

ÉTUDE COMPARATIVE SOMMAIRE DES PONTS EN BÉTON ET DES PONTS MIXTES EN TERMES D'ÉNERGIE CONSOMMÉE ET D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

Serge MONTENS
SYSTRA

1. INTRODUCTION

Le domaine de la construction représente une part importante des activités humaines en termes d'énergie consommée et d'émission de gaz à effet de serre (GES).

Ainsi on estime qu'en France, et plus généralement en Europe, le secteur du BTP consomme 37 % de l'énergie totale. Environ 15 % de cette énergie (soit 5,5 % de l'énergie totale) sert à la construction des bâtiments et des ouvrages, les 85 % restants servant à leur utilisation (éclairage, chauffage, climatisation,...). Sur ces 5,5 %, 4 % sont consommés pour la production du ciment et de l'acier. C'est dire que 73 % de l'énergie consommée par la construction sont utilisés pour la production des matériaux de base : le ciment et l'acier.

En ce qui concerne les gaz à effet de serre, le BTP représente 40 % des gaz à effet de serre émis par l'homme.

La production de ciment à elle seule en représente 5 % et la production d'acier 6 % ([4]).

Le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, demande aux pays industrialisés de diminuer de 5,2 % leurs émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2012. L'Europe s'est engagée sur une valeur plus forte : 8 %.

Comment prendre en compte le concept de développement durable pour un ingénieur de structures de génie civil ? Le programme de l'opération d'infrastructure étant fixé par le maître d'ouvrage, le bureau d'études ne peut prendre en compte ce concept qu'au travers de la conception de la structure. Le choix des matériaux de construction fait partie de cette liberté qui reste à l'ingénieur de structures.

Nous nous intéresserons à deux indicateurs environnementaux : la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. Ces dernières contribuent au réchauffement climatique. Elles sont exprimées habituellement en kilogramme équivalent CO₂. Tous les gaz n'ont pas le même effet de serre. Ainsi 1 kg de méthane contribue 21 fois plus à l'effet de serre que 1 kg de CO₂.

La présente étude ne prétend pas établir des conclusions définitives dans ce domaine en plein défrichage. Elle représente plutôt une première approche, destinée à sensibiliser l'ingénieur de structures :

- aux ordres de grandeur qui sont en jeu ;
- aux sources d'informations disponibles ;
- et aux méthodes d'évaluation envisageables.

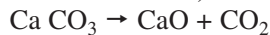
2. QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

2.1. Production du ciment et de l'acier

La production d'une tonne de ciment consomme une énergie d'environ 4 GJ, dépensée en grande partie par le chauffage du calcaire.

La production d'une tonne de ciment entraîne l'émission d'environ 0,7 tonne d'équivalent CO₂ ([12]).

40 % sont émis par le chauffage du calcaire (four à 1500°C), et 60 % sont émis par la réaction chimique suivante (décarbonatation du calcaire) :



La considération des masses atomiques (56 pour CaO et 44 pour CO₂) permet de vérifier l'ordre de grandeur de l'émission de CO₂ par rapport au calcaire consommé. Alors que la part due au chauffage peut être optimisée, celle due à la réaction chimique est bien sûr intangible.

La production d'acier demande une énergie d'environ 21 GJ par tonne.

L'émission de gaz à effet de serre est quant à elle d'environ 1,3 tonne d'équivalent CO₂ par tonne d'acier.

Il faut signaler les progrès réalisés, à la fois par les sidérurgistes et les cimentiers, pour diminuer l'énergie consommée et l'émission de gaz à effet de serre.

Lafarge par exemple s'est fixée un objectif de réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre par tonne de ciment, de 20 % entre 1990 et 2010 ([12]).

Dans la sidérurgie européenne, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre ont diminué de 50 % au cours des 30 dernières années. Les émissions de gaz à effet de serre par les sites de production Arcelor en Europe ont diminué de 18 % entre 1990 et 2004, malgré une production plus importante.

Ainsi, les ratios cités ci-dessus évoluent chaque année.

