

Solutions béton

L'ACV, une analyse multicritère et multiétape pour évaluer les impacts environnementaux d'un ouvrage	P. 2
Les impacts environnementaux	P. 3
Le Cycle de Vie de l'ouvrage	P. 4
Présentation des solutions comparées	P. 5
Schémas des ouvrages étudiés	R. 2
Analyse et synthèse de l'ACV comparative	P. 8



Analyse du Cycle de Vie comparative de ponts

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode normalisée, quantitative, multiétape et multicritère qui permet de quantifier les impacts environnementaux et d'apprécier la qualité environnementale d'un ouvrage sur la totalité de son Cycle de Vie. La démarche a été appliquée au cas concret d'un pont courant en béton (Passage Supérieur en Dalle Précontrainte) représentatif du patrimoine des ouvrages d'art routiers et autoroutiers français puis à trois solutions alternatives : ouvrage PRAD, structure mixte Acier/Béton et structure mixte Bois/Béton. L'ACV se révèle être un nouvel outil pertinent au service des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, ingénieurs et architectes pour concevoir, sélectionner et optimiser des solutions constructives respectueuses du principe du développement durable.

Texte : Patrick Guiraud

L'ACV, une analyse multicritère et multiétape pour évaluer les impacts environnementaux d'un ouvrage

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

est la méthodologie de référence la plus complète pour réaliser l'inventaire des flux, quantifier et évaluer les impacts environnementaux d'une structure, d'un ouvrage, d'un produit, d'un service ou d'un procédé durant l'ensemble de son Cycle de Vie. Elle fait l'objet d'une méthode normalisée qui s'appuie en particulier sur la série des normes de management environnemental ISO 14040 et 14044. Elle distingue 4 étapes principales :

- la définition des frontières du système étudié, de l'unité fonctionnelle qui définit l'objet de l'étude et du périmètre précis des informations et données entrant dans le champ de l'étude ;
- la réalisation de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) 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 et donc de recueillir toutes les données utiles à l'analyse ;
- la transformation de cet inventaire sous forme d'indicateurs traduisant les impacts environnementaux potentiels ;

■ l'interprétation des résultats.

L'ACV est multiétape (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 multicritère. Elle intègre les flux qui sont répartis dans les diverses catégories suivantes :

- **consommation de ressources** naturelles et énergétiques, naturelles non énergétiques, eau, énergie et matières récupérées ;
- **émissions** dans l'air, dans l'eau et dans le sol ;
- **production** de déchets valorisés, et de déchets éliminés.

L'analyse du Cycle de Vie d'un ouvrage consiste à collecter, compiler, évaluer et quantifier :

- **les entrants**, matières ou énergies consommés à chacune des étapes du Cycle de Vie de l'ouvrage ;
- **les sortants**, émissions dans l'eau, dans l'air et dans le sol et les déchets produits à chaque étape, puis à déterminer les **impacts environnementaux** générés par cet ouvrage au cours de son Cycle de Vie en intégrant l'ensemble des processus associés à l'extraction des matières

premières, à la fabrication et aux transports des produits et matériaux, à la réalisation de l'ouvrage, son utilisation et sa fin de vie.

Les résultats de l'ACV sont agrégés, traduits et restitués sous forme d'une série d'Indicateurs d'impacts environnementaux associés à une durée d'utilisation donnée de l'ouvrage.

Nota : le format utilisé pour l'ICV, les flux qui contribuent aux indicateurs ainsi que les coefficients de conversion qui leur sont associés et le calcul des Indicateurs Environnementaux respectent dans cette étude les recommandations de la norme NF P 01-010.

Champ de l'étude, unité fonctionnelle et frontière du système

L'ACV appliquée à un ouvrage nécessite la définition précise de :

- la fonction de l'ouvrage ;
- l'unité fonctionnelle qui sert de référence pour les flux entrants et les flux sortants ;
- la durée de vie typique de l'ouvrage (en général identique à la durée d'utilisation du projet et prise égale à 100 ans pour les ponts) ;

■ le système associé à l'ouvrage : la modélisation du système doit intégrer l'ensemble des phases du Cycle de Vie de l'ouvrage ;

- la décomposition de l'ouvrage en sous-systèmes ;
- les limites du système étudié.

Dans cette analyse, l'unité fonctionnelle de référence est un pont en béton de type Passage Supérieur en Dalle Précontrainte (unité de produit) qui assure le franchissement d'une autoroute par des véhicules (unité de fonction), pendant une durée d'utilisation de 100 ans (unité de temps).

Nota : le PSDP est un pont courant particulièrement représentatif du patrimoine des ouvrages d'art routiers et autoroutiers français.

