



ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UN PONT

**Christophe AUBAGNAC¹, Patrick GUIRAUD², Guillaume HABERT³, Amélie SÉMAT PONCHEL⁴,
Yannick TARDIVEL⁵, Christian TRIDON⁶**

¹ CETE de Lyon

² CIMbéton

³ Université Paris-Est, département matériaux, IFSTTAR, 58 Bd Lefebvre, 75732 Paris cedex 15

⁴ Egis Structures et Environnement, 11 avenue du Centre, 78286 GUYANCOURT cedex

⁵ SETRA, Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art, 46 avenue Aristide Briand, 92225 Bagneux cedex

⁶ STRRES

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE, MÉTHODOLOGIE DE COLLECTE DES DONNÉES ET CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

1.1. Présentation

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode permettant d'évaluer la qualité environnementale d'un produit. Cette méthode, intégrée dans les normes ISO 14040 et 14044 (ISO, 2006), pourrait être intégrée dans de futurs outils d'aide à la décision au service des maîtres d'ouvrages, ingénieurs et architectes qui souhaitent optimiser la conception de leur futur projet en intégrant une approche globale de dimensionnement intégrant les aspects techniques, économiques et environnementaux.

Dans cette méthode, on peut distinguer 4 étapes principales :

- La définition des frontières du système étudié ainsi que de l'unité fonctionnelle.

- La réalisation de l'inventaire du cycle de vie qui consiste à collecter et compiler les entrants (matières ou énergies consommées) et les sortants (émissions dans l'eau, dans l'air et dans le sol et les déchets produits) à chaque étape du cycle de vie de l'ouvrage (figure 1).
- La transformation de cet inventaire en impacts environnementaux (figure 1).
- Enfin, l'interprétation des résultats.

L'intérêt principal de cette méthode est que l'analyse est multiétapes, c'est-à-dire qu'elle inclut toutes les étapes du cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à la valorisation des composants de l'ouvrage en fin de vie, et multicritères ; c'est-à-dire que l'ensemble des impacts environnementaux est étudié.

1.2. Champ de l'étude, unité fonctionnelle et frontières du système

Dans cette étude, l'unité fonctionnelle est un pont en béton de type PSDP qui assure le franchissement d'une autoroute par des véhicules (unité de fonction), pendant une durée d'utilisation de 100 ans (unité de temps). L'analyse ne



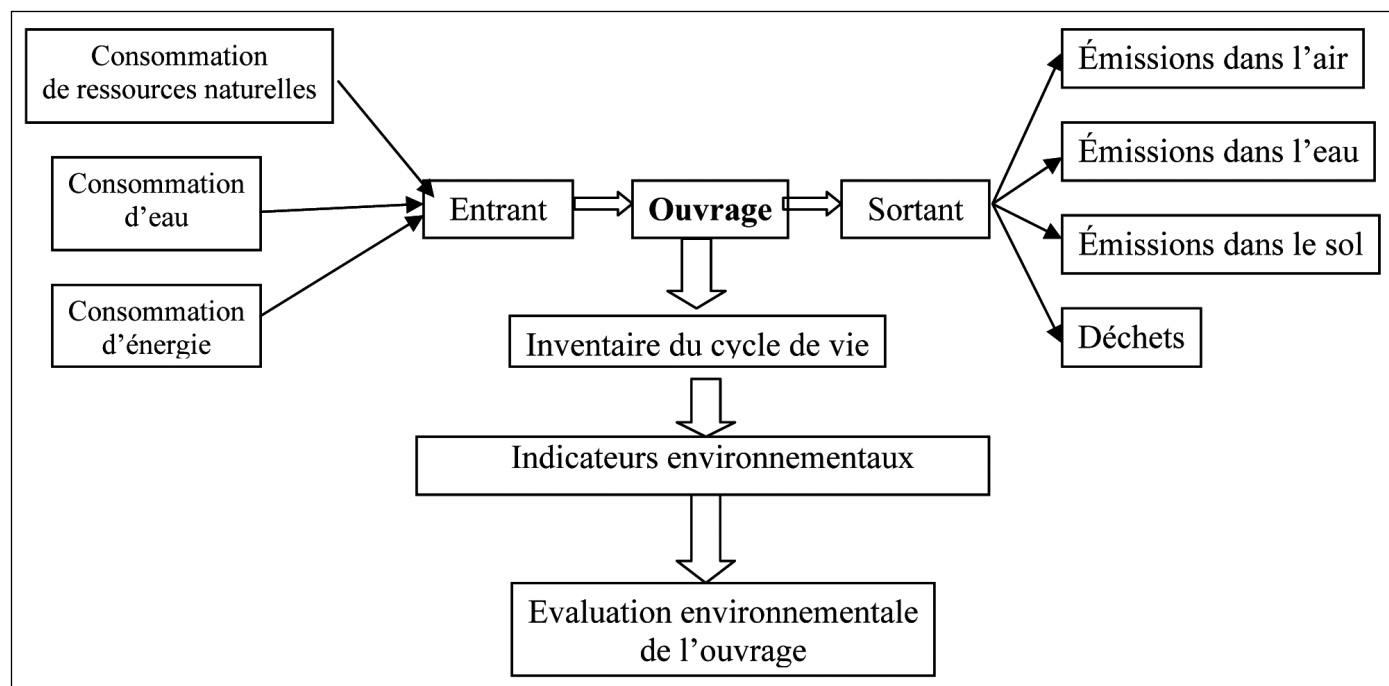


Figure 1 : Synoptique de l'évaluation environnementale d'un ouvrage (d'après Chen et al., 2008)

prend pas en compte les impacts du trafic circulant sur l'ouvrage pendant sa phase de service mais inclut : l'extraction des matières premières, la production des constituants, la fabrication des matériaux et produits qui le composent, des matériaux, matériels et engins nécessaires à sa réalisation, leurs transports jusqu'au chantier, sa construction et sa vie en œuvre (exploitation, maintenance et entretien) et en fin de vie sa déconstruction et la valorisation des matériaux. Le cycle de vie de l'ouvrage a été décomposé en 5 grandes étapes (Figure 2).

1.2.1. Étape 1 : fabrication des matériaux, matériels et engins de chantier

Cette étape comprend l'extraction des matières premières, la fabrication, la transformation, le montage ou l'assemblage. Elles incluent tous les transports nécessaires en amont pour livrer les divers constituants ou composants des matériaux, matériels et engins de leur sites initiaux jus-

qu'à leur site de production final. Elle s'arrête à la sortie du produit, du matériel ou de l'engin de son site de production.

Nous avons distingué :

- les matériaux structurants : bétons, armatures de précontrainte, armatures passives...
- les équipements de l'ouvrage : Etanchéité, Couche de roulement, Joints de chaussé, Appareils d'appuis...
- les matériaux nécessaires à la réalisation de l'ouvrage : coffrages, étalements, huiles de décoffrage...
- les matériels et engins de chantier utilisés pour la réalisation de l'ouvrage.

