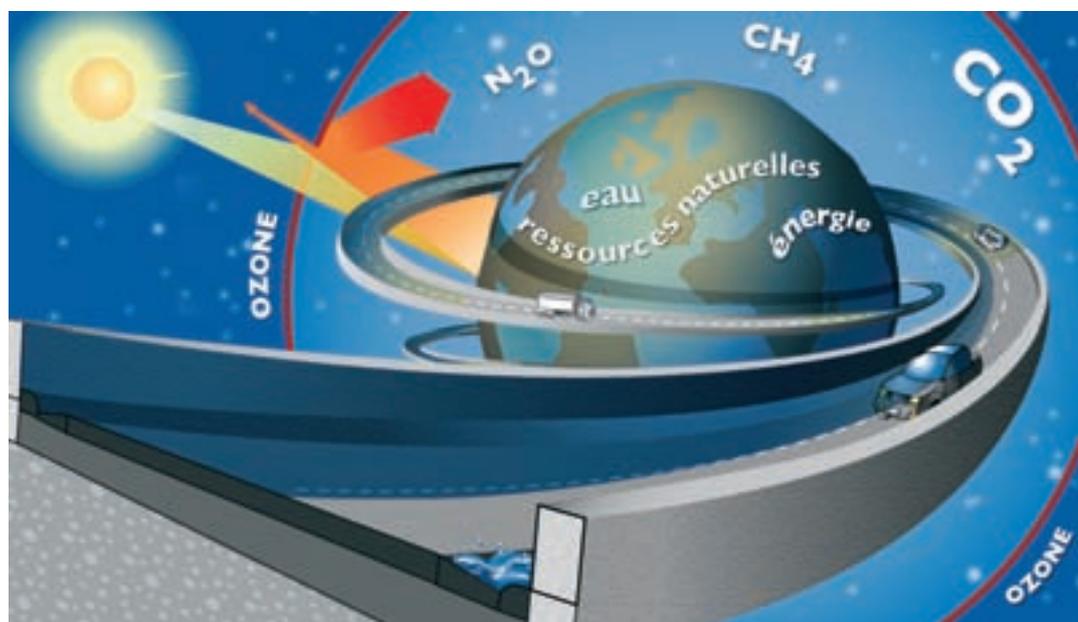


## BÉTON ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

Analyse du cycle de vie  
de structures routières

**BÉTON ET DÉVELOPPEMENT DURABLE**

# Analyse du cycle de vie de structures routières

***Cet ouvrage a été mis à jour par  
Joseph Abdo, CIMBÉTON, et réédité en 2011***

*La version originale de l'ouvrage a été rédigée par  
Joseph ABDO                      CIMBÉTON*

*Son contenu a été validé par un groupe  
de travail CIMBÉTON, auquel ont pris part :*

Fabrice AGNESINA  
Anne BERNARD-GELY  
Ludovic CASABIEL  
Claude DERACHE  
Pascal DUMUR  
Éric GRAND  
François LAPORTE  
Michel PIGEAT  
Jean-Marc POTIER  
Jean-Christophe REDON

# Avant-propos

● L'application des principes du développement durable tend à se généraliser dans les différents secteurs économiques et, en particulier, dans la construction routière. En effet :

- des acteurs industriels importants mettent en œuvre des systèmes de management environnemental, conformément à la série de normes ISO 14000 ;
- les décideurs expriment une demande croissante en matière de qualité environnementale des produits ;
- un processus d'information sur la qualité environnementale des produits de construction est proposé par l'AFNOR dans le cadre de la norme NF P01-010.

Dans ce contexte, l'industrie cimentière, consciente de l'enjeu stratégique et universel du développement durable, a été parmi les premiers à mettre en œuvre, au niveau du process de fabrication, un engagement volontaire de réduction des impacts environnementaux. Aujourd'hui, elle envisage d'aller bien au-delà. Avec ses partenaires, elle désire évaluer les impacts des ouvrages routiers sur l'environnement en effectuant un bilan environnemental par analyse de cycle de vie d'un kilomètre de route. Cette étude a été motivée par un certain nombre d'éléments.

- Les données environnementales constitueront dans un proche avenir un outil d'aide au choix des structures routières, à l'instar des critères techniques et économiques. Les résultats de l'analyse de cycle de vie d'un kilomètre de route constitueront une base de données au service des décideurs.

- La route impacte l'environnement dans sa phase de construction mais aussi dans sa phase d'utilisation. Connaître les contributions relatives des phases de construction, d'entretien, de fin de vie et d'utilisation permet de mieux cibler les actions destinées à diminuer les impacts environnementaux.

- Les études canadiennes [15], indiennes [16], américaines [17] et suédoises [18], établies à partir d'essais en vraie grandeur, concluent toutes que la consommation en carburant des véhicules est moindre sur une chaussée béton que sur une chaussée bitumineuse, l'écart variant entre 2 et 15 % selon les cas. Sachant que la consommation d'énergie engendrée par la circulation est considérable, une réduction de

la consommation des véhicules peut se traduire par une réduction importante des impacts sur l'environnement, en particulier une réduction de la consommation d'énergie et une diminution de l'émission des gaz à effet de serre.

Par souci d'objectivité, l'analyse du cycle de vie d'un kilomètre de route a été confiée au Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris. Ce choix offre un bon nombre d'avantages :

- c'est un centre spécialisé disposant d'une méthodologie de calcul EQUER éprouvée ;
- il utilise une base de données suisse (OEKOINVENTARE, École Polytechnique Fédérale de Zurich) et Allemande (Université de Karlsruhe, OEKOINSTITUT de WEIMAR) qui assurent une cohérence globale quant à la manière de définir et de quantifier les données des inventaires ; En outre cette base de données va au-delà de la norme NF P01-010 quant à la manière d'agréger les flux élémentaires ;
- la méthodologie EQUER permet d'évaluer d'une façon assez complète les impacts d'un ouvrage sous forme de douze indicateurs environnementaux.

Après un rappel des transformations opérées par l'industrie cimentière et ses partenaires sur les outils industriels et la mise au point de produits respectueux des principes du développement durable, la présente étude décrit et compare douze impacts environnementaux de six structures routières (quatre structures en béton, une structure composite BBTM/BAC/GB<sub>3</sub> et une structure totalement bitumineuse BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub>) et de deux types de dispositifs de sécurité (séparateur en béton et glissière en métal). Ces indicateurs sont évalués pour les différentes phases du cycle de vie d'une route (construction, entretien, fin de vie et utilisation).

Les structures de chaussées réalisées par traitement des sols (ou matériaux) en place aux ciments ou aux liants hydrauliques routiers, connues et reconnues comme étant (et de loin) les meilleures structures en matière d'impact sur l'environnement, ne sont pas concernées par cette étude.

# Sommaire

---

<b>● I - Le ciment, le béton et le développement durable</b>	<b>7</b>
1.1 - Les liants hydrauliques et leurs impacts	9
1.2 - Le béton et ses impacts	9
1.3 - Techniques de mise en œuvre du béton et leurs impacts	9
1.4 - La profession et le Développement Durable	10
1.4.1 - Cimenterie: des impacts minimisés	10
1.4.2 - Des centrales BPE au diapason	11
1.4.3 - Des entreprises engagées en faveur de l'environnement	12
1.5 - Les techniques ciment / LHR pour réduire les impacts sur l'environnement	12
1.5.1 - Mettre à profit les matériaux en place pour construire des routes	12
1.5.2 - Mettre à profit les matériaux en place pour entretenir des routes	13
1.6 - Les techniques béton pour réduire les impacts sur l'environnement	13
1.6.1 - La clarté du béton pour lutter contre le réchauffement climatique	13
1.6.2 - Le revêtement en béton poreux ou drainant pour lutter contre les inondations et la pollution	14
1.6.3 - Le béton pour répondre aux exigences de la loi sur l'eau	15
1.6.4 - Voirie en béton dépolluant	15
1.6.5 - Puits pour piéger le carbone	16
1.7 - Conclusion	16

---

<b>● 2 - Présentation de la méthodologie</b>	<b>17</b>
2.1 - Les hypothèses de calcul	18
2.1.1 - Les caractéristiques géométriques	18
2.1.2 - Les structures prises en compte	19
2.1.3 - Les dispositifs de sécurité	19
2.1.4 - Les séquences d'entretien	20
2.1.5 - Les consommations de carburant des véhicules en phase d'utilisation	20
2.1.6 - Le recyclage en fin de vie	20
2.2 - Les données de l'étude	20
2.2.1 - Les inventaires de fabrication des constituants de base	20
2.2.2 - Les consommations des centrales de fabrication des mélanges	22
2.2.3 - Les distances de transport des matériaux	22
2.2.4 - Les consommations de carburant pour les machines de mise en œuvre et d'entretien	22

2.3 - L'analyse de cycle de vie d'un kilomètre de route	22
2.3.1 - Les inventaires de production des mélanges	22
2.3.2 - Les inventaires de transport des constituants et des mélanges	24
2.3.3 - Les indicateurs pour les phases de construction et d'entretien	24
2.3.4 - Les indicateurs pour la phase d'utilisation	24
2.3.5 - Les indicateurs pour la phase de fin de vie	26

---

### ● 3 - Résultats de l'étude 27

3.1 - Présentation comparative des résultats	28
3.1.1 - ACV d'un kilomètre de structures de chaussées	29
3.1.1 - ACV d'un mètre de dispositif de sécurité sur la phase de construction, d'entretien et de fin de vie	32
3.2 - Présentation comparative par indicateur d'un kilomètre de route	33
3.2.1 - L'indicateur environnemental énergie	34
3.2.2 - L'indicateur environnemental eau	36
3.2.3 - L'indicateur environnemental ressources	38
3.2.4 - L'indicateur environnemental déchets	40
3.2.5 - L'indicateur environnemental déchets radioactifs	42
3.2.6 - L'indicateur environnemental gaz à effet de serre (GWP 100)	44
3.2.7 - L'indicateur environnemental acidification	46
3.2.8 - L'indicateur environnemental eutrophisation	48
3.2.9 - L'indicateur environnemental écotoxicité	50
3.2.10 - L'indicateur environnemental toxicité humaine	52
3.2.11 - L'indicateur environnemental SMOG	54
3.2.12 - L'indicateur environnemental odeurs	56
3.3 - Présentation comparative par indicateur d'un séparateur en béton et d'une glissière acier	58
3.4 - Ce qu'il faut retenir	60

---

### ● 4 - Annexes 61

4.1 - Bibliographie	62
4.2 - Données de l'étude	63

---



Chapitre

1

# Le ciment, le béton et le développement durable

La route est un moyen de communication nécessaire au développement. Sa construction nécessite beaucoup de matériaux :

- des matériaux non liés comme la grave non traitée (GNT) ;
- des matériaux traités avec un liant qui peut être, soit du bitume pour faire des graves-bitume et des bétons bitumineux, soit des liants hydrauliques routiers pour faire des graves-liants hydrauliques routiers, soit du ciment pour faire des graves-ciment ou des bétons.

Aussi, construire une route suppose de mobiliser sur des kilomètres, et sur une épaisseur pouvant atteindre un mètre, un volume considérable de granulats. Ainsi, en France, pour entretenir et étendre le réseau routier, 200 millions de tonnes de granulats sont puisées annuellement dans les ressources naturelles, soit un volume de 100 millions de mètres cubes par an. Ceci se traduit par des impacts importants sur le

milieu naturel : perturbation ou disparition des écosystèmes des rivières dans lesquelles sont dragués les matériaux (ballastières), extension des carrières à ciel ouvert, etc. De plus, beaucoup de maîtres d'œuvre et d'entreprises sont confrontés à des pénuries de granulats consécutives à la surexploitation des ressources.

En outre, extraire et fabriquer les constituants élémentaires (granulats et liants), transporter ces constituants élémentaires jusqu'au lieu de fabrication, fabriquer les matériaux élaborés ou les mélanges et les transporter de la centrale de fabrication au chantier, et enfin mettre en œuvre ces matériaux pour la construction de la route, sont des opérations qui engendrent des impacts non négligeables sur l'environnement. Il en est de même pour les opérations d'entretien et de réhabilitation des chaussées en fin de vie.

Enfin, dans sa phase d'utilisation, la route qui traverse des paysages exerce une pression énorme sur la faune et la flore, de par la barrière parfois infranchissable qu'elle constitue, mais aussi des rejets de métaux lourds, des débris en tout genre (pneus, plastique, etc.) et autres polluants engendrés par le trafic des automobiles et des poids lourds, sans parler de l'énorme quantité d'énergie consommée par les véhicules.

En clair, quels que soient les matériaux utilisés, la construction, l'entretien et l'utilisation d'une infrastructure routière impactent l'Environnement. Et les produits à base de liants hydrauliques n'échappent pas à ce constat. Le devoir de chacun est de travailler d'une façon volontaire et responsable à réduire ses propres impacts.

Ainsi, l'industrie cimentière et ses partenaires, conscients de l'enjeu stratégique et universel du développement durable, veulent contribuer à leur niveau, et avec leur compétence, à l'effort collectif ayant pour but de préserver les ressources naturelles et de réduire les impacts environnementaux – bien qu'un nombre élevé de mesures ait été déjà pris au cours des deux dernières décennies.



*Les sociétés cimentières mettent tout en œuvre pour limiter les nuisances liées à l'extraction des matières premières.*

© Photothèque Holcim

## 1.1 - Les liants hydrauliques et leurs impacts

L'industrie cimentière produit principalement des « ciments », ingrédients indispensables à la fabrication des bétons. Ceux-ci sont utilisés pour la construction des bâtiments, des ouvrages d'art mais aussi des routes et des aménagements en béton.

Mais, elle produit aussi des liants spécifiquement élaborés pour la route qu'on dénomme « Liants Hydrauliques Routiers ou LHR ». Ces derniers sont formulés pour traiter et valoriser des matériaux ou des sols pour leur conférer des caractéristiques géotechniques et mécaniques compatibles avec une utilisation routière.

Pour fabriquer du ciment (tableau 1), on puise dans des ressources très abondantes (calcaire et argile), on consomme de l'énergie (2 300 à 5 950 MJ/t de ciment, en fonction de la nature du ciment) et on rejette dans l'environnement différents gaz et en particulier les Gaz à Effet de Serre (210 à 866 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>/t de ciment, en fonction de la nature du ciment) [1].

Pour fabriquer du LHR (tableau 1), on puise dans des coproduits ou des sous-produits (laitier, cendres volantes), on consomme de l'énergie (1 850 à 5 500 MJ/t de LHR, en fonction de la nature du liant) et on rejette dans l'environnement différents gaz et en particulier les GES (125 à 790 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>/t de LHR, en fonction de la nature du liant) [1].

**Tableau 1 : les liants hydrauliques, fabrication et impacts**

Fabrication	Ciment		LHR	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Consommation d'énergie (MJ/t)	2 300	5 950	1 850	5 500
	4 125		3 675	
Emission de GES (kg équivalent CO <sub>2</sub> /t)	210	866	125	790
	538		457,5	

## 1.2 - Le béton et ses impacts

Pour construire et entretenir les routes, on utilise du béton, mélange de granulats (gravillons et sables), ciment, eau et adjuvants. Pour extraire et fabriquer des granulats, on puise dans des ressources très abondantes, on consomme de l'énergie (25 à 50 MJ/t de granulats) et on rejette dans l'environnement différents gaz et en particulier les GES (5 à 15 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>/t). Pour la production du béton, on consomme très peu d'énergie (36 MJ/t de béton – le mélange se fait à froid) et on rejette très peu de gaz dans l'environnement (2,5 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>/t de béton).

En fonction de la nature du ciment utilisé, la consommation d'énergie totale pour fabriquer une tonne de béton se situe donc dans la fourchette 350 - 800 MJ et les émissions de GES se situent donc dans la fourchette 40 - 150 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> [1] et [2].

En moyenne, pour produire 1 m<sup>3</sup> de béton, la consommation d'énergie totale s'élève, à 1 525 MJ et les émissions des gaz à effet de serre à 193 kg eq CO<sub>2</sub> (tableau 2).

**Tableau 2 : le béton, fabrication et impacts**

Béton (1 m <sup>3</sup> )	Ciment	Granulats	Centrale BPE	Total fabrication béton (1 m <sup>3</sup> )
	Fabrication + transport <sup>(1)</sup>	Fabrication + transport <sup>(2)</sup>		
Consommation d'énergie (MJ)	1 269	171	85	1 525
Émission de GES (Kg équivalent CO <sub>2</sub> )	164	23	6	193

1. Distance cimenterie-centrale: 150 km.

2. Distance carrière-centrale: 75 km.

## 1.3 - Les techniques de mise en œuvre du béton et leurs impacts

Elles n'ont relativement que peu d'impact sur l'environnement. En effet, la distance de transport entre centrale BPE et chantier est, en règle générale, faible

et ne dépasse guère les 20 km. L'impact transport est, de ce fait, limité sur le plan de la consommation énergétique (10 MJ/t de béton) et sur le plan des émissions de GES (0,8 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>/t de béton).

En outre, pour mettre en œuvre le béton, on travaille à froid et on utilise un matériel de vibration à faible consommation énergétique (1 MJ/t de béton) et à faible émission de GES (0,07 kg d'équivalent CO<sub>2</sub>/t de béton) [2].

En moyenne, les impacts d'1 m<sup>3</sup> de béton s'élèvent à (tableau 3) :

- 1 551 MJ, pour la consommation d'énergie ;
- 195 kg eq CO<sub>2</sub>, pour les émissions des gaz à effet de serre.

**Tableau 3 : le béton, impacts de la phase construction**

Béton (1 m <sup>3</sup> )	Ciment	Granulats	Centrale BPE	Transport et mise en œuvre <sup>(3)</sup>	Total béton (1 m <sup>3</sup> )
	Fabrication + transport <sup>(1)</sup>	Fabrication + transport <sup>(2)</sup>			
Consommation d'énergie (MJ)	1 269	171	85	26	1 561
Émission de GES (Kg équivalent CO <sub>2</sub> )	164	23	6	2	195

1. Distance cimenterie-centrale : 150 km.

2. Distance carrière-centrale : 75 km.

3. Distance centrale-chantier : 20 km.

## 1.4 - La profession et le Développement Durable

Tout acte ou toute action, comme extraire, transporter, produire, fabriquer, mettre en œuvre, etc., est synonyme d'impacts sur l'environnement, et ceci quel que soit le produit. La profession du ciment et

du béton, ayant été très tôt sensible aux aspects environnementaux, a eu une conduite volontaire et responsable afin de minimiser ses impacts tout en contribuant à éliminer ceux d'autres industries et d'optimiser l'exploitation des ressources naturelles (énergie, matière).

### ■ 1.4.1 - Cimenterie : des impacts minimisés

Produit industriellement à partir de ressources naturelles abondantes, l'argile (20 %) et le calcaire (80 %) cuits dans un four à très haute température (1 450 °C), le ciment nécessite beaucoup d'énergie pour sa fabrication. Pour minimiser les émissions de gaz à effet de serre, l'industrie cimentière a été parmi les premiers à mettre en œuvre, au niveau national, un engagement volontaire de réduction des émissions, et poursuit son action à travers l'AERES (Association d'Entreprises pour la Réduction de l'Effet de Serre) fondée en octobre 2002<sup>(1)</sup>.

Pour y parvenir, les gestionnaires de sites recourent de plus en plus massivement à des combustibles de substitution, déchets d'autres industries qui auraient été éliminés de toute façon sans être valorisés (pneus, huiles usagées, solvants, matières plastiques, cartons, boues d'épuration, farines animales, etc.), moyennant des adaptations très coûteuses, comme les filtres disposés sur les cheminées retenant les poussières et les polluants résiduels qui n'auraient pas été éliminés par la chaleur du four. L'efficacité énergétique des installations a également été améliorée (dispositif d'injection des combustibles plus performants, systèmes de régulation améliorant le rendement de la cuisson, préchauffage des matières premières avec les gaz de combustion).

1. Pour la période 1990-2000, l'industrie cimentière s'est engagée à réduire de 10 % les émissions de CO<sub>2</sub> à la tonne de ciment et de 25 % les émissions totales de CO<sub>2</sub> liées à la consommation de combustibles fossiles. Ces objectifs ont été largement dépassés : plus de 20 % pour le premier objectif et environ 40 % pour le second.



*Les sociétés cimentières mettent tout en œuvre pour limiter les nuisances lors de la fabrication du ciment et des liants hydrauliques routiers.*

Une autre contribution au développement durable, et en particulier à son volet social, est la mise en place, au niveau des cimenteries, de commissions de concertation avec les riverains, les élus, les associations, pour répondre aux interrogations, recueillir les requêtes et trouver des solutions pour y remédier. Ces structures de concertation sont devenues indispensables pour accompagner, le mieux possible et dans la transparence vis-à-vis des populations, les projets d'extension ainsi que de réhabilitation paysagère d'anciennes carrières. Ces dossiers gagnent en pertinence avec l'intervention d'associations spécialistes de la faune et de la flore. L'information du public et la concertation avec les riverains sur les choix industriels illustrent la politique de transparence de l'industrie cimentière.

#### ■ 1.4.2 - Des centrales BPE au diapason

Nécessitant moins de surface que les cimenteries, les centrales de béton prêt à l'emploi (BPE) n'en sont pas moins soumises aux mêmes contraintes. Ces installations sont de plus en plus souvent construites à l'intérieur de bâtiments de type industriel, afin de limiter les nuisances sonores pour le voisinage et d'améliorer l'insertion dans le paysage, objectif qui motive parfois la plantation d'arbres.

Sur le plan de la maîtrise des rejets, les centrales de BPE s'inscrivent pleinement dans une logique « zéro

déchet ». Les excédents de béton frais sont récupérés pour en extraire les granulats qui, après lavage, pourront resservir ultérieurement, de même que les eaux chargées en laitance, recueillies et réinjectées dans le circuit de fabrication comme apport de fines.

Sur le plan énergétique, le principal atout du béton est son mode de fabrication à froid, par simple mélange des constituants de base. Cela se traduit par une consommation électrique limitée et l'absence d'émissions directes de gaz à effet de serre ou de tout autre composé portant potentiellement atteinte à la santé et à l'environnement.

Ce panorama serait incomplet si l'on omettait de souligner l'excellente couverture du territoire français par les centrales de BPE. Grâce à la densité de ce



*Insonorisation, traitement paysager, maîtrise des rejets et recyclage des matériaux sont une réalité pour les centrales BPE.*

maillage, l'impact du transport est limité. Le ciment est acheminé en priorité par voie fluviale ou ferroviaire, et le BPE est disponible en tout point à moins d'une heure de route. Cette présence, au plus près des besoins, est renforcée par un recours privilégié à une main-d'œuvre locale et constitue l'une des composantes de la contribution sociale de l'industrie du béton.

### ■ 1.4.3 - Des entreprises engagées en faveur de l'environnement

Dans le prolongement de la convention d'engagement volontaire (CEV) signée, le 25 mars 2009 – par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), le Syndicat des Terrassiers de France (STF), l'Union des Syndicats de l'Industrie Routière de France (USIRF) et l'Assemblée des Départements de France (ADF) –, le syndicat des Spécialistes de la Chaussée en Béton et des Aménagements (SPECBEA), en tant que syndicat de spécialité, a signé avec la FNTP et le MEEDDM, une Convention d'engagement volontaire métiers portant, en particulier, sur la préservation des ressources non renouvelables, l'optimisation du réemploi des matériaux et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'oxyde d'azote (NOx).

## 1.5 - Les techniques ciment / LHR pour réduire les impacts sur l'environnement

Pour construire ou entretenir les infrastructures routières, il est possible aujourd'hui de réduire les impacts sur l'environnement [1], [2], [3] et [4] tout en réalisant des économies substantielles, en considérant les matériaux des sites à aménager ou à entretenir comme un gisement que l'on peut valoriser par un traitement approprié.

On distingue deux grandes filières de valorisation :

- le traitement aux liants hydrauliques des matériaux naturels en place ou en centrale ;
- le retraitement en place à froid des anciennes chaussées aux liants hydrauliques.

### ■ 1.5.1 - Mettre à profit les matériaux en place pour construire des routes

Au lieu d'exploiter des matériaux nobles, au prix de nombreux impacts environnementaux et des nuisances générées par leur transport (pollutions, bruit, dégradation du réseau routier, etc.), l'approche proposée est d'exploiter le gisement constitué par les matériaux présents naturellement sur le site. Grâce à la technique du traitement des sols aux liants hydrauliques routiers ou au ciment, il est possible de stabiliser argiles, limons, sables, marnes, chailles, etc. [5] Cette technique est de plus en plus utilisée pour les terrassements routiers, mais aussi pour la réalisation des assises de chaussées dont l'étanchéité est assurée par une couche de surface en béton bitumineux.



*La technique du traitement des sols aux liants hydrauliques est de plus en plus utilisée pour les terrassements, mais aussi pour la réalisation des couches d'assises de chaussées.*

### ■ 1.5.2 - Mettre à profit les matériaux en place pour entretenir des routes

L'approche du développement durable peut aussi s'appliquer à l'entretien de chaussées existantes. Plutôt que de fraiser et d'évacuer les matériaux en décharge, pour introduire des matériaux neufs, mieux vaut mettre à profit le gisement propre de la route. Là aussi, la technique du retraitement au ciment et aux liants hydrauliques routiers est parfaitement adaptée [6]. Généralement, le seul matériau apporté est le liant, d'où un impact bien moindre sur l'environnement.



*Le retraitement des chaussées en place au ciment ou aux liants hydrauliques routiers épargne les ressources en granulats et supprime les nuisances dues à leur transport.*

## 1.6 - Les techniques béton pour réduire les impacts sur l'environnement

Ce sont des solutions techniques multifonctions, dotées de propriétés ou de fonctions agissant positivement sur l'environnement ou « solutions compensatoires ». L'infrastructure de transport devient donc une source pour lutter contre certains problèmes tels le réchauffement climatique (revêtement béton clair à fort pouvoir réfléchissant, le béton comme puits pour piéger le carbone), les inondations (concept de structure réservoir en béton poreux) ou la pollution de l'air (béton à fonction dépolluante) [7], [8], [9] et [10].

### ■ 1.6.1 - La clarté du béton pour lutter contre le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique est dû principalement à l'accumulation autour de la terre de gaz tels le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{N}_2\text{O}$  et le  $\text{CH}_4$  qui font office de filtre en ne laissant passer que les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à un seuil  $E_0 = hv_0$ . Ainsi, un rayon lumineux d'une énergie adéquate, émis par le soleil, peut traverser cette couche de gaz pour atteindre la terre où, en fonction des obstacles et des objets rencontrés, il se comporte de deux manières : soit, il est réfléchi (neige, glacier, matériau clair ou poli), soit il est absorbé (matériau sombre, faune, flore) puis restitué à un niveau énergétique plus faible (en infrarouge). Dans le premier cas, le rayon lumineux réfléchi rebrousse son chemin pour atteindre cette couche de gaz qu'il peut traverser sans encombre. En revanche, dans le second cas, le rayon lumineux restitué en infrarouge n'arrive pas à franchir cette barrière de gaz et se trouve ainsi piégé entre la terre et cette couche de gaz. Ce qui provoque le réchauffement climatique par effet de serre. Plus la concentration des gaz est élevée, plus l'effet de serre est important.

En fait, pour lutter contre le réchauffement climatique, deux voies, non exclusives, sont possibles : soit on tente de réduire la concentration des GES, ce que préconise le Grenelle de l'environnement, soit on tente de limiter les pertes d'énergie des rayons lumineux au contact de la terre, en faisant appel, dans la



*Marseille - Aménagement urbain en béton désactivé clair.*



Le Pont du Gard - Aménagement piétonnier en béton hydrosablé clair.

construction et dans l'entretien des bâtiments et des infrastructures de transport, à des matériaux à haut pouvoir réfléchissant (matériaux clairs et polis pour les façades des bâtiments, matériaux clairs et à faible granulométrie pour les infrastructures de transport), ce qui se pratique couramment dans les pays à climat chaud.

Cette bonne vieille méthode, utilisée depuis la nuit des temps dans les pays chauds, a l'énorme avantage d'être corrélée positivement au développement : plus la démographie augmente, plus on construit, plus on



La Savoie - Piste cyclable en béton Armé Continu clair.

augmente les surfaces réfléchissantes et plus on atténue l'effet de serre. Quand on sait ce que représentent aujourd'hui les surfaces développées des façades des bâtiments et les surfaces des infrastructures de transport, on mesure toute l'importance d'une telle approche.

L'idéal, bien sûr, serait d'associer les deux voies [7].

### ■ 1.6.2 - Le revêtement en béton poreux ou drainant pour lutter contre les inondations et la pollution

L'urbanisation croissante – aujourd'hui 80 % de la population française habite en ville ou en périphérie d'une ville – a imperméabilisé les sols et augmenté de ce fait les risques d'inondation par les eaux pluviales, les réseaux d'évacuation n'ayant généralement pas suivi cette croissance.

Pour remédier à ces risques, les chaussées à structures réservoirs [8] constituent une solution intéressante. Elles permettent, sans diminuer l'espace disponible pour l'urbanisation, d'écarter les débits en assurant un stockage temporaire des eaux pluviales ; de plus, elles assurent une décantation des matières en suspension et des métaux lourds, ce qui localise et concentre la pollution, évitant ainsi un engorgement des stations d'épuration par un apport massif et brutal de polluants.



Piste cyclable en béton poreux.