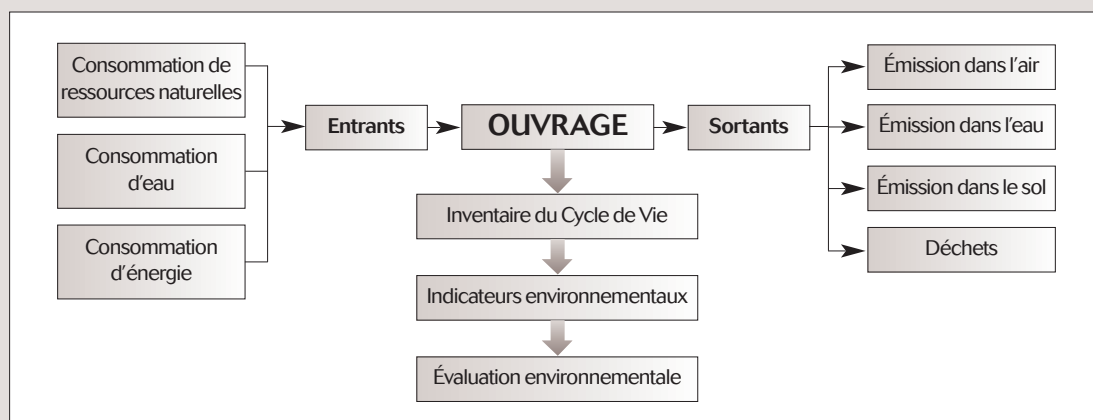
L'analyse ne prend pas en compte les impacts du trafic circulant sur l'ouvrage pendant sa phase de service.

Règles de coupure et amortissement

Il est possible d'appliquer une règle de coupure sur les flux afin de ne pas prendre en compte les flux peu significatifs. La norme NF P 01-010 propose une règle de coupure massive dont le seuil est fixé à 98 %.

Un calcul de l'amortissement permet d'imputer ou non l'impact de la production des engins de chantier. L'amortissement correspond en % au rapport entre la durée d'immobilisation et d'utilisation de l'engin pendant toutes les phases du chantier et sa durée de vie estimée. Si l'amortissement est inférieur à 5 %, l'impact est négligé, s'il est supérieur à 5 %, les impacts liés à la fabrication des engins sont affectés au prorata de cette valeur d'amortissement. ■

Synoptique de l'évaluation de la qualité environnementale d'un ouvrage selon une analyse du Cycle de Vie



Les impacts environnementaux

La norme NF P 01-010 considère 10 impacts environnementaux qui permettent d'évaluer la contribution environnementale des produits de construction tout au long de leur Cycle de Vie.

Ces impacts environnementaux ont été choisis pour traduire la qualité environnementale du pont car ils font l'objet d'un large consensus parmi les experts en environnement (à l'exclusion de l'impact « destruction de la couche d'ozone stratosphérique » dont la détermination est délicate et la représentativité non validée).

Nota : ces impacts ne peuvent pas être comparés car il n'existe pas de méthode permettant de les hiérarchiser. Il n'est pas non plus possible de leur attribuer une pondération dans l'estimation d'une évaluation globale environnementale d'un ouvrage.

DÉFINITION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

■ L'indicateur « **consommation de ressources énergétiques** » représente la somme de toutes les sources d'énergies qui sont directement puisées dans les ressources naturelles.

L'énergie primaire totale représente la somme des sources d'énergie telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse et l'énergie hydraulique. Elle se décompose en énergie renouvelable et en énergie non renouvelable ou en énergie combustible et énergie matière.

L'énergie non renouvelable inclut toutes les sources d'énergies primaires fossiles et minérales (pétrole, gaz naturel, charbon...). Ressources limitées ne pouvant être renouvelées à l'échelle de temps humaine.

L'énergie renouvelable comprend toutes les autres sources d'énergies primaires (énergie hydraulique et biomasse). Ressources renouvelées ou régénérées naturellement à une

vitesse supérieure à la vitesse d'épuisement de cette ressource.

■ L'**épuisement des ressources** intègre les consommations de ressources naturelles (sauf l'eau). À chaque ressource est affecté un coefficient de pondération qui est fonction de sa rareté. L'antimoine a par convention un coefficient de rareté égal à 1. Une ressource qui a une valeur supérieure à 1 est une ressource plus rare que l'antimoine. Une ressource dont le coefficient de pondération est très faible est considérée comme non épuisable à l'échelle humaine.

■ L'indicateur « **consommation d'eau totale** » correspond aux prélèvements d'eau (toutes sources confondues) dans le milieu naturel.

■ La production de **déchets solides** est regroupée en : déchets valorisés et en 4 types de déchets éliminés.

■ Le **changement climatique** traduit la conséquence climatique des émissions humaines atmosphériques des Gaz dits à Effet de Serre (tels que le CO₂ et le méthane). Cet indicateur permet de quantifier la contribution de l'ouvrage à l'augmentation de la teneur en GES dans l'atmosphère.