1.2.2. Étape 2 : transport des matériaux, matériels et engins de chantier

Cette étape inclut tous les transports nécessaires pour assurer toutes les livraisons de la sortie de chaque site de fabrication jusqu'au chantier pour les divers matériaux

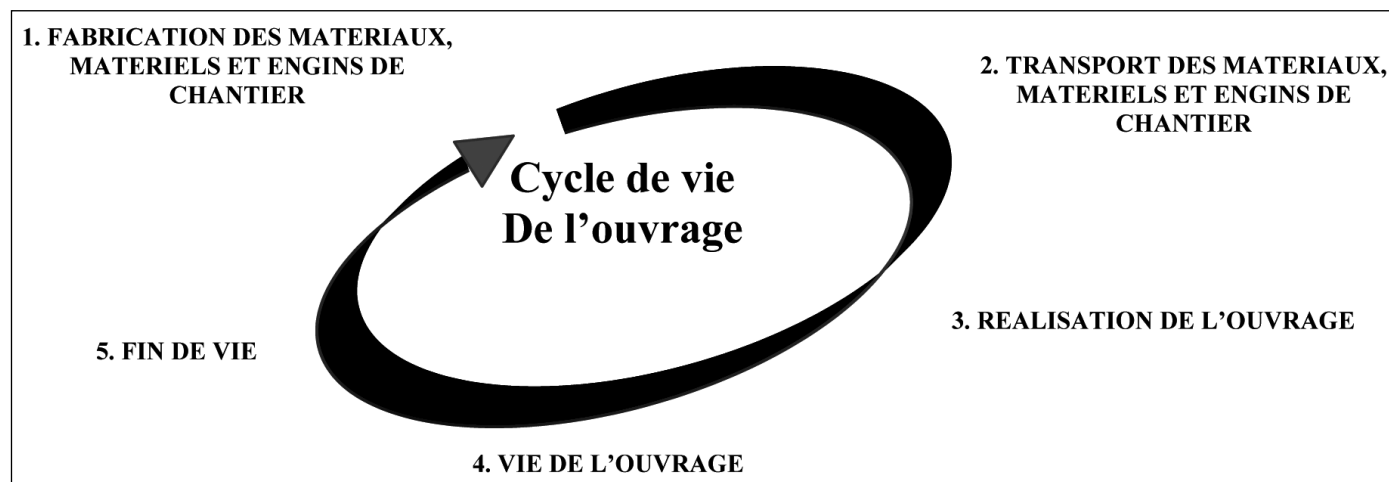


Figure 2 : Les 5 étapes du cycle de vie d'un ouvrage

structurants, les équipements et les matériaux nécessaires à la construction de l'ouvrage ainsi que les livraisons des matériels et engins de chantier à partir du dépôt de l'entreprise jusqu'au chantier.

1.2.3. Étape 3 : réalisation de l'ouvrage

L'étape de réalisation de l'ouvrage regroupe toutes les phases nécessaires à sa construction sur le site et les moyens généraux et humains déployés pendant toute la période d'exécution.

La réalisation de l'ouvrage est décomposée en différentes phases afin de distinguer les travaux réalisés par l'entreprise générale présente sur le site pendant toute la durée du chantier et les travaux réalisés, par les divers sous traitants. Elle intègre également :

- L'ensemble des moyens généraux spécifiques au chantier (installations de chantier, consommation d'eau, éclairage, chauffage des installations de chantier...).
- Les impacts des véhicules lors des déplacements effectués par tous les intervenants sur le chantier, pendant toutes les étapes de la construction : déplacements du personnel de chantier et de l'encadrement (entreprise générale et entreprises sous traitantes) à partir de leur domicile personnel ou du siège de leurs entreprises.
- Les consommations en carburant et énergie de l'ensemble des matériels et engins utilisés sur le chantier : groupe électrogène, pompe à béton, grue mobile...

1.2.4. Étape 4 : Vie de l'ouvrage

L'ouvrage va faire l'objet, au cours de l'ensemble de sa durée d'utilisation, d'un ensemble d'interventions réalisées régulièrement qui sont regroupées en trois catégories : la surveillance, l'entretien courant et l'entretien spécialisé incluant les petites réparations.

1.2.5. Étape 5 : Fin de vie

Cette étape couvre la déconstruction de l'ouvrage en fin de vie, le transport des matériaux dans un centre de valorisation, leur traitement et leur stockage.

1.3. Inventaire du cycle de vie, sources de données et règles de coupure

Lors de la récolte de l'ensemble des entrants et sortants pour chaque étape du cycle de vie de l'ouvrage, nous avons appliqué la règle de coupure sur les flux de la norme NF P 01-010 dont le seuil est fixé à 98% (les entrants dont la masse est inférieure à 2 % sont exclus). De même l'amortissement des matériels et engins utilisés tout au long du cycle de vie du pont n'a été pris en compte qu'au delà de 5%. C'est-à-dire que la durée d'immobilisation de l'engin pendant toutes les phases du chantier était supérieure à 5% de sa durée de vie estimée. Les impacts liés à la fabrication des matériels et des engins ont alors été affectés à l'engin au prorata de cette valeur d'amortissement.

Les données environnementales utilisées sont issues en particulier :

- de bases de données publiques (FDES répertoriées dans la base INIES)

- de bases de données internationales accessibles via internet.

Certaines données ont aussi été collectées auprès des organismes tels que, l'ATILH pour le ciment, le SNBPE pour le béton, l'UNPG pour les granulats. De plus amples informations sur les données sont disponibles dans l'ouvrage Cimbéton T87 (Cimbéton, 2010).

1.4. Impacts environnementaux

A partir des données de l'Inventaire du Cycle de Vie, les différents flux ont été pondérés au sein de chaque catégorie d'impact auxquelles ils contribuent par des facteurs de caractérisation (coefficient de conversion) qui expriment l'importance relative des émissions (ou des consommations) de chaque substance au sein d'une catégorie d'impact environnemental spécifique.

1.4.1. Description

Nous avons choisi de nous conformer à la norme NF P 01-010 (AFNOR, 2004) qui permet d'évaluer la contribution environnementale des produits de construction. Cette norme considère 10 impacts environnementaux qui couvrent l'ensemble des atteintes possibles de l'environnement. Cette norme est en cours de modification cependant l'esprit des différentes catégories d'impact reste similaire.

Nota : Ces impacts sont déterminés séparément et ne peuvent donc pas être comparés. La méthode utilisée dans la norme NF P 01-010 ne permet pas de hiérarchiser les impacts environnementaux ; cependant, d'autres méthodes comme Ecoindicateur99, RECIPE ou IMPACT2002+ permettent de pondérer les impacts permettant une évaluation globale environnementale d'un ouvrage. Mais ces méthodes introduisent plus d'incertitudes et rendent l'interprétation des résultats plus délicate.

1.4.2. Calcul des impacts environnementaux

Différents types de méthodes sont utilisées pour le calcul des impacts environnementaux, notamment la méthode des équivalences et celle du volume critique.

