	CEM II / A-S	CEM II/A-L	CEM II/B-L	CEM II / A-V	CEM II / B-M
		52,5	52,5 et 42,5 et 32,5	32,5	42,5 et 32,5	42,5 et 32,5
Energie primaire totale (EP)	MJ	-10,5%	-14,1%	-26,1%	-14,7%	-26,0%
Energie primaire totale non renouvelable	MJ	-10,4%	-14,2%	-26,1%	-14,8%	-25,9%
Energie primaire totale renouvelable	MJ	-12,6%	-13,5%	-26,1%	-13,7%	-27,8%
Epuisement ressources non-renouvelables	kg Sb eq	-11,8%	-12,3%	-25,0%	-13,2%	-25,9%
Consommation d'eau totale	l	-4,9%	-13,8%	-26,1%	-14,2%	-20,3%
Déchets solides	kg	-8,8%	-17,3%	-28,5%	-17,9%	-27,0%
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	-13,0%	-12,4%	-25,2%	-12,8%	-27,4%
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq	-13,0%	-12,1%	-24,7%	-13,0%	-26,8%
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	-13,7%	-12,4%	-24,5%	-13,6%	-27,5%
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	-4,0%	-12,0%	-20,0%	-12,0%	-16,0%
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC 12 eq	-3,5%	-2,8%	-6,2%	-3,5%	-6,9%
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	-11,1%	-11,1%	-22,2%	-12,8%	-23,9%

En première lecture (les données d'impact les plus favorables apparaissent dans des cases grisées), on constate que l'utilisation de ciments avec ajouts permet une réduction plus ou moins importante des impacts environnementaux, cette diminution étant d'autant plus importante que le taux de substitution est élevé (i.e. CEM II/B par rapport au CEM II/A). Pour les laitiers et les cendres volantes, ceci est lié au fait que ces produits sont considérés comme étant issus de stocks d'une autre industrie (production de la fonte ou de l'électricité) et qu'aucun impact ne leur est pour le moment appliqué en dehors du transport et éventuellement de leur transformation (eau, broyage, séchage, ...) mais ceci pourrait changer !

Si on regarde plus en détail les différents impacts, on peut voir que les diminutions ne sont pas identiques selon les impacts :

- la diminution d'énergie est directement dépendante du taux de substitution, ce qui paraît logique compte tenu du fait que 70% de l'énergie primaire totale est consommée par le four de cimenterie pour la cuisson du clinker. Les progrès technologiques dans la cuisson du clinker et la récupération d'énergie sont donc essentiels pour diminuer cet impact. L'augmentation de la part d'énergie primaire renouvelable (moins de 10% actuellement) est aussi une piste à approfondir ;

- la consommation de ressources non énergétiques et non renouvelables (exprimée en équivalent antimoine) peu paraître importante mais il convient de rappeler que, à l'échelle planétaire, les matières premières naturelles utilisées pour fabriquer le ciment (argiles, calcaires ou marnes) sont présentes en abondance dans la croûte terrestre. On peut toutefois chercher à minimiser cet impact en utilisant encore plus de sous-produits industriels dans les ciments ;
- la consommation d'eau est moins impactée par la substitution du laitier. Ceci vient du fait que l'eau est principalement utilisée dans les opérations de fabrication (broyage, granulation, ...) et non de cuisson du clinker (25% seulement de l'eau est attribuable au procédé cimentier) ;
- pour le changement climatique, et donc la production de CO<sub>2</sub>, comme 90% de ces émissions sont liées à la production propre du clinker, la substitution du clinker par une addition s'avère bénéfique. On retrouve le même type de résultat pour l'acidification atmosphérique et la formation d'ozone photochimique ;
- enfin, c'est la destruction de la couche d'ozone qui apparaît la moins impactée par la substitution du clinker par des additions. Toutefois, ces valeurs doivent être prises avec précaution compte tenu du très faible impact de la production de ciment sur cette catégorie.