Les risques d'inondation par ruissellement pluvial dépendent des spécificités climatiques régionales.



*Les ouvrages hydrauliques en béton permettent de respecter la loi sur l'eau et son obligation de recueillir puis de filtrer les eaux de ruissellement avant de les rejeter dans l'environnement.*

Les régions méditerranéennes, par exemple, subissent des orages d'été violents, les régions de l'Ouest des pluies automnales fortes et prolongées. Les villes de ces régions seraient donc propices aux chaussées à structure réservoir. Leur réalisation sera à privilégier pour la voirie urbaine à faible et moyen trafic (espaces piétonniers, parkings, lotissements, voies de desserte), mais elles peuvent aussi être dimensionnées et conçues pour des trafics plus importants.

Ces structures réservoirs, constituées de matériaux poreux, peuvent être alimentées soit directement par la surface (cas d'un revêtement drainant), soit à partir d'avaloirs, de caniveaux, de chéneaux (cas d'un revêtement étanche). Les matériaux à base de ciment – bétons denses, bétons drainants ou pavés pour les revêtements et les bétons poreux pour les couches de structure – sont bien adaptés à leur réalisation.

Du fait de leur fonctionnement hydraulique, elles sont en mesure de protéger contre le risque d'inondation en cas de pluie, grâce à trois fonctions :

- le recueil de l'eau de pluie: que le recueil soit réparti (au travers d'un revêtement drainant) ou qu'il soit localisé (revêtement imperméable), la chaussée absorbe l'intensité maximale de la pluie ou le débit de pointe.
- le stockage temporaire de l'eau dans la structure de chaussée; le volume à stocker dépend de la quantité d'eau tombée et du débit de fuite que l'on a nécessairement limité.

– la régulation des débits, c'est-à-dire la restitution lente et différée selon un débit de fuite maximal; cette restitution se fait soit dans le système d'assainissement superficiel par l'intermédiaire d'un orifice calibré, soit par infiltration dans le sol support.

### ■ 1.6.3 - Le béton pour répondre aux exigences de la loi sur l'eau

Grâce aux ouvrages hydrauliques en béton, les concepteurs peuvent protéger l'environnement en canalisant les eaux de ruissellement polluées (caniveaux, cunettes, tuyaux, etc.), puis en les filtrant (bassins de décantation) avant de les rejeter dans la nature, en accord avec les exigences de la loi sur l'eau.

### ■ 1.6.4 - Voirie en béton dépolluant

Le nouveau type de béton, appelé "béton antipollution" ou "béton dépolluant" [7] et [9], est formulé à partir d'un ciment à effet photo-catalytique dont le catalyseur est une variété de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>)



*À Vanves, la rue Jean-Bleuzen a été choisie comme site expérimental par le Conseil général des Hauts-de-Seine, afin de tester un revêtement utilisant du ciment à effet photocatalytique.*

à granulométrie grossière, présent en très faible quantité et intimement lié dans la matrice cimentaire. Ce catalyseur permet d'obtenir, sous l'action des rayonnements ultraviolets (UV), la dégradation des polluants de l'air, principalement les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COV) qui sont piégés par action directe à la surface du béton : les réactions d'oxydo-réduction, issues de l'absorption du rayonnement UV par le ciment "photo-actif", transforment alors les NOx en produits acides qui sont, en partie, neutralisés par le carbonate de calcium alcalin contenu dans le béton et, en partie, éliminés par l'eau de pluie. Conséquence : le revêtement d'une chaussée en béton de ciment à effet photo-catalytique devient particulièrement efficace contre la pollution, car le mouvement de l'air amène constamment des NOx et d'autres composés volatils ou semi-volatils à sa surface. Et comme les molécules adhèrent suffisamment longtemps, elles sont susceptibles d'être décomposées par le processus d'oxydation.

### ■ 1.6.5 - Puits pour piéger le carbone

Le béton est, en effet, un puits pour piéger le CO<sub>2</sub> [10]. Ce phénomène se déroule :

- pendant la vie de l'ouvrage où l'on observe que le matériau est en mesure de capter 20 à 25 % du CO<sub>2</sub>, initialement dégagé par la décarbonatation du calcaire lors de la fabrication des liants, pour produire, en se combinant avec la chaux libre existante dans le béton, du carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub> ;
- après la vie dans l'ouvrage, et dans le cas où le béton est recyclé et transformé en granulats, il a été démontré [10] que, si l'on utilise le béton recyclé de telle manière à ce qu'il reste en contact avec l'air (uti-

lisation en remblai, talus, plates-formes diverses), on obtient une récupération additionnelle de CO<sub>2</sub>, de l'ordre de 25 à 30 %.

Au total, un béton pourra ainsi piéger une quantité de CO<sub>2</sub>, allant de 45 à 55 % de la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée initialement lors de la fabrication des ciments et des liants hydrauliques routiers. C'est le phénomène de carbonatation dont l'effet bénéfique sur le bilan carbone doit être pris en compte.

## 1.7 - Conclusion

---

Ce rapide tour d'horizon des enjeux du développement durable et des contributions de l'industrie cimentière, avec ses partenaires, à sa mise en œuvre ne saurait être exhaustif. Mais, beaucoup reste encore à accomplir : le travail est loin d'être achevé.

Dans ce contexte, CIMBÉTON<sup>(2)</sup>, le SNBPE<sup>(3)</sup> et leurs partenaires, dans le but de mettre à la disposition des décideurs des éléments d'aide au choix des structures routières respectueuses des principes du développement durable, ont confié au Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris une étude d'analyse du cycle de vie d'un kilomètre de route. Ces analyses, menées conformément à la méthode EQUER, ont évalué les impacts environnementaux de plusieurs structures routières en béton et en bitume et des deux dispositifs de sécurité (séparateur en béton et glissière métallique) les plus couramment utilisés sur le réseau routier français.

2. Centre d'information sur le ciment et ses applications.

3. Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi.



Chapitre

2

# Présentation de la méthodologie

La méthodologie EQUER, utilisée par le Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris pour l'évaluation des impacts environnementaux d'un kilomètre de route par simulation du cycle de vie, a été développée par une équipe regroupant l'École des Mines de Paris, Dumez-GTM, l'INERIS, un consultant et une agence d'architecture. Il s'agit de comptabiliser les impacts environnementaux durant la vie d'un ouvrage, depuis la fabrication des constituants de base jusqu'à la démolition de l'ouvrage et le traitement des déchets. Les inventaires de fabrication des constituants de base, utilisés par le logiciel EQUER, sont issus des bases de données fournies par l'École Polytechnique de Zürich (Oekoinventare) et l'Université de Karlsruhe (Oekoinstitut de Weimar), sachant que le travail de collecte des données en France n'est pas terminé.

Le nombre important des flux élémentaires correspondant à un inventaire des cycles de vie d'un produit (environ 400 données) rend la manipulation des paramètres très lourde. Pour simplifier leur utilisation, on passe par un stade intermédiaire dans lequel les inventaires sont stockés sous forme agrégée. Cette agrégation a pour but de condenser les informations en les regroupant en familles homogènes d'impacts ou indicateurs. La méthodologie considère ainsi

douze thèmes ou indicateurs environnementaux (exemple consommation d'énergie, d'eau, gaz à effet de serre, etc.).

## 2.1 - Les hypothèses de calcul

Dans le but de comparer les impacts environnementaux, une analyse de cycle de vie a été menée avec les hypothèses détaillées ci-après.

### ■ 2.1.1 - Les caractéristiques géométriques

La portion de route considérée correspond à un kilomètre de longueur d'une route à 2 x 2 voies à grande circulation. La géométrie de cette route est décrite sur les figures 1 et 2 : 4 voies de 3,5 m de large, deux bandes d'arrêt d'urgence de 1 m de large.

Dans le but de comparer les impacts environnementaux dus aux dispositifs de sécurité, l'étude comprend une analyse de cycle de vie des deux configurations

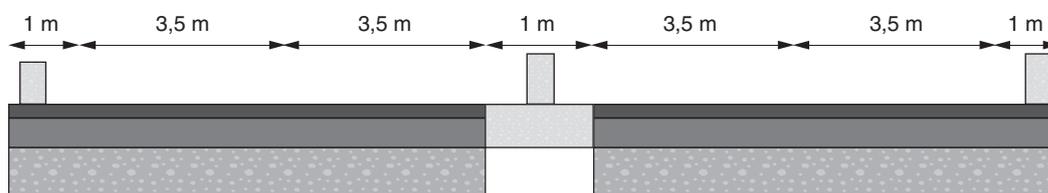


Figure 1 : profil en travers de la route dotée de séparateurs en béton

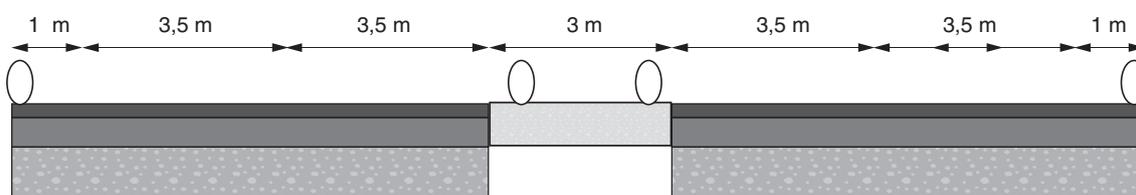


Figure 2 : profil en travers de la route dotée de glissières de sécurité en métal

les plus répandues: la première est constituée d'un séparateur béton de type DBA posé sur un terre-plein central de 1 m de large et de deux séparateurs latéraux en béton de type GBA, la deuxième est constituée de deux glissières métalliques posées sur un terre-plein central large de 3 m et de deux glissières de sécurité latérales en métal. Précisons toutefois que les bilans environnementaux des chaussées et des dispositifs de sécurité sont complètement indépendants.

### ■ 2.1.2 - Les structures prises en compte

Les calculs sont réalisés pour 6 structures de chaussées (figure 3) sélectionnées dans le Catalogue des structures types de chaussées neuves (SETRA/LCPC, 1998) [11], avec les hypothèses suivantes :

- classe de trafic: TC6 soit 25 millions de poids lourds, ce qui correspond à environ 125 millions de véhicules toutes catégories confondus ;
- classe de la plateforme support: PF3 ;
- durée de service: 30 ans.

### ■ 2.1.3 - Les dispositifs de sécurité [12]

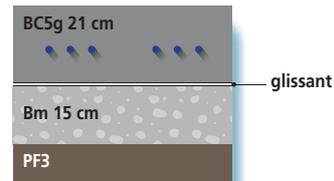
En ce qui concerne les séparateurs en béton, il a été retenu les hypothèses suivantes :

- profil DBA : 650 kg de béton par mètre linéaire ;
- profil GBA : 600 kg de béton par mètre linéaire.

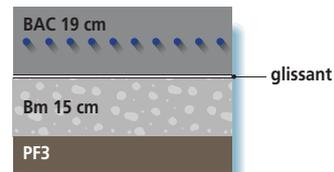
Pour la glissière métallique, on a retenu l'hypothèse de 22 kg d'acier galvanisé par mètre linéaire.

#### Nota

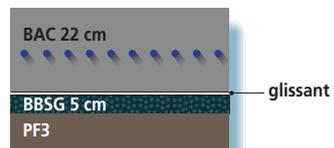
- Il a été retenu une densité de 2,45 pour tous les bétons et une densité de 2,35 pour tous les produits bitumineux.
- Pour la dalle goudonnée, le calcul a été fait à raison de six goujons par joint et par voie de circulation. Ces goujons ont une longueur de 50 cm et un diamètre de 30 mm.
- Pour le béton armé continu, le calcul a été fait sur la base d'un taux d'acier de 0,67 % par rapport à la section béton.
- La constitution des bandes d'arrêt d'urgence est supposée identique pour toutes les structures étudiées. Le terre-plein central est formé d'une couche de 10 cm en béton de ciment de densité 2,45 (350 kg de ciment par m<sup>3</sup> soit 12,2 % de ciment, 81,7 % de granulats et 6,1 % d'eau).
- L'épaisseur moyenne du déblai avant la construction est de 75 cm.



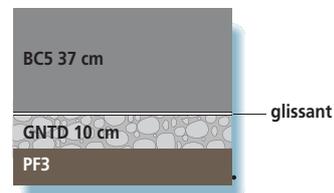
**Structure 1 : dalles goudonnées sur béton maigre**



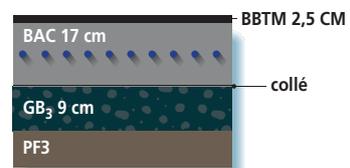
**Structure 2 : béton armé continu sur béton maigre**



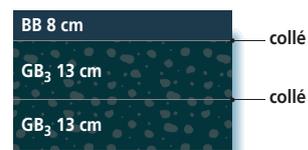
**Structure 3 : béton armé continu sur béton bitumineux semi-grenu**



**Structure 4 : dalle épaisse sur grave non traitée drainante**



**Structure 5 : béton bitumineux très mince sur béton armé continu sur grave bitume**



**Structure 6 : béton bitumineux sur deux couches en grave-bitume**

**Figure 3 : les six structures retenues**

### ■ 2.1.4 - Les séquences d'entretien

En l'état actuel de nos connaissances, il est très difficile d'établir avec précision des scénarios d'entretien pour des périodes longues, le sujet restant fort controversé. Cependant, à partir des constatations effectuées sur les chaussées neuves, et compte tenu de l'amélioration des méthodes et techniques de construction et d'entretien, on a pu établir de façon pragmatique des scénarios plausibles pour les différentes structures envisagées, sur une période de 30 ans, qui s'établissent comme suit.

- Pour les structures 1 et 4:
  - garnissage périodique des joints tous les 6 ans ;
  - régénérescence de l'adhérence, tous les 10 ans, par grenailage ou par réalisation d'un enduit superficiel « ES ».
- Pour les structures 2 et 3 : régénérescence de l'adhérence, tous les 10 ans, par grenailage ou par réalisation d'une couche de surface bitumineuse très mince BBTM.
- Pour les structures 5 et 6 : réalisation d'une couche de surface bitumineuse très mince de 2,5 cm d'épaisseur, tous les 10 ans, qui est rabotée à la 20<sup>e</sup> année.

**On a volontairement sous-évalué les besoins d'entretien de la structure bitumineuse 6, compte tenu des incertitudes évoquées auparavant.**

### ■ 2.1.5 - Les consommations de carburant des véhicules en phase d'utilisation

Trois hypothèses ont été retenues :

- pas de réduction de consommation des véhicules en carburant quelle que soit la nature du revêtement ;
- réduction de la consommation des véhicules en carburant sur revêtement béton de 10 % pendant 10 ans et de 5 % ensuite ;
- réduction de la consommation des véhicules en carburant sur revêtement de béton de 10 % sur toute la durée de service.

On considère une portion de route sans éclairage public.

### ■ 2.1.6 - Le recyclage en fin de vie

En fin de vie, on a fait l'hypothèse que, après démolition, tous les matériaux constitutifs sont transportés sur 20 km afin d'être recyclés en totalité pour d'autres ouvrages.

## 2.2 - Les données de l'étude

---

### ■ 2.2.1 - Les inventaires de fabrication des constituants de base

Ils sont principalement issus de bases de données suisses (Oekoinventare, École Polytechnique Fédérale de Zürich) et allemandes (Université de Karlsruhe, Oekoinstitut de Weimar) car le travail de collecte des données n'est pas terminé au niveau français (tableau 4).

**En ce qui concerne le bitume**, il a été retenu comme source de données la base Oekoinventare. Toutefois, les calculs ont été aussi menés avec les valeurs fournies par la base Eurobitume qui présente des différences notables avec la source Oekoinventare. En effet, l'indicateur de contribution à l'effet de serre est plus élevé dans la base Oekoinventare : 0,504 au lieu de 0,277 (source Eurobitume). L'indicateur de consommation d'énergie primaire est également plus élevé : d'une part il comprend l'énergie matière contenue dans le matériau, et d'autre part cet indicateur est exprimé en pouvoir calorifique supérieur. Il vaut alors 53,42 MJ (à comparer avec 4,71 donnés par Eurobitume).

Il faut noter à ce sujet que la norme NF P01-010 [13] définit l'énergie matière comme « la part de l'énergie primaire contenue dans les matériaux non utilisés comme combustibles entrant dans le système (par exemple la consommation de pétrole entrant dans la composition du produit fabriqué) ». Dans cette norme, l'énergie matière est comptabilisée dans l'énergie primaire totale, ce qui ne semble pas être le cas dans l'inventaire fourni par Eurobitume. Si nous considérons

**Tableau 4 : inventaires de fabrication des constituants de base (pour 1 kg)**

Indicateur	Unité	Ciment	Bitume	Granulats	Eau	Armatures acier	Tôle d'acier galvanisé
Énergie	MJ	5,602	4,71	0,056	0,0259	35,28	70,38
Eau	kg	3,34	0,438	0,117	1,009	20,8	340
Ressources	10 <sup>09</sup>	9,52.10 <sup>-16</sup>	1,01.10 <sup>-14</sup>	3,26.10 <sup>-17</sup>	1,74.10 <sup>-17</sup>	4,94.10 <sup>-15</sup>	4,26.10 <sup>-13</sup>
Déchets	t eq	0,002604	0,000008	0,0002446	0,0000077	0,001301	0,001301
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	8,07.10 <sup>-06</sup>	2,20.10 <sup>-07</sup>	6,66.10 <sup>-07</sup>	8,38.10 <sup>-08</sup>	4,06.10 <sup>-05</sup>	4,06.10 <sup>-05</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	0,978	0,277	0,0103	0,0000087	1,71	3,88
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	0,002417	0,00533	3,52.10 <sup>-05</sup>	8,53.10 <sup>-08</sup>	4,34.10 <sup>-03</sup>	0,02089
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,000286	0,00727	6,04.10 <sup>-06</sup>	5,68.10 <sup>-09</sup>	0,0004567	0,001359
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	1,41.10 <sup>-08</sup>	1,735	2,72.10 <sup>-07</sup>	0,001749	2,22.10 <sup>-04</sup>	331,8
Toxicité humaine	kg	0,006535	0,0072	8,05.10 <sup>-08</sup>	0,000116	0,06189	0,0532
O <sub>3</sub> -smog	kg	0,0001045	0,00519	1,11.10 <sup>-05</sup>	3,01.10 <sup>-08</sup>	5,61.10 <sup>-04</sup>	0,008258
Odeurs	m <sup>3</sup>	4,76.10 <sup>-10</sup>	0	1,70.10 <sup>-11</sup>	0,0751	1,42.10 <sup>-07</sup>	65 560

que le bitume peut être récupéré en fin de vie avec un rendement de 100 %, alors l'énergie matière est récupérée et le bilan global est équivalent. Mais le rendement réel de la récupération est sans doute inférieur à 100 %.

Une étude de sensibilité est donc menée pour savoir si les résultats concernant la comparaison des différentes variantes sont identiques en considérant les deux bases de données.

**En ce qui concerne les granulats**, les données provenant de la base Oekoinventare ont été comparées à des données fournies par l'USIRF<sup>(4)</sup>. La base suisse Oekoinventare donne, pour l'énergie primaire, une valeur plus élevée (0,189 MJ/kg au lieu de 0,056 MJ/kg). La base de l'USIRF a cependant été retenue car elle reflète mieux les pratiques françaises.

**Les données pour le ciment** provenant de la base Oekoinventare ont été comparées à des données collectées par CIMBÉTON. L'indicateur de contribution à l'effet de serre est plus élevé dans la base Oekoinventare : 978 g au lieu de 600 g pour la fabrication d'un kg de ciment, ce qui donne 130 g au lieu de 97 g pour la fabrication d'un kg de béton prêt à l'emploi. La base Oekoinventare a cependant été choisie car les données sont plus complètes : le nombre de matériaux disponibles et l'inventaire des substances émises dans l'environnement sont plus importants.

**En ce qui concerne les goujons, les armatures et les tôles d'acier galvanisé**, nous avons choisi comme source la base de données suisse Oekoinventare, ne disposant pas en France de données sur ces produits.

**En ce qui concerne l'eau**, nous avons choisi comme source la base de données suisse « Ecoinvent », ne disposant pas en France de données sur ce produit.

**Les inventaires considérés pour les constituants de base** (fabrication d'un kg) et correspondant aux douze indicateurs environnementaux sont donnés dans le tableau 4.

### ■ 2.2.2 - Les consommations des centrales de fabrication des mélanges

Les composants sont ensuite mélangés dans une centrale à béton ou dans une centrale d'enrobage, dont les consommations sont données dans le tableau 5. Les impacts générés par la consommation d'un litre de diesel sont fournis par la base Oekoinventare.

**Tableau 5 : consommations d'énergie pour les centrales de fabrication des mélanges**

Type	Consommation l/kg	Consommation MJ/kg
Centrale béton	0,001	0,0360
Centrale d'enrobage	0,007	0,2517

### ■ 2.2.3 - Les distances de transport des matériaux

Les distances de transport, considérées dans la présente étude, pour les constituants de base et les mélanges sont données dans le tableau 6.

4. Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française.

**Tableau 6: distances de transport des matériaux**

<i>Liaison</i>	<i>Distance (en km)</i>
Raffinerie-centrale (bitume)	300
Cimenterie-centrale (ciment)	150
Carrière-centrale (granulats)	100
Acierie-chantier (armatures et glissières)	500
Centrale-chantier (béton prêt à l'emploi et matériaux bitumineux)	20
Fin de vie (tous les matériaux)	20

Nous faisons l'hypothèse que, pour la construction de la route, les matériaux sont transportés par camion de 40 t. Les indicateurs correspondant à l'utilisation du diesel sont également obtenus de la base Oekoinventare.

#### ■ 2.2.4 - Les consommations de carburant pour les machines de mise en œuvre et d'entretien

Les consommations de combustibles pour les différentes machines de mise en œuvre sont données dans le tableau 7.

**Tableau 7: consommations de combustibles pour les machines de mise en œuvre**

<i>Machine</i>	<i>Consommation par jour</i>	<i>Rendement par jour</i>
Compacteur plate-forme	75 litres fuel	75 000 m <sup>2</sup>
Coffrage glissant voies	75 litres fuel	3 000 m <sup>2</sup>
Finisseur grave-bitume	75 litres fuel	10 000 m <sup>2</sup>
Compacteur grave-bitume	75 litres fuel	75 000 m <sup>2</sup>
Finisseur béton bitumineux	75 litres fuel	15 000 m <sup>2</sup>
Compacteur béton bitumineux	75 litres fuel	75 000 m <sup>2</sup>
Coffrage glissant séparateurs béton	75 litres fuel	700 ml
Pose glissière acier	10 litres fuel	10 000 ml
Pose armatures acier	0,58 litre fuel	2 000 ml
Machine de grenailage	75 litres fuel	5 000 m <sup>2</sup>
Machine de rabotage	75 litres fuel	5 000 m <sup>2</sup>
Entretien des joints	0,05 litre bitume/m <sup>2</sup> de chaussée	

## 2.3 - L'analyse de cycle de vie d'un kilomètre de route

L'analyse de cycle de vie (ACV) [14] permet d'évaluer de façon rigoureuse les flux de matières et d'énergie ainsi que les impacts environnementaux liés à l'ensemble des processus associés à la réalisation d'un kilomètre de route et durant sa phase d'utilisation (voir la figure 4). Il inclut toutes les étapes, de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de la période de service de la route, en passant par les phases de fabrication des matériaux, leur mise en œuvre pour la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie de la chaussée – sans oublier la phase d'utilisation.

L'analyse de cycle de vie consiste à collecter les données spécifiques à chaque étape de ce cycle: consommations de matières premières et d'énergie, émissions atmosphériques, rejets liquides et déchets solides. Ces données permettent de déterminer l'inventaire complet des ressources prélevées, des polluants émis et des déchets générés. Les résultats de cet inventaire sont ensuite traduits en terme d'indicateurs exprimant les impacts sur l'environnement.

#### ■ 2.3.1 - Les inventaires de production des mélanges

À partir des données de l'étude, des indicateurs pour la production des mélanges (Béton maigre BC3, Béton de Ciment à joints goujonnés BC5g, Béton Armé Continu BAC, Béton Bitumineux BB et Grave Bitume GB3) sont évalués dans le tableau 8, pour un kg de mélange en sortie de centrale (y compris l'armature pour le BAC ou le goujon pour le BC5g), en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base du béton et selon le pourcentage en masse du béton et de l'acier.

**Tableau 8: indicateurs de fabrication des mélanges (pour 1 kg)**

Indicateur	Unité	Béton bitumineux	Grave-bitume	Béton de ciment	Béton maigre	Béton armé continu
% de bitume		5,3	3,8	0	0	0
% de ciment		0	0	12,2	9	14
% de granulats		94,7	96,2	81,7	84,9	77,9
% d'eau		0	0	6,1	6,1	6
% d'acier		0	0	0	0	2,1
Énergie	MJ	6,55.10 <sup>01</sup>	5,86.10 <sup>01</sup>	7,81.10 <sup>01</sup>	6,04.10 <sup>01</sup>	1,62
Eau	kg	1,49.10 <sup>01</sup>	1,44.10 <sup>01</sup>	5,67.10 <sup>01</sup>	4,64.10 <sup>01</sup>	1,06
Ressources	10 <sup>09</sup>	6,38.10 <sup>16</sup>	4,87.10 <sup>16</sup>	1,54.10 <sup>16</sup>	1,25.10 <sup>16</sup>	2,74.10 <sup>16</sup>
Déchets	t eq	2,34.10 <sup>04</sup>	2,37.10 <sup>04</sup>	5,18.10 <sup>04</sup>	4,43.10 <sup>04</sup>	5,83.10 <sup>04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	2,03.10 <sup>06</sup>	2,04.10 <sup>06</sup>	1,73.10 <sup>06</sup>	1,50.10 <sup>06</sup>	2,71.10 <sup>06</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	4,73.10 <sup>02</sup>	4,33.10 <sup>02</sup>	1,31.10 <sup>01</sup>	1,00.10 <sup>01</sup>	1,84.10 <sup>01</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	6,23.10 <sup>04</sup>	5,43.10 <sup>04</sup>	3,67.10 <sup>04</sup>	2,91.10 <sup>04</sup>	5,01.10 <sup>04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	4,41.10 <sup>04</sup>	3,33.10 <sup>04</sup>	4,70.10 <sup>05</sup>	3,81.10 <sup>05</sup>	6,15.10 <sup>05</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	8,50.10 <sup>01</sup>	8,24.10 <sup>01</sup>	1,08.10 <sup>01</sup>	1,08.10 <sup>01</sup>	1,08.10 <sup>01</sup>
Toxicité humaine	kg	8,19.10 <sup>04</sup>	7,13.10 <sup>04</sup>	9,22.10 <sup>04</sup>	7,15.10 <sup>04</sup>	2,34.10 <sup>03</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	6,32.10 <sup>04</sup>	5,54.10 <sup>04</sup>	7,12.10 <sup>05</sup>	6,82.10 <sup>05</sup>	8,45.10 <sup>05</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	2,46.10 <sup>01</sup>	2,46.10 <sup>01</sup>	3,52	3,52	3,52

#### • Les inventaires de production des mélanges bitumineux

Les constituants de base (granulats et bitume) sont mélangés dans une centrale d'enrobage, dont la consommation est donnée dans le tableau 5. Les indicateurs correspondant à l'utilisation du diesel sont obtenus de la base Oekoinventare.

À partir de ces données, des indicateurs pour des mélanges (Béton Bitumineux, Grave-Bitume) sont évalués dans le tableau 8, pour 1 kg en sortie de centrale, en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base.

#### • Les inventaires de production du Béton Maigre BC3

Les constituants de base (Ciment, Granulats et eau) sont mélangés dans une centrale à béton, dont la consommation est donnée dans le tableau 5. Les indicateurs correspondant à l'utilisation du diesel sont obtenus de la base Oekoinventare.

À partir de ces données, des indicateurs pour le Béton Maigre BC3 sont évalués dans le tableau 8, pour 1 kg en sortie de centrale, en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base.

#### • Les inventaires de production du Béton de ciment à joints goudonnés BC5g

Les constituants de base (Ciment, Granulats et eau) sont mélangés dans une centrale à béton, dont la consommation est donnée dans le tableau 5. Les indicateurs correspondant à l'utilisation du diesel sont obtenus de la base Oekoinventare.

À partir de ces données, des indicateurs pour le Béton de Ciment à joints goudonnés BC5g sont évalués dans le tableau 8, pour 1 kg de béton doté de goudons, en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base du béton et selon le pourcentage en masse du béton et de l'acier des goudons.

#### Les inventaires de production du Béton Armé Continu BAC

Les constituants de base (Ciment, Granulats et eau) sont mélangés dans une centrale à béton, dont la consommation est donnée dans le tableau 5. Les indicateurs correspondant à l'utilisation du diesel sont obtenus de la base Oekoinventare.

À partir de ces données, des indicateurs pour le Béton Armé Continu BAC sont évalués dans le

tableau 8, pour 1 kg de béton armé, en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base du béton et selon le pourcentage en masse du béton et de l'acier des armatures.

Connaissant la longueur des voies, l'épaisseur des couches et la densité des matériaux, le poids de chaque matériau par kilomètre de route est évalué pour chaque structure, pour la fabrication des mélanges.

À partir de ces données, des indicateurs générés par la fabrication des mélanges sont évalués dans les tableaux 25 à 31 (chapitre 4 – Annexes) pour 1 km de route.