Dans le cadre de la norme NF P 01-010, la méthode des équivalences s'applique aux indicateurs suivants :

- changement climatiques
- épuisement des ressources naturelles
- acidification atmosphérique
- formation d'ozone photochimique.

La méthode du volume critique quant à elle, est utilisée pour les indicateurs :

- pollution de l'air
- pollution de l'eau.

Le principe de la méthode des équivalences consiste à convertir les flux des substances susceptibles de contribuer aux impacts en un flux d'une substance de référence spécifique à chaque catégorie d'impact. Par exemple pour le changement climatique, les émissions dans l'air sont converties en kg puis multipliées par un coefficient de conversion (kg CO₂ équivalent) spécifique à chaque gaz. L'indicateur de changement climatique correspond à la somme des résultats convertis (Figure 3).

Impact environnemental	Unité
Consommation de ressources énergétiques <ul style="list-style-type: none"> • Energie primaire totale • Energie renouvelable • Energie non renouvelable 	MJ / UF
Épuisement de ressources (ADP)	kg équivalent antimoine / UF
Consommation d'eau totale	Litre / UF
Déchets solides <ul style="list-style-type: none"> Déchets valorisés total, Déchets éliminés : <ul style="list-style-type: none"> Déchets dangereux, Déchets non dangereux, Déchets inertes, Déchets radioactifs. 	kg / UF
Changement climatique	kg équivalent CO ₂ / UF
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂ / UF
Pollution de l'air	m ³ / UF
Pollution de l'eau	m ³ / UF
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC équivalent / UF
Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène / UF

Tableau 1 : Unités associées aux impacts environnementaux de la norme NF P 01-010

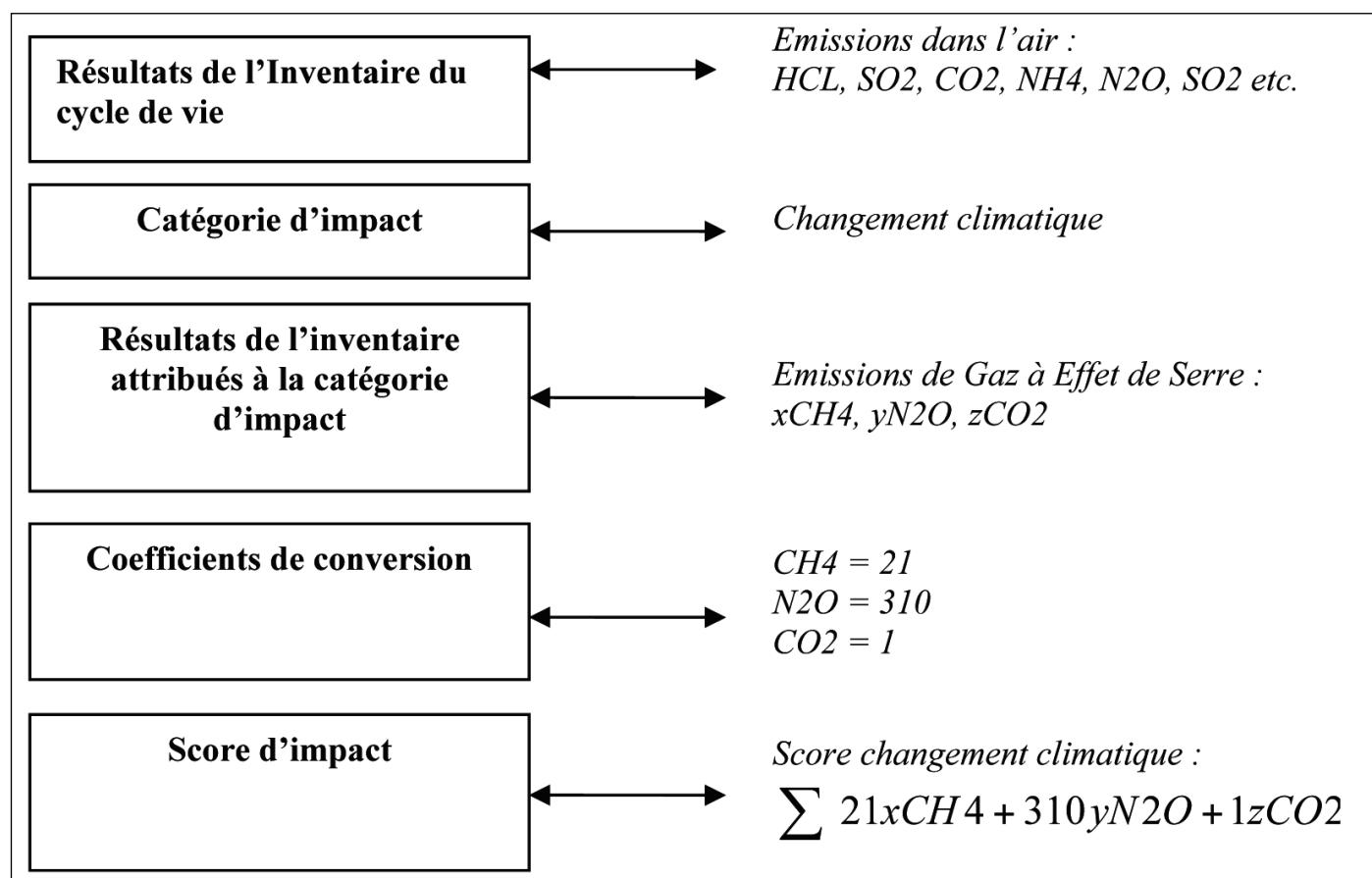


Figure 3 : Méthodologie de détermination de l'indicateur changement climatique

Pour la méthode du volume critique, les émissions sont prises en compte en calculant le volume d'air ou d'eau fictif nécessaire pour diluer chaque flux (hydrocarbures, oxyde d'azote, composés chlorés organiques...) pour le rendre conforme à un seuil (défini par l'arrêté 27 du 2/2/98 relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement). L'émission est divisée par un coefficient de conversion. L'indicateur correspond à la somme des volumes d'air ou d'eau fictifs.

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE ÉTUDIÉ

2.1. Identification de l'ouvrage

L'ouvrage étudié est le passage supérieur de Cocloye en Saône et Loire (71), ouvrage réalisé en 2006 dans le cadre des travaux de mise à 2 x 2 voies de la RN80 – Route Centre Europe Atlantique (RCEA), pour permettre le rétablissement de la RD 981. Un marché de type TOARC (Terrassements, Ouvrages d'Art, Rétablissements, Chaussées) relatif à la section Givry – Cocloye, de 3 km de longueur, de la RN80, comprenait la démolition de deux passages supérieurs existants et la construction de deux passages inférieurs en cadre fermé (PICF) et de deux passages supérieurs en dalles précontraintes (PSDP), dont le PS de Cocloye. Une description succincte du chantier est effectuée dans les paragraphes suivants mais de plus amples informations sont disponibles dans l'ouvrage Cimbéton T87 (Cimbéton, 2010).