Ainsi, en ce qui concerne les ciments, la diminution d'impact est surtout liée à la diminution de la teneur en clinker dans le ciment commercialisé. Cependant, il ne faut pas oublier que cela se traduit aussi par une diminution de la classe de résistance du ciment et par des changements importants dans l'acte de construire : plus faible résistance initiale des bétons qui sont aussi plus sensibles à la dessiccation, ....

### **3.2 Données sur les granulats**

L'UNPG (Union Nationale de Producteurs de Granulats) a fait réaliser des modules d'informations environnementales, conformément aux exigences de la norme NF P 01 010, pour trois types de granulats produits en France métropolitaine : granulats issus de roches meubles, granulats issus de roches massives et granulats issus du recyclage du béton.

L'unité fonctionnelle de référence est la tonne de granulats produite, les données sont des données moyennées relatives à la production du granulats considéré, c'est-à-dire de l'extraction des ressources naturelles jusqu'à la sortie de la carrière.

Les données d'inventaire viennent de 8 sites représentatifs de l'exploitation de roches meubles (5 sites en eau, 2 sites hors d'eau et 1 site mixte), 8 sites représentatifs d'exploitation de roches massives (4 sites en roches éruptives et 4 sites en calcaires) et de 7 installations représentatives de recyclage (3 fixes et 4 mobiles). Les sites retenus représentent seulement environ 10% de la production mais ils ont l'avantage de couvrir l'ensemble des types de sites (des petits aux très grands) et de procédés d'exploitation.

Les autres données génériques comme le mix énergétique viennent de bases de données ou de fournisseurs.

Les données ont ensuite été traitées et ont fait l'objet d'une revue critique indépendante.

Le tableau 3 présente la contribution des différents types de granulats aux impacts environnementaux. Pour faciliter la discussion, les impacts des granulats sont présentés en écart relatif par rapport au granulats de roches meubles, le plus utilisé actuellement. Les impacts les plus favorables sont soulignés par l'utilisation d'un fond de case grisé.

Tableau 3. Impacts environnementaux relatifs des différents types de granulats.

Catégorie d'impact	Unité	Roches meubles	Roches massives	Granulats recyclés
Energie Primaire totale	MJ	64,9	-6,2%	-27,1%
Energie primaire totale non renouvelable	MJ	64,40	-6,5%	-27,3%
Energie primaire totale renouvelable	MJ	0,55	29,7%	-1,6%
Epuisement des ressources non-renouvelables	kg Sb eq	0,016	3,7%	25,9%
Consommation d'eau totale	l	279,0	-90,1%	-82,8%
Déchets solides éliminés	kg	0,99	-45,1%	-31,7%
Déchets solides valorisés	kg	0,28	-52,8%	530,3%
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	2,30	11,7%	28,7%
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq	1,73E-02	255,5%	54,3%
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	804	35,6%	0,4%
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	2,91	-21,0%	1,4%
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC 12 eq	2,19E-07	21,5%	55,7%
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	1,04E-03	284,6%	76,9%
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	0,004	197,2%	42,6%

Contrairement aux ciments présentés dans le paragraphe précédent, on constate que le changement de granulats conduit à des variations d'impacts qui ne vont pas toutes dans le même sens. Ceci illustre la difficulté que va rencontrer un utilisateur potentiel pour une prise de décision environnementale.

On peut résumer ce tableau de la manière suivante :

- les granulats de roches meubles sont les plus consommateurs d'énergie primaire et pour cet impact il paraît plus intéressant d'utiliser des granulats recyclés. On voit aussi que la quasi-totalité de l'énergie primaire est non renouvelable (fioul, gaz naturel, ...) et il serait intéressant d'augmenter la part d'énergie renouvelable tout en recherchant des gains énergétiques. A souligner toutefois le rapport pratiquement de 100 entre l'énergie primaire du ciment et celle des granulats ;
- la consommation d'eau est beaucoup plus importante pour la production de roches meubles (279 litres/tonne de granulat). La majeure partie (267 litres) correspond à un prélèvement direct par les sites de production et 80% sont recyclés sur site ;
- en ce qui concerne les déchets, il convient de séparer les déchets solides éliminés des déchets solides valorisés. Ainsi, si les granulats recyclés sont moins favorables que les granulats de roches massives pour les déchets éliminés, ils deviennent bien évidemment très favorables pour les déchets valorisés ;
- en termes de changement climatique, de pollution de l'air, de destruction de couche d'ozone, de formation d'ozone photochimique et d'eutrophisation, l'utilisation de roches massives et de granulats recyclés apparaît défavorable.