2.2. Indices d'efficacité environnementale des matériaux

On connaît les indices d'efficacité structurelle des matériaux, encore appelés «résistances spécifiques». Il s'agit de la résistance du matériau divisée par sa masse volumique. La comparaison entre le béton et l'acier permet de montrer que l'on a intérêt à utiliser l'acier pour les ponts de grande portée car l'acier a une résistance spécifique plus élevée que le béton.

Nous définissons de même une efficacité environnementale des matériaux en comparant leurs indicateurs environnementaux à résistance égale.

Considérons un béton armé contenant 350 kg/m³ de ciment et 150 kg/m³ de ferraille.

Sa consommation d'énergie sera, en utilisant les valeurs indiquées plus haut :

$$0,35 \times 4 + 0,15 \times 21 = 4,6 \text{ GJ/m}^3$$

Son émission de gaz à effet de serre sera de même :

$$0,35 \times 0,7 + 0,15 \times 1,3 = 0,44 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$$

Pour l'acier nous avons :

- consommation d'énergie $21 \times 7,85 = 164 \text{ GJ/m}^3$
- émission de gaz à effet de serre $1,3 \times 7,85 = 10,2 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$

Comparons d'abord l'efficacité en compression. Prenons un acier S355 et un béton B35. Le rapport de leurs contraintes admissibles à l'ELS est $(355/1,4)/(0,6 \times 35) = 12$

Les valeurs environnementales par m³ de l'acier doivent donc être divisées par 12 pour être comparées à celle du béton, à résistance en compression égale. On trouve ainsi :

- consommation d'énergie $164/12 = 14 \text{ GJ/m}^3$ pour l'acier comparé à 4,6 GJ/m³ pour le béton armé, soit 3 fois plus,
- émission de gaz à effet de serre $10,2/12 = 0,85 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$ pour l'acier comparé à 0,44 t d'équivalent CO₂/m³ pour le béton armé, soit 1,9 fois plus (tableau 1).

Comparons maintenant l'efficacité en cisaillement. Le rapport des contraintes admissibles à l'ELS est $(0,6 \times 355/1,4)/3 = 50$

Les valeurs environnementales par m³ de l'acier doivent donc être divisées par 50 pour être comparées à celle du béton, à résistance en compression égale. On trouve ainsi :

- consommation d'énergie $164/50 = 3,3 \text{ GJ/m}^3$ pour l'acier comparé à 4,6 GJ/m³ pour le béton armé, soit 0,72 fois la valeur du béton armé,
- émission de gaz à effet de serre $10,2/50 = 0,2 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$ pour l'acier comparé à 0,44 t d'équivalent CO₂/m³ pour le béton armé, soit 0,45 fois la valeur du béton armé (tableau 1).

Mode de travail	Indicateur environnemental	Béton armé	Acier	Rapport Acier / Béton armé
Compression	Énergie	4,6 GJ/m ³	14 GJ/m ³	3,00
	Equ. CO ₂	0,44 t/m ³	0,85 t/m ³	1,90
Compression	Énergie	4,6 GJ/m ³	3,3 GJ/m ³	0,72
	Equ. CO ₂	0,44 t/m ³	0,2 t/m ³	0,45

Tableau 1: Efficacité environnementale à résistance équivalente, rapportée à celle du béton armé.

Ainsi, d'un point de vue théorique, à résistance égale, le béton est plus efficace environnementalement que l'acier en compression, alors que c'est l'inverse en cisaillement. Notons bien qu'il s'agit ici de valeurs théoriques. Des contraintes diverses de conception des structures font qu'il n'est en général pas possible d'utiliser les matériaux au mieux de leur capacité en tout point de la structure. Le voilement par cisaillement des tôles par exemple, impose des épaisseurs minimales souvent bien supérieures aux épaisseurs théoriquement nécessaires.

3. SOURCES D'INFORMATION

3.1. Fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES)

Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire représentent un format de présentation commun des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction ([1]). Elles sont élaborées suivant une norme :

Fiche	Unité fonctionnelle	Volume	Ratio de ferrailage	Auteur
Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	1 ml de poutre 35 × 20 cm de portée 6,40 m	0,07 m³	129 kg/m³	SNBPE
Poutre en béton BAP (CEM I)	1 ml de poutre 35 × 20 cm de portée 6,40 m	0,07 m³	129 kg/m³	SNBPE
Poutre en béton précontraint	1 ml de poutre 35 x 20 cm de portée 6,40 m	0,07 m³	?	FIB – CERIB
Poutrelle en acier	1 ml de poutrelle IPE 360 en acier S 235 de portée 12 m	0,0073 m³	–	CONSTRUIRACIER

Tableau 2: Fiches utilisées.