2.2. Caractéristiques générales de l'ouvrage

L'ouvrage, qui comporte un unique tablier, possède deux travées de 25 m de portée, pour une longueur totale de 51,53 m. Le biais du franchissement et des appuis est de 94,20 grades. La hauteur libre minimale au dessus de la RN80 est de 4,98 m.

Les culées en béton armé sont fondées par l'intermédiaire de deux files de trois pieux forés de diamètre 800 mm et de 5,75 m de profondeur (substratum marno-calcaire ou cal-

caire tendre), coiffées par une semelle de 4 m de largeur et de 0,90 m d'épaisseur. Elles sont constituées d'un chevêtre – mur de front, de 1,80 m d'épaisseur, comportent un mur garde-grève et sont équipées d'une dalle de transition de 3 m de longueur. Les talus des culées sont revêtus de percés en dalles de béton.

La pile intermédiaire est constituée d'un voile unique en béton armé de forme trapézoïdale (largeurs d'environ 4,50 m en pied et 6 m en tête) et d'épaisseur 0,70 m à sa base, qui s'épaissit par deux redans successifs en partie supérieure : épaisseurs de 0,80 m puis de 0,90 m. Elle est fondée par l'intermédiaire de trois barrettes de section 5 m x 0,80 m (épaisseur) et de 2,10 m de profondeur, surmontées d'une semelle de 4 m de largeur pour 6,40 m de longueur, et de 0,80 m d'épaisseur.

Le tablier repose sur ses appuis par l'intermédiaire de lignes de deux appareils d'appui en caoutchouc fretté, de dimensions 650 x 600 x 4(16+4) sur pile et 300 x 600 x 5(10+3) sur culées.

L'ouvrage est équipé à ses extrémités de joints de chaussée à hiatus de souffle 50 mm.

Le profil en travers de la RD 981 sur l'ouvrage est constitué d'une chaussée de 6,60 m de largeur, avec un profil en toit déversé à 2,5 %, bordée de deux trottoirs de 1 m de largeur, soit une largeur utile de 8,60 m, pour une largeur totale du tablier de 9,60 m.

Le tablier est constitué d'une dalle nervurée en béton précontraint : nervure de 5,30 m de largeur et d'épaisseur maximale à l'axe de 1,01 m et encorbellements de 2,15 m de largeur.

Il est précontraint au moyen de 19 câbles de type 12 T 15,7 (Super), torons TBR de classe 1860 MPa (procédé CCL-EF).

2.3. Conception générale de l'ouvrage

Les travaux de construction des quatre ouvrages d'art du TOARC ont démarré en janvier 2006 et se sont achevés en novembre 2006, cependant, la construction du PS de Cocloye a nécessité six mois d'activité sur chantier (mise en service début octobre 2006). Le tablier du nouveau PS a été coulé sur cintre et étalements en une seule phase, au moyen d'une pompe à béton de 36 m. Le détail du chantier

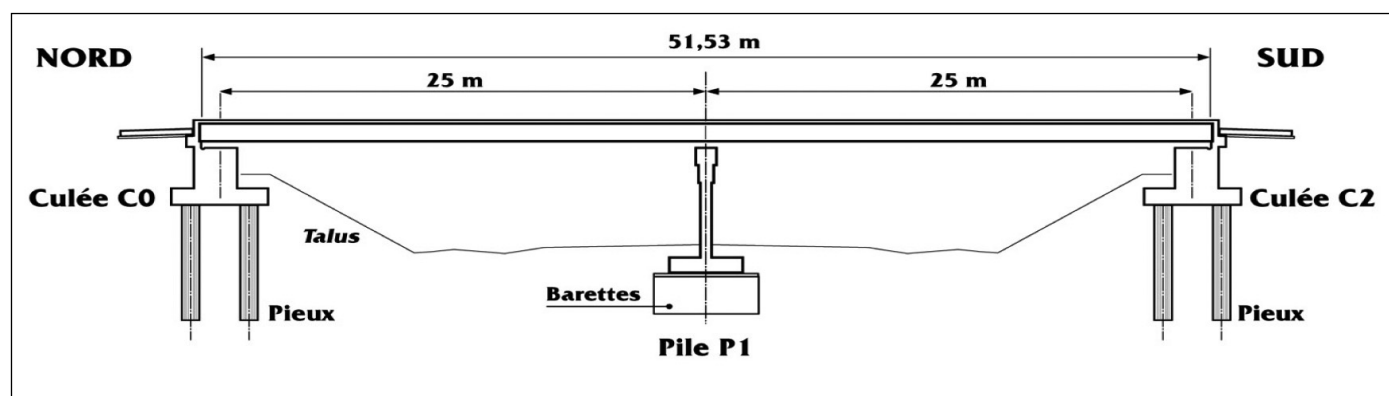


Figure 4 : Coupe longitudinale de l'ouvrage

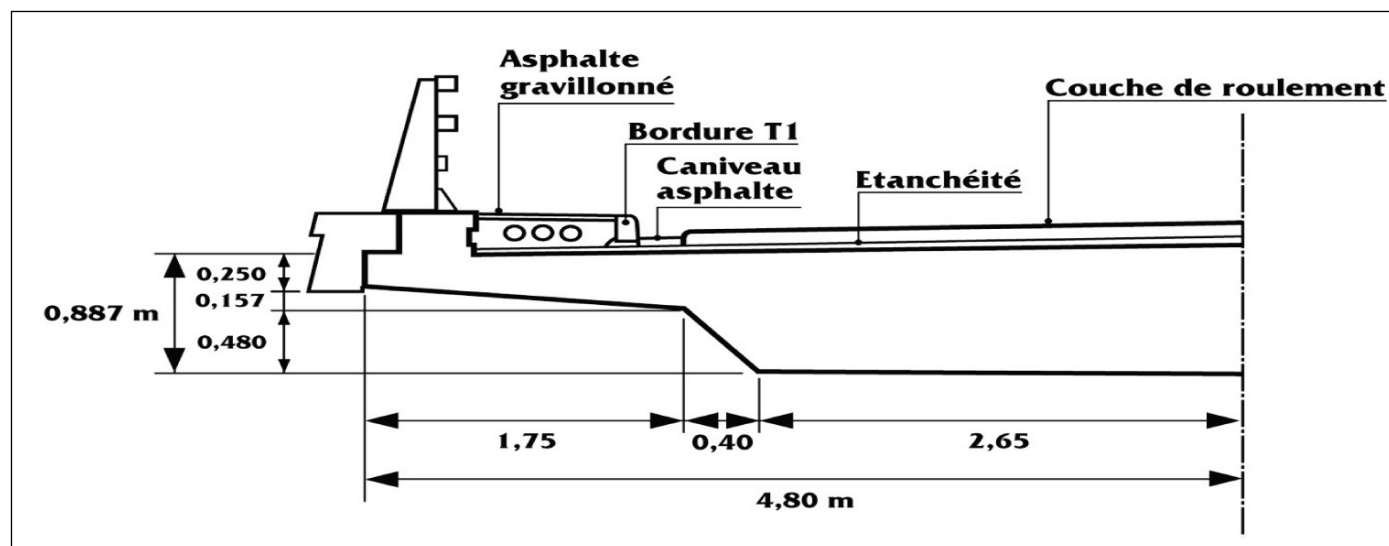


Figure 5 : Coupe transversale de l'ouvrage

et du choix du dimensionnement sont détaillés dans l'ouvrage de cimbéton (Cimbéton, 2010). Les principales quantités mises en œuvre peuvent être résumées ainsi :