### ■ 2.3.2 - Les inventaires de transport des constituants et des mélanges

Pour obtenir les indicateurs correspondant au transport des constituants de base et des mélanges on a retenu les hypothèses suivantes :

- les constituants de base (granulats, ciment, eau, goujons ou armatures, bitume) sont transportés de leurs lieux de production jusqu'à la centrale à béton, sur des distances évaluées et fournies dans le tableau 6 ;
- les mélanges sont transportés de la centrale (centrale d'enrobage, centrale à béton) jusqu'au chantier, sur une distance moyenne, évaluée à 20 km ;
- le transport s'effectue en camion de 40 t, dont la charge utile est de 25 t et dont la consommation s'élève à 39 litres de fuel aux 100 km. Les indicateurs correspondant à la consommation du fuel sont obtenus de la base Oekoinventare. On considère un pouvoir calorifique de 42,8 MJ/kg et une masse volumique de 0,84 kg/l.

À partir de ces données, des indicateurs générés par le transport des constituants et des mélanges sont évalués dans les tableaux 25 à 31 (chapitre 4 – Annexes) pour 1 km de route.

### ■ 2.3.3 - Les indicateurs pour les phases de construction et d'entretien

En fonction de la largeur des voies, de l'épaisseur des couches et de la densité des matériaux, le poids de chaque matériau par kilomètre de route est évalué pour chaque structure, pour la construction et pour l'entretien.

À partir de ces données, des indicateurs générés par la mise en œuvre des matériaux sont évalués dans les tableaux 25 à 31 (chapitre 4 – Annexes) pour 1 km de route.

### ■ 2.3.4 - Les indicateurs pour la phase d'utilisation

Les inventaires disponibles pour le transport par camion correspondent au transport d'une tonne sur un kilomètre. Il faut donc connaître la charge et la consommation des différents véhicules. Ces valeurs sont données dans le tableau 9 (on considère qu'en moyenne, les camions sont chargés à 50 %).

On fait l'hypothèse d'une répartition égale par catégorie : un tiers de camions de 16 t, de 28 t et de 40 t.

**Tableau 9 : charge et consommation des poids lourds**

Type de véhicule	Charge	Consommation
Camion 16 t	8 t	29 l diesel/100 km
Camion 28 t	14 t	36 l diesel/100 km
Camion 40 t	20 t	39 l diesel/100 km

Sur cette période, la route étant de classe TC6, il circule 25 millions de poids lourds et environ 125 millions de voitures. Les indicateurs environnementaux sont calculés en envisageant trois hypothèses.

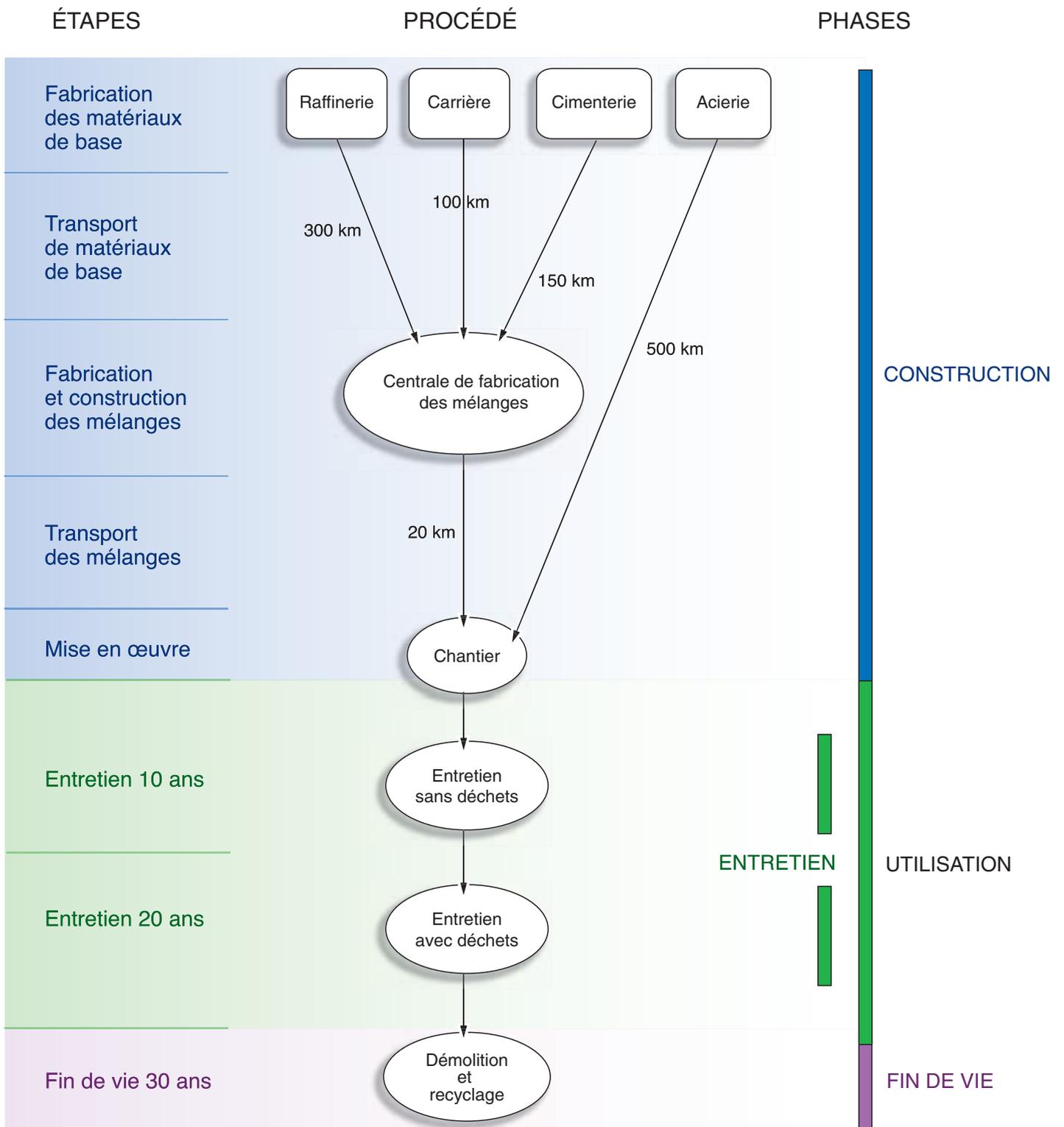


Figure 4: représentation schématique du cycle de vie d'un kilomètre de route.

• **Pas de réduction de consommation des véhicules quelle que soit la nature du revêtement (tableau 10).**

**Tableau 10: pas de réduction de consommation des véhicules quelle que soit la nature du revêtement**

Indicateur	Unité	Voitures	Camions
Énergie	TJ	4,41.10 <sup>-02</sup>	9,88.10 <sup>-02</sup>
Eau	kg	1,78.10 <sup>-08</sup>	3,34.10 <sup>-08</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	2,34.10 <sup>-02</sup>	4,49.10 <sup>-02</sup>
Déchets	t eq	1,79.10 <sup>-03</sup>	1,76.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	1,81.10 <sup>-03</sup>	4,18.10 <sup>-03</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	2,82.10 <sup>-07</sup>	6,28.10 <sup>-07</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	1,85.10 <sup>-05</sup>	7,53.10 <sup>-05</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,44.10 <sup>-04</sup>	1,19.10 <sup>-05</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	8,91.10 <sup>-08</sup>	1,94.10 <sup>-09</sup>
Toxicité humaine	kg	4,06.10 <sup>-05</sup>	9,00.10 <sup>-05</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	1,37.10 <sup>-05</sup>	8,37.10 <sup>-05</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	3,16.10 <sup>-10</sup>	4,34.10 <sup>-10</sup>

• **Réduction de la consommation des véhicules de 10 % pendant 10 ans et de 5 % ensuite (tableau 11)** lorsque le revêtement est en béton, pendant une durée initiale de 10 ans, puis recouvert par une couche mince bitumineuse, conformément aux conclusions des études américaines, canadiennes, suédoises et indiennes [15], [16], [17] et [18].

**Tableau 11: réduction de la consommation des véhicules de 10 % pendant 10 ans et de 5 % ensuite**

Indicateur	Unité	Voitures	Camions
Énergie	TJ	4,11.10 <sup>-02</sup>	9,21.10 <sup>-02</sup>
Eau	kg	1,66.10 <sup>-08</sup>	3,12.10 <sup>-08</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	2,18.10 <sup>-02</sup>	4,18.10 <sup>-02</sup>
Déchets	t eq	1,67.10 <sup>-03</sup>	1,64.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	3,90.10 <sup>-03</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	2,63.10 <sup>-07</sup>	5,85.10 <sup>-07</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	1,73.10 <sup>-05</sup>	7,02.10 <sup>-05</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,34.10 <sup>-04</sup>	1,11.10 <sup>-05</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	8,30.10 <sup>-08</sup>	1,81.10 <sup>-09</sup>
Toxicité humaine	kg	3,79.10 <sup>-05</sup>	8,39.10 <sup>-05</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	1,27.10 <sup>-05</sup>	7,80.10 <sup>-05</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	2,94.10 <sup>-10</sup>	4,04.10 <sup>-10</sup>

• **Réduction de la consommation des véhicules de 10 % sur toute la durée de service** lorsque le revêtement est en béton et que son entretien est fait par grenailage, conformément aux conclusions des études américaines, canadiennes, suédoises et indiennes.

À partir de ces données, des indicateurs générés par l'utilisation des matériaux sont évalués dans les tableaux 33 à 35 (chapitre 4 – Annexes) pour 1 km de route.

■ **2.3.5 - Les indicateurs pour la phase de fin de vie**

En ce qui concerne la fin de vie, nous comptabilisons une quantité de matériaux à traiter (phase de démolition) et nous considérons une distance de transport forfaitaire (comme pour la fabrication).

À partir de ces données, des indicateurs générés lors de la phase de fin de vie sont données dans les tableaux 25 à 31 (chapitre 4 – Annexes) pour 1 km de route.



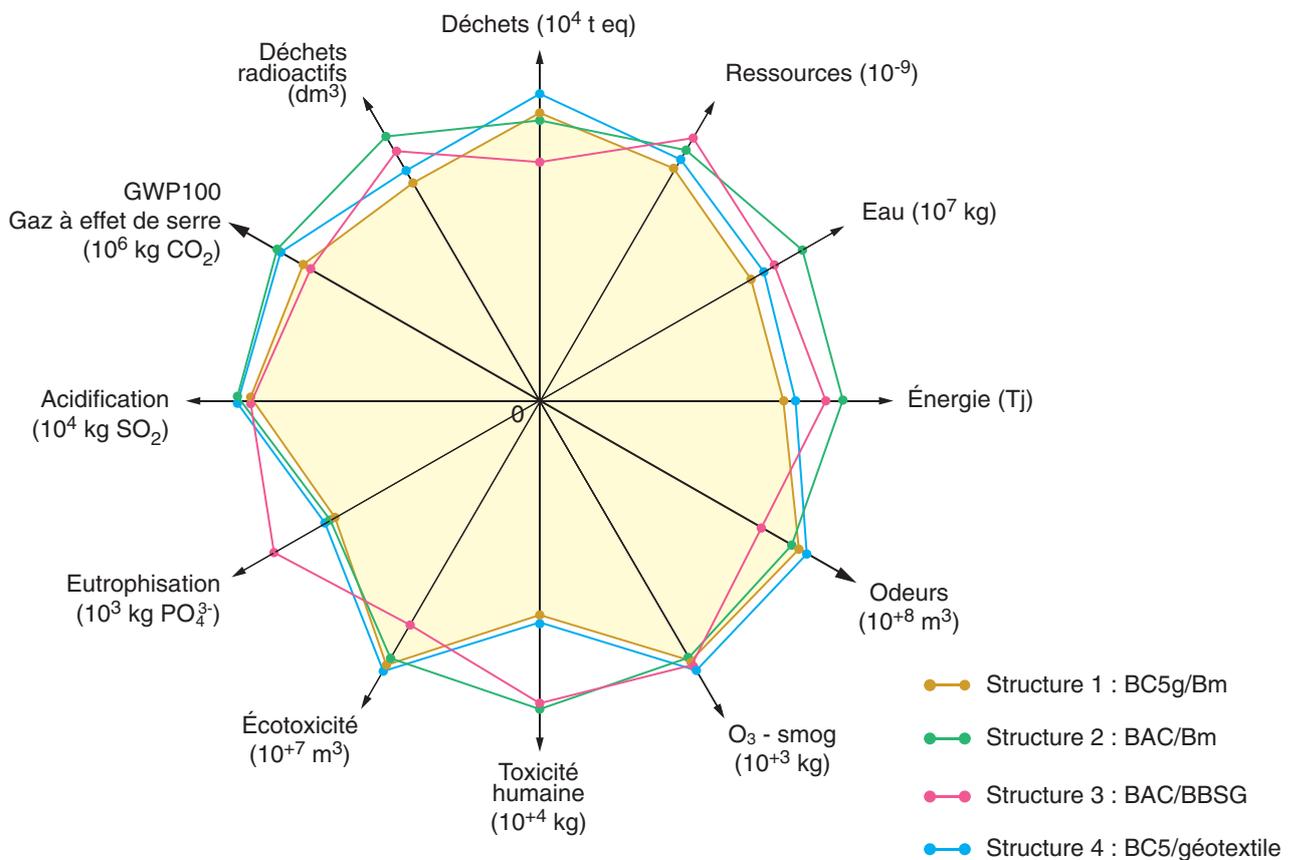
Chapitre **3**

# Résultats de l'étude

### 3.1 - Présentation comparative des résultats

Un bilan par analyse de cycle de vie a été effectué sur une portion de route d'un kilomètre de longueur, représentative d'une route à grande circulation en France. La méthodologie employée consiste à quantifier les matériaux et composants, puis les substances puisées et émises dans l'environnement, en considérant des inventaires issus d'une base de données suisse (Oekoinventare, École polytechnique fédérale de Zürich), et enfin des indicateurs environnementaux parmi ceux les plus couramment employés en

analyse de cycle de vie. Les résultats de ce bilan sont donnés dans les tableaux 25 à 35. Ils sont présentés ci-après sous forme d'un diagramme constitué de douze axes correspondant aux douze indicateurs environnementaux sélectionnés pour cette étude. Chaque axe porte une unité de mesure spécifique à l'indicateur étudié, permettant de comparer visuellement les écarts relatifs entre les différentes techniques. Ainsi, plus le point visualisant l'indicateur étudié est proche de 0, plus l'impact environnemental de la structure est faible.



**Figure 5 : diagramme synthétique de comparaison des impacts environnementaux des quatre structures routières en béton – phase de construction, d'entretien et de fin de vie**

### ■ 3.1.1 - ACV d'un kilomètre de structures de chaussées

#### • Comparaison des structures routières en béton sur les phases de construction, d'entretien et de fin de vie

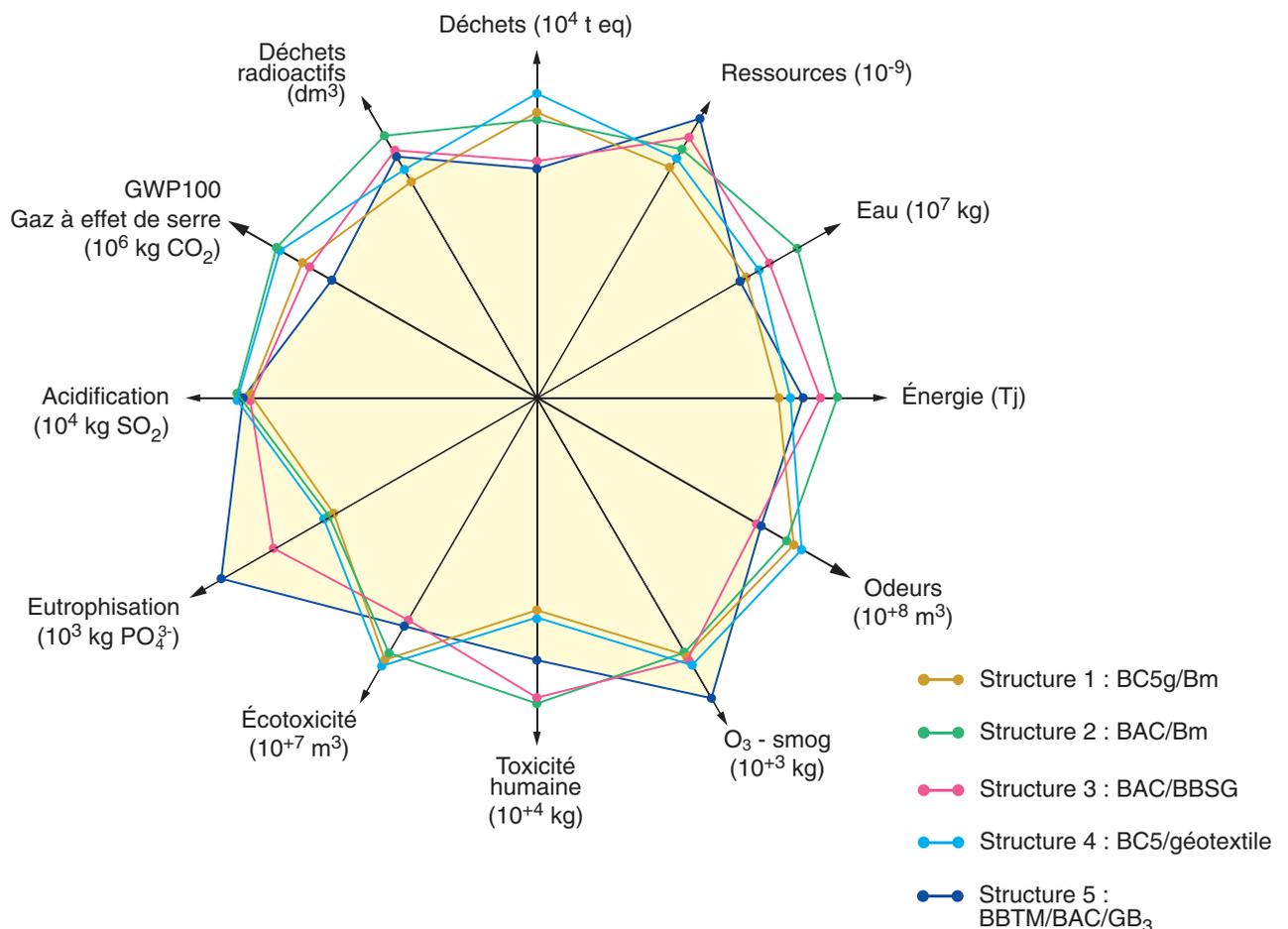
La structure 1 « dalle goudonnée » et la structure 4 « dalle épaisse » sont visiblement plus favorables que les structures 2 et 3 en béton armé continu pour les indicateurs Énergie, Eau, Ressources, Déchets Radioactifs, Eutrophisation et Toxicité humaine.

Elles sont légèrement moins favorables pour les Indicateurs Déchets, Écotoxicité, Smog et Odeurs (voir la figure 5).

#### • Comparaison des structures routières en béton et de la structure composite sur les phases de construction, d'entretien et de fin de vie

La structure 5 « structure composite » est plus favorable que les structures en béton 1 à 4 pour les indicateurs Eau, Déchets, Gaz à effet de serre, Écotoxicité et Odeurs.

Elle est moins favorable pour les Indicateurs Ressources, Eutrophisation et Smog (voir la figure 6).



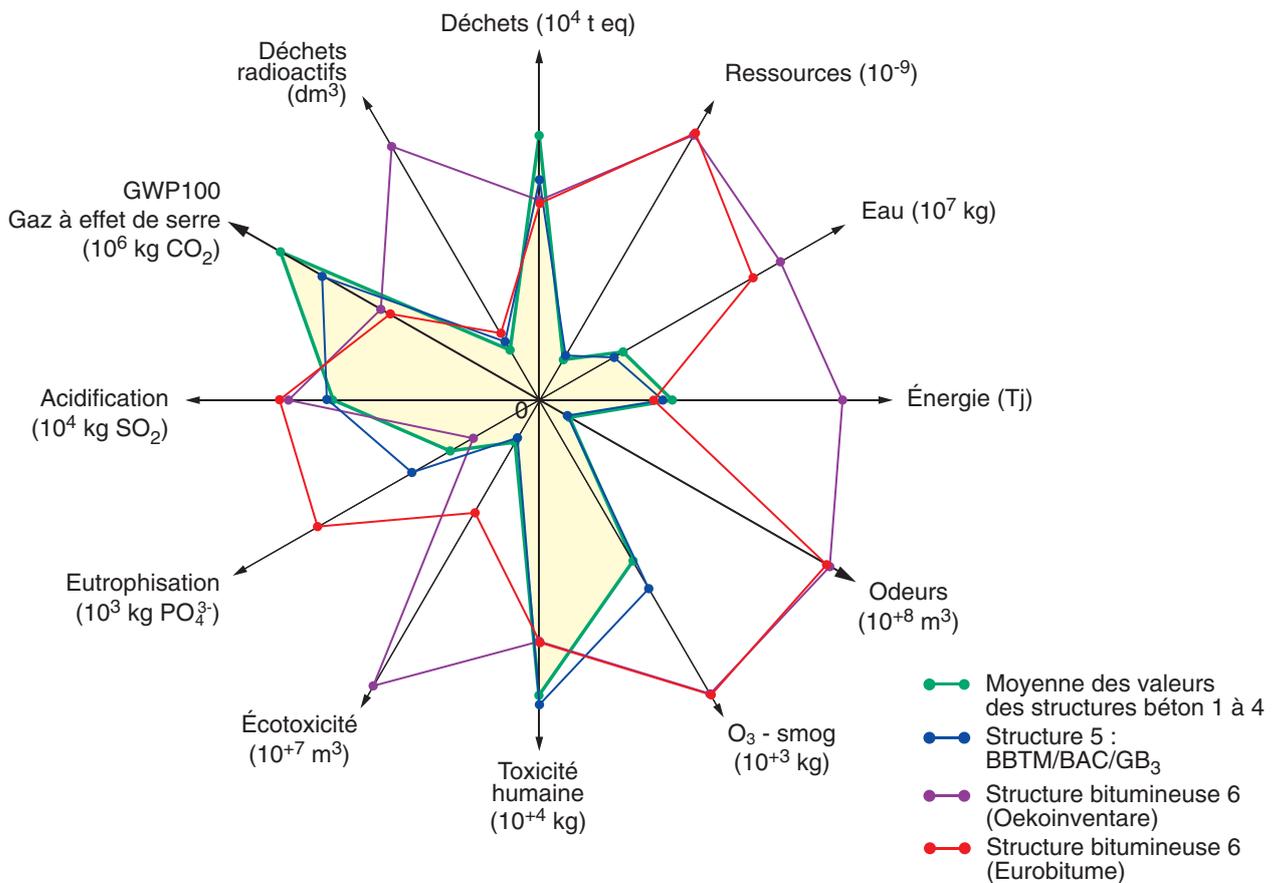
**Figure 6: diagramme synthétique de comparaison des impacts environnementaux des quatre structures routières en béton et de la structure composite – phase de construction, d'entretien et de fin de vie**

• **Comparaison des structures béton et de la structure bitumineuse (source Oekoinventare) sur les phases de construction, d'entretien et de fin de vie**

La structure bitumineuse (Oekoinventare) est plus favorable, que les structures béton 1 à 4, pour les indicateurs Déchets solides, Gaz à effet de serre, Eutrophisation et Toxicité Humaine. En revanche, les structures béton sont plus favorables sur les indicateurs Énergie, Eau, Ressources, Déchets radioactifs, Acidification, Écotoxicité, Smog et Odeurs (voir la figure 7).

• **Comparaison des structures béton et de la structure bitumineuse (source Eurobitume) sur les phases de construction, d'entretien et de fin de vie**

La structure bitumineuse (Eurobitume) est plus favorable, que les structures béton 1 à 4 et la structure composite, pour les indicateurs Déchets, Gaz à effet de serre et Toxicité humaine. En revanche, les structures béton sont plus favorables sur les indicateurs Eau, Ressources, Acidification, Eutrophisation, Écotoxicité, Smog et Odeurs (voir la figure 7).



**Figure 7 : diagramme synthétique de comparaison des impacts environnementaux des structures en béton et de la structure bitumineuse – phase de construction, d'entretien et de fin de vie**

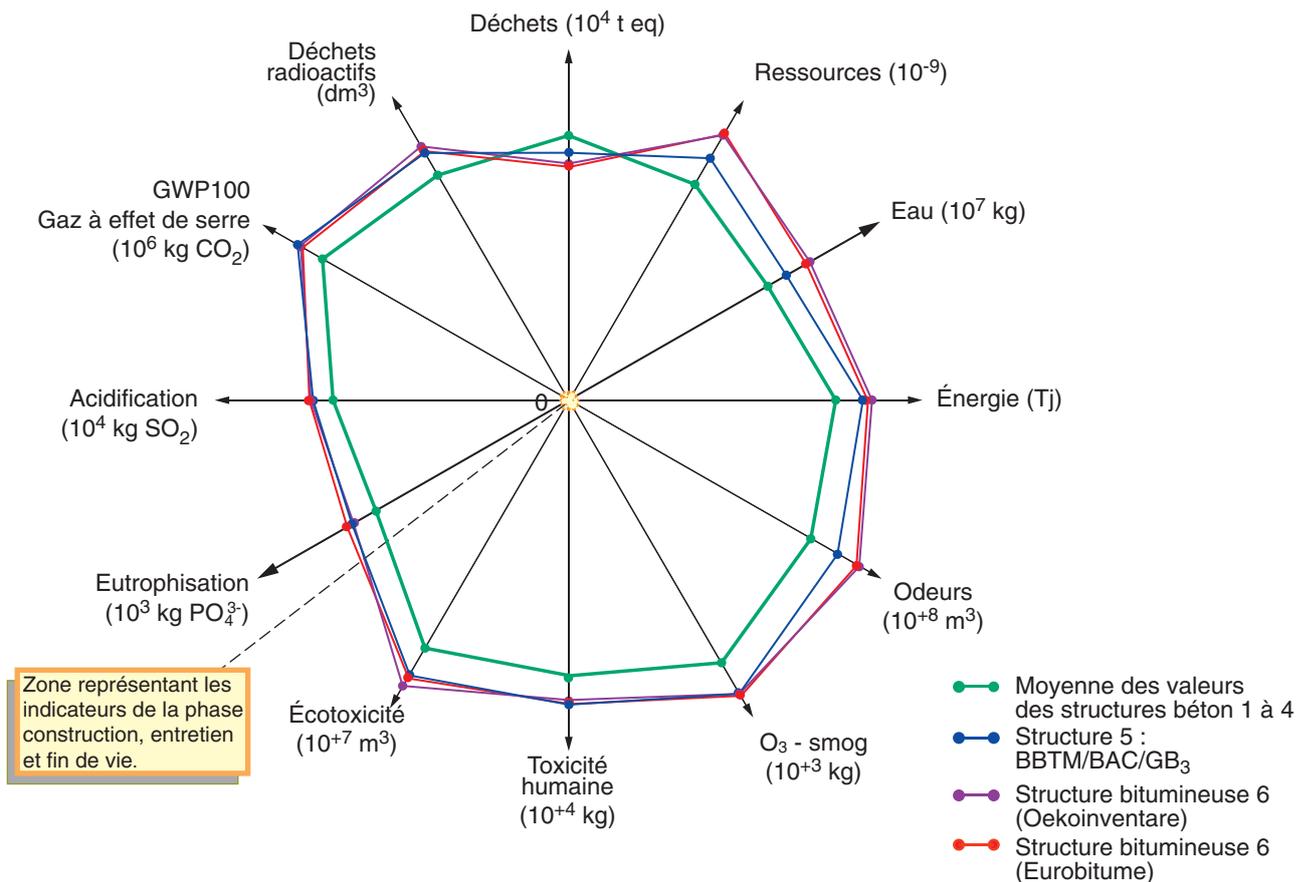
• **Comparaison des structures sur le cycle de vie complet**

Sur le cycle de vie complet, incluant la phase d'utilisation, les impacts liés à la circulation des véhicules sont très importants par rapport aux impacts liés à la construction, l'entretien et fin de vie de la chaussée (voir la figure 8). Les hypothèses relatives à l'influence du revêtement routier sur la consommation de carburant des véhicules peuvent influencer de façon sensible les résultats de l'analyse du cycle de vie des structures routières.

Si une consommation égale est considérée pour les véhicules quel que soit le revêtement, les solutions bitumineuses sont un peu plus favorables par rapport aux déchets solides inertes (la quantité de matériau

utilisée est moindre et le recyclage est possible en fin de vie), les gaz à effet de serre et les variantes béton sont mieux placés sur les indicateurs d'énergie primaire, de consommation d'eau, d'épuisement des ressources, d'eutrophisation, d'écotoxicité, de smog et d'odeurs.