Fiche	Consommation d'énergie primaire		Émissions de gaz à effet de serre	
	Valeur par unité fonctionnelle	Valeur par m³	Valeur par unité fonctionnelle	Valeur par m³
Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	186 MJ	2 740 MJ	19,5 kg équ. CO ₂	279 kg équ. CO ₂
Poutre en béton BAP (CEM I)	240 MJ	3 380 MJ	27,9 kg équ. CO ₂	399 kg équ. CO ₂
Poutre en béton précontraint	380 MJ	5 430 MJ	33 kg équ. CO ₂	471 kg équ. CO ₂
Poutrelle en acier	1 220 MJ	167 100 MJ	75.1 kg équ. CO ₂	10 300 kg équ. CO ₂

Tableau 3: Données extraites des fiches.

NF P 01-010 ([8]). Elles sont réalisées par les fabricants sur la base du volontariat.

Les caractéristiques environnementales découlent d'une analyse du cycle de vie (ACV) du produit selon la norme ISO 14040. Une analyse de cycle de vie consiste à calculer l'ensemble des impacts environnementaux (consommation énergétique, émission de gaz à effet de serre, déchets, etc.) générés tout au long du cycle de vie du produit (du berceau à la tombe), et rapportés à une durée de vie typique (DVT) du produit. Les caractéristiques sont évaluées pour une «unité fonctionnelle» (par exemple 1 ml de poutre).

Les phases du cycle de vie sont :

- production,
- transport,
- mise en œuvre,
- vie en œuvre,
- fin de vie.

Une liste des fiches existantes est tenue à jour par l'AIMCC (Association des Industries de Produits de Construction) : www.aimcc.org. Il en existe actuellement 201. Elles couvrent les domaines suivants : couverture – étanchéité, maçonnerie, façades, isolation – doublage, cloisons – plafonds, revêtements de sol, revêtements de murs, menuiseries, gouttières, canalisations, mortiers industriels, produits préfabriqués en béton, profilés PVC.

Les fiches figurent dans une base de données officielle, publique et gratuite: la base INIES : www.inies.fr.

Il existe deux formats de fiche : fiche complète et fiche résumée. Une fiche complète fait parfois 31 pages, et compte jusqu'à 745 valeurs numériques non nulles ! En effet, les fiches couvrent de nombreux aspects: consommation de ressources naturelles énergétiques et indicateurs

énergétiques, consommation de ressources naturelles non énergétiques, consommation d'eau, consommation d'énergie et de matière récupérées, émissions dans l'air, émissions dans l'eau, émissions dans le sol, déchets valorisés, déchets éliminés, impacts environnementaux représentatifs des produits de construction, informations utiles à l'évaluation des risques sanitaires, contribution du produit à la qualité de vie à l'intérieur des bâtiments, écogestion du bâtiment, préoccupation économique, politique environnementale globale, définition du système d'ACV, sources de données, traçabilité.

Pour la présente étude, quatre fiches sont utilisables (tableau 2):

- poutre en béton XF1 C25/30 CEM II (septembre 2007),
- poutre en béton BAP (septembre 2007),
- poutre en béton précontraint (décembre 2005),
- poutrelle en acier (décembre 2007).

La poutrelle métallique comporte des connecteurs soudés, et des trous pour un assemblage par boulonnage. La protection anti-corrosion n'est pas comprise.

Les données utiles pour notre étude sont la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre (tableau 3).

Les valeurs très différentes obtenues par m³ pour le béton et l'acier ne peuvent pas être comparées directement car une section de 1 m² d'acier a évidemment une résistance bien supérieure à une section de 1 m² de béton.

Les FDES donnent la décomposition des impacts environnementaux selon les différentes phases du cycle de vie. Elles ne donnent malheureusement pas dans ce cas les émissions d'équivalent CO₂, mais les émissions pour chaque gaz. Nous considérerons les émissions de CO₂ lui-même car c'est ce gaz qui apparaît prépondérant.