Bétons structuraux: 686 m³

Bois de coffrage: 315 m²

Aciers de précontrainte: 14 t

Aciers passifs: 60 t

Chape d'étanchéité feuille préfabriquée: 487 m²

Chape d'étanchéité asphalte gravillonné + divers asphaltes: 39 t

Béton bitumineux: 60 t

Appareils d'appui en caoutchouc fretté: 109 dm³

Joints de dilatation: 20 ml

BN4: 136 ml

Corniches préfabriquées en BA C35/45: 97 ml

Remblais contigus: 533 m³

3. SCÉNARIO D'ENTRETIEN ET DE MAINTENANCE DE L'OUVRAGE

Comme l'ouvrage étudié a été construit en 2006, et que la durée de vie étudiée par la méthode ACV est de 100 ans, il a fallu faire des hypothèses sur le scénario d'entretien. Tout d'abord, et en accord avec le principe de l'ACV qui évalue des procédés ou des produits ayant un fonctionnement normal, nous avons considéré que l'ouvrage a été exécuté correctement, dans le respect des exigences contractuelles. De même, nous n'avons pas non plus tenu compte des conséquences d'événements accidentels, chocs, incendies, dégâts des eaux ou autres.

Ensuite, l'expérience que nous avons, aujourd'hui, d'ouvrages en béton armé, d'un âge équivalent, montre que l'effet du vieillissement structurel n'a pas d'incidence sur la qualité du service que l'on est en droit d'attendre de la part de l'ouvrage tant que le choix des bétons a été établi en conséquence du cahier des charges.

Le scénario retenu est considéré comme « moyen ». Il a consisté à surveiller l'ouvrage et à lui assurer l'entretien

courant et les petites réparations que l'expérience des 30 dernières années nous a permis de recueillir, en ce domaine. Nous avons distingué des actions de surveillance, d'entretien courant et d'entretien spécialisé.

La surveillance de l'ouvrage comprend :

- l'inspection détaillée initiale (sitôt après sa construction)
- les visites sommaires de type IQOA ou autre système
- les inspections détaillées périodiques
- les inspections détaillées exceptionnelles.

Ce principe de surveillance est prescrit par l'ITSEO (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'art) document rédigé par la Direction des Routes du ministère de l'Équipement, en octobre 1979.

L'entretien courant couvre :

- le nettoyage des joints de chaussée
- le nettoyage des dispositifs d'évacuation des eaux
- le nettoyage des abords.

L'entretien spécialisé et les petites réparations concernent :

- le remplacement de la couche de roulement
- le changement des appareils d'appuis
- le changement des joints de chaussée
- le remplacement de la chape d'étanchéité
- la réfection du revêtement des trottoirs
- la réfection des corniches
- la remise en peinture des dispositifs de retenue
- la reprise des bétons dégradés
- le nettoyage des bétons (enlèvement des graffitis)
- l'entretien des abords.

Pour chacune de ces tâches, il a été retenu un ensemble de paramètres tels que :

- la périodicité
- le personnel nécessaire (qualité et quantité)
- les matériels nécessaires
- les fournitures, matériaux et produits utilisés.

Pour chacun de ces éléments, il a été défini une quantité de temps ou de matière, tels que par exemple, la consommation en gasoil utilisée par chaque personnel pour se rendre sur le chantier, depuis un lieu d'habitation probable. Chaque matériel spécifique (camion, compresseur,

groupe électrogène etc) a fait l’objet d’une décomposition en durée de fonctionnement (durée d’acheminement et durée d’utilisation) qui a pu être traduite en quantité de consommable énergétique. Pour les fournitures, l’analyse a retenue les impacts relatifs à chacun d’eux en tenant compte de leur lieu de fabrication (ou en retenant comme point de départ l’importateur français) ainsi que de leur transport jusqu’au chantier. Le détail de l’ensemble de ces hypothèses est accessible dans l’annexe 13 (Cimbéton, 2010)

4. SYNTHÈSE DE L’ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L’ACV permet d’évaluer les impacts environnementaux d’une structure de génie civil sur son environnement, selon une approche globale de l’ensemble des processus associés à la fabrication des matériaux, à sa réalisation et à son exploitation ainsi qu’à sa fin de vie. L’analyse des résultats présentés en détail dans l’ouvrage Cimbéton T87 (Cimbéton, 2010) dégage des pistes de progrès en matière de technologie et de méthodologie.

4.1. Constats

La répartition des impacts environnementaux selon les différentes phases du cycle de vie est présentée dans le tableau suivant. L’impact est exprimé, pour chaque catégorie d’impact, en pourcentage par rapport à l’impact de l’ensemble du cycle. L’analyse de gravité des résultats permet de mettre à jour deux étapes déterminantes dans l’ACV pour cet ouvrage, en termes de valeurs d’impacts : la production des matériaux et la vie de l’ouvrage. A elles deux,

celles-ci concentrent 70% de la consommation d’énergie, 80% de l’épuisement des ressources et 100% de la formation d’ozone photochimique. A l’exception de la pollution de l’eau, les autres impacts trouvent quant à eux leur source quasi-exclusive dans l’étape de production des matériaux (rappelons qu’en outre l’étape « vie de l’ouvrage » inclut la production des matériaux des opérations de maintenance).

La réalisation de l’ouvrage contribue à hauteur de 0 à 20% des impacts selon leur nature. Il est intéressant de souligner que ces valeurs dépassent les impacts imputables aux transports en dépit d’un important kilométrage cumulé (140 000 km). Cependant le chantier peut générer des impacts indirects très importants qui ne sont pas pris en compte dans cette étude (ex : bruit).