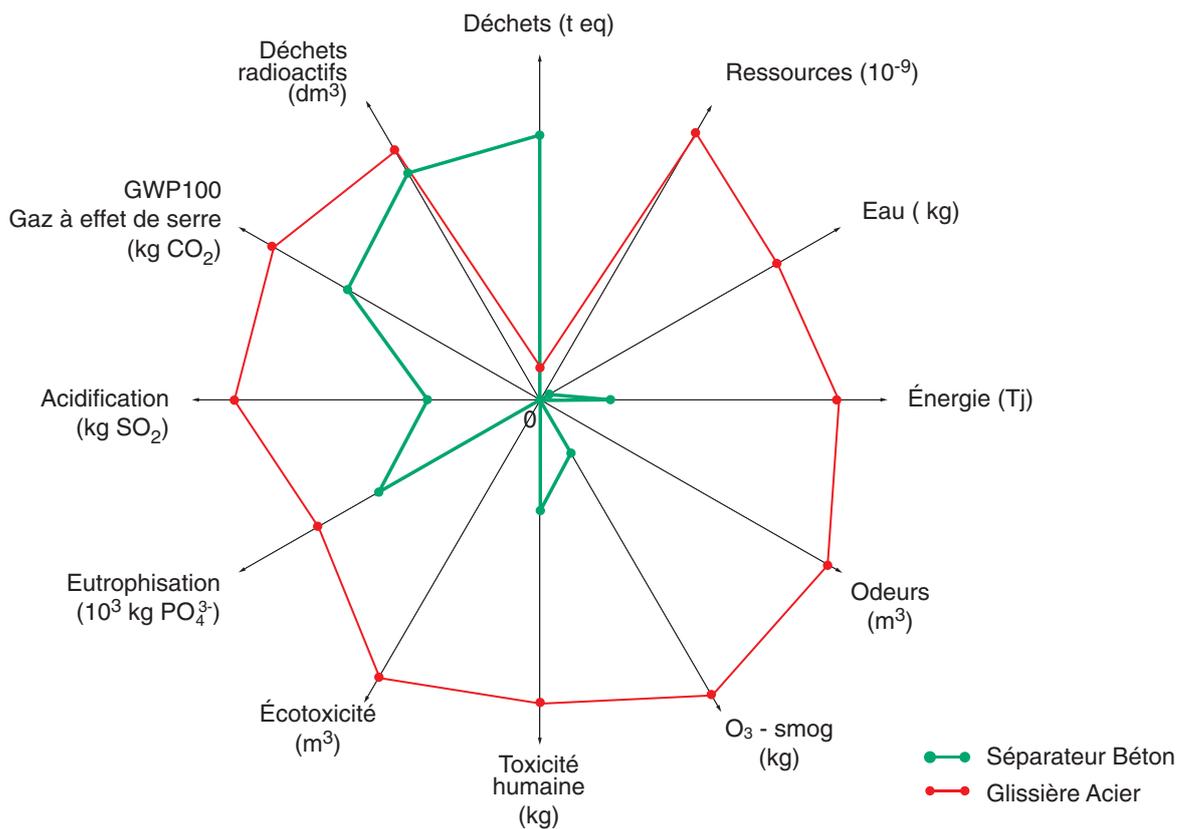
Si une réduction de 10 % de la consommation des véhicules est considérée pour les revêtements béton, sur les 10 premières années, et de 5 %, les années suivantes, les impacts sont réduits pour les variantes béton. La réduction est encore plus élevée si la réduction de 10 % est appliquée sur les 30 ans de durée de vie de l'ouvrage. Dans ce dernier cas tous les indicateurs environnementaux, à l'exception de l'indicateur déchets, deviennent favorables aux structures béton (voir la figure 8).



**Figure 8: diagramme synthétique de comparaison des impacts environnementaux de différentes structures routières – cycle de vie complet**

**3.1.2 - ACV d'un mètre de dispositif de sécurité sur la phase de construction, d'entretien et de fin de vie**

Dans le domaine des dispositifs de sécurité, le séparateur béton présente, pour tous les indicateurs environnementaux, un avantage sur la glissière métal, sauf pour l'indicateur déchets (voir la figure 9).



**Figure 9 : diagramme synthétique de comparaison des impacts environnementaux de deux dispositifs de sécurité – phase de construction, d'entretien et fin de vie**

### 3.2 - Présentation comparative par indicateur d'un kilomètre de route

---

Les indicateurs environnementaux ont été calculés pour :

- la fabrication des matériaux de base (ciment, granulats, bitume, tôles d'acier) ;
- le transport des matériaux en phase de construction (transport des matériaux de base vers les centrales, transport des mélanges vers le chantier) ;
- la fabrication des mélanges (grave-ciment, grave-bitume et béton bitumineux) ;
- les process de chantier ;
- l'entretien (y compris le transport des matériaux et des déchets) ;
- l'utilisation de la route par les voitures et par les camions ;
- la fin de vie.

Les résultats, pour un kilomètre de route, sont donnés dans les tableaux de l'annexe 4.2. Les résultats de l'analyse de cycle de vie sont présentés par indicateur environnemental. Nous rappelons ici la liste des indicateurs considérés :

- consommation d'énergie primaire, en Terajoule (1 TJ = 277 778 kWh) ;
- consommation d'eau, en kg ;
- contribution à l'épuisement des ressources, quantités de combustibles et de matières premières rares

utilisées par le projet divisées par les réserves mondiales correspondantes, ce rapport est exprimé en exposant -9 (milliardième) ;

- déchets générés en tonnes ;
- déchets radioactifs générés en dm<sup>3</sup>,
  - contribution à l'effet de serre (potentiel de réchauffement global, GWP), en kg d'équivalent CO<sub>2</sub> ;
  - contribution à l'acidification, en kg d'équivalent SO<sub>2</sub> ;
  - contribution à l'eutrophisation, en kg d'équivalent phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>),
  - contribution à l'écotoxicité, en m<sup>3</sup> équivalents d'eau polluée,
  - contribution à la toxicité humaine, en kg équivalents de chair contaminée ;
  - contribution au phénomène de smog (pollution de l'air), en kg d'équivalent de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> ;
  - génération d'odeurs, en m<sup>3</sup> équivalents d'air pollué par de l'ammoniac.

Ces indicateurs peuvent être globaux, c'est-à-dire à l'échelle planétaire, comme les indicateurs énergie et gaz à effet de serre, ou locaux/régionaux tels le smog, les odeurs, l'acidification, etc.

Tous ces indicateurs sont équivalents en matière d'impact sur l'environnement, le caractère local ou régional n'enlevant rien à l'importance de chacun.



### 3.2.1 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL ÉNERGIE

#### ■ Définition

Il s'agit de la consommation d'énergie primaire. Cet indicateur représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles. C'est donc un indicateur environnemental global.

La consommation de l'énergie primaire est exprimée en Joule (J). Pour plus de commodité, des unités multiples du Joule sont utilisées, telles le Mégajoule (MJ) ou le Térajoule (TJ) qui valent :

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ TJ} = 10^{12} \text{ J.}$$

Aussi, on utilise plus couramment le kilowattheure (kWh) qui est lié au Joule par la relation :

$$1 \text{ TJ} = 277\,778 \text{ kWh.}$$

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

Pour la construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et pour l'utilisation de la route, la source d'énergie utilisée est le pétrole et ses dérivés (gasoil, bitume, essence, etc.) qui existe sur la terre en quantité limitée et non renouvelée. Elle diminue donc régulièrement. Au rythme actuel, les réserves mondiales seront épuisées bien avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. D'où la nécessité de réduire la consommation d'énergie aussi bien dans les travaux de construction et d'entretien que dans la phase d'utilisation de la route.

#### ■ Consommation d'énergie pour 1 km de route

Le tableau 12 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la consommation d'énergie engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie et d'autre part durant la phase d'utilisation. En outre, il présente

deux hypothèses relatives à l'économie d'énergie qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 10 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière de consommation d'énergie, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. L'énergie primaire nécessaire pour construire, entretenir et recycler en fin de vie, ne représente que de 1 à 3 % de l'énergie totale consommée durant les 30 années d'utilisation (voir le tableau 12).

- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, la structure BC5g/Bm est la moins consommatrice en énergie (21,3 TJ), la structure BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub> (Oekoinventare) étant la plus consommatrice (53,6 TJ). L'écart de consommation d'énergie entre ces deux structures s'élève à 32,3 TJ (voir la figure 10, partie gauche).

- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 par rapport aux structures 5 et 6. L'écart de consommation d'énergie en faveur des structures béton se situe entre 90 et 143 TJ, par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 10, partie droite). Ce gain d'énergie apporté par les structures béton compense largement l'énergie nécessaire à la construction et à l'entretien de la route (figure 10). **En fait, une hypothèse de réduction de la consommation des véhicules de 2 % sur 30 ans aurait suffi.**

Tableau 12: indicateur environnemental énergie (en TJ)

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Consommation d'énergie:</b> • Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans) • Phase d'utilisation	21,3 1,43.10 <sup>+03</sup>	26,5 1,43.10 <sup>+03</sup>	25,0 1,43.10 <sup>+03</sup>	22,3 1,43.10 <sup>+03</sup>	23,3 1,43.10 <sup>+03</sup>	22,9 1,43.10 <sup>+03</sup>	53,6 1,43.10 <sup>+03</sup>
<b>Économie d'énergie</b> – sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules:							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	0,10.10 <sup>+03</sup>	0,09.10 <sup>+03</sup>	0,09.10 <sup>+03</sup>	0,10.10 <sup>+03</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	0,143.10 <sup>+03</sup>	0,143.10 <sup>+03</sup>	0,143.10 <sup>+03</sup>	0,143.10 <sup>+03</sup>	0	0	0

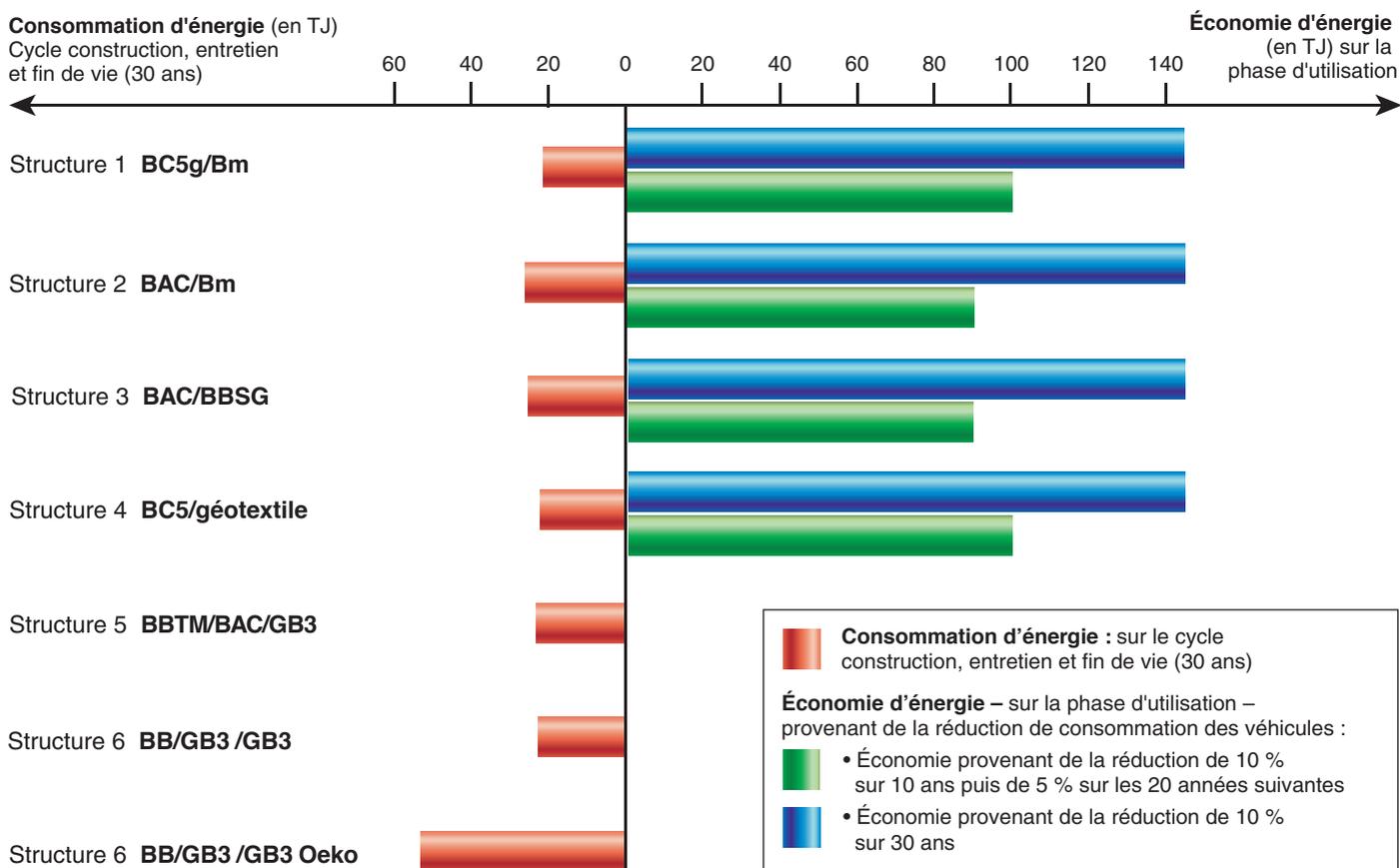


Figure 10: indicateur environnemental énergie



### 3.2.2 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL EAU

#### ■ Définition

Il s'agit de la consommation d'eau. Cet indicateur correspond au prélèvement d'eau dans le milieu naturel. C'est donc un indicateur environnemental local ou régional. L'unité retenue est le kilogramme (kg).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La route est consommatrice d'eau, pour extraire les constituants de base et pour fabriquer les mélanges mais aussi pour assurer le lavage du matériel de fabrication et de mise en œuvre. L'eau intervient au stade de l'utilisation de la route, pour l'entretien du revêtement, dans la fabrication et l'entretien des véhicules et dans la fabrication des carburants et l'entretien des raffineries.

Bien que la ressource hydrique ne soit pas menacée globalement en France, l'approvisionnement en eau peut être problématique durant certaines périodes et dans certaines régions. Ce problème va s'amplifier car la population continuera à croître et, de plus, la consommation journalière moyenne par habitant ne cessera pas d'augmenter. D'où la nécessité de réduire la consommation d'eau aussi bien dans les travaux de construction et d'entretien que dans la phase d'utilisation de la route.

#### ■ Consommation d'eau pour 1 km de route

Le tableau 13 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la consommation d'eau engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à l'économie d'eau qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales.

La figure 11 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière de consommation d'eau, on peut tirer les conclusions suivantes.

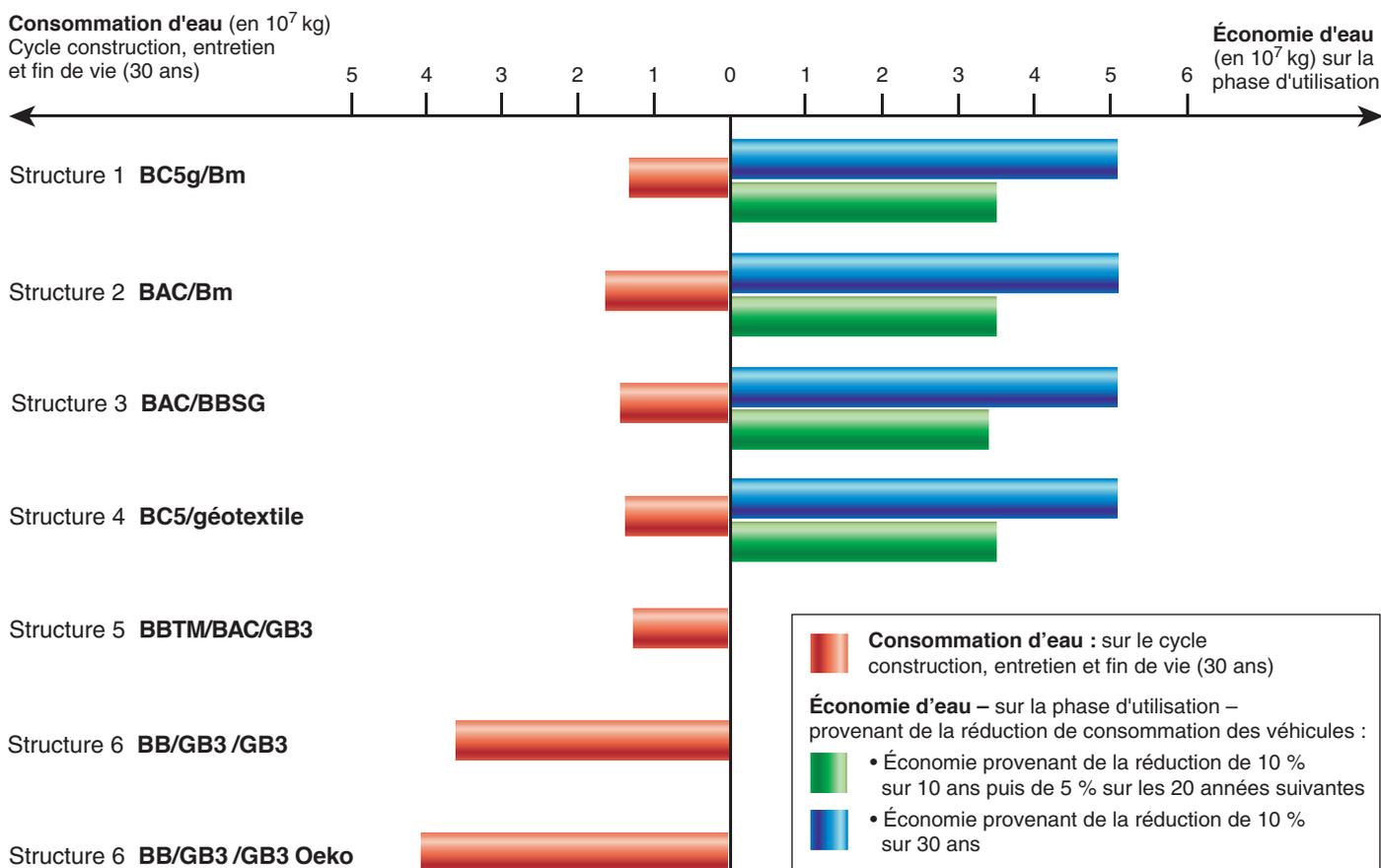
- Les résultats de l'étude montrent l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. L'eau nécessaire pour construire, entretenir et recycler en fin de vie, ne représente que de 2,5 à 7 % de l'eau totale consommée durant les 30 années d'utilisation (voir le tableau 13).

- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, la structure BBTM/BAC/GB<sub>3</sub> est la moins consommatrice en eau ( $1,27 \cdot 10^7$  kg), la structure BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub> étant la plus consommatrice ( $3,61$  à  $4,08 \cdot 10^7$  kg selon la source). Les structures bitumineuses sont environ 3 fois plus consommatrices d'eau que les structures béton (voir la figure 11, partie gauche).

- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 par rapport aux structures 5 et 6. L'écart de consommation d'eau en faveur des structures béton se situe entre  $0,35$  et  $0,51 \cdot 10^8$  kg, soit 50 000 tonnes d'eau par kilomètre de route (voir la figure 11, partie droite). Cette économie d'eau apportée par les structures béton compense largement la consommation d'eau nécessaire à la construction et à l'entretien de la route (voir figure 11). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 3 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 13: indicateur environnemental eau (en kg)**

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Consommation d'eau :</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	1,32.10 <sup>+07</sup>	1,62.10 <sup>+07</sup>	1,44.10 <sup>+07</sup>	1,38.10 <sup>+07</sup>	1,27.10 <sup>+07</sup>	3,61.10 <sup>+07</sup>	4,08.10 <sup>+07</sup>
• Phase d'utilisation	52,5.10 <sup>+07</sup>	52,8.10 <sup>+07</sup>	52,6.10 <sup>+07</sup>	52,6.10 <sup>+07</sup>	52,5.10 <sup>+07</sup>	54,8.10 <sup>+07</sup>	55,3.10 <sup>+07</sup>
<b>Économie d'eau</b>							
– sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	3,5.10 <sup>+07</sup>	3,5.10 <sup>+07</sup>	3,4.10 <sup>+07</sup>	3,5.10 <sup>+07</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	5,1.10 <sup>+07</sup>	5,1.10 <sup>+07</sup>	5,1.10 <sup>+07</sup>	5,1.10 <sup>+07</sup>	0	0	0



**Figure 11: indicateur environnemental eau**



### 3.2.3 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL RESSOURCES

#### ■ Définition

Il s'agit de la contribution à l'épuisement des ressources naturelles (énergie et matières premières rares). C'est donc un indicateur environnemental global. Il est exprimé par le rapport sans dimension de la quantité de combustibles et de matières premières utilisés par le projet divisée par les réserves mondiales correspondantes. Pour des raisons de commodité, ce rapport est exprimé en milliardième (exposant -9).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La route est consommatrice de ressources naturelles. Aussi, construire une route suppose de mobiliser sur des kilomètres, et sur une épaisseur pouvant atteindre un mètre, un volume considérable de matériaux. Ainsi, en France, pour entretenir et étendre le réseau routier, plus de 3 millions de tonnes de bitume sont consommées par an, alors que ce produit, à l'instar du pétrole, dispose de réserves limitées et non renouvelées. Quant aux granulats et ciments, leurs productions se font à partir de ressources naturelles abondantes.

D'autre part, pour circuler sur la route, il faut produire des véhicules particuliers et des poids lourds. Ceci entraîne la consommation de matières premières (acier, aluminium, plastique, caoutchouc, etc.) et de produits chimiques (lubrifiants, liquide de refroidissement, liquide de freins, etc.). La plupart de ces ressources naturelles sont en voie d'épuisement et il est de notre devoir aujourd'hui de les préserver en réduisant leur consommation aussi bien dans les travaux de construction et d'entretien, que dans la phase d'utilisation de la route.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 14 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la consommation des ressources engendrée d'une part par la construc-

tion, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à l'économie des ressources qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 12 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière de consommation des ressources, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. Les ressources naturelles nécessaires pour construire, entretenir et recycler en fin de vie, ne représentent que de 1 à 7 % des ressources totales consommées durant les 30 années d'utilisation (voir le tableau 14).

- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, la structure BC5g/Bm est la moins consommatrice en ressources ( $6,95 \cdot 10^{-9}$ ), la structure BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub> étant la plus consommatrice ( $48,5$  à  $48,6 \cdot 10^{-9}$  selon la source). Les structures bitumineuses sont environ sept fois plus consommatrices de ressources que les structures béton (voir la figure 12, partie gauche).

- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 par rapport aux structures 5 et 6. L'écart de consommation des ressources en faveur des structures béton se situe entre  $0,46$  et  $0,68 \cdot 10^{-7}$  des réserves estimées, par kilomètre de route et sur une période de 30 ans. Cette préservation des ressources apportée par les structures béton compense largement la quantité de ressources nécessaire à la construction et à l'entretien de la route (voir la figure 12, partie droite). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 1 % sur 30 ans aurait suffi.**

Tableau 14: indicateur environnemental ressources (10<sup>-9</sup>)

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Consommation des ressources:</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	6,95	7,62	7,94	7,18	8,53	48,6	48,5
• Phase d'utilisation	680	691	691	690	692	732	732
<b>Économie des ressources</b> – sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules:							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	46	47	46	46	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	68	69	68	68	0	0	0

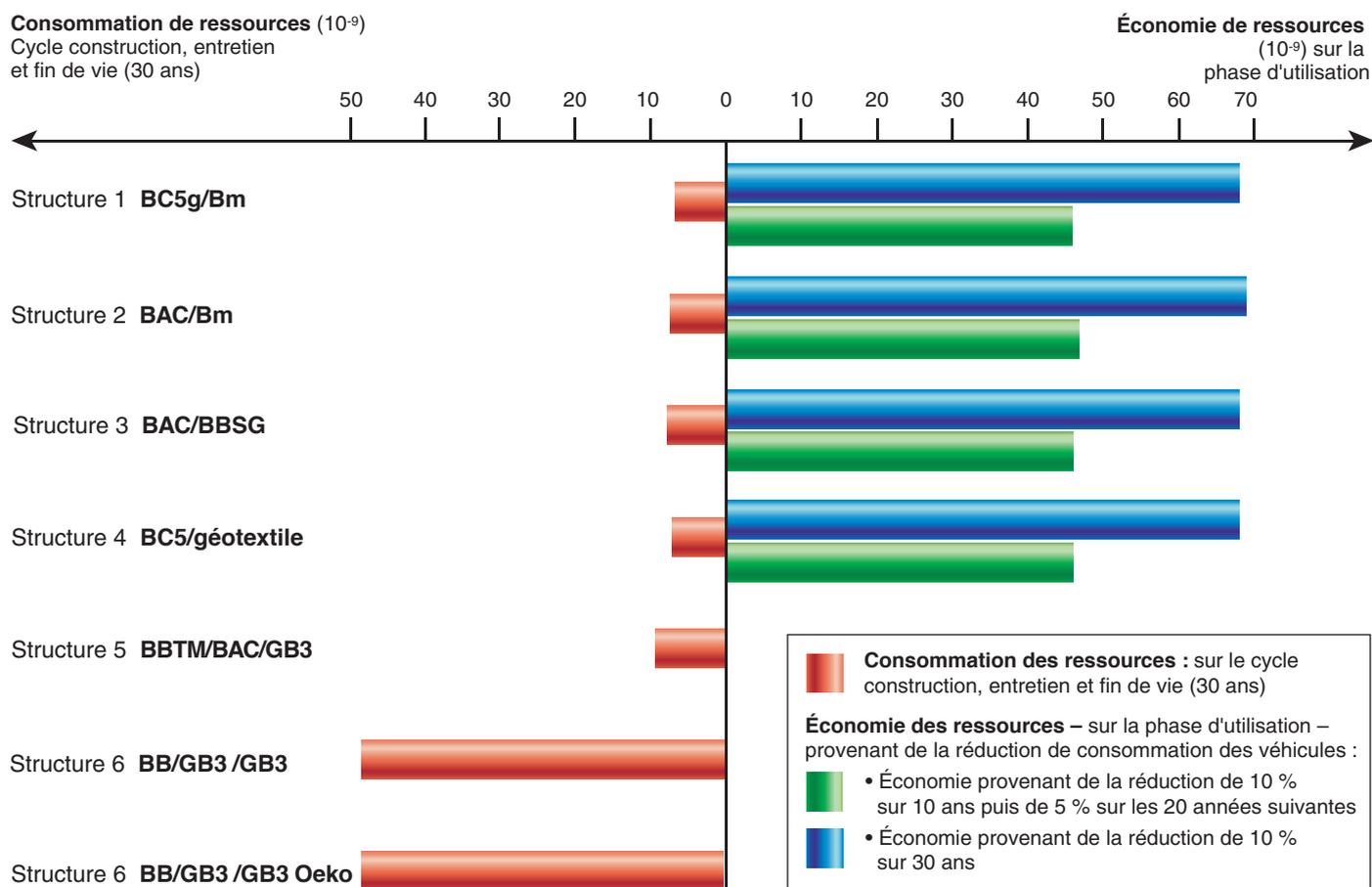


Figure 12: indicateur environnemental ressources



### 3.2.4 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL DÉCHETS

#### ■ Définition

Il s'agit de déchets solides non radioactifs, générés sur le cycle de vie de l'ouvrage étudié. C'est donc un indicateur environnemental local ou régional. Le concept de déchets est purement artificiel, car dans la « nature » les produits issus d'un process forment une matière première potentiellement utilisable par un autre process. Peut-être ce concept est-il appelé à disparaître dans le futur. L'unité retenue est la tonne (t).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La route produit plusieurs types de déchets, qui doivent être classés selon leurs effets possibles sur l'environnement et la santé. Les plus dangereux sont appelés déchets toxiques tels les déchets en provenance de l'acier galvanisé, du caoutchouc des pneumatiques, des métaux et des huiles provenant des véhicules et des matériaux bitumineux qui, stockés sans précaution, provoquent la pollution des sols, de l'eau et de l'air. D'autres déchets sont inertes (sans odeurs, non fermentescibles et non toxiques) et la seule gêne qu'ils occasionnent est leur encombrement et la dégradation éventuelle des paysages tels le béton et les matériaux routiers traités au ciment ou non traités. Les déchets toxiques sont traités de plus en plus efficacement par les industriels, on parle alors du recyclage des enrobés ou de l'acier galvanisé (pratique obligatoire en France depuis 2002). Certains sont même recyclés dans des process, par exemple pour servir de combustibles dans les cimenteries, tels les pneus usagés et les huiles.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 15 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la production de déchets engendrée d'une part par la construction,

l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction d'émission des déchets qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 13 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière des déchets, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre que la phase utilisation et la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie sont également génératrices de déchets (50 % de déchets provenant de la phase de construction, d'entretien et de recyclage en fin de vie, 50 % de déchets provenant de la phase d'utilisation, voir le tableau 15).
- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont légèrement moins génératrices de déchets ( $1,78 \cdot 10^4$  t), la structure BC5/Géotextile étant la plus génératrice ( $2,60 \cdot 10^4$  t). Les structures béton génèrent plus de déchets que les structures bitumineuses (entre 12 et 46 %) (voir la figure 13, partie gauche).
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 qui restent plus génératrices de déchets que les structures bitumineuses, mais l'écart se resserre (voir la figure 13, partie droite).