A la lecture de ce tableau, on voit donc que les incitations à utiliser des roches massives ou des granulats recyclés ne trouvent pas leur justification dans la limitation des impacts climatiques mais plutôt dans l'utilisation des espaces (moins d'impact foncier) et des ressources.

### 3.3 Autres données DIOGEN

D'autres données françaises en rapport direct avec le béton sont disponibles (laitier de haut fourneau) ou attendues (fumée de silice, additions calcaire, métakaolin, adjuvants, ...) de manière à pouvoir calculer au plus juste la totalité des impacts environnementaux d'une formule de béton.

De même, des données sur les aciers, le bois et les matériaux composites sont collectées et évaluées.

## 4. DONNÉES CONSTRUITES ET EXPLOITATION

### 4.1 Impact environnementaux des bétons (BETie)

Lancé en Novembre 2011 par le SNBPE (Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi) à l'usage des professionnels (accessible au grand public en ligne depuis février 2013), BETie est un outil de calcul des impacts environnementaux du béton. Il permet la création de Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) complètes ou simplifiées dans le cadre de projet spécifique : choix du type de béton, impacts des transports amont et aval (mode et distance), dimensions de la partie d'ouvrage considérée (poteaux, poutres, ..), taux de ferrailage... C'est donc un outil multicritères qui prend en compte soit l'ensemble du cycle de vie, soit l'inventaire du cycle de vie jusqu'à la porte du chantier.

#### 4.1.1 Hiérarchisation des impacts

Il est important de hiérarchiser l'influence des différents constituants de manière à mieux connaître les cibles pertinentes permettant d'améliorer les impacts environnementaux des bétons. Le tableau 4 présente l'influence du type de granulats et du type de ciment sur une formulation de béton à 25 MPa (les diminutions d'impacts les plus importantes sont soulignées par des cases grisées).

Tableau 4. Impacts environnementaux relatifs de bétons confectionnés avec différents types de granulats ou de ciments.

Catégorie d'impact	Unité	C25 CEM I Alluvionnaires	C25 CEM I Massives	C25 CEM I Recyclés	C25 CEM II/A-S Alluvionnaires
Energie primaire totale (EP)	MJ	1 868	-0,2%	-0,9%	-8,7%
Energie primaire totale non renouvelable	MJ	1 743	-0,2%	-1,0%	-8,5%
Energie primaire totale renouvelable	MJ	124	0,1%	0,0%	-12,4%
Epuisement ressources non-renouvelables	kg Sb eq	0,668	0,1%	0,6%	-9,7%
Consommation d'eau totale	l	1 212	-20,7%	-19,0%	-1,6%
Déchets solides éliminés	kg	4,926	-12,4%	-10,5%	-16,0%
Déchets solides valorisés	kg	0,293	-51,4%	512,6%	-0,2%
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	255	0,1%	0,3%	-12,2%
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq	0,777	5,7%	1,2%	-10,4%
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	11 794	2,5%	0,0%	-10,5%
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	14,7	-2,6%	5,4%	-2,4%
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC 12 eq	0	0,0%	0,0%	0,0%
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0,0531	0,0%	-0,1%	-6,6%

On peut ainsi confirmer que remplacer du ciment sans ajout par un ciment de même classe de résistance incorporant du laitier par exemple permet de diminuer significativement (8 à 10%) les impacts environnementaux des bétons courants dont celui sur le changement climatique.

On peut aussi voir que sur certains impacts, comme la consommation d'eau totale ou les déchets solides valorisés, c'est en substituant des granulats alluvionnaires par des granulats issus de roches massives ou de recyclage de béton que l'effet est le plus important.

Enfin, aux niveaux de la pollution de l'eau ou de la destruction de la couche d'ozone, les modifications sont négligeables.