Les deux étapes principales que permet de faire émerger cette analyse environnementale, la production des matériaux et l’exploitation de l’ouvrage, doivent donc concentrer une attention particulière :

- la fabrication des matériaux structurants reste l’élément clé en matière de consommation d’énergie et plus encore d’émissions de GES. Les armatures et les bétons se partagent de manière très variable le poids des impacts selon leur nature. Prépondérants en terme d’écotoxicités (pollution de l’air, pollution de l’eau), les armatures en place dans la structure restent en retrait des bétons sur l’impact d’acidification et dans une moindre mesure, de changement climatique. Notons un quasi-équilibre entre ces deux matériaux en terme d’épuisement des ressources et de consommation d’énergie. Ces conclusions ne sont pas relatives aux volumes unitaires des matériaux, mais aux quantités précises en place issues du dimensionnement de l’ouvrage: une transposition au-delà d’un cas de figure similaire n’est donc pas envisageable ;

Indicateurs	Unités	Fabrication %	Transport %	Réalisation %	Vie de l’ouvrage %	Fin de vie %	Total %
Consommation de ressources énergétiques	MJ	38	5	21	30	6	100
Épuisement des ressources	kg équivalent antimoine	45	4	13	34	4	100
Consommation d’eau totale	Litre	82	1	5	11	1	100
Déchets solides	kg	97	0	1	2	0	100
Changement climatique	kg équivalent CO ₂	59	4	14	19	4	100
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂	58	10	14	14	4	100
Pollution de l’air	m ³	83	3	4	9	1	100
Pollution de l’eau	m ³	31	6	22	35	6	100
Formation d’ozone photochimique	kg équivalent éthylène	44	0	0	56	0	100

Tableau 2 : Répartition des impacts environnementaux selon les différentes étapes du cycle de vie

- les impacts imputables à l'étape « vie de l'ouvrage » trouvent leur origine principale dans les consommations de carburant des matériels et engins de chantier ainsi que dans les matériaux bitumineux (couche de roulement et étanchéité du tablier). Notons en particulier que dans cette étude, la formation d'ozone photochimique est imputable aux postes « enrobés » et « chape d'étanchéité ».

4.2. Interprétation

A partir des constats ci-dessus, il apparaît que les enjeux essentiels se situent donc dans la production et la mise en œuvre des matériaux, selon un schéma variable en fonction des étapes considérées : impacts importants de la production des matériaux constitutifs de l'ouvrage, et impacts importants de la mise en œuvre pour les opérations d'entretien (au regard des quantités de matériaux concernés). Ce dernier constat pourra être modulé, du fait que le scénario retenu considère des hypothèses d'entretien élevées, notamment en terme de moyens mobilisés. Par ailleurs, à l'échelle de la durée de vie d'un ouvrage, l'évolution des motorisations vis-à-vis des énergies utilisées modifiera notablement ces résultats estimés, en diminuant d'autant le poids de cette étape.

A contrario, les trois premières étapes du cycle de vie (fabrication, transport et réalisation) n'ont pas fait l'objet d'hypothèse mais d'un recensement précis des natures et quantités de matériaux utilisés, des distances parcourues et modes d'approvisionnement choisis, des engins et matériels mobilisés ainsi que des déplacements professionnels induits. Elles reflètent donc les modes de production et pratiques actuelles de réalisation d'un ouvrage d'art routier. Pour autant, il faut considérer cet ouvrage dans son environnement : il ne peut donc être question de transposer les valeurs d'impacts obtenues. Gardons bien à l'esprit que la conception et la réalisation d'un pont sont tributaires de contraintes fonctionnelles, naturelles, sociétales, etc. et que les autres étapes du cycle de vie dépendent quant à elles de paramètres spécifiques de gestion.

Un point particulier mérite d'être mentionné. Certaines actions, en particuliers celles liées à la mise en œuvre des matériaux, ont des impacts environnementaux peu significatifs ; cependant, elles génèrent des impacts indirects (gêne aux usagers, embouteillage, déviation, risque d'accident), notamment du fait de la neutralisation de voies de circulation. Ces impacts ne sont pas pris en compte dans cette étude, soit parce que la catégorie d'impact n'est pas étudiée (ex : bruit, odeurs,...) soit parce que les conséquences de ces actions ne sont pas incluses dans les frontières du système étudié. C'est le cas par exemple des déviations de trafic. En effet, on peut estimer que sur l'ensemble de la durée de vie du pont, il y aura 130 jours (sur 100 ans) où les voies devront être coupées. Considérant le trafic et les émissions actuelles du parc automobile et poids lourds circulant sur l'ouvrage, chaque kilomètre de déviation emprunté pour l'occasion par les usagers couvrirait ainsi 10% des émissions de GES issues des travaux d'entretien. L'estimation est réalisée sur la base d'un trafic peu élevé (500 véh/jour), représentatif de la voie portée par l'ouvrage.

4.3. Conclusion

La multiplicité des indicateurs environnementaux qui contribue à la qualité de l'analyse transversale, peut nécessiter la pondération d'un ou plusieurs impacts. Une telle démarche sélective doit viser à conférer au projet une cohérence environnementale vis-à-vis du milieu dans lequel il se situe, induisant l'émergence de choix et orientations susceptibles d'être différents de ceux issus d'une analyse restreinte au champ « conception-réalisation », ou d'un simple bilan GES. De même tous les impacts environnementaux ne sont pas pris en compte et leur prise en compte reste délicate. In fine les conclusions de l'étude renvoient donc aux décisions politiques et au difficile arbitrage entre différents intérêts sociaux et environnementaux. Une attention particulière sur les politiques d'entretien et de conception des ouvrages, étape amont au cours de laquelle doit être envisagée l'exploitation future du projet par un gestionnaire dont les priorités resteront l'aptitude au service et la durabilité de son patrimoine associée à un entretien maîtrisé est donc une étape clé. A ce titre, associée à une étude de coût global, l'ACV permet de définir des pistes de progrès en matière de conception et d'exploitation des infrastructures et doit contribuer à faire émerger des innovations du fait de l'apparition d'indicateurs complémentaires dans l'évaluation des performances.

5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Les données que nous avons utilisées pour faire cette étude sont issues de données factuelles récoltées sur le terrain, de données choisies à dire d'expert ainsi que de données issues de la littérature. Elles sont donc soumises à une certaine incertitude, et il peut donc sembler intéressant d'évaluer les conséquences de ces variations potentielles sur le résultat. Les résultats présentés ici proviennent d'une étude réalisée par Arribe et co auteurs (Arribe et al., 2010).

5.1. Incertitudes et méthodes étudiées

Dans ce paragraphe, nous avons évalué l'influence des variations associées à un certain nombre de points qui sont résumés dans le tableau suivant (tableau 3). L'essentiel des variations présentées dans le tableau sont associées à des incertitudes d'ordre technique qui peuvent se résumer essentiellement en une incertitude sur les distances de transport des matériaux, des engins et des personnels, une incertitude sur la consommation des engins et matériels de chantier et une dernière sur le taux de déchet lors de la réalisation et le taux de recyclage en fin de vie. À ces **incertitudes** que l'on peut qualifier de **techniques**, il est important d'ajouter des **incertitudes** que l'on appellera **environnementales** et qui sont associées à une méconnaissance des procédés industriels ou à une variabilité en terme d'efficacité de production entre les différents sites industriels. Les variations environnementales qui ont été prise en compte concernent la production d'acier et de ciment. Pour l'acier, l'incertitude provient d'une part du fait que les armatures d'acier peuvent être produites par 2 filières ayant

des procédés de production très différents (la filière électrique et la filière haut fourneau) et que la proportion relative de ces deux filières n'est pas bien connue entre autre parce que l'acier vient de différents pays européens. Au niveau européen, la base de données Ecoinvent estime que 30% de l'acier vient de la filière électrique alors qu'au vu des estimations des experts français 70 à 80% de l'acier passif français serait produit par la filière électrique. Il a donc été décidé de considérer que 50% de l'acier des armatures provenait de la filière électrique et que la variation pouvait être entre 30% et 70% issus de la filière électrique. La deuxième incertitude environnementale qui a été prise en compte concerne la filière haut fourneau. En effet, l'acier utilisé pour la précontrainte provient d'usines implantées dans différents pays européens voir au niveau mondial. Il est donc probable que l'efficacité de la production des différentes usines soit différente. Comme il était difficile d'avoir des renseignements sur ces variations, il a été décidé d'affecter une variation arbitraire de 20%. L'intérêt de cette variation, même arbitraire est de pouvoir tester la sensibilité de la réponse du système à cette variation. Enfin, en ce qui concerne le ciment, nous avons utilisés des résultats déjà présentés dans une précédente étude (Chen et al., 2010) permettant de calculer les variations des émissions de gaz entre les différentes cimenteries françaises en s'appuyant sur le registre européen des émissions polluantes.