**Il faut toutefois rappeler que les déchets générés par les structures béton sont des déchets inertes sans conséquences nuisibles sur la santé et sur l'environnement.**

Tableau 15: indicateur environnemental déchets (en t eq)

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Production déchets:</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	2,49.10 <sup>+04</sup>	2,44.10 <sup>+04</sup>	2,01.10 <sup>+04</sup>	2,60.10 <sup>+04</sup>	1,99.10 <sup>+04</sup>	1,78.10 <sup>+04</sup>	1,79.10 <sup>+04</sup>
• Phase d'utilisation	1,9.10 <sup>+04</sup>	1,9.10 <sup>+04</sup>	1,9.10 <sup>+04</sup>	1,9.10 <sup>+04</sup>	1,9.10 <sup>+04</sup>	1,9.10 <sup>+04</sup>	1,9.10 <sup>+04</sup>
<b>Réduction déchets:</b>							
– sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules:							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	0,13.10 <sup>+04</sup>	0,14.10 <sup>+04</sup>	0,13.10 <sup>+04</sup>	0,13.10 <sup>+04</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	0,19.10 <sup>+04</sup>	0,2.10 <sup>+04</sup>	0,19.10 <sup>+04</sup>	0,19.10 <sup>+04</sup>	0	0	0

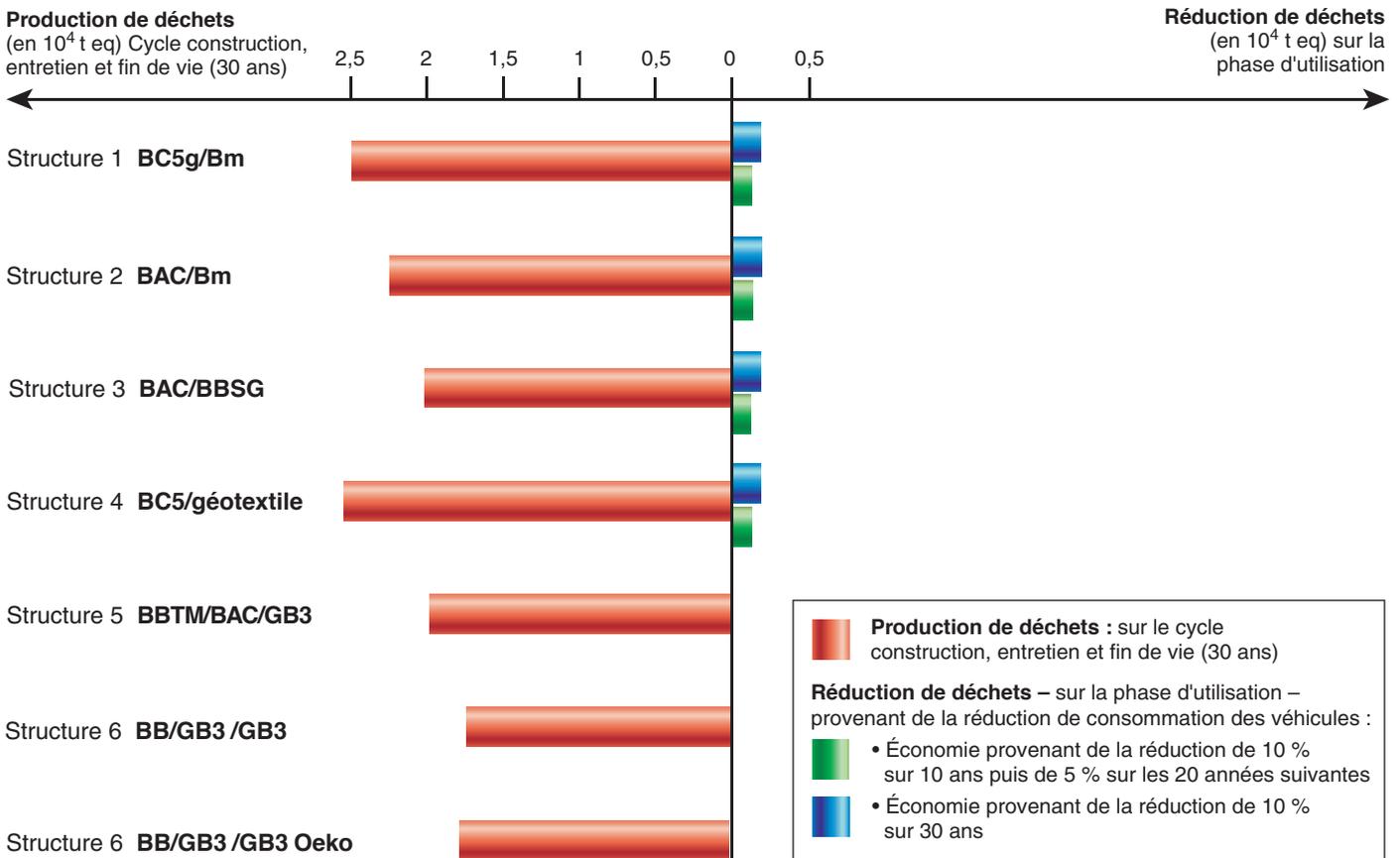


Figure 13: indicateur environnemental déchets



### 3.2.5 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL DÉCHETS RADIOACTIFS

#### ■ Définition

Il s'agit de déchets radioactifs, générés sur le cycle de vie de l'ouvrage étudié. C'est donc un indicateur environnemental local ou régional. L'unité retenue est le décimètre cube ( $\text{dm}^3$ ).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

Les déchets radioactifs générés par la route peuvent avoir plusieurs origines : la présence de radon émanant de certaines roches naturelles telles le granit utilisé en tant que granulats dans la construction routière ou la présence de métaux lourds dans certains produits utilisés dans les structures routières ou émis par la circulation routière tel le plomb.

Les déchets radioactifs sont très nuisibles pour la santé. Il n'existe pas de seuil en dessous duquel le rayonnement serait inoffensif. Les effets des faibles doses sont cependant très difficiles à mettre en évidence, car ils se manifestent après un temps de latence qui varie entre plusieurs années (leucémies), plusieurs dizaines d'années (tumeurs) et même plusieurs générations (maladies génétiques).

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 16 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la production de déchets radioactifs engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction d'émission des déchets radioactifs qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 14 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière des déchets, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. Les déchets radioactifs, générés par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représentent qu'une infime fraction (0,5 à 3 %) de ceux générés par le trafic des véhicules (voir le tableau 16).

- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les plus polluantes (source Oekoinventare) en matière de déchets radioactifs ( $173 \text{ dm}^3$ ) contre  $34 \text{ dm}^3$  en moyenne pour les chaussées béton. Les structures bitumineuses génèrent 5 fois plus de déchets radioactifs que les structures béton (voir la figure 14, partie gauche).

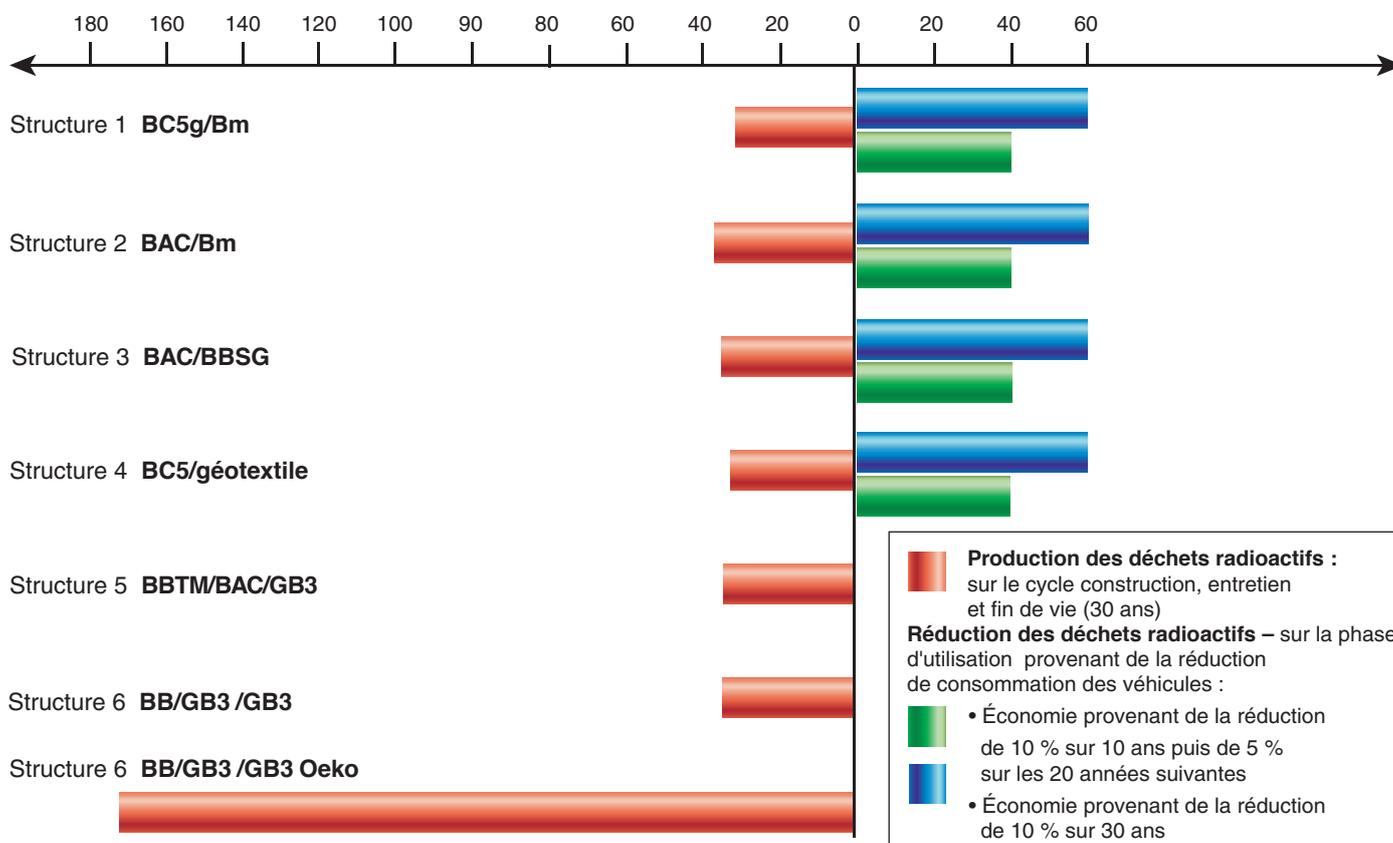
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 par rapport aux structures 5 et 6. La réduction des déchets radioactifs en faveur des structures béton se situe entre  $0,41$  et  $0,60 \cdot 10^3 \text{ dm}^3$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 14, partie droite). Cette réduction apportée par les structures béton compense largement la production des déchets radioactifs durant la phase construction, entretien et fin de vie (figure 14). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 1 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 16 : indicateur environnemental déchets radioactifs (en dm<sup>3</sup>)**

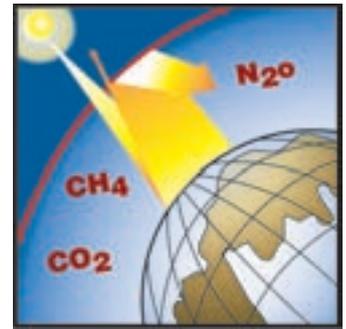
<b>Structures</b>	<b>Structure 1 BC5g/Bm</b>	<b>Structure 2 BAC/Bm</b>	<b>Structure 3 BAC/BBSG</b>	<b>Structure 4 BC5/ géotextile</b>	<b>Structure 5 BBTM/BAC/ GB<sub>3</sub></b>	<b>Structure 6 BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub> Eurobitume</b>	<b>Structure 6 BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub> Oekoinventare</b>
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Production déchets radioactifs :</b> • Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans) • Phase d'utilisation	31,4 6.10 <sup>+03</sup>	37,0 6.10 <sup>+03</sup>	35,2 6.10 <sup>+03</sup>	32,8 6.10 <sup>+03</sup>	34,8 6.10 <sup>+03</sup>	34,9 6.10 <sup>+03</sup>	173 6.10 <sup>+03</sup>
<b>Réduction déchets radioactifs :</b> – sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	0,41.10 <sup>+03</sup>	0,41.10 <sup>+03</sup>	0,41.10 <sup>+03</sup>	0,40.10 <sup>+03</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	0,60.10 <sup>+03</sup>	0,60.10 <sup>+03</sup>	0,60.10 <sup>+03</sup>	0,60.10 <sup>+03</sup>	0	0	0

**Production des déchets radioactifs (en dm<sup>3</sup>)**  
Cycle construction, entretien  
et fin de vie (30 ans)

**Réduction des déchets radioactifs**  
(en dm<sup>3</sup>) sur la phase d'utilisation (10<sup>+1</sup>)



**Figure 14 : indicateur environnemental déchets radioactifs**



### 3.2.6 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL GAZ À EFFET DE SERRE (GWP 100)

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental global, dont l'impact est évalué à l'échelle planétaire. L'effet de serre correspond à l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère, liée à la concentration atmosphérique de divers gaz. L'unité retenue est le kilogramme d'équivalent  $\text{CO}_2$  ( $\text{kg CO}_2$ ).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et l'utilisation de la route entraînent des émissions de gaz à effet de serre : le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), les CFC, le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ). La concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère est passée de 280 ppm avant l'ère industrielle à plus de 350 aujourd'hui. Elle augmente actuellement de 0,5 % par an (ce qui représente de 5 à 6 gigatonnes) et, à ce rythme, doublerait en 2060. Les conséquences de l'accroissement de l'effet de serre sont un réchauffement, dont l'importance est encore controversée, ainsi que des risques climatiques et océanographiques. Les impacts économiques concernent l'agriculture, mais aussi les ressources en eau et la santé (effet des canicules, augmentation de la concentration d'ozone troposphérique, développement de maladies infectieuses). **Mais, même si l'état actuel de la connaissance ne permet pas de prévoir les conséquences avec certitude, les experts incitent à la prudence et à la réduction des émissions.**

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 17 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la production de gaz à effet de serre engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction d'émission

des gaz à effet de serre (GWP 100) qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 15 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière d'émission de gaz à effet de serre, on peut tirer les conclusions suivantes.

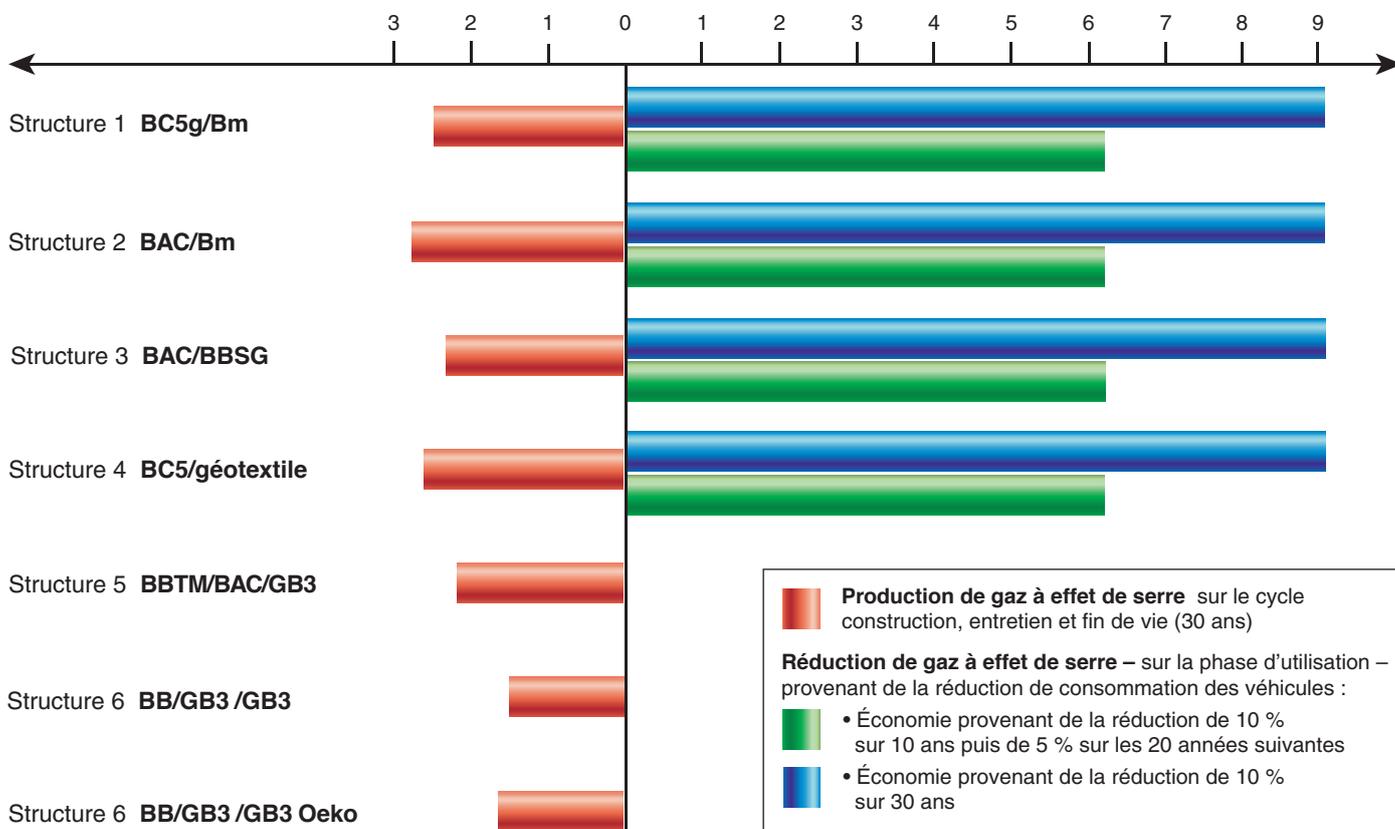
- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. Les gaz à effet de serre, générés par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représentent qu'une infime fraction (1,5 à 3 %) de ceux générés par le trafic des véhicules (voir le tableau 17).
- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les moins polluantes en matière de gaz à effet de serre :  $1,49 \cdot 10^6$  kg éq.  $\text{CO}_2$  contre  $2,52 \cdot 10^6$  kg éq.  $\text{CO}_2$ , en moyenne, pour les chaussées béton. Les structures béton génèrent 70 % en plus de gaz à effet de serre que les structures bitumineuses (voir la figure 15, partie gauche).
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 qui deviennent moins génératrices de gaz à effet de serre que les structures bitumineuses. La réduction des gaz à effet de serre en faveur des revêtements béton s'établit entre 6,2 et  $9,1 \cdot 10^6$  kg  $\text{CO}_2$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans. Cette réduction des émissions des gaz à effet de serre apportée par les structures béton compense largement la quantité des gaz émis à la construction et à l'entretien de la route (voir la figure 15, partie droite). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 3 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 17: Indicateur environnemental gaz à effet de serre (en kg CO<sub>2</sub>)**

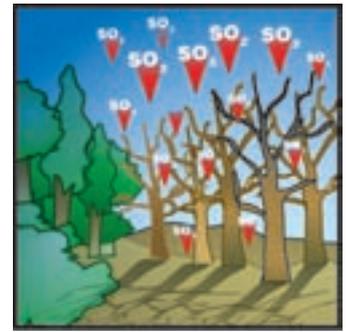
Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Production gaz à effet de serre:</b> • Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans) • Phase d'utilisation	2,49.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>	2,77.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>	2,43.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>	2,71.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>	2,18.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>	1,49.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>	1,63.10 <sup>+06</sup> 9,1.10 <sup>+07</sup>
<b>Réduction gaz à effet de serre:</b> – sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	6,2.10 <sup>+06</sup>	6,2.10 <sup>+06</sup>	6,1.10 <sup>+06</sup>	6,2.10 <sup>+06</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	9,1.10 <sup>+06</sup>	9,1.10 <sup>+06</sup>	9,1.10 <sup>+06</sup>	9,1.10 <sup>+06</sup>	0	0	0

**Production de gaz à effet de serre** (en 10<sup>6</sup> kg CO<sub>2</sub>)  
Cycle construction, entretien  
et fin de vie (30 ans)

**Réduction de gaz à effet de serre**  
(en 10<sup>6</sup> kg CO<sub>2</sub>) sur la phase d'utilisation



**Figure 15: indicateur environnemental GWP100**



### 3.2.7 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL ACIDIFICATION

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental régional ou local. L'acidification de l'air correspond à l'augmentation de substances acides dans la basse atmosphère. Elle est exprimée par le potentiel de libération d'ions hydrogène  $H^+$ . L'unité retenue est le kilogramme d'équivalent  $SO_2$  ( $kg SO_2$ ).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et surtout l'utilisation de la route entraînent des émissions de gaz tels les oxydes d'azote ( $NO$ ,  $NO_2$ ) et le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ). Le dioxyde d'azote est fortement toxique (40 fois plus que le monoxyde de carbone  $CO$  et 4 fois plus que le monoxyde d'azote  $NO$ ). Ces gaz ont donc des répercussions sur la santé publique, provoquant des irritations des yeux et des bronches, de la toux et des inflammations des bronches avec des altérations des fonctions respiratoires. En outre, en se transformant en sulfates et en nitrates – voire en acide sulfurique et nitrique dans les nuages – et en retombant ensuite avec l'eau de pluie, ces gaz causent des dégâts importants à la flore (attaque physico-chimique des aiguilles et des feuilles et destruction des racines des végétaux, lessivage des éléments nutritifs des sols). Ce processus est accéléré en présence d'ozone. D'où la nécessité de réduire les émissions des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre dans les travaux de construction, d'entretien et de fin de vie de la route mais surtout dans sa phase d'utilisation.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 18 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, l'acidification de l'air engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la

phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction de l'acidification qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 16 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière d'émission de gaz à effet de serre, on peut tirer les conclusions suivantes.

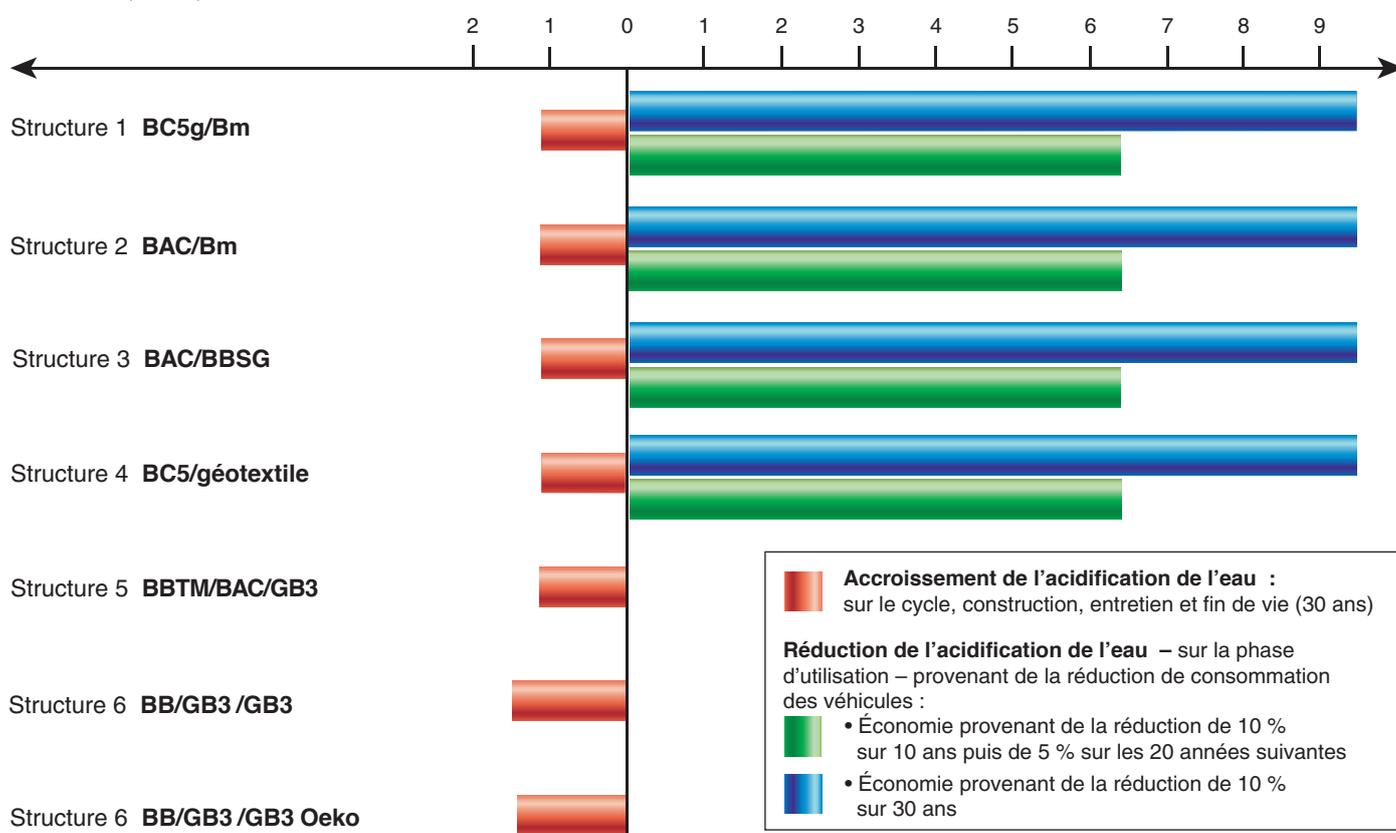
- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. L'acidification de l'air générée par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représente qu'une infime fraction (1 à 2 %) de celle générée par le trafic des véhicules (voir le tableau 18).
- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les plus polluantes en matière d'acidification de l'air:  $1,49.10^4 kg SO_2$  contre  $1,20.10^4 kg SO_2$ , en moyenne, pour les chaussées béton. Les structures bitumineuses génèrent 20 % en plus de substances acides que les structures béton (voir la figure 16, partie gauche).
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, augmente l'avantage des structures 1 à 4 en béton par rapport aux structures 5 et 6. La réduction de l'acidification de l'eau, apportée par les structures béton, se situe entre 6,4 et  $9,4 10^4$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 16, partie droite). Elle compense largement l'accroissement de l'acidification de l'eau générée lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route (figure 16). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 2 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 18: Indicateur environnemental acidification (en kg SO<sub>2</sub>)**

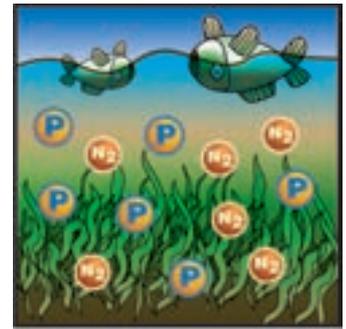
Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Accroissement de l'acidification de l'eau :</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	1,16.10 <sup>+04</sup>	1,23.10 <sup>+04</sup>	1,16.10 <sup>+04</sup>	1,23.10 <sup>+04</sup>	1,20.10 <sup>+04</sup>	1,49.10 <sup>+04</sup>	1,43.10 <sup>+04</sup>
• Phase d'utilisation	9,4.10 <sup>+05</sup>	9,4.10 <sup>+05</sup>	9,4.10 <sup>+05</sup>	9,4.10 <sup>+05</sup>	9,4.10 <sup>+05</sup>	9,4.10 <sup>+05</sup>	9,4.10 <sup>+05</sup>
<b>Réduction de l'acidification de l'eau :</b>							
– sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	6,4.10 <sup>+04</sup>	6,4.10 <sup>+04</sup>	6,4.10 <sup>+04</sup>	6,4.10 <sup>+04</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	9,4.10 <sup>+04</sup>	9,4.10 <sup>+04</sup>	9,4.10 <sup>+04</sup>	9,4.10 <sup>+04</sup>	0	0	0

Accroissement de l'acidification de l'eau (en 10<sup>4</sup> kg SO<sub>2</sub>)  
Cycle construction, entretien  
et fin de vie (30 ans)

Réduction de l'acidification de l'eau  
(en 10<sup>4</sup> kg SO<sub>2</sub>) sur la phase d'utilisation



**Figure 16: indicateur environnemental acidification**



### 3.2.8 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL EUTROPHISATION

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental régional ou local. L'eutrophisation des eaux traduit l'accroissement de la teneur en matières azotées et phosphorées des eaux. L'unité retenue est le kilogramme d'équivalent phosphates ( $\text{kg PO}_4^{3-}$ ).