#### 4.1.2 Évaluation environnementale de bétons d'ouvrage

A partir de ce calculateur, il est possible d'effectuer l'évaluation environnementale d'ouvrages en béton en se limitant bien évidemment à la partie béton.

Ainsi, dans les années 1990 en France (projet BHP 2000), une étude technico-économique avait été faite entre trois conceptions de passages supérieurs pour autoroutes. Les variantes proposées étaient soit un pont en béton armé (Rc béton = 60 MPa - volume du tablier = 300 m<sup>3</sup>), soit un pont en béton précontraint (Rcbéton = 80 MPa - volume de béton de 188 m<sup>3</sup>) à comparer avec la solution de base qui était un pont en béton précontraint (Rc béton = 35 MPa - volume de béton de 390 m<sup>3</sup>).

Cette étude avait montré que pour un coût identique (environ 1000 Euros le m<sup>2</sup> utile y compris les fondations), il était possible de faire un pont plus durable grâce au Béton à Hautes Performances.

Le tableau 5 ci-dessous, qui présente les impacts environnementaux relatifs des bétons pour les différentes solutions de tablier par rapport à la solution de base, montre aussi que du point de vue environnemental la solution en béton haute performance précontraint à 80 MPa est la moins impactante.

Tableau 5. Impacts environnementaux relatifs de différents bétons destinés à un passage supérieur.

Catégorie d'impact	Unité pour l'ouvrage	Dalle BP béton 35 MPa	Dalle BA béton 60 MPa	Dalle BP béton 80 MPa
Energie primaire totale (EP)	MJ	901 504	-2,9%	-38,6%
Energie primaire totale non renouvelable	MJ	840 216	-2,9%	-38,5%
Energie primaire totale renouvelable	MJ	61 287	-2,5%	-38,9%
Epuisement ressources non-renouvelables	kg Sb eq	324	-2,5%	-38,2%
Consommation d'eau totale	l	408 308	-16,1%	-48,9%
Déchets solides éliminés	kg	2 095	-3,4%	-39,2%
Déchets solides valorisés	kg	56	-25,1%	-50,9%
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	125 066	-2,6%	-38,7%
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq	392	-4,0%	-39,0%
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	5710 060	-5,3%	-40,0%
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	6 426	-9,0%	-41,5%
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC 12 eq			
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	24	-8,8%	-41,6%

On peut voir aussi (tableau 6), qu'en changeant dans la solution en béton armé (plus facile à réaliser) le ciment CEM I par des ciments composés de même classe de résistance, des gains substantiels en termes d'impacts environnementaux peuvent aussi être faits (10% en moyenne).

Tableau 6. Impacts environnementaux relatifs de différents bétons C60 à base de ciments composés destinés à un passage supérieur.

Catégorie d'impact	Unité pour l'ouvrage	Dalle BA béton 60 MPa	CEM II A-S 60 MPa	CEM II A-V 60 MPa	CEM II A-LL 60 MPa
Energie primaire totale (EP)	MJ	875428	-9,0%	-12,6%	-12,1%
Energie primaire totale non renouvelable	MJ	815675	-8,8%	-12,5%	-12,0%
Energie primaire totale renouvelable	MJ	59752	-12,5%	-13,7%	-13,3%
Epuisement ressources non-renouvelables	kg Sb eq	316	-10,0%	-10,9%	-10,4%
Consommation d'eau totale	l	342380	-2,8%	-8,0%	-7,7%
Déchets solides éliminés	kg	2024	-11,8%	-12,5%	-12,1%
Déchets solides valorisés	kg	42	-0,7%	-1,9%	-1,8%
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	121753	-12,3%	-12,1%	-11,7%
Acidification atmosphérique	kg SO <sub>2</sub> eq	376	-10,4%	-10,3%	-9,7%
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	5405620	-11,1%	-11,0%	-10,1%
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	5850	-2,9%	-6,5%	-5,8%
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC 12 eq				
Formation d'ozone photochimique	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	22	-7,7%	-8,5%	-7,5%



## **4.2     Calculateur d'ouvrage**

A partir de cet exemple basé uniquement sur le béton, on voit bien tout l'intérêt de disposer de ce type d'outil pour l'aide à la décision dans le choix de solutions techniques tout en prenant aussi en compte les impacts environnementaux. Cependant, pour être le plus juste possible, il faut bien évidemment prendre en compte non seulement les autres éléments de structure, comme les aciers pour béton armé ou précontraint négligés dans l'exemple précédent, mais aussi le transport et les moyens de mise en œuvre sur le chantier (grue, banches, aiguilles vibrantes, huiles de démoulage, ...).