5.2. Étude de la sensibilité du résultat

D'un point de vue plus global, il est évident que l'ensemble de ces incertitudes ne se cumulent pas mais varient toutes en même temps. Pour évaluer la variation issues de l'ensemble de ces incertitudes, nous avons procédé à une simulation de type « Monte Carlo » en considérant que la fonction de répartition des différentes incertitudes était une fonction triangle, c'est-à-dire que la moyenne a le plus de probabilité de se produire et qu'ensuite la probabilité diminue linéairement jusqu'aux maximum et minimum. Le résultat de cette simulation est présenté pour certaines catégories d'impact dans la figure 6. Il est intéressant de noter que bien que les incertitudes choisies soient importantes, en particulier le fait que les distances et les consommations aient été multipliées par deux, les variations ne sont que de l'ordre de 10 %.

5.3. Conclusion

Ces résultats sont encourageants car cela donne une certaine fiabilité dans le résultat de la solution proposée. En effet, il est classiquement considéré que lors d'une étude d'analyse de cycle de vie, les différences entre deux solutions ne peuvent pas être considérées comme significatives pour des différences inférieures à 20%. Nous retrouvons ces variations, mais nous les avons quantifiées. De plus, en faisant varier chaque incertitude individuellement il est possible de tester la sensibilité de cette incertitude sur le résultat final. Permettant ainsi d'identifier les points d'amélioration de l'analyse. Du point de vue de la récolte des **données techniques**, plus que les distances entre les

sites de production et le chantier, il apparaît clairement qu'une meilleure connaissance des consommations des engins utilisés est primordiale. En effet l'ensemble des incertitudes sur les distances ne modifient de moins de 10% le résultat alors que les consommations des engins peuvent induire des variations de plus de 20%. De plus, une meilleure connaissance des actions lors de la maintenance, appuyée sur des suivis de chantier plus que sur des hypothèses permettra de fiabiliser le résultat. Ensuite du point de vue de la qualité des **données environnementales**, une meilleure connaissance du type de filière de production de l'acier ainsi que du lieu de production est essentielle pour calculer l'impact de la production des aciers passifs. Enfin, il est apparu que la variabilité entre les différents sites de production doit être prise en compte. Cette variation a été mise en évidence pour les différentes cimenteries et nécessiterait d'être mieux quantifiée. Notons que l'évaluation de cette variation n'est pas possible pour les aciéries au vu des données disponibles et n'a donc été introduite qu'en faisant varier de +20% l'impact de la production des haut fourneaux. Ceci mérite également d'être mieux quantifié.

6. PERSPECTIVES

En dépit de la structure courante choisie, un PSDP représentatif des ouvrages d'art du réseau routier national, il est apparu un manque cruel de données matériaux permettant de bâtir un profil environnemental adapté. La représentativité de l'étude butait donc sur une difficulté ouvrant un large champ à investiguer.

Afin de pouvoir déterminer la pertinence d'une innovation ou d'un choix de conception ou d'entretien, il est impératif de disposer de données d'entrée fiables et adaptées à l'objet étudié. Les bases de données environnementales actuellement disponibles apparaissent très générales ou ciblées sur des domaines qui ne couvrent pas le champ du génie civil. Les FDES en particulier, permettent de combler ces lacunes dans le cadre de produits destinés aux bâtiments, selon un cycle de vie prédéfini. Cette démarche reste cependant difficilement transposable en l'état au génie civil, où le caractère de prototype des ouvrages induit une spécificité de conception, de réalisation et d'exploitation ne permettant une forfaitisation des différentes étapes qu'au détriment de la précision recherchée.

Afin de pouvoir valoriser l'emploi de matériaux à faibles impacts environnementaux ou présentant une durabilité accrue, un phasage optimisé de construction ou une politique d'entretien préventive, l'évaluateur doit pouvoir disposer de données sources justes et suffisamment précises afin de les agglomérer de manière transparente selon les différents scénarios qu'il aura envisagés.

La constitution d'un groupe de travail destiné à fournir les éléments indispensables à une évaluation environnementale représentative est apparue comme une nécessité. Le groupe DIOGEN (Données d'Impacts environnementaux pour les Ouvrages de GENie civil) s'est donc constitué en 2009 au sein de l'AFGC. Ce groupe s'organise autour de cinq thèmes traitant des grandes familles de matériaux

Variations	Moyenne	Min	Max	explications
Distance entre la carrière de granulats et la centrale BPE	50	2	98	Distance effective
Distance entre la cimenterie CEM I et la centrale BPE	260	135	385	Distance effective
Distance entre la cimenterie CEM II et la centrale BPE	180	110	250	Distance effective
Distance entre la centrale BPE et le chantier	30	10	50	Distance effective
Distance entre production de l'acier precontrainte et le chantier	900	500	1200	Distance effective
Distance entre la production de l'acier passif et le chantier	100	50	200	Distance effective
Distance raffinerie station de malaxage sur chantier	300	140	500	Distance effective
Distance carrière station de malaxage sur chantier	50	2	98	Distance effective
Distance engins de chantier pour la realisation. vehicule autoporteur	175	87,5	350	Distance cumulée
Distance engins de chantier pour la realisation. camion plateau	3035	1517	6070	Distance cumulée
Distance engins de chantier pour la realisation. semi remorque	1550	775	3100	Distance cumulée
Distance véhicule léger pendant la phase de maintenance	10240	5120	20480	Distance cumulée
Distance poids lourds pendant la phase de maintenance	3740	1870	7480	Distance cumulée
Distance entre le siège et le chantier (vehicule personnel utilisés pendant la realisation)	57800	28900	115600	Distance cumulée
Distance entre le siège et le chantier (vehicule utilitaire utilisés pendant la realisation)	32630	16135	65260	Distance cumulée
Distance entre l'ouvrage à la décharge	30	10	60	Distance effective
Distance du point de dépôt des matériaux (=supermarché) au chantier	50	5	100	Distance effective
Variation de la consommation des engins et matériels de chantier pour la réalisation	1	0,5	2	Coefficient multiplicateur
Variation de la consommation des engins et matériels de chantier pour la maintenance	1	0,5	2	Coefficient multiplicateur
Variation de la consommation des engins et matériels de chantier pour la demolition	1	0,5	2	Coefficient multiplicateur
Taux de déchet de béton	0	-0,05	0,05	
Taux de déchet de l'acier	0	-0,05	0,05	
Taux de déchet du bitume	0	-0,05	0,05	
Taux de mise en décharge du béton en fin de vie	0,5	0,2	0,8	
Taux de mise en décharge de l'acier en fin de vie	0,8	0,5	1	
Taux de mise en décharge du bitume en fin de vie	0,5	0,2	0,8	
% de la filiere haut fourneau dans l'acier passif	0,5	0,3	0,7	% haut fourneau/électrique
Variation de l'efficacité de filière haut fourneau pour acier precontraint	1	0,8	1,2	
Variation des émissions des gaz des différents cimenteries françaises	[Chen et al., 2010]			