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et surtout l'utilisation de la route entraînent des émissions de gaz tels les oxydes d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) et du phosphore. Ces gaz se transforment en nitrates et en phosphates qui, entraînés par ruissellement vers les eaux de surface (rivières et lacs) et associés à l'ammoniac  $\text{NH}_3$  provenant des engrais, favorisent alors la croissance des algues. Celles-ci prolifèrent et, dans une première phase, génèrent de l'oxygène. La surcharge en biomasse végétale entraîne une diminution de la transparence des eaux, qui empêche les réactions photosynthétiques et donc le dégagement d'oxygène en profondeur. La décomposition des algues mortes par les micro-organismes finit par appauvrir le milieu en oxygène, ce qui conduit à éliminer peu à peu toute vie aquatique. Des vases putrides se forment au fond par fermentations anaérobies, dégageant de l'hydrogène sulfuré et de l'ammoniac. D'où la nécessité de réduire les émissions des oxydes d'azote dans les travaux de construction, d'entretien et de fin de vie de la route mais surtout dans sa phase d'utilisation.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 19 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, l'eutrophisation engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la

phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction de l'eutrophisation de l'eau qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 17 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière d'eutrophisation, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. L'eutrophisation des eaux générée par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représente qu'une infime fraction (1 à 5 %) de celle générée par le trafic des véhicules (voir le tableau 19).
- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont soit les plus polluantes en matière d'eutrophisation :  $6,23 \cdot 10^3 \text{ kg PO}_4^{3-}$ , (source Eurobitume), soit les moins polluantes :  $1,84 \cdot 10^3 \text{ kg PO}_4^{3-}$  (source Oekoinventare) contre  $2,68 \cdot 10^3 \text{ kg PO}_4^{3-}$ , en moyenne, pour les chaussées béton (voir la figure 17, partie gauche).
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, augmente sensiblement l'avantage des structures 1 à 4 en béton par rapport aux structures 5 et 6. La réduction de l'eutrophisation, apportée par les structures béton, se situe entre  $9$  et  $14 \cdot 10^3$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 17, partie droite). Elle compense largement l'accroissement de l'eutrophisation générée lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route (figure 17). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 2 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 19 : indicateur environnemental eutrophisation (en kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)**

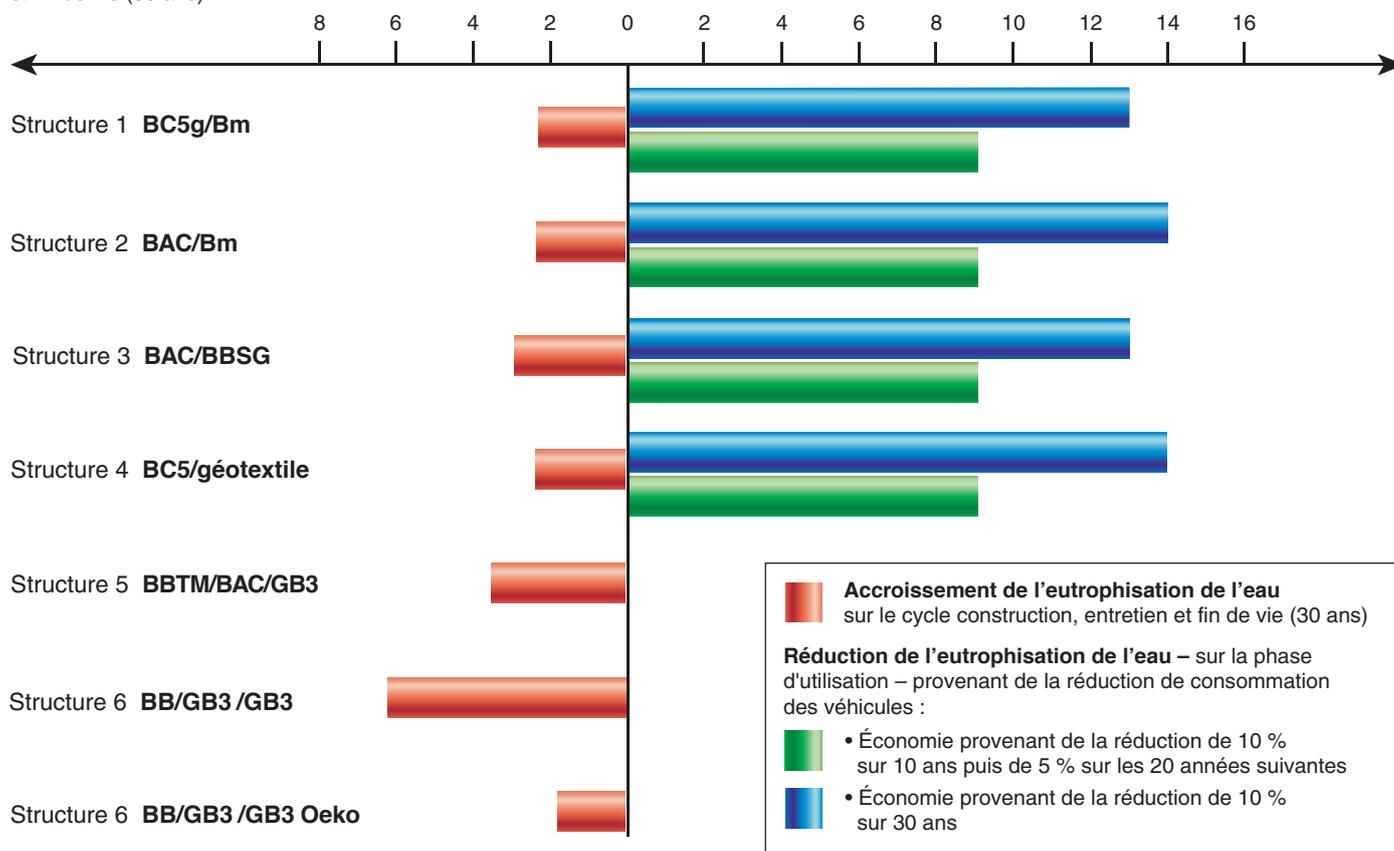
Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Accroissement de l'eutrophisation de l'eau :</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	2,28.10 <sup>+03</sup>	2,34.10 <sup>+03</sup>	2,92.10 <sup>+03</sup>	2,36.10 <sup>+03</sup>	3,52.10 <sup>+03</sup>	6,23.10 <sup>+03</sup>	1,84.10 <sup>+03</sup>
• Phase d'utilisation	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>
<b>Réduction de l'eutrophisation de l'eau :</b>							
– sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	9.10 <sup>+03</sup>	9.10 <sup>+03</sup>	9.10 <sup>+03</sup>	9.10 <sup>+03</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	13.10 <sup>+03</sup>	14.10 <sup>+03</sup>	13.10 <sup>+03</sup>	14.10 <sup>+03</sup>	0	0	0

**Accroissement de l'eutrophisation de l'eau (en 10<sup>3</sup> kg<sub>4</sub><sup>3</sup>PO )**

Cycle construction, entretien  
et fin de vie (30 ans)

**Réduction de l'eutrophisation de l'eau**

(en 10<sup>3</sup> kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) sur la phase d'utilisation



**Figure 17 : indicateur environnemental eutrophisation**



### 3.2.9 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL ÉCOTOXICITÉ

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental régional ou local. L'écotoxicité ou la toxicité aquatique traduit l'accroissement de la pollution des eaux. L'unité retenue est le mètre cube équivalent d'eau polluée.

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et surtout l'utilisation de la route entraînent des émissions de polluants tels le plomb (additif ajouté au raffinage du pétrole), le zinc (altération de la galvanisation des glissières de sécurité en acier) qui, entraînés par ruissellement vers les eaux de surface (rivières et lacs), et associés au problème d'eutrophisation évoqué précédemment, provoquent la toxicité aquatique et engendrent la disparition progressive des espèces animales. D'où la nécessité de réduire les émissions des polluants dans les travaux de construction, d'entretien et de fin de vie de la route mais surtout dans sa phase d'utilisation.

La toxicité de certains produits peut se ressentir à moyen ou long terme, sans avoir forcément d'effets immédiatement visibles. La contamination indirecte (par consommation d'espèces contaminées) peut conduire à un phénomène de bioaccumulation.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 20 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, l'écotoxicité engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction de l'écotoxicité qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux

conclusions de différentes études internationales. La figure 18 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière d'écotoxicité, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. L'écotoxicité des eaux générée par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représente qu'une infime fraction (0,5 à 4 %) de celle générée par le trafic des véhicules (voir le tableau 20).
- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les plus polluantes en matière d'écotoxicité:  $11,5 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup> équivalents d'eau polluée, source Oekoinventare ou  $4,59 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup> équivalents d'eau polluée, source Eurobitume, contre  $1,65 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup> équivalents d'eau polluée en moyenne pour les chaussées béton. En fonction de la source, les structures bitumineuses génèrent 2,8 fois (selon la source Eurobitume) ou 7 fois (selon la source Oekoinventare) plus de substances toxiques que les structures béton (voir la figure 18, partie gauche).
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, augmente sensiblement l'avantage des structures 1 à 4 en béton par rapport aux structures 5 et 6. La réduction de l'écotoxicité, apportée par les structures béton, se situe entre 20 et  $28 \cdot 10^7$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 18, partie droite). Elle compense largement l'accroissement de l'écotoxicité générée lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route (figure 18). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 1 % sur 30 ans aurait suffi.**

Tableau 20: indicateur environnemental écotoxicité (en m³)

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Accroissement de l'écotoxicité:</b> • Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans) • Phase d'utilisation	1,73.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>	1,70.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>	1,5.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>	1,76.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>	1,55.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>	4,59.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>	11,5.10 <sup>+07</sup> 28.10 <sup>+08</sup>
<b>Accroissement de l'écotoxicité:</b> – sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules:							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	20.10 <sup>+07</sup>	20.10 <sup>+07</sup>	19.10 <sup>+07</sup>	20.10 <sup>+07</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	28.10 <sup>+07</sup>	28.10 <sup>+07</sup>	28.10 <sup>+07</sup>	28.10 <sup>+07</sup>	0	0	0

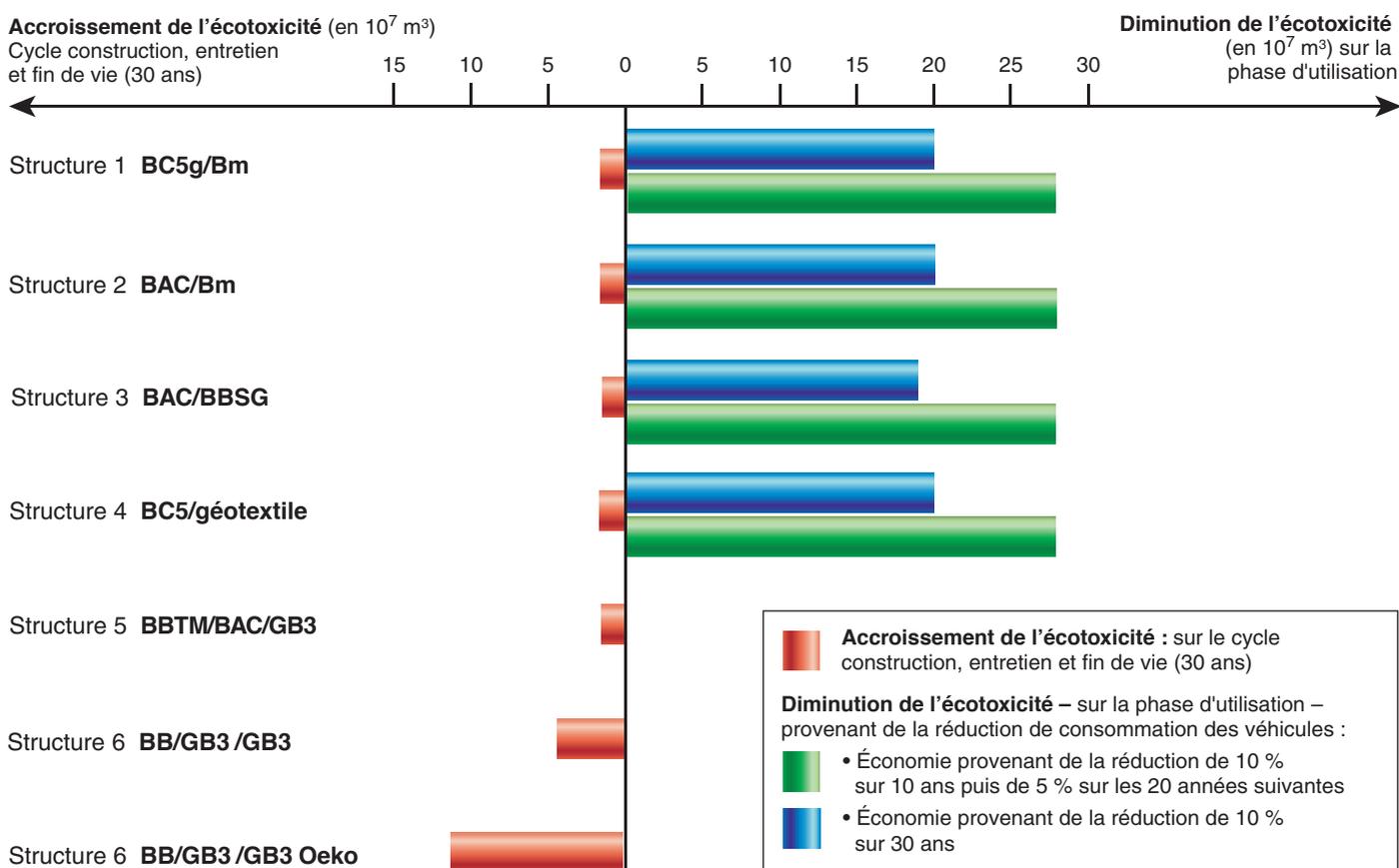


Figure 18: indicateur environnemental écotoxicité



### 3.2.10 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL TOXICITÉ HUMAINE

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental régional ou local. La toxicité humaine traduit l'accroissement de la pollution de l'air. L'unité retenue est le kilogramme équivalent de chair contaminée.

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et l'utilisation de la route entraînent l'émission dans l'air de quantités importantes de composés organiques volatils (COV). Ce sont des molécules organiques (hydrocarbures, aldéhydes, cétones, acides et dérivés), constituées principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, mais aussi d'atomes d'oxygène, de chlore, de soufre, de phosphore ou de fluor. Le méthane, principal COV, est non toxique et pratiquement inerte du point de vue photochimique. Il n'est donc en général pas comptabilisé, on parle alors d'hydrocarbures non méthaniques (HCNM). D'autres substances nuisent à la qualité de l'air : le monoxyde de carbone (CO) toxique, qui représente entre 4 et 6 % des gaz d'échappement des véhicules, les NOx, le plomb (qui provient principalement de la circulation automobile), et surtout les poussières. Une atmosphère polluée augmente la fréquence et la gravité des maladies respiratoires. Certains composés peuvent avoir des effets cancérogènes sur les poumons.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 21 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, la toxicité humaine engendrée d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction de la toxicité humaine

qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 19 illustre l'ensemble de ces données.

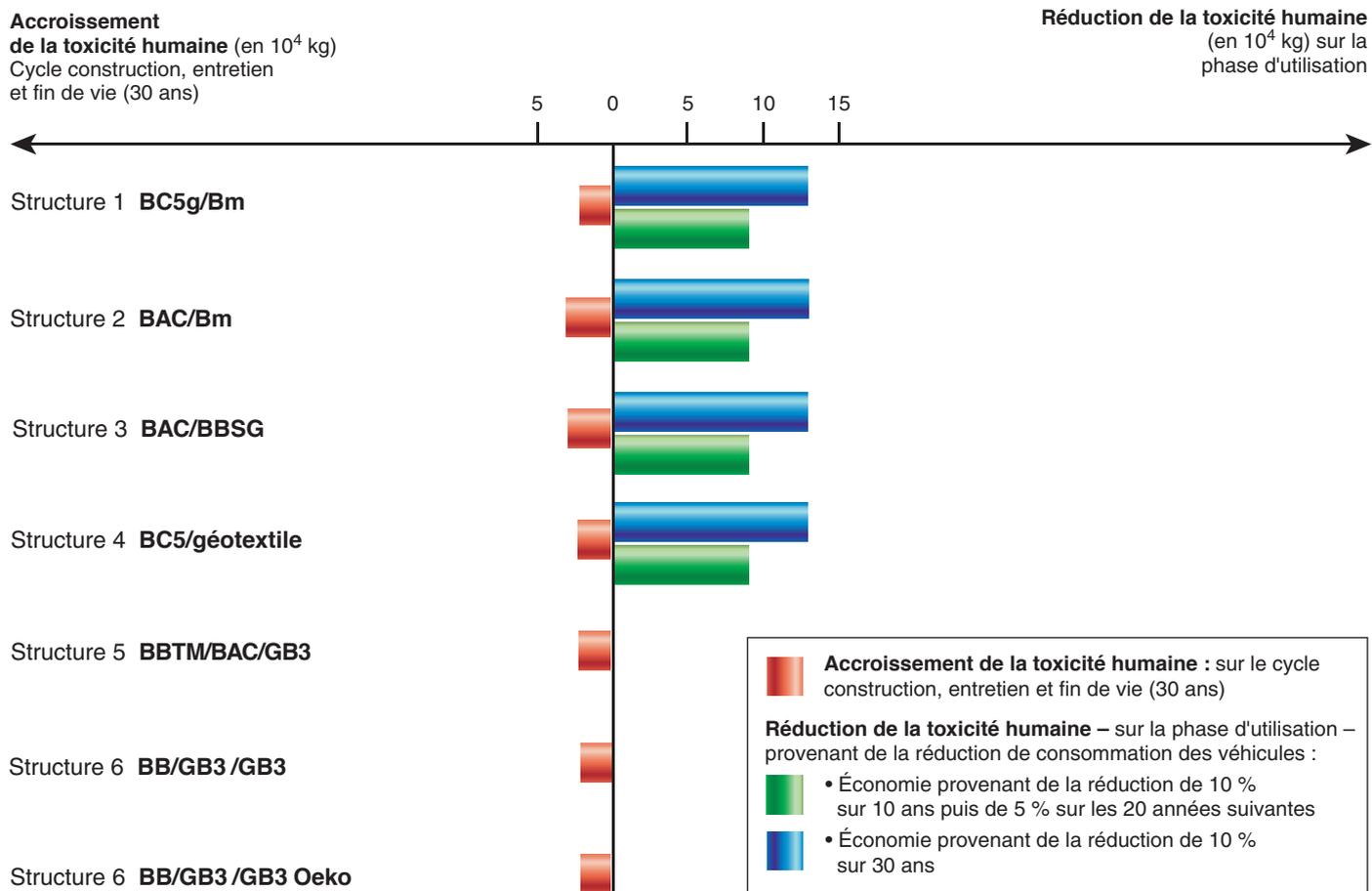
#### ■ Conclusions

En matière d'écotoxicité, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. La toxicité humaine générée par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représente qu'une infime fraction (1,5 à 2,5 %) de celle générée par le trafic des véhicules (voir le tableau 21).
- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures en Béton Armé Continu BAC sont les plus polluantes en matière de toxicité humaine ( $3,12 \cdot 10^4$  en kg équivalents de chair contaminée contre  $2,21 \cdot 10^4$  en kg équivalents de chair contaminée) en moyenne pour les autres structures (béton et bitume). Cette différence de toxicité entre béton armé et béton non armé est imputable à l'acier (voir la figure 19, partie gauche).
- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, avantage les structures 1 à 4 en béton par rapport aux structures 5 et 6. La réduction de la toxicité humaine, apportée par les structures béton, se situe entre 9 et  $13 \cdot 10^4$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 19, partie droite). Elle compense largement l'accroissement de la toxicité humaine générée lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route (figure 19). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 2 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 21 : indicateur environnemental toxicité humaine (en kg)**

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Accroissement de la toxicité humaine :</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	2,21.10 <sup>+04</sup>	3,12.10 <sup>+04</sup>	3,05.10 <sup>+04</sup>	2,29.10 <sup>+04</sup>	2,76.10 <sup>+04</sup>	2,17.10 <sup>+04</sup>	2,17.10 <sup>+04</sup>
• Phase d'utilisation	13.10 <sup>+05</sup>	13.10 <sup>+05</sup>	13.10 <sup>+05</sup>	13.10 <sup>+05</sup>	13.10 <sup>+05</sup>	13.10 <sup>+05</sup>	13.10 <sup>+05</sup>
<b>Réduction de la toxicité humaine :</b>							
– sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	9.10 <sup>+04</sup>	9.10 <sup>+04</sup>	9.10 <sup>+04</sup>	9.10 <sup>+04</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	13.10 <sup>+04</sup>	0	0	0



**Figure 19: indicateur environnemental toxicité humaine**



### 3.2.11 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL SMOG

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental régional ou local. Le SMOG traduit l'accroissement de la pollution de l'air due à l'ozone et aux particules fines. L'unité retenue est le kilogramme d'équivalent de  $C_2H_2$ .

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et surtout l'utilisation de la route entraînent l'émission dans l'air de molécules d'ozone que les véhicules produisent indirectement (l'ozone est 500 fois plus toxique que le CO), du plomb (qui provient principalement de la circulation automobile) et surtout des poussières fines générées principalement par les moteurs diesel. Une atmosphère polluée augmente la fréquence et la gravité des maladies respiratoires.

L'élévation des niveaux de base d'ozone se traduit par une hausse de 20 % du nombre d'hospitalisations de personnes âgées souffrant de maladies respiratoires chroniques. Le smog de Londres, en décembre 1952, provoqua la mort de 4000 personnes en 5 jours.

D'où la nécessité de réduire les émissions de molécules d'ozone dans l'air aussi bien pendant les travaux de construction et d'entretien que durant la phase d'utilisation de la route.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 22 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, le smog engendré d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses

relatives à la réduction du smog qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 20 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière d'écotoxicité, on peut tirer les conclusions suivantes.

- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. Le smog généré par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représente qu'une infime fraction (0,8 à 1,5 %) de celle générée par le trafic des véhicules (voir le tableau 22).

- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les plus polluantes en matière de smog:  $14.10^3$  en kg équivalents de  $C_2H_2$  contre  $7,9.10^3$  en kg équivalents de  $C_2H_2$ , en moyenne, pour les autres structures béton. Les chaussées bitumineuses sont environ deux fois plus polluantes que les structures béton (voir la figure 20, partie gauche).

- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, augmente sensiblement l'avantage des structures 1 à 4 en béton par rapport aux structures 5 et 6. La réduction du SMOG, apportée par les structures béton, se situe entre  $66$  et  $97.10^3$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 20, partie droite). Elle compense largement l'accroissement du SMOG généré lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route (figure 20). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 1 % sur 30 ans aurait suffi.**

Tableau 22 : indicateur environnemental O<sub>3</sub>-smog (en kg)

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Accroissement O<sub>3</sub>-smog:</b> • Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans) • Phase d'utilisation	7,62.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>	7,57.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>	7,72.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>	7,74.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>	8,96.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>	14,0.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>	14,0.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+04</sup>
<b>Réduction O<sub>3</sub>-smog:</b> – sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules: • Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes • Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	66.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+03</sup>	66.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+03</sup>	66.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+03</sup>	66.10 <sup>+03</sup> 97.10 <sup>+03</sup>	0 0	0 0	0 0

Accroissement O<sub>3</sub>-smog (en 10<sup>3</sup> kg)

Cycle construction, entretien  
et fin de vie (30 ans)

Réduction O<sub>3</sub>-smog

(en 10<sup>3</sup> kg) sur la  
phase d'utilisation

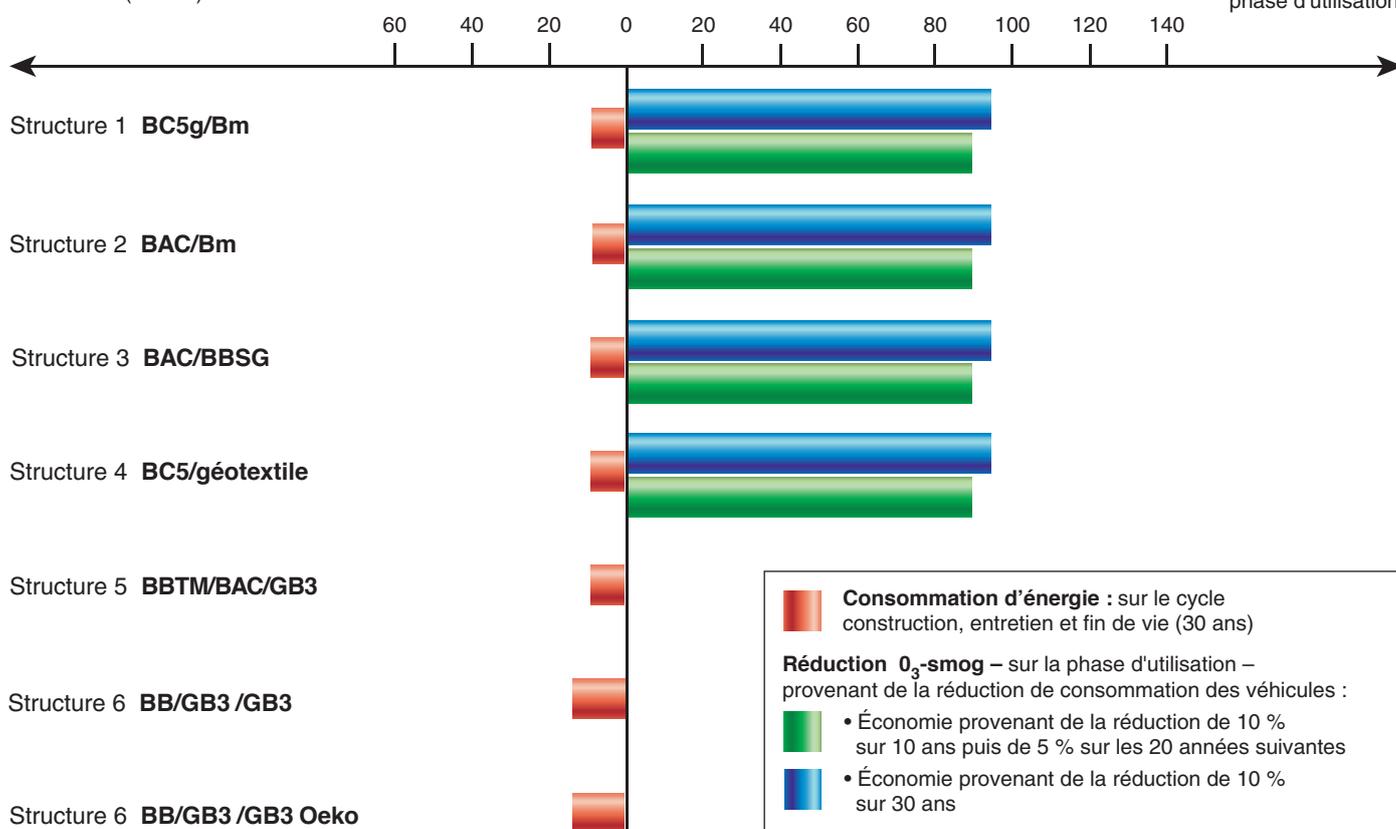


Figure 20 : indicateur environnemental O<sub>3</sub>-smog



### 3.2.12 - L'INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL ODEURS

#### ■ Définition

Il s'agit d'un indicateur environnemental régional ou local. Les odeurs impliquent l'accroissement de la pollution de l'air. L'unité retenue est le mètre cube équivalent d'air pollué par de l'ammoniac

#### ■ Pourquoi cet indicateur ?

La construction, l'entretien, le recyclage en fin de vie et l'utilisation de la route entraînent l'émission dans l'air de quantités importantes de composés organiques volatils (COV). Ce sont des molécules organiques (hydrocarbures, aldéhydes, cétones, acides et dérivés), constituées principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, mais aussi d'atomes d'oxygène, de chlore, de soufre, de phosphore ou de fluor.

Ces odeurs sont gênantes et désagréables voire toxiques. Il convient de réduire les émissions de gaz générant ces odeurs aussi bien pendant la phase de construction et d'entretien que durant la phase d'utilisation de la route.

#### ■ Consommation des ressources pour 1 km de route

Le tableau 23 donne, pour un kilomètre de route et pour chaque structure envisagée, les odeurs engendrées d'une part par la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie, et d'autre part durant la phase utilisation. En outre, il présente deux hypothèses relatives à la réduction des odeurs qui proviendrait de la réduction de la consommation des véhicules roulant sur un revêtement béton conformément aux conclusions de différentes études internationales. La figure 21 illustre l'ensemble de ces données.

#### ■ Conclusions

En matière de dégagement d'odeurs, on peut tirer les conclusions suivantes.

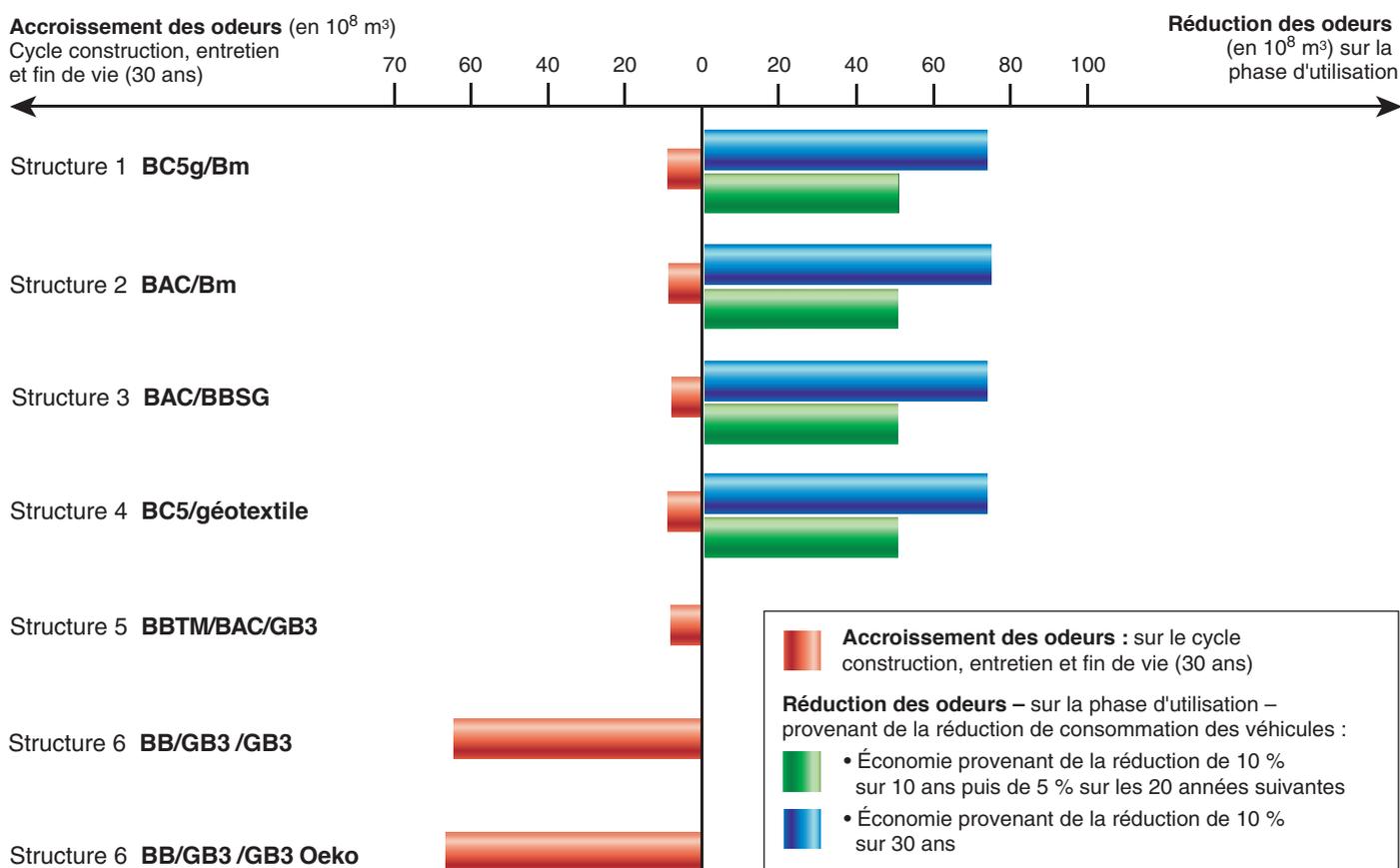
- L'étude montre l'importance de la phase utilisation par rapport à la phase regroupant la construction, l'entretien et le recyclage en fin de vie. Les odeurs générées par la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, ne représentent qu'une infime fraction (0,8 à 8 %) de celle générée par le trafic des véhicules (voir le tableau 23).