Phase	Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	Poutre en béton BAP (CEM I)	Poutre en béton précontraint	Poutrelle en acier
Production	124	191	332	1 200
Transport	5,3	5,3	25,5	17
Mise en œuvre	42	28,2	2,9	0
Fin de vie	14,5	14,6	19,1	2
Total	186	240	380	1 220

Tableau 4: Énergie primaire consommée par phase (en MJ par unité fonctionnelle).

Phase	Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	Poutre en béton BAP (CEM I)	Poutre en béton précontraint	Poutrelle en acier
Production	14,5	23,8	28,2	71,5
Transport	0,4	0,4	1,9	1,3
Mise en œuvre	3,2	2,3	0,28	0
Fin de vie	1,0	1,1	1,5	0,2
Total	19,2	27,5	31,9	73

Tableau 5: Émissions de CO₂ par phase (en kg par unité fonctionnelle).

On observe que (tableaux 4 et 5):

- les phases de production représentent 67 à 98 % du total pour la consommation d'énergie, et 75 à 98 % du total pour les émissions de CO₂,
- la phase de mise en œuvre d'une poutrelle en acier a un impact négligeable,
- le total des phases de production et de mise en œuvre représente 88 à 98 % du total pour la consommation d'énergie, et 89 à 98 % du total pour les émissions de CO₂.

Le transport représente entre 2 et 6 % du total.

Même si l'on sous-estime d'un facteur 2 le transport, on ne se trompe donc que de 2 à 6 % sur le total.

3.2. Autres sources

La base de données européenne intitulée ODYSSEE existe depuis 16 ans. Elle est gérée par L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) dans le cadre du programme SAVE de la Commission Européenne.

Elle donne des ratios technico-économiques. Ceux-ci établissent une relation entre la consommation d'énergie ou les émissions de gaz à effet de serre, et un indicateur d'activité mesurée en termes physiques: litre de carburant ou gramme de CO₂ par kilomètre-véhicule, tonnes-équivalent-pétrole ou tonnes de CO₂ par tonne de ciment, kWh ou gramme de CO₂ par réfrigérateur ou par logement. Cette base de données est payante. Nous ne l'avons pas utilisée.

4. COMPARAISON DES PONTS EN BÉTON ET DES PONTS MIXTES

4.1. Cas étudié

Nous allons comparer la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre correspondant à un pont autoroutier à 2 voies dont le tablier a une largeur totale de 9,75 m, les piles une hauteur de 10 m, avec des pieux forés de 15 m de longueur. Nous ferons varier la portée de 30 m à 110 m.

Deux solutions techniques de tablier seront examinées : tablier en caisson en béton précontraint, et tablier bipoutre mixte acier-béton. Les quantités de béton et de charpente métallique des tabliers seront estimées à l'aide des formules du SETRA.

Les ratios de ferrailage utilisés seront les suivants :

- tablier en béton précontraint : 150 kg/m³ d'acier passif et 40 kg/m³ d'acier de précontrainte ;

- tablier mixte : 200 kg/m³ d'acier passif ;
- piles : 120 kg/m³ d'acier passif ;
- semelles : 140 kg/m³ d'acier passif ;
- pieux : 100 kg/m³ d'acier passif.

Nous avons considéré que le dimensionnement des piles et fondations n'était pas gouverné par les efforts horizontaux.

4.2. Utilisation des FDES

Les FDES ont été établies pour des poutres de bâtiment, et non pour des ouvrages d'art.

Il manque des renseignements importants sur les FDES pour pouvoir faire des extrapolations.

Le dosage en ciment du béton n'est pas mentionné. Or celui-ci est, parmi les constituants du béton, le principal consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre.

Les quantités d'acier passif et d'acier de précontrainte de la poutre précontrainte ne sont pas indiquées.

Les distances de transport ne sont pas toujours explicitées. Cependant nous avons fait l'exercice en utilisant :

- la poutre en béton précontraint pour le tablier en béton précontraint ;
- la poutre en béton XF1 C25/30 CEM II pour le béton du tablier mixte et pour les appuis ;
- la poutrelle métallique pour la charpente du tablier mixte.

Ceci est imparfait puisque le taux de ferrailage n'intervient pas explicitement.