Tableau 3 : Synthèse des différents paramètres étudiés

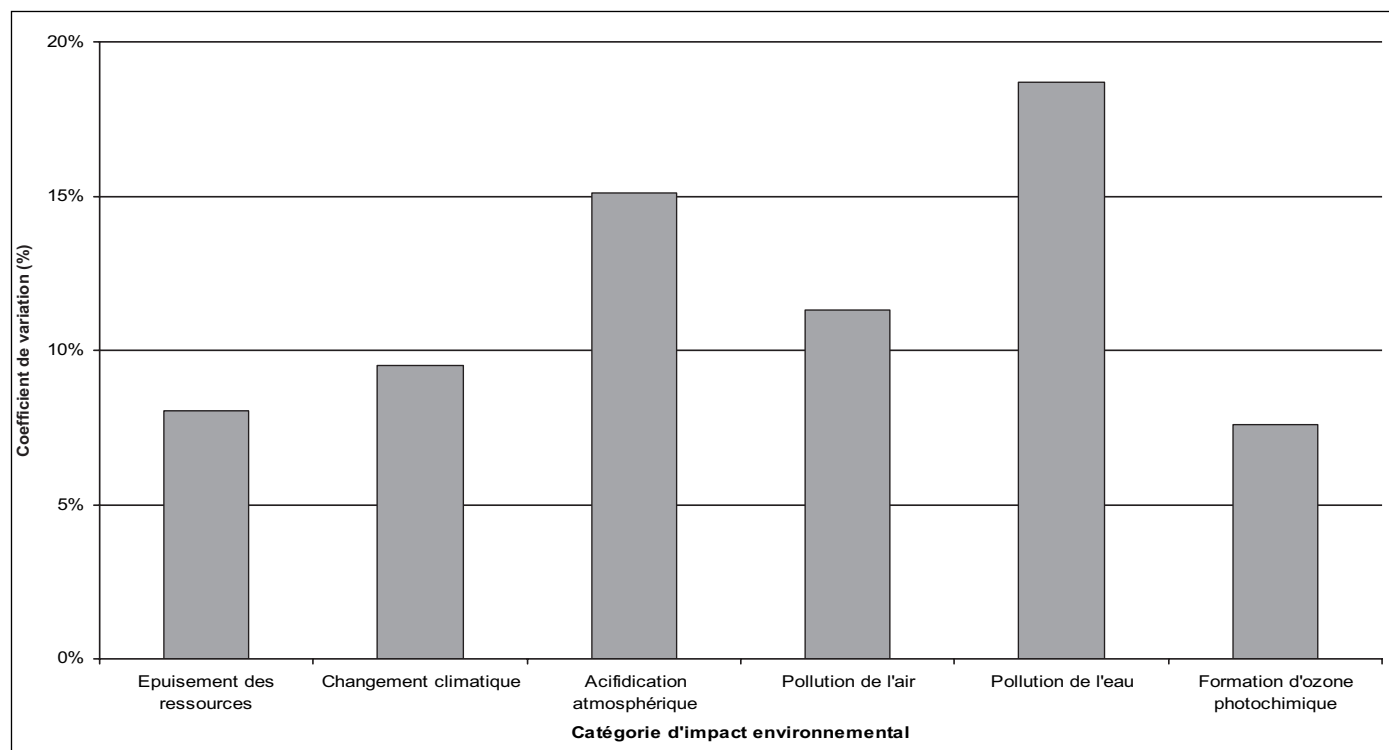


Figure 6 : Coefficients de variations issus de l'ensemble des incertitudes pour différentes catégories d'impact

constitutifs des ouvrages de génie civil et d'une méthodologie visant à qualifier, à travers un indice de confiance, la représentativité et la fiabilité des données proposées. Constitué d'une cinquantaine de représentants des producteurs, des entreprises et des établissements institutionnels, le groupe projette de mettre librement à la disposition des professionnels une première version de la base de données environnementales au premier semestre 2011.

Dans un premier temps, les travaux ont mis l'accent sur les matériaux dont le poids environnemental est particulièrement important et pour lesquels il est essentiel de disposer de données adaptées. Cependant cette base de données se veut complète et évolutive, pour tenir compte des travaux de type ICV (Inventaire de Cycle de Vie) récemment entrepris par les producteurs, ainsi que des mises à jour liées aux évolutions permanentes des technologies, des zones géographiques d'approvisionnement ou encore des règles de certification donnant accès au marché national.

L'ambition de DIOGEN est donc de proposer rapidement un accès libre à des données environnementales fiables qui permettront aux bureaux d'études de réaliser des calculs rigoureux et justes, et aux décideurs que sont les Maîtres d'Ouvrages d'opérer des choix éclairés à partir de variantes correctement évaluées.

REMERCIEMENTS

Les Auteurs souhaitent remercier David Arribé, Ludovic Espinasse et Thibaut Dehove, étudiants à l'Ecole des Ponts Paris Tech et leur encadrant R. Leroy qui ont participé à

l'étude de sensibilité. Eric DOUCE et Florent MONNIN de l'entreprise SNCTP qui ont conduit le chantier sont également grandement remerciés pour leur disponibilité lors de la récolte des données de terrain et leur aide précieuse lors de l'établissement des hypothèses de consommation et d'amortissement des engins.

RÉFÉRENCES

- AFNOR, French standardisation Agency. Environmental quality of construction products - Environmental and health declaration of construction products. AFNOR; 2004. 47pp.
- Arribé D., Espinasse L., Dehove T. Etude de sensibilité d'une ACV d'un pont. Projet de fin d'étude, ENPC, 2010.
- Cimbéton, ACV d'un pont en béton, collection technique cimbéton, T87, 2010.
- Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A. 2008. Développement d'une méthodologie pour évaluer l'impact environnemental du béton. Annales du BTP, 4, 17-21.
- Chen C., Habert G., Bouzidi Y., Jullien A. 2010. Environmental impact of cement production: Detail of the different processes and cement plant variability evaluation. Journal of Cleaner Production, 18, 478-485.
- International Standardisation Organisation (ISO) (2006) Environmental management-life cycle assessment-principles and framework; ISO 14040; 2006.