- Pour la phase construction, entretien et recyclage en fin de vie, les structures bitumineuses sont les plus polluantes en matière de dégagement d'odeurs :  $66,4 \cdot 10^8$  en mètre cube équivalents d'air pollué par de l'ammoniac contre  $6,75 \cdot 10^8$  en mètre cube équivalents d'air pollué par de l'ammoniac, en moyenne, pour les autres structures béton. Les chaussées bitumineuses sont environ 10 fois plus polluantes que les structures béton (voir la figure 21, partie gauche).

- La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules, quand ils roulent sur un revêtement béton, augmente substantiellement l'avantage des structures 1 à 4 en béton par rapport aux structures 5 et 6. La réduction des odeurs, apportée par les structures béton, se situe entre  $51$  et  $75 \cdot 10^8$ , par kilomètre de route et sur une période de 30 ans (voir la figure 21, partie droite). Elle compense largement l'accroissement des odeurs générées lors de la phase construction, entretien et fin de vie de la route (figure 21). **En fait, une hypothèse de réduction de consommation des véhicules de 1 % sur 30 ans aurait suffi.**

**Tableau 23 : indicateur environnemental odeurs (en m³)**

Structures	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
<b>Cycle de vie</b>							
<b>Accroissement des odeurs :</b>							
• Cycle construction, entretien et fin de vie (30 ans)	7,14.10 <sup>+08</sup>	7,03.10 <sup>+08</sup>	6,08.10 <sup>+08</sup>	7,27.10 <sup>+08</sup>	6,25.10 <sup>+08</sup>	64,3.10 <sup>+08</sup>	66,4.10 <sup>+08</sup>
• Phase d'utilisation	75.10 <sup>+09</sup>	75.10 <sup>+09</sup>	75.10 <sup>+09</sup>	75.10 <sup>+09</sup>	75.10 <sup>+09</sup>	75.10 <sup>+09</sup>	75.10 <sup>+09</sup>
<b>Réduction des odeurs :</b>							
– sur la phase d'utilisation – provenant de la réduction de consommation des véhicules :							
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 10 ans puis de 5 % sur les 20 années suivantes	51.10 <sup>+08</sup>	51.10 <sup>+08</sup>	51.10 <sup>+08</sup>	51.10 <sup>+08</sup>	0	0	0
• Économie provenant de la réduction de 10 % sur 30 ans	74.10 <sup>+08</sup>	75.10 <sup>+08</sup>	75.10 <sup>+08</sup>	75.10 <sup>+08</sup>	0	0	0



**Figure 21 : indicateur environnemental odeurs**

### 3.3 - Présentation comparative par indicateur d'un séparateur en béton et d'une glissière acier

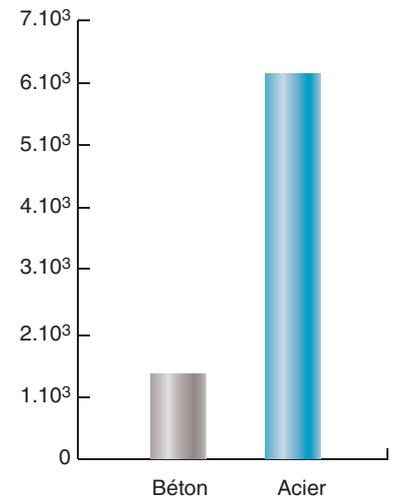
Le tableau 24 montre comment se situent les filières béton et acier pour les différents indicateurs environnementaux considérés. Seule la contribution de la fabrication des glissières est considérée (fabrication et transport des matériaux, process de chantier), mais pas celle des voiries ni de l'utilisation de la route.

Tableau 24: comparaison entre séparateurs béton et glissières acier

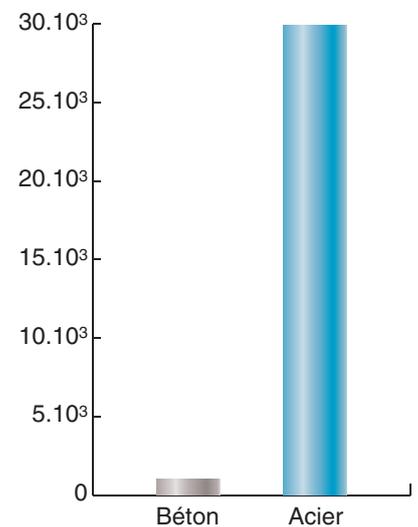
	Unité	Béton	Acier
Quantité par ml	kg	1 850	88
Énergie	TJ	$1,45 \cdot 10^{-03}$	$6,19 \cdot 10^{-03}$
Eau	kg	$1,05 \cdot 10^{-03}$	$29,92 \cdot 10^{-03}$
Ressources	$10^{-09}$	$2,85 \cdot 10^{-13}$	$374,79 \cdot 10^{-13}$
Déchets	t eq	$95,90 \cdot 10^{-02}$	$11,45 \cdot 10^{-02}$
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	$3,21 \cdot 10^{-03}$	$3,57 \cdot 10^{-03}$
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	$2,42 \cdot 10^{-02}$	$3,41 \cdot 10^{-02}$
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	$68,00 \cdot 10^{-02}$	$184 \cdot 10^{-02}$
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	$8,70 \cdot 10^{-02}$	$11,96 \cdot 10^{-02}$
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	$2,01 \cdot 10^{-02}$	$291,98 \cdot 10^{-02}$
Toxicité humaine	kg	1,71	4,68
O <sub>3</sub> -smog	kg	$1,32 \cdot 10^{-01}$	$7,27 \cdot 10^{-01}$
Odeurs	m <sup>3</sup>	$6,51 \cdot 10^{-03}$	$5\,769,28 \cdot 10^{-03}$

Le séparateur béton est plus favorable que la glissière acier pour les indicateurs Énergie, Eau, Ressources, Déchets Radioactifs, Gaz à effet de serre, Acidification, Eutrophisation, Écotoxicité, Toxicité humaine, Smog et Odeurs. La glissière acier est plus favorable pour l'indicateur Déchets solides (voir figure 22).

Énergie (TJ)



Eau (kg)



Ressources (10<sup>-9</sup>)

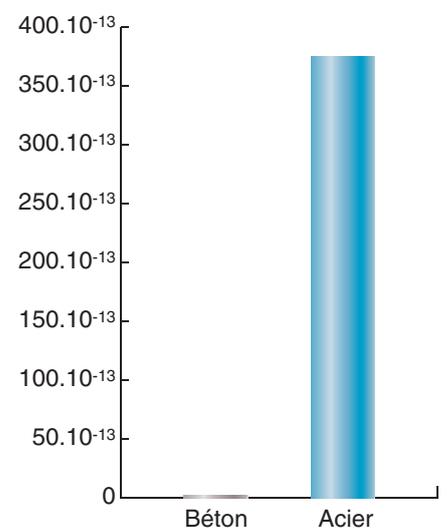
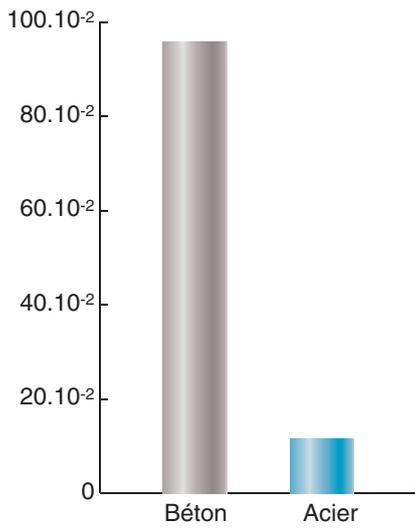
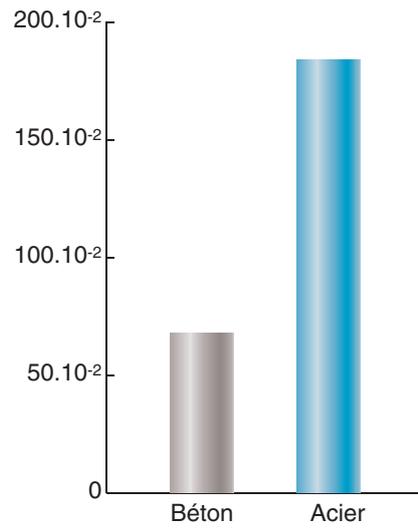


Figure 22: comparaison d'un n

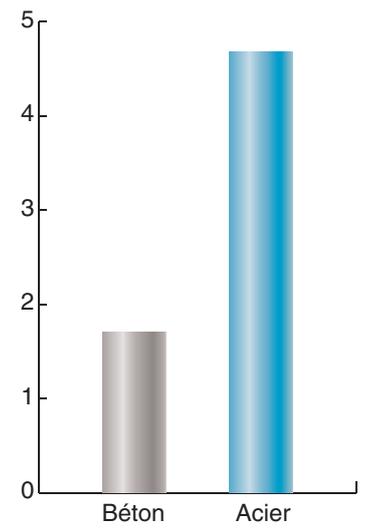
Déchets (t eq)



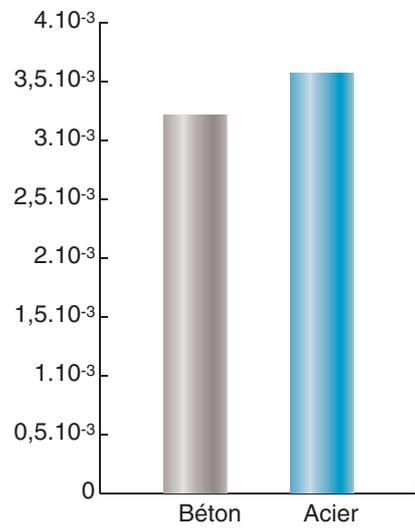
Acidification (kg SO<sub>2</sub>)



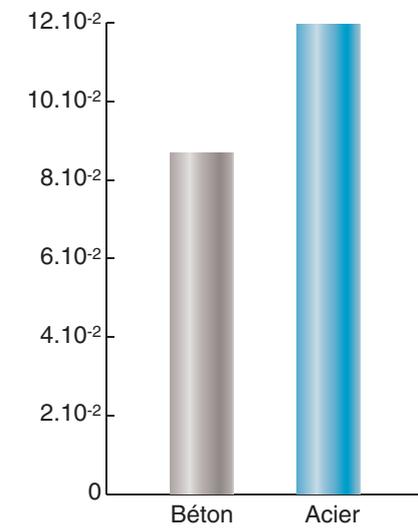
Toxicité humaine (kg)



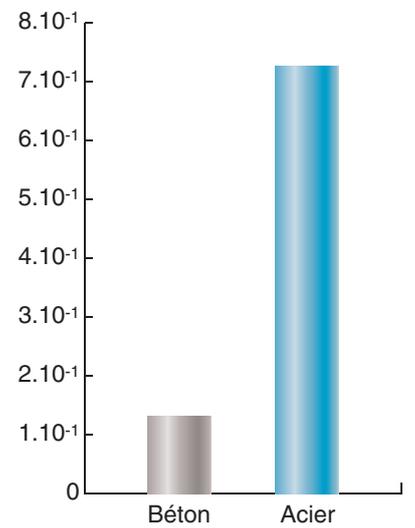
Déchets radioactifs (dm<sup>3</sup>)



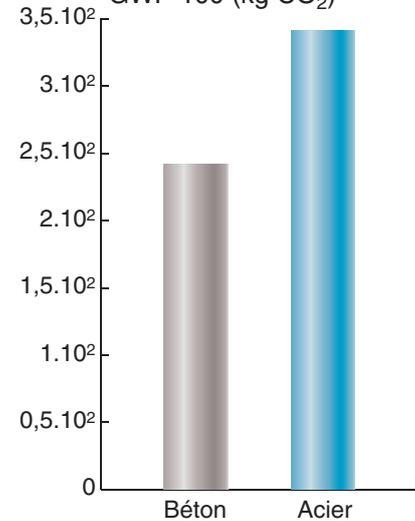
Eutrophisation (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)



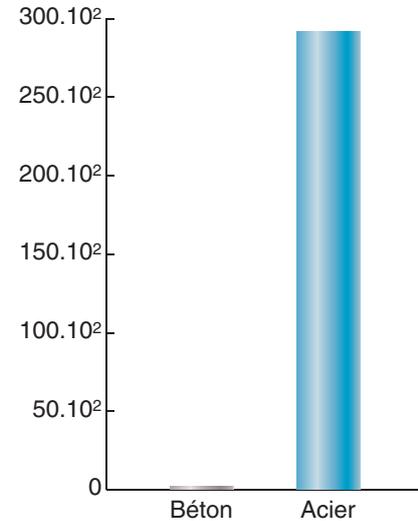
O<sub>3</sub> - smog (kg)



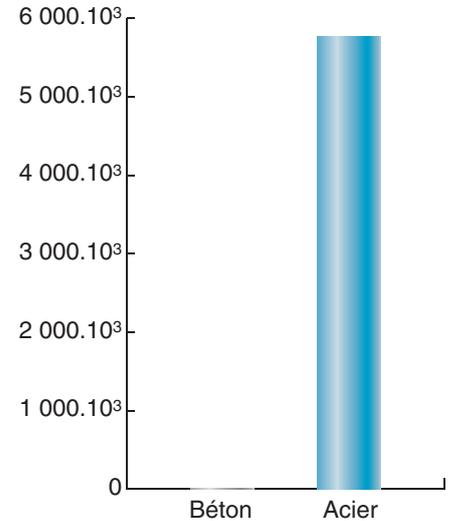
Gaz à effet de serre  
GWP 100 (kg CO<sub>2</sub>)



Écotoxicité (m<sup>3</sup>)



Odeurs (m<sup>3</sup>)



Comparatif linéaire de séparateur béton et de glissière acier pour l'ensemble des 12 indicateurs environnementaux

### 3.4 - Ce qu'il faut retenir

---

Un bilan par analyse de cycle de vie a été effectué sur une portion de route d'un km de longueur, représentative d'une route à grande circulation en France. La méthodologie employée consiste à quantifier les matériaux et composants, puis les substances puisées et émises dans l'environnement, en considérant des inventaires issus d'une base de données suisse (Oekoinventare, École polytechnique fédérale de Zürich), et enfin des indicateurs environnementaux parmi ceux les plus couramment employés en analyse de cycle de vie.

> Pour tous les indicateurs, excepté l'indicateur déchets, la contribution de la phase de construction est faible par rapport à l'utilisation de la route (circulation des camions et des voitures). Tous les efforts à consentir pour réduire les impacts doivent être portés sur la phase d'utilisation de la route, la phase de construction n'ayant qu'un impact minime, de l'ordre de 1 à 7 %.

> Sur les phases de construction, d'entretien et de fin de vie, la structure bitumineuse génère légèrement moins de déchets solides et d'émission de gaz à effet de serre que les structures béton. En revanche, les structures béton sont plus favorables sur les indicateurs d'énergie primaire, de consommation d'eau, d'épuisement des ressources, d'eutrophisation, d'écotoxicité, de smog et d'odeurs. En outre, si l'on restreint la comparaison aux quatre structures béton, la structure 1 « dalle goudonnée » présente le meilleur bilan en matière d'analyse de cycle de vie.

> Sur le cycle de vie complet, incluant la phase d'utilisation, les impacts liés à la circulation des véhicules sont très importants et les hypothèses en matière de consommation de carburant pour les véhicules peuvent influencer les résultats.

- Si une consommation égale est considérée pour les véhicules quel que soit le revêtement, les solutions

bitumineuses sont un peu plus favorables par rapport aux déchets solides inertes (la quantité de matériau utilisée est moindre et le recyclage est possible en fin de vie), les gaz à effet de serre et les variantes béton sont mieux placés sur les indicateurs d'énergie primaire, de consommation d'eau, d'épuisement des ressources, d'eutrophisation, d'écotoxicité, de smog et d'odeurs.

- Si une réduction de 10 % de la consommation des véhicules est considérée pour les revêtements béton, sur les 10 premières années, et de 5 %, les années suivantes, les impacts sont réduits pour les variantes béton. La réduction est encore plus élevée si la réduction de 10 % est appliquée sur les 30 ans de durée de vie de l'ouvrage.

**La prise en compte d'une réduction de la consommation des véhicules quand ils roulent sur un revêtement en béton se traduit par une réduction très importante des impacts environnementaux compensant ainsi largement les impacts engendrés lors de la phase de construction, entretien et fin de vie. Pour l'ensemble des indicateurs présentés dans ce document, une hypothèse de réduction de la consommation des véhicules circulant sur une chaussée en béton d'environ 3 % aurait suffi à compenser les impacts générés durant la phase construction, entretien et fin de vie.**

**Compte tenu de cet avantage, il serait judicieux qu'une campagne d'essais soit réalisée en France pour confirmer les conclusions des études internationales.**

- > Dans le domaine des dispositifs de sécurité, le séparateur béton présente, pour tous les indicateurs environnementaux, un avantage sur la glissière métal.



Chapitre **4** Annexes

## 4.1 - Bibliographie

---

1. Inventaire du Cycle de Vie des ciments – www.infociments.fr. CIMBETON, 2009.
2. Base de données Oekoinventare (école polytechnique fédérale de Zurich et université de Karlsruhe).
3. Etude comparative en technique routière: traitement des sols vs emprunts granulaires – Méthode graphique de comparaison économique et environnementale. Collection Technique CIMBETON, T30. CIMBETON, 2009.
4. Etude comparative en technique routière: retraitement des chaussées en place vs renforcement – Méthode graphique de comparaison économique et environnementale. Collection Technique CIMBETON, T31. CIMBETON, 2010.
5. Terrassements et assises de chaussées - Traitement des sols aux liants hydrauliques. Collection Technique CIMBETON, T70 – CIMBETON, 2009.
6. Entretien des routes secondaires - Le retraitement en place à froid des chaussées au ciment ou aux liants hydrauliques routiers. Collection Technique CIMBETON, T90. CIMBETON, 2006.
7. Revue Routes – Collection Technique CIMBETON. Différents articles, reportages et documentation technique.
8. Voiries et aménagements urbains en béton – Revêtements et structures réservoir. Collection Technique CIMBETON, T57. CIMBETON, 2007.
9. Revue RGRA – N° 880, novembre 2009 – Dossier béton.
10. Comment intégrer quantitativement la carbonatation atmosphérique dans le bilan-carbone des matériaux cimentaires? Mickael THIERY, Nicolas ROUSSEL, Guillaume HABERT, Patrick BELIN – Université Paris-est, LCPC, division BCC – Patrick DANGLA UR Navier, Equipe « milieux poreux » – AFGC, GC 2009
11. Catalogue des structures types de chaussées neuves, SETRA/LCPC, 1998.
12. Sécurité routière: les dispositifs de retenue en béton. Documentation Technique Routes N° 95. CIMBETON, 2006.
13. AFNOR, norme NF P01-010: Qualité environnementale des produits de construction – Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction, 2004.
14. AFNOR, norme X 30-300, Analyse du cycle de vie, mars 1994.
15. Étude canadienne: Effect of pavement structure on truck fuel consumption – phase 1 and 2, Conseil national de recherches Canada, Rapport technique contrôlé CSTT-HWv-CTR-041, août 2000. Project team: Gordon Taylor, P. Eng., M. Eng. – Philip Marsh, P. Eng. - Eric Oxelgren.
16. Étude indienne: Fuel savings on cement concrete pavement, by Dr L.R. Kadiyali & Associates in collaboration with Central Road Research Institute, 2000.
17. Étude américaine: Vehicle operating costs, fuel consumption, and pavement type and condition factors, Final Report, Texas Research and Development Foundation, Austin, TX Jun 82.
18. Étude suédoise: Benefit of reduced fuel consumption from economic and environmental perspectives. A novel approach, Robert Larsson et Ronny Andersson. Exposé au Symposium Cembureau à Istanbul, avril 2004.

## 4.2 - Données de l'étude

**Tableau 25: structure 1 [BC5g/Bm] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	1,13.10 <sup>-01</sup>	6,12	8,17.10 <sup>-01</sup>	1,70.10 <sup>-01</sup>	2,00	8,76.10 <sup>-01</sup>	2,13.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	8,85.10 <sup>-06</sup>	3,17.10 <sup>-06</sup>	3,46.10 <sup>-04</sup>	7,76.10 <sup>-04</sup>	6,76.10 <sup>-05</sup>	4,54.10 <sup>-05</sup>	1,32.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	2,23	2,62	1,67.10 <sup>-01</sup>	3,45.10 <sup>-02</sup>	1,53	3,74.10 <sup>-01</sup>	6,95
Déchets	t eq	7,97.10 <sup>-03</sup>	2,45.10 <sup>-02</sup>	3,49	7,00.10 <sup>-01</sup>	4,70.10 <sup>-02</sup>	1,63.10 <sup>-04</sup>	2,49.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	2,41.10 <sup>-01</sup>	2,19.10 <sup>-02</sup>	3,22	2,57.10 <sup>-01</sup>	3,83	3,13.10 <sup>-03</sup>	3,14.10 <sup>-01</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	1,91.10 <sup>-06</sup>	3,35.10 <sup>-05</sup>	5,30.10 <sup>-04</sup>	1,11.10 <sup>-04</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	4,80.10 <sup>-04</sup>	2,49.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	4,86.10 <sup>-03</sup>	3,75.10 <sup>-03</sup>	7,11.10 <sup>-02</sup>	1,48.10 <sup>-02</sup>	1,64.10 <sup>-03</sup>	5,36.10 <sup>-02</sup>	1,16.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	5,99.10 <sup>-02</sup>	5,62.10 <sup>-02</sup>	1,17.10 <sup>-02</sup>	2,44.10 <sup>-01</sup>	9,00.10 <sup>-02</sup>	8,04.10 <sup>-01</sup>	2,28.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	1,76.10 <sup>-03</sup>	1,21.10 <sup>-07</sup>	1,76.10 <sup>-06</sup>	3,67.10 <sup>-05</sup>	3,11.10 <sup>-06</sup>	1,73.10 <sup>-06</sup>	1,73.10 <sup>-07</sup>
Toxicité humaine	kg	1,38.10 <sup>-04</sup>	4,56.10 <sup>-03</sup>	8,37.10 <sup>-02</sup>	1,75.10 <sup>-02</sup>	2,11.10 <sup>-03</sup>	6,52.10 <sup>-02</sup>	2,21.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	3,44.10 <sup>-02</sup>	4,03.10 <sup>-03</sup>	8,01.10 <sup>-02</sup>	1,67.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	5,77.10 <sup>-02</sup>	7,62.10 <sup>-03</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	7,42.10 <sup>-04</sup>	5,18.10 <sup>-08</sup>	5,69.10 <sup>-07</sup>	1,06.10 <sup>-07</sup>	1,11.10 <sup>-08</sup>	7,41.10 <sup>-07</sup>	7,14.10 <sup>-08</sup>

**Tableau 26: structure 2 [BAC/Bm] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	1,67.10 <sup>-01</sup>	6,03	7,83.10 <sup>-01</sup>	1,70.10 <sup>-01</sup>	2,00	8,39.10 <sup>-01</sup>	2,65.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	1,19.10 <sup>-07</sup>	3,13.10 <sup>-06</sup>	3,32.10 <sup>-04</sup>	7,76.10 <sup>-04</sup>	6,76.10 <sup>-05</sup>	4,35.10 <sup>-05</sup>	1,62.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	2,97	2,58	1,60.10 <sup>-01</sup>	3,45.10 <sup>-02</sup>	1,53	3,58.10 <sup>-01</sup>	7,62
Déchets	t eq	8,09.10 <sup>-03</sup>	2,41.10 <sup>-02</sup>	3,35	7,00.10 <sup>-01</sup>	4,70.10 <sup>-02</sup>	1,56.10 <sup>-04</sup>	2,44.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	2,98.10 <sup>-01</sup>	2,15.10 <sup>-02</sup>	3,09	2,57.10 <sup>-01</sup>	3,83	3,00.10 <sup>-03</sup>	3,70.10 <sup>-01</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	2,20.10 <sup>-06</sup>	3,30.10 <sup>-05</sup>	5,08.10 <sup>-04</sup>	1,11.10 <sup>-04</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	4,60.10 <sup>-04</sup>	2,77.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	5,59.10 <sup>-03</sup>	3,69.10 <sup>-03</sup>	6,81.10 <sup>-02</sup>	1,48.10 <sup>-02</sup>	1,64.10 <sup>-03</sup>	5,14.10 <sup>-02</sup>	1,23.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	6,76.10 <sup>-02</sup>	5,54.10 <sup>-02</sup>	1,12.10 <sup>-02</sup>	2,44.10 <sup>-01</sup>	9,00.10 <sup>-02</sup>	7,70.10 <sup>-01</sup>	2,34.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	1,71.10 <sup>-03</sup>	1,19.10 <sup>-07</sup>	1,68.10 <sup>-06</sup>	3,67.10 <sup>-05</sup>	3,11.10 <sup>-06</sup>	1,66.10 <sup>-06</sup>	1,70.10 <sup>-07</sup>
Toxicité humaine	kg	2,30.10 <sup>-04</sup>	4,49.10 <sup>-03</sup>	8,02.10 <sup>-02</sup>	1,75.10 <sup>-02</sup>	2,11.10 <sup>-03</sup>	6,24.10 <sup>-02</sup>	3,12.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	4,21.10 <sup>-02</sup>	3,97.10 <sup>-03</sup>	7,68.10 <sup>-02</sup>	1,67.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	5,53.10 <sup>-02</sup>	7,57.10 <sup>-03</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	7,06.10 <sup>-04</sup>	5,10.10 <sup>-08</sup>	5,46.10 <sup>-07</sup>	1,06.10 <sup>-07</sup>	1,11.10 <sup>-08</sup>	7,10.10 <sup>-07</sup>	7,03.10 <sup>-08</sup>

**Tableau 27: structure 3 [BAC/BBSG] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	1,58.10 <sup>-01</sup>	5,08	1,21	1,51.10 <sup>-01</sup>	2,00	6,87.10 <sup>-01</sup>	2,50.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	1,07.10 <sup>-07</sup>	2,63.10 <sup>-06</sup>	5,13.10 <sup>-04</sup>	7,68.10 <sup>-04</sup>	6,76.10 <sup>-05</sup>	3,56.10 <sup>-05</sup>	1,44.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	3,67	2,17	2,48.10 <sup>-01</sup>	3,06.10 <sup>-02</sup>	1,53	2,94.10 <sup>-01</sup>	7,94
Déchets	t eq	6,62.10 <sup>-03</sup>	2,03.10 <sup>-02</sup>	5,17	6,19.10 <sup>-01</sup>	4,70.10 <sup>-02</sup>	1,28.10 <sup>-04</sup>	2,01.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	2,64.10 <sup>-01</sup>	1,81.10 <sup>-02</sup>	4,77	1,82.10 <sup>-01</sup>	3,83	2,45.10 <sup>-03</sup>	3,52.10 <sup>-01</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	1,90.10 <sup>-06</sup>	2,78.10 <sup>-05</sup>	7,85.10 <sup>-04</sup>	9,84.10 <sup>-03</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	3,77.10 <sup>-04</sup>	2,43.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	5,27.10 <sup>-03</sup>	3,11.10 <sup>-03</sup>	1,05.10 <sup>-03</sup>	1,32.10 <sup>-02</sup>	1,64.10 <sup>-03</sup>	4,21.10 <sup>-02</sup>	1,16.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,29.10 <sup>-03</sup>	4,66.10 <sup>-02</sup>	1,73.10 <sup>-02</sup>	2,17.10 <sup>-01</sup>	9,00.10 <sup>-02</sup>	6,31.10 <sup>-01</sup>	2,92.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	1,74.10 <sup>-05</sup>	1,00.10 <sup>-07</sup>	2,60.10 <sup>-06</sup>	3,26.10 <sup>-05</sup>	3,11.10 <sup>-06</sup>	1,36.10 <sup>-06</sup>	1,50.10 <sup>-07</sup>
Toxicité humaine	kg	2,27.10 <sup>-04</sup>	3,78.10 <sup>-03</sup>	1,24.10 <sup>-03</sup>	1,55.10 <sup>-02</sup>	2,11.10 <sup>-03</sup>	5,12.10 <sup>-02</sup>	3,05.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	8,89.10 <sup>-02</sup>	3,35.10 <sup>-03</sup>	1,19.10 <sup>-03</sup>	1,49.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	4,53.10 <sup>-02</sup>	7,72.10 <sup>-03</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	4,90.10 <sup>-04</sup>	4,30.10 <sup>-08</sup>	8,43.10 <sup>-07</sup>	9,31.10 <sup>-06</sup>	1,11.10 <sup>-08</sup>	5,82.10 <sup>-07</sup>	6,08.10 <sup>-08</sup>