Nous avons ramené les résultats à 1 mètre linéaire de pont (tableau 6).

Portée (m)	Pont en béton		Pont mixte	
	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO ₂)	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO ₂)
30	31,8	2,86	33,7	2,47
40	33,9	3,04	38,4	2,76
50	35,9	3,22	43,4	3,07
60	38,0	3,40	48,8	3,41
70	40,0	3,58	54,4	3,76
80	42,0	3,76	60,3	4,13
90	44,1	3,95	66,4	4,51
100	46,1	4,13	72,7	4,90
110	48,2	4,31	79,2	5,31

Tableau 6: Impacts environnementaux calculés pour 1 ml de pont à 2 voies avec les FDES.

On constate que le pont mixte consomme toujours plus d'énergie que le pont en béton précontraint, et ceci d'autant plus que la portée est grande.

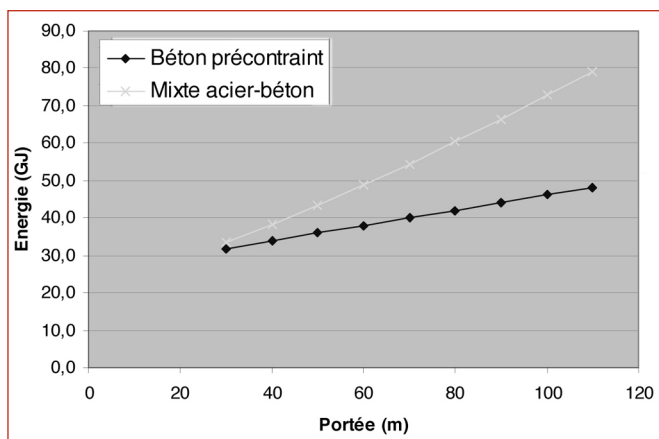


Figure 1: Énergie consommée par ml de pont.

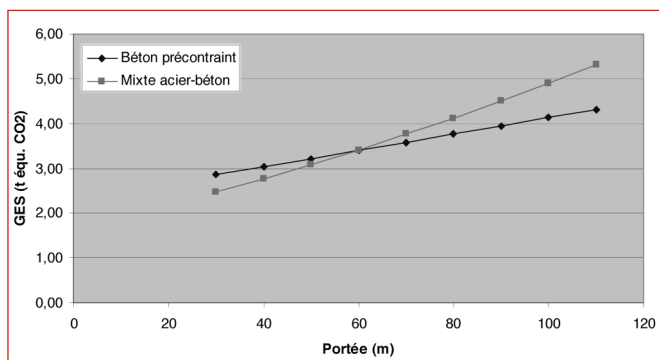


Figure 2: Émissions de GES par ml de pont.

On constate aussi que les ponts mixtes de faible portée émettent un peu moins de gaz à effet de serre que les ponts en béton précontraint.

N'oublions pas que nous avons considéré que le dimensionnement des appuis ne dépendait pas des charges horizontales. Si c'est le cas (vent ou séisme importants), le volume de béton des appuis augmentera, et la différence d'impact environnemental entre le pont béton et le pont mixte diminuera. Si on se ramène au m² de tablier, on peut retenir comme ordres de grandeur :

- consommation d'énergie : 3 à 8 MJ/m² ;
- émission de gaz à effet de serre : 300 à 500 kg équ. CO₂/m².

4.3. Utilisation de valeurs simplifiées

Les FDES n'étant pas adaptées aux ouvrages d'art, et difficilement adaptables du fait du manque de certains renseignements comme expliqué ci-dessus, nous avons essayé également de faire un calcul plus direct, basé sur les indicateurs environnementaux globaux correspondant à la **production des matériaux**. En effet, nous avons montré ci-dessus que les phases de production et mise en œuvre correspondent à 88 % à 98 % du total. Il n'est donc pas injustifié de considérer, en première approximation, ces seules phases. Les résultats ne devront pas être considérés comme des valeurs absolues, mais pourront être comparés de manière relative.