Il faut donc non seulement récupérer des données d'impacts de ces différents postes de la construction d'un ouvrage mais il faut aussi pouvoir les assembler : c'est l'objectif du calculateur « CIOGEN » développé initialement par le SETRA et qui sera adapté au calcul d'ouvrage et proposé par l'AFGC.

## **5.       CONCLUSION**

Alors que le réchauffement climatique est devenu une préoccupation mondiale et que les impacts environnementaux du secteur de la construction en général et du béton en particulier sont clairement démontrés, il devient de plus en plus difficile aujourd'hui de justifier de nouveaux choix de construction utilisant ce matériau. Or, ses capacités mécaniques et sa durabilité ainsi que les prouesses techniques qu'il permet de réaliser au quotidien ne doivent pas être oubliées au moment où la demande de la population en termes de logements décentes et d'infrastructures est croissante. C'est un risque aussi bien pour le matériau que pour l'humanité.

En tant qu'acteurs de la construction et chercheurs dans le domaine des matériaux cimentaires, nous nous devons de diminuer les impacts du matériau béton mais en nous appuyant sur des données fiables pour aider à la prise de décision. C'est une opportunité pour les générations à venir.

Il convient donc de se doter d'outils performants permettant cette aide à la prise de décision en s'appuyant sur des données d'impact environnemental fiables. Ces données doivent être aussi les plus complètes possibles et présenter de bonnes corrélations technologique, géographique et temporelle. La démarche entreprise par l'AFGC avec la mise en place du groupe de travail DIOGEN répond à cette problématique.

Les exemples donnés dans cette communication montrent à la fois quels sont les impacts environnementaux les plus importants et aussi comment il est possible de les diminuer. Ainsi, le choix d'un béton à haute performance associé à une optimisation de la structure considérée permet de diminuer de manière significative la totalité des impacts environnementaux de l'ouvrage sans en augmenter le coût économique. De même, faire plus de béton avec moins de clinker et moins d'énergie, valoriser les sous-produits industriels, améliorer la durabilité des ouvrages et certainement aussi rationaliser l'utilisation du béton sont autant de points d'amélioration pour les années à venir.

Il conviendra aussi de développer des calculateurs plus performants pour rendre plus systématique cette approche environnementale et faciliter la prise de décision. Mais dans tous les cas, c'est la justesse et la fiabilité des données d'entrée qui seront les points essentiels de la réussite de cette approche.

## **6.       REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier les membres du groupe de travail AFGC « DIOGEN » que ce soient les producteurs de matériaux qui alimentent la base de données en impacts environnementaux et bien entendu ceux qui les évaluent... Un merci tout particulier à CIMBETON (Patrick Guiraud) et au SNBPE (Jean-Marc Potier) pour les nombreuses discussions autour des impacts des bétons.

## 7 RÉFÉRENCES

Escadeillas G., Les éco-matériaux dans la construction : enjeux et perspectives, 7<sup>ème</sup> édition des Journées scientifiques du (RF)<sup>2</sup>B, Toulouse les 19 et 20 juin 2006

Module d'informations environnementales de la production de ciments courants en France". ATILH, Edition juin 2011 - version 2. Document téléchargeable (<http://www.infociments.fr/developpement-durable/construction-durable/icv-ciments>)

Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches meubles. Données sous format FDES conformes à la norme NF P 01-010. UNPG Edition 31 mai 2011

Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches massives. Données sous format FDES conformes à la norme NF P 01-010. UNPG Edition 31 mai 2011

Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de la production de granulats recyclés. Données sous format FDES conformes à la norme NF P 01-010. UNPG Edition 31 mai 2011