**Tableau 28: structure 4 [BC5/géotextile] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	1,21.10 <sup>-01</sup>	6,27	8,37.10 <sup>-01</sup>	1,46.10 <sup>-01</sup>	2,00	4,23.10 <sup>-02</sup>	2,23.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	9,37.10 <sup>-06</sup>	3,25.10 <sup>-06</sup>	3,54.10 <sup>-04</sup>	7,66.10 <sup>-04</sup>	6,76.10 <sup>-05</sup>	1,71.10 <sup>-08</sup>	1,38.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	2,39	2,68	1,71.10 <sup>-01</sup>	2,96.10 <sup>-02</sup>	1,53	2,25.10 <sup>-02</sup>	7,18
Déchets	t eq	8,60.10 <sup>-03</sup>	2,51.10 <sup>-02</sup>	3,58	5,98.10 <sup>-01</sup>	4,70.10 <sup>-02</sup>	1,72.10 <sup>-03</sup>	2,60.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	2,55.10 <sup>-01</sup>	2,24.10 <sup>-02</sup>	3,30	1,63.10 <sup>-01</sup>	3,83	1,74.10 <sup>-03</sup>	3,28.10 <sup>-01</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	2,12.10 <sup>-06</sup>	3,44.10 <sup>-05</sup>	5,43.10 <sup>-04</sup>	9,53.10 <sup>-03</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	2,71.10 <sup>-07</sup>	2,71.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	5,37.10 <sup>-03</sup>	3,84.10 <sup>-03</sup>	7,28.10 <sup>-02</sup>	1,27.10 <sup>-02</sup>	1,64.10 <sup>-03</sup>	1,78.10 <sup>-05</sup>	1,23.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	6,61.10 <sup>-02</sup>	5,76.10 <sup>-02</sup>	1,20.10 <sup>-02</sup>	2,10.10 <sup>-01</sup>	9,00.10 <sup>-02</sup>	1,38.10 <sup>-04</sup>	2,36.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	1,80.10 <sup>-03</sup>	1,24.10 <sup>-07</sup>	1,80.10 <sup>-06</sup>	3,16.10 <sup>-05</sup>	3,11.10 <sup>-06</sup>	8,55.10 <sup>-08</sup>	1,76.10 <sup>-07</sup>
Toxicité humaine	kg	1,44.10 <sup>-04</sup>	4,67.10 <sup>-03</sup>	8,58.10 <sup>-02</sup>	1,50.10 <sup>-02</sup>	2,11.10 <sup>-03</sup>	3,90.10 <sup>-05</sup>	2,29.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	3,61.10 <sup>-02</sup>	4,14.10 <sup>-03</sup>	8,21.10 <sup>-02</sup>	1,44.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	7,74.10 <sup>-03</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	7,60.10 <sup>-04</sup>	5,31.10 <sup>-08</sup>	5,83.10 <sup>-07</sup>	8,98.10 <sup>-06</sup>	1,11.10 <sup>-08</sup>	3,03.10 <sup>-10</sup>	7,27.10 <sup>-08</sup>

**Tableau 29: structure 5 [BBTM/BAC/GB<sub>3</sub>] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	1,32.10 <sup>-01</sup>	5,24	1,97	1,59.10 <sup>-01</sup>	2,00	7,12.10 <sup>-01</sup>	2,33.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	8,89.10 <sup>-06</sup>	2,72.10 <sup>-06</sup>	8,36.10 <sup>-04</sup>	7,72.10 <sup>-04</sup>	6,76.10 <sup>-05</sup>	3,69.10 <sup>-05</sup>	1,27.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	4,02	2,24	4,04.10 <sup>-01</sup>	3,23.10 <sup>-02</sup>	1,53	3,04.10 <sup>-01</sup>	8,53
Déchets	t eq	6,04.10 <sup>-03</sup>	2,10.10 <sup>-02</sup>	8,43	6,53.10 <sup>-01</sup>	4,70.10 <sup>-02</sup>	1,32.10 <sup>-04</sup>	1,99.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	2,30.10 <sup>-01</sup>	1,87.10 <sup>-02</sup>	7,78	2,14.10 <sup>-01</sup>	3,83	2,54.10 <sup>-03</sup>	3,48.10 <sup>-01</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	1,58.10 <sup>-06</sup>	2,87.10 <sup>-05</sup>	1,28.10 <sup>-05</sup>	1,04.10 <sup>-04</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	3,90.10 <sup>-04</sup>	2,18.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	4,86.10 <sup>-03</sup>	3,21.10 <sup>-03</sup>	1,72.10 <sup>-03</sup>	1,39.10 <sup>-02</sup>	1,64.10 <sup>-03</sup>	4,36.10 <sup>-02</sup>	1,20.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,77.10 <sup>-03</sup>	4,82.10 <sup>-02</sup>	2,82.10 <sup>-02</sup>	2,28.10 <sup>-01</sup>	9,00.10 <sup>-02</sup>	6,54.10 <sup>-01</sup>	3,52.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	3,11.10 <sup>-05</sup>	1,03.10 <sup>-07</sup>	4,24.10 <sup>-06</sup>	3,44.10 <sup>-05</sup>	3,11.10 <sup>-06</sup>	1,41.10 <sup>-06</sup>	1,55.10 <sup>-07</sup>
Toxicité humaine	kg	1,89.10 <sup>-04</sup>	3,90.10 <sup>-03</sup>	2,02.10 <sup>-03</sup>	1,63.10 <sup>-02</sup>	2,11.10 <sup>-03</sup>	5,30.10 <sup>-02</sup>	2,76.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	1,25.10 <sup>-03</sup>	3,46.10 <sup>-03</sup>	1,93.10 <sup>-03</sup>	1,57.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	4,69.10 <sup>-02</sup>	8,96.10 <sup>-03</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	4,01.10 <sup>-04</sup>	4,44.10 <sup>-08</sup>	1,37.10 <sup>-08</sup>	9,88.10 <sup>-06</sup>	1,11.10 <sup>-08</sup>	6,02.10 <sup>-07</sup>	6,25.10 <sup>-08</sup>

**Tableau 30: structure 6 inventaire Eurobitume [BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub>] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	9,93	5,52	4,55	1,40.10 <sup>-01</sup>	2,00	7,35.10 <sup>-01</sup>	2,29.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	3,20.10 <sup>-07</sup>	2,86.10 <sup>-06</sup>	1,93.10 <sup>-05</sup>	8,46.10 <sup>-04</sup>	6,76.10 <sup>-05</sup>	3,81.10 <sup>-05</sup>	3,61.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	4,34.10 <sup>-01</sup>	2,36	9,31.10 <sup>-01</sup>	2,83.10 <sup>-02</sup>	1,53	3,14.10 <sup>-01</sup>	4,86.10 <sup>-01</sup>
Déchets	t eq	3,50.10 <sup>-03</sup>	2,21.10 <sup>-02</sup>	1,94.10 <sup>-01</sup>	5,67.10 <sup>-01</sup>	4,70.10 <sup>-02</sup>	1,36.10 <sup>-04</sup>	1,78.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	1,30.10 <sup>-01</sup>	1,97.10 <sup>-02</sup>	1,79.10 <sup>-01</sup>	8,83.10 <sup>-02</sup>	3,83	2,62.10 <sup>-03</sup>	3,49.10 <sup>-01</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	7,09.10 <sup>-05</sup>	3,03.10 <sup>-05</sup>	2,95.10 <sup>-05</sup>	9,11.10 <sup>-03</sup>	1,31.10 <sup>-05</sup>	4,03.10 <sup>-04</sup>	1,49.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	5,34.10 <sup>-03</sup>	3,38.10 <sup>-03</sup>	3,96.10 <sup>-03</sup>	1,22.10 <sup>-02</sup>	1,64.10 <sup>-03</sup>	4,50.10 <sup>-02</sup>	1,49.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	4,08.10 <sup>-03</sup>	5,07.10 <sup>-02</sup>	6,50.10 <sup>-02</sup>	2,01.10 <sup>-01</sup>	9,00.10 <sup>-02</sup>	6,75.10 <sup>-01</sup>	6,23.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	3,02.10 <sup>-07</sup>	1,09.10 <sup>-07</sup>	9,77.10 <sup>-06</sup>	3,02.10 <sup>-05</sup>	3,11.10 <sup>-06</sup>	1,45.10 <sup>-06</sup>	4,59.10 <sup>-07</sup>
Toxicité humaine	kg	1,01.10 <sup>-04</sup>	4,11.10 <sup>-03</sup>	4,66.10 <sup>-03</sup>	1,44.10 <sup>-02</sup>	2,11.10 <sup>-03</sup>	5,47.10 <sup>-02</sup>	2,17.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	3,63.10 <sup>-03</sup>	3,64.10 <sup>-03</sup>	4,46.10 <sup>-03</sup>	1,38.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	4,84.10 <sup>-02</sup>	1,40.10 <sup>-04</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	5,78.10 <sup>-09</sup>	4,67.10 <sup>-08</sup>	3,17.10 <sup>-08</sup>	8,38.10 <sup>-06</sup>	1,11.10 <sup>-08</sup>	6,22.10 <sup>-07</sup>	6,43.10 <sup>-09</sup>

**Tableau 31 : structure 6 base oekoinventaire [BB/GB<sub>3</sub>/GB<sub>3</sub>] – phases de construction, d'entretien et de fin de vie (pour 1 km)**

Indicateur	Unité	Fabrication des matériaux de base	Transport (matériaux et mélanges)	Fabrication des mélanges	Process de chantier	Entretien (transport de matériaux inclus)	Fin de vie	Total
Énergie	TJ	3,58.10 <sup>-01</sup>	5,52	4,55	1,40.10 <sup>-01</sup>	6,85	7,35.10 <sup>-01</sup>	5,36.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	3,60.10 <sup>-07</sup>	2,86.10 <sup>-06</sup>	1,93.10 <sup>-05</sup>	8,46.10 <sup>-04</sup>	1,42.10 <sup>-06</sup>	3,81.10 <sup>-05</sup>	4,08.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>09</sup>	4,34.10 <sup>-01</sup>	2,36	9,31.10 <sup>-01</sup>	2,83.10 <sup>-02</sup>	1,52	3,14.10 <sup>-01</sup>	4,85.10 <sup>-01</sup>
Déchets	t eq	3,54.10 <sup>-03</sup>	2,21.10 <sup>-02</sup>	1,94.10 <sup>-01</sup>	5,67.10 <sup>-01</sup>	4,78.10 <sup>-02</sup>	1,36.10 <sup>-04</sup>	1,79.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	1,30.10 <sup>-02</sup>	1,97.10 <sup>-02</sup>	1,79.10 <sup>-01</sup>	8,83.10 <sup>-02</sup>	2,57.10 <sup>-01</sup>	2,62.10 <sup>-03</sup>	1,73.10 <sup>-02</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	8,30.10 <sup>-05</sup>	3,03.10 <sup>-05</sup>	2,95.10 <sup>-05</sup>	9,11.10 <sup>-03</sup>	1,54.10 <sup>-05</sup>	4,03.10 <sup>-04</sup>	1,63.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	4,85.10 <sup>-03</sup>	3,38.10 <sup>-03</sup>	3,96.10 <sup>-03</sup>	1,22.10 <sup>-02</sup>	1,55.10 <sup>-03</sup>	4,50.10 <sup>-02</sup>	1,43.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	3,91.10 <sup>-02</sup>	5,07.10 <sup>-02</sup>	6,50.10 <sup>-02</sup>	2,01.10 <sup>-01</sup>	2,07.10 <sup>-02</sup>	6,75.10 <sup>-01</sup>	1,84.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	8,84.10 <sup>-07</sup>	1,09.10 <sup>-07</sup>	9,77.10 <sup>-06</sup>	3,02.10 <sup>-05</sup>	1,40.10 <sup>-07</sup>	1,45.10 <sup>-06</sup>	1,15.10 <sup>-08</sup>
Toxicité humaine	kg	1,01.10 <sup>-04</sup>	4,11.10 <sup>-03</sup>	4,66.10 <sup>-03</sup>	1,44.10 <sup>-02</sup>	2,10.10 <sup>-03</sup>	5,47.10 <sup>-02</sup>	2,17.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	3,63.10 <sup>-03</sup>	3,64.10 <sup>-03</sup>	4,46.10 <sup>-03</sup>	1,38.10 <sup>-02</sup>	1,69.10 <sup>-03</sup>	4,84.10 <sup>-02</sup>	1,40.10 <sup>-04</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	5,96.10 <sup>-09</sup>	4,67.10 <sup>-08</sup>	3,17.10 <sup>-08</sup>	8,38.10 <sup>-06</sup>	1,45.10 <sup>-08</sup>	6,22.10 <sup>-07</sup>	6,64.10 <sup>-09</sup>

**Tableau 32 : comparaison des structures – phases de construction, d'entretien et de fin de vie**

Indicateur	Unité	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventaire
Énergie	TJ	2,13.10 <sup>-01</sup>	2,65.10 <sup>-01</sup>	2,50.10 <sup>-01</sup>	2,23.10 <sup>-01</sup>	2,33.10 <sup>-01</sup>	2,29.10 <sup>-01</sup>	5,36.10 <sup>-01</sup>
Eau	kg	1,32.10 <sup>-07</sup>	1,62.10 <sup>-07</sup>	1,44.10 <sup>-07</sup>	1,38.10 <sup>-07</sup>	1,27.10 <sup>-07</sup>	3,61.10 <sup>-07</sup>	4,08.10 <sup>-07</sup>
Ressources	10 <sup>09</sup>	6,95.10	7,62	7,94	7,18	8,53	4,86.10 <sup>-01</sup>	4,85.10 <sup>-01</sup>
Déchets	t eq	2,49.10 <sup>-04</sup>	2,44.10 <sup>-04</sup>	2,01.10 <sup>-04</sup>	2,60.10 <sup>-04</sup>	1,99.10 <sup>-04</sup>	1,78.10 <sup>-04</sup>	1,79.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	3,14.10 <sup>-01</sup>	3,70.10 <sup>-01</sup>	3,52.10 <sup>-01</sup>	3,28.10 <sup>-01</sup>	3,48.10 <sup>-01</sup>	3,49.10 <sup>-01</sup>	1,73.10 <sup>-02</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	2,49.10 <sup>-06</sup>	2,77.10 <sup>-06</sup>	2,43.10 <sup>-06</sup>	2,71.10 <sup>-06</sup>	2,18.10 <sup>-06</sup>	1,49.10 <sup>-06</sup>	1,63.10 <sup>-06</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	1,16.10 <sup>-04</sup>	1,23.10 <sup>-04</sup>	1,16.10 <sup>-04</sup>	1,23.10 <sup>-04</sup>	1,20.10 <sup>-04</sup>	1,49.10 <sup>-04</sup>	1,43.10 <sup>-04</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	2,28.10 <sup>-03</sup>	2,34.10 <sup>-03</sup>	2,92.10 <sup>-03</sup>	2,36.10 <sup>-03</sup>	3,52.10 <sup>-03</sup>	6,23.10 <sup>-03</sup>	1,84.10 <sup>-03</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	1,73.10 <sup>-07</sup>	1,70.10 <sup>-07</sup>	1,50.10 <sup>-07</sup>	1,76.10 <sup>-07</sup>	1,55.10 <sup>-07</sup>	4,59.10 <sup>-07</sup>	1,15.10 <sup>-08</sup>
Toxicité humaine	kg	2,21.10 <sup>-04</sup>	3,12.10 <sup>-04</sup>	3,05.10 <sup>-04</sup>	2,29.10 <sup>-04</sup>	2,76.10 <sup>-04</sup>	2,17.10 <sup>-04</sup>	2,17.10 <sup>-04</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	7,62.10 <sup>-03</sup>	7,57.10 <sup>-03</sup>	7,72.10 <sup>-03</sup>	7,74.10 <sup>-03</sup>	8,96.10 <sup>-03</sup>	1,40.10 <sup>-04</sup>	1,40.10 <sup>-04</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	7,14.10 <sup>-08</sup>	7,03.10 <sup>-08</sup>	6,08.10 <sup>-08</sup>	7,27.10 <sup>-08</sup>	6,25.10 <sup>-08</sup>	6,43.10 <sup>-09</sup>	6,64.10 <sup>-09</sup>

**Tableau 33 : comparaison des structures – phases de construction, d'entretien, d'utilisation et de fin de vie – sans réduction de consommation des véhicules**

Indicateur	Unité	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventaire
Énergie	TJ	1,45.10 <sup>-03</sup>	1,45.10 <sup>-03</sup>	1,45.10 <sup>-03</sup>	1,45.10 <sup>-03</sup>	1,45.10 <sup>-03</sup>	1,45.10 <sup>-03</sup>	1,48.10 <sup>-03</sup>
Eau	kg	5,25.10 <sup>-08</sup>	5,28.10 <sup>-08</sup>	5,26.10 <sup>-08</sup>	5,26.10 <sup>-08</sup>	5,25.10 <sup>-08</sup>	5,48.10 <sup>-08</sup>	5,53.10 <sup>-08</sup>
Ressources	10 <sup>09</sup>	6,90.10 <sup>-02</sup>	6,91.10 <sup>-02</sup>	6,91.10 <sup>-02</sup>	6,90.10 <sup>-02</sup>	6,92.10 <sup>-02</sup>	7,32.10 <sup>-02</sup>	7,32.10 <sup>-02</sup>
Déchets	t eq	4,43.10 <sup>-04</sup>	4,38.10 <sup>-04</sup>	3,94.10 <sup>-04</sup>	4,53.10 <sup>-04</sup>	3,93.10 <sup>-04</sup>	3,72.10 <sup>-04</sup>	3,73.10 <sup>-04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	6,02.10 <sup>-03</sup>	6,03.10 <sup>-03</sup>	6,03.10 <sup>-03</sup>	6,02.10 <sup>-03</sup>	6,03.10 <sup>-03</sup>	6,03.10 <sup>-03</sup>	6,16.10 <sup>-03</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	9,35.10 <sup>-07</sup>	9,38.10 <sup>-07</sup>	9,34.10 <sup>-07</sup>	9,37.10 <sup>-07</sup>	9,32.10 <sup>-07</sup>	9,25.10 <sup>-07</sup>	9,26.10 <sup>-07</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	9,50.10 <sup>-05</sup>	9,51.10 <sup>-05</sup>	9,50.10 <sup>-05</sup>	9,51.10 <sup>-05</sup>	9,51.10 <sup>-05</sup>	9,53.10 <sup>-05</sup>	9,53.10 <sup>-05</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,35.10 <sup>-05</sup>	1,36.10 <sup>-05</sup>	1,36.10 <sup>-05</sup>	1,36.10 <sup>-05</sup>	1,37.10 <sup>-05</sup>	1,39.10 <sup>-05</sup>	1,35.10 <sup>-05</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	2,85.10 <sup>-09</sup>	2,85.10 <sup>-09</sup>	2,84.10 <sup>-09</sup>	2,85.10 <sup>-09</sup>	2,84.10 <sup>-09</sup>	2,87.10 <sup>-09</sup>	2,94.10 <sup>-09</sup>
Toxicité humaine	kg	1,33.10 <sup>-06</sup>	1,34.10 <sup>-06</sup>	1,34.10 <sup>-06</sup>	1,33.10 <sup>-06</sup>	1,33.10 <sup>-06</sup>	1,33.10 <sup>-06</sup>	1,33.10 <sup>-06</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	9,81.10 <sup>-05</sup>	9,81.10 <sup>-05</sup>	9,81.10 <sup>-05</sup>	9,81.10 <sup>-05</sup>	9,83.10 <sup>-05</sup>	9,88.10 <sup>-05</sup>	9,88.10 <sup>-05</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	7,56.10 <sup>-10</sup>	7,56.10 <sup>-10</sup>	7,55.10 <sup>-10</sup>	7,57.10 <sup>-10</sup>	7,56.10 <sup>-10</sup>	8,14.10 <sup>-10</sup>	8,16.10 <sup>-10</sup>

**Tableau 34 : comparaison des structures – phases de construction, d’entretien, d’utilisation et de fin de vie – avec une réduction de la consommation des véhicules de 10 % les 10 premières années et 5 % les 20 suivantes pour les structures 1 à 4**

Indicateur	Unité	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
Énergie	TJ	1,35.10 <sup>+03</sup>	1,36.10 <sup>+03</sup>	1,36.10 <sup>+03</sup>	1,35.10 <sup>+03</sup>	1,45.10 <sup>+03</sup>	1,45.10 <sup>+03</sup>	1,48.10 <sup>+03</sup>
Eau	kg	4,90.10 <sup>+08</sup>	4,93.10 <sup>+08</sup>	4,92.10 <sup>+08</sup>	4,91.10 <sup>+08</sup>	5,25.10 <sup>+08</sup>	5,48.10 <sup>+08</sup>	5,53.10 <sup>+08</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	6,44.10 <sup>+02</sup>	6,44.10 <sup>+02</sup>	6,45.10 <sup>+02</sup>	6,44.10 <sup>+02</sup>	6,92.10 <sup>+02</sup>	7,32.10 <sup>+02</sup>	7,32.10 <sup>+02</sup>
Déchets	t eq	4,30.10 <sup>+04</sup>	4,24.10 <sup>+04</sup>	3,81.10 <sup>+04</sup>	4,40.10 <sup>+04</sup>	3,93.10 <sup>+04</sup>	3,72.10 <sup>+04</sup>	3,73.10 <sup>+04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	5,61.10 <sup>+03</sup>	5,62.10 <sup>+03</sup>	5,62.10 <sup>+03</sup>	5,62.10 <sup>+03</sup>	6,03.10 <sup>+03</sup>	6,03.10 <sup>+03</sup>	6,16.10 <sup>+03</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	8,73.10 <sup>+07</sup>	8,76.10 <sup>+07</sup>	8,73.10 <sup>+07</sup>	8,75.10 <sup>+07</sup>	9,32.10 <sup>+07</sup>	9,25.10 <sup>+07</sup>	9,26.10 <sup>+07</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	8,86.10 <sup>+05</sup>	8,87.10 <sup>+05</sup>	8,86.10 <sup>+05</sup>	8,87.10 <sup>+05</sup>	9,51.10 <sup>+05</sup>	9,53.10 <sup>+05</sup>	9,53.10 <sup>+05</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,26.10 <sup>+05</sup>	1,27.10 <sup>+05</sup>	1,27.10 <sup>+05</sup>	1,27.10 <sup>+05</sup>	1,37.10 <sup>+05</sup>	1,39.10 <sup>+05</sup>	1,35.10 <sup>+05</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	2,65.10 <sup>+09</sup>	2,65.10 <sup>+09</sup>	2,65.10 <sup>+09</sup>	2,65.10 <sup>+09</sup>	2,84.10 <sup>+09</sup>	2,87.10 <sup>+09</sup>	2,94.10 <sup>+09</sup>
Toxicité humaine	kg	1,24.10 <sup>+06</sup>	1,25.10 <sup>+06</sup>	1,25.10 <sup>+06</sup>	1,24.10 <sup>+06</sup>	1,33.10 <sup>+06</sup>	1,33.10 <sup>+06</sup>	1,33.10 <sup>+06</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	9,15.10 <sup>+05</sup>	9,15.10 <sup>+05</sup>	9,15.10 <sup>+05</sup>	9,15.10 <sup>+05</sup>	9,83.10 <sup>+05</sup>	9,88.10 <sup>+05</sup>	9,88.10 <sup>+05</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	7,05.10 <sup>+10</sup>	7,05.10 <sup>+10</sup>	7,04.10 <sup>+10</sup>	7,06.10 <sup>+10</sup>	7,56.10 <sup>+10</sup>	8,14.10 <sup>+10</sup>	8,16.10 <sup>+10</sup>

**Tableau 35 : comparaison des structures – phases de construction, d’entretien, d’utilisation et de fin de vie – avec une réduction de la consommation des véhicules de 10 % sur 30 ans pour les structures 1 à 4**

Indicateur	Unité	Structure 1 BC5g/Bm	Structure 2 BAC/Bm	Structure 3 BAC/BBSG	Structure 4 BC5/ géotextile	Structure 5 BBTM/BAC/ GB <sub>3</sub>	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Eurobitume	Structure 6 BB/GB <sub>3</sub> /GB <sub>3</sub> Oekoinventare
Énergie	TJ	1,31.10 <sup>+03</sup>	1,31.10 <sup>+03</sup>	1,31.10 <sup>+03</sup>	1,31.10 <sup>+03</sup>	1,45.10 <sup>+03</sup>	1,45.10 <sup>+03</sup>	1,48.10 <sup>+03</sup>
Eau	kg	4,74.10 <sup>+08</sup>	4,77.10 <sup>+08</sup>	4,75.10 <sup>+08</sup>	4,75.10 <sup>+08</sup>	5,25.10 <sup>+08</sup>	5,48.10 <sup>+08</sup>	5,53.10 <sup>+08</sup>
Ressources	10 <sup>-09</sup>	6,22.10 <sup>+02</sup>	6,22.10 <sup>+02</sup>	6,23.10 <sup>+02</sup>	6,22.10 <sup>+02</sup>	6,92.10 <sup>+02</sup>	7,32.10 <sup>+02</sup>	7,32.10 <sup>+02</sup>
Déchets	t eq	4,24.10 <sup>+04</sup>	4,18.10 <sup>+04</sup>	3,75.10 <sup>+04</sup>	4,34.10 <sup>+04</sup>	3,93.10 <sup>+04</sup>	3,72.10 <sup>+04</sup>	3,73.10 <sup>+04</sup>
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	5,42.10 <sup>+03</sup>	5,43.10 <sup>+03</sup>	5,43.10 <sup>+03</sup>	5,42.10 <sup>+03</sup>	6,03.10 <sup>+03</sup>	6,03.10 <sup>+03</sup>	6,16.10 <sup>+03</sup>
GWP100	kg CO <sub>2</sub>	8,44.10 <sup>+07</sup>	8,47.10 <sup>+07</sup>	8,43.10 <sup>+07</sup>	8,46.10 <sup>+07</sup>	9,32.10 <sup>+07</sup>	9,25.10 <sup>+07</sup>	9,26.10 <sup>+07</sup>
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	8,56.10 <sup>+05</sup>	8,57.10 <sup>+05</sup>	8,56.10 <sup>+05</sup>	8,57.10 <sup>+05</sup>	9,51.10 <sup>+05</sup>	9,53.10 <sup>+05</sup>	9,53.10 <sup>+05</sup>
Eutrophisation	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1,22.10 <sup>+05</sup>	1,22.10 <sup>+05</sup>	1,23.10 <sup>+05</sup>	1,22.10 <sup>+05</sup>	1,37.10 <sup>+05</sup>	1,39.10 <sup>+05</sup>	1,35.10 <sup>+05</sup>
Écotoxicité	m <sup>3</sup>	2,56.10 <sup>+09</sup>	2,56.10 <sup>+09</sup>	2,56.10 <sup>+09</sup>	2,56.10 <sup>+09</sup>	2,84.10 <sup>+09</sup>	2,87.10 <sup>+09</sup>	2,94.10 <sup>+09</sup>
Toxicité humaine	kg	1,20.10 <sup>+06</sup>	1,21.10 <sup>+06</sup>	1,21.10 <sup>+06</sup>	1,20.10 <sup>+06</sup>	1,33.10 <sup>+06</sup>	1,33.10 <sup>+06</sup>	1,33.10 <sup>+06</sup>
O <sub>3</sub> -smog	kg	8,84.10 <sup>+05</sup>	8,84.10 <sup>+05</sup>	8,84.10 <sup>+05</sup>	8,84.10 <sup>+05</sup>	9,83.10 <sup>+05</sup>	9,88.10 <sup>+05</sup>	9,88.10 <sup>+05</sup>
Odeurs	m <sup>3</sup>	6,82.10 <sup>+10</sup>	6,81.10 <sup>+10</sup>	6,80.10 <sup>+10</sup>	6,82.10 <sup>+10</sup>	7,56.10 <sup>+10</sup>	8,14.10 <sup>+10</sup>	8,16.10 <sup>+10</sup>

---

**Mise en page et réalisation**

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

**Illustrations**

David Lozach

**Impression**

Chirat

---

2<sup>e</sup> édition décembre 2011



**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](mailto:centrinfo@cimbeton.net) • internet : [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)