Nous avons ainsi utilisé les valeurs suivantes, déduites des données de base du § 2.1 :

- Béton précontraint : 350 kg/m³ de ciment
→ $0,35 \times 4 = 1,4 \text{ GJ/m}^3$
→ $0,35 \times 0,7 = 0,25 \text{ t équ. CO}_2/\text{m}^3$
- Autres bétons : 300 kg/m³ de ciment
→ $0,3 \times 4 = 1,2 \text{ GJ/m}^3$
→ $0,3 \times 0,7 = 0,21 \text{ t équ. CO}_2/\text{m}^3$
- Acier : 21 GJ/t
1,3 t équ. CO₂/t

Élément	Énergie	GES
Béton précontraint	1,4 GJ/m ³	0,25 t équ. CO ₂ /m ³
Béton pour tablier mixte	1,2 GJ/m ³	0,21 t équ. CO ₂ /m ³
Béton pour appuis	1,2 GJ/m ³	0,21 t équ. CO ₂ /m ³
Acier pour béton	21 GJ/t	1,3 t équ. CO ₂ /t
Acier de charpente	21 GJ/t	1,3 t équ. CO ₂ /t

Tableau 7: Indicateurs environnementaux élémentaires considérés.

Nous avons donc refait les calculs avec ces données (tableau 7). Cette fois, le taux de ferrailage intervient explicitement, alors que le transport n'intervient pas.

Portée (m)	Pont en béton		Pont mixte	
	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO ₂)	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO ₂)
30	33,6	3,15	40,8	2,99
40	35,7	3,34	45,5	3,28
50	37,8	3,54	50,6	3,60
60	39,9	3,74	56,0	3,93
70	42,0	3,93	61,6	4,28
80	44,2	4,13	67,5	4,65
90	46,3	4,33	73,7	5,03
100	48,4	4,52	80,0	5,43
110	50,5	4,72	86,5	5,84

Tableau 8: Impacts environnementaux calculés pour 1 ml de pont à 2 voies avec les valeurs simplifiées.

On observe (tableau 8) que toutes les valeurs sont légèrement supérieures à celle obtenues à partir des FDES, mais dans des proportions assez faibles. Ceci confirme le fait que la production des matériaux de base est l'élément dominant des impacts environnementaux. De plus, on peut faire exactement les mêmes comparaisons entre le pont en béton précontraint et le pont mixte.

4.4. Comparaison avec les effets du trafic

On objectera peut-être que les gaz à effet de serre émis pour la construction du pont sont négligeables par rapport à ceux qui résulteront du trafic passant sur l'ouvrage pendant 50 ans. Un petit calcul va nous donner les ordres de grandeur.

Considérons un trafic moyen de 6000 véhicules par jour par voie, avec 10 % de poids lourds. L'émission de gaz à effet de serre est de 145 g/km pour une voiture et 800 g/km pour un poids lourd. L'émission totale en 50 ans correspondant au passage des véhicules sur 1 ml de pont est donc :

$$(0,145 \times 6\,000 + 0,8 \times 6\,000 \times 0,1) \times 365 \times 50 = 25 \text{ t équ. CO}_2 \text{ par voie.}$$

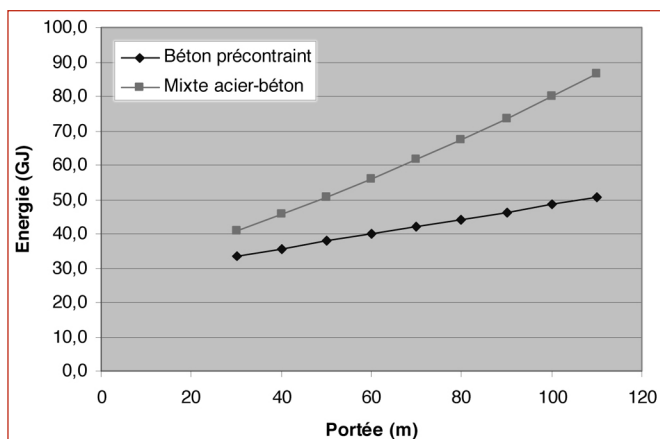


Figure 3: Énergie consommée par ml de pont.

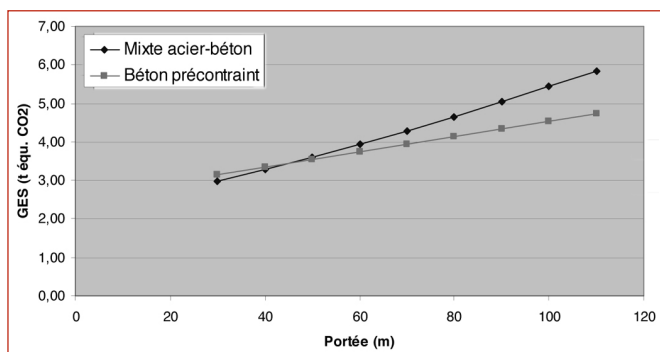


Figure 4: Émissions de GES par ml de pont.

D'après le tableau ci-dessus l'émission de gaz à effet de serre pour la construction d'un ml d'un pont en béton de 100 m de portée est de 4,52 t équ. CO₂ pour le pont à 2 voies étudié, soit 2,3 t équ. CO₂ par voie, ce qui représente 9,2 % de l'émission due au trafic pendant 50 ans. C'est peu mais cela n'est pas négligeable, surtout compte tenu du fait que les émissions de gaz à effet de serre des véhicules de demain seront probablement nettement plus faibles que celles d'aujourd'hui.

5. CONCLUSIONS

5.1. Observations

Les FDES publiées à ce jour concernant des produits de construction pour le bâtiment, sont insuffisantes pour permettre une extrapolation fiable aux ouvrages d'art.

Cependant, si on se contente d'ordres de grandeur, un calcul simplifié utilisant les valeurs de base correspondant à la production des matériaux pourrait être suffisant. On observe en effet que les phases de production et de mise en œuvre représentent 88 % à 98 % des effets totaux.

Sous réserve de toutes les approximations faites, on constate que le pont mixte consomme plus d'énergie que le pont en béton précontraint, et ceci d'autant plus que la portée est grande.

On constate aussi que les ponts mixtes de faible portée émettent un peu moins de gaz à effet de serre que les ponts

en béton précontraint, et que c'est l'inverse pour les ponts de grande portée.

Il faut garder à l'esprit que de nombreuses données intervenant dans ces calculs sont fluctuantes, du fait de l'évolution des techniques de fabrication du ciment et de l'acier ([6]).

5.2. Propositions

Pour faire des études d'impact environnemental de différentes variantes de ponts, il serait bien de pouvoir disposer des valeurs de base des impacts environnementaux (énergie consommée et émission de gaz à effet de serre) pour les éléments de base qu'utilise l'ingénieur structures, c'est-à-dire pour :

- un m³ de béton de tel ou tel dosage en ciment de tel ou tel type,
- une tonne de ferrailage passif de telle ou telle nuance,
- une tonne d'acier de précontrainte,
- une tonne d'acier de charpente de telle ou telle nuance, et le cas échéant de tel ou tel type (poutre, caisson, treillis) si celui-ci a une influence,

Chaque valeur pourrait être affectée d'un correctif, fonction de la distance de transport effectuée.

Un groupe de travail de l'AFGC pourrait établir, d'une part un document de vulgarisation de ces concepts à l'intention des ingénieurs en génie civil, d'autre part une méthodologie simplifiée de calcul des impacts environnementaux applicable aux ouvrages d'art.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Ponthier P.**, Les fiches de déclarations environnementale et sanitaire (FDES) des produits de construction : présentation, validation et utilisation, GC'2007, AFGC.
- [2] **Dalsheimer J.**, Qualité environnementale des produits de construction : la norme NF P 01-010 et son application à des produits en acier, GC'2007, AFGC.
- [3] **Bodet R.**, Certification des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction : application aux produits en béton, GC'2007, AFGC.
- [4] **Chaturvedi S., Ochsendorf J.**, Global environmental impact due to cement and steel, Structural Engineering International, August 2004.
- [5] **Meyer C.**, Concrete materials and sustainable development in the USA, Structural Engineering International, August 2004.
- [6] **Dalsheimer J., Vigo J.M.**, Développement durable et génie civil, les atouts de l'acier, OTUA.
- [7] Rapport de développement durable 2007, Lafarge.
- [8] Norme NF P 01-010 « Qualité environnementale des produits de construction – Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction »
- [9] www.odyssee-indicators.org
- [10] www.aimcc.org
- [11] www.inies.fr
- [12] www.lafarge.fr