■ Des gaz tels que le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azotes (NO_x) peuvent s'oxyder et se transformer en acides (acide sulfurique, acide nitrique). Ils se transforment en pluies acides, puis se retrouvent dans les eaux de ruissellement ou les eaux de surface. Ils ont un impact important sur la faune et la flore. Cet effet se traduit par l'indicateur « **acidification atmosphérique** ».

■ Les indicateurs « **pollution de l'air et pollution de l'eau** » permettent de quantifier les impacts (toxiques et écotoxiques) de l'ouvrage respectivement sur la qualité de l'air et la qualité de l'eau.

■ L'ozone forme dans la stratosphère (10 à 15 km d'altitude) une couche de filtrage des rayons ultraviolets dangereux. Les gaz de type CFC

(chlorofluorocarbure) réagissent à haute altitude avec l'ozone. L'indicateur « **destruction de la couche d'ozone stratosphérique** » est calculé en agrégeant les émissions dans l'air des composés susceptibles de réagir avec l'ozone, il permet de quantifier la contribution du produit à cette destruction.

■ L'indicateur « **formation d'ozone photochimique** » permet de quantifier la contribution des émissions dans l'air de composés susceptibles de former de l'ozone et donc de polluer la qualité de l'air. La molécule de référence pour ce phénomène est l'éthylène (C₂H₂).

MÉTHODES DE CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Différents types de méthodes sont utilisées (dans le cadre de la norme NF P 01-010) pour le calcul des impacts environnementaux, notamment la méthode des équivalences et celle du volume critique.

La méthode des équivalences s'applique aux indicateurs suivants :

- changement climatique ;
- épuisement des ressources naturelles ;
- acidification atmosphérique ;

■ formation d'ozone photochimique ; La méthode du volume critique est utilisée pour les indicateurs :

■ pollution de l'air et 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 équivalent CO₂) spécifique à chaque gaz à effet de serre. L'indicateur de changement climatique correspond à la somme des résultats convertis.

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).

Chaque émission est divisée par un coefficient de conversion. L'indicateur correspond à la somme des volumes d'air ou d'eau fictifs. ■

Impacts environnementaux et unités associées

IMPACT ENVIRONNEMENTAL	UNITÉ
Consommation de ressources énergétiques	
– Énergie primaire totale	
– Énergie renouvelable	MJ
– Énergie non renouvelable	
Épuisement de ressources	kg équivalent antimoine
Consommation d'eau totale	Litre
Déchets solides	
Déchets valorisés total,	
Déchets éliminés :	
• Déchets dangereux, • Déchets inertes,	kg
• Déchets non dangereux, • Déchets radioactifs	
Changement climatique	kg équivalent CO ₂
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂
Pollution de l'air	m ³
Pollution de l'eau	m ³
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC équivalent
Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène

Le Cycle de Vie de l'ouvrage

La démarche globale de l'Analyse du Cycle de Vie intègre la durée de vie complète de l'ouvrage en décomposant son cycle de vie en 5 grandes étapes (voir schéma ci-dessous).

ÉTAPE 1 – FABRICATION DES MATÉRIAUX, MATÉRIELS ET ENGIN DE CHANTIER

Cette étape comprend l'extraction des matières premières (tel que le calcaire et l'argile pour la fabrication du ciment), la fabrication, la transformation, le montage ou l'assemblage des matériaux. Elles incluent tous les transports nécessaires en amont pour livrer les divers constituants ou composants des matériaux, matériels et engins de leurs sites initiaux jusqu'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.

On distingue :

- les matériaux structurants : bétons, armatures de précontrainte, armatures passives, poutres en acier ou en bois... ;
- les équipements de l'ouvrage : étanchéité, couche de roulement,

joint de chaussé, appareils d'appuis, dispositifs de retenue... ;

- les matériaux nécessaires à la réalisation de l'ouvrage : coffrages, étaielements, huiles de décoffrage... ;
- les matériels et engins de chantier utilisés pour la réalisation de l'ouvrage.

ÉTAPE 2 – TRANSPORT DES MATÉRIAUX, MATÉRIELS ET ENGIN 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 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 des entreprises jusqu'au chantier.

La collecte des données différencie pour chaque type de matériaux, matériels et engins, les véhicules

spécifiques nécessaires à leur transport (camion toupie, camion benne, semi-remorque, camion pour transport de palettes) et les natures de livraison (livraison complète, livraison partielle...).

Elle prend en compte en particulier la production et la combustion du gazole consommé par les transports et les distances parcourues (en charge et à vide).

ÉTAPE 3 – RÉALISATION DE L'OUVRAGE

La 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. Elle 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 et 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 leur entreprise ;
- les consommations en carburant et énergie de l'ensemble des matériels et engins utilisés sur le chantier (groupe électrogène, pompe à béton, grue mobile...).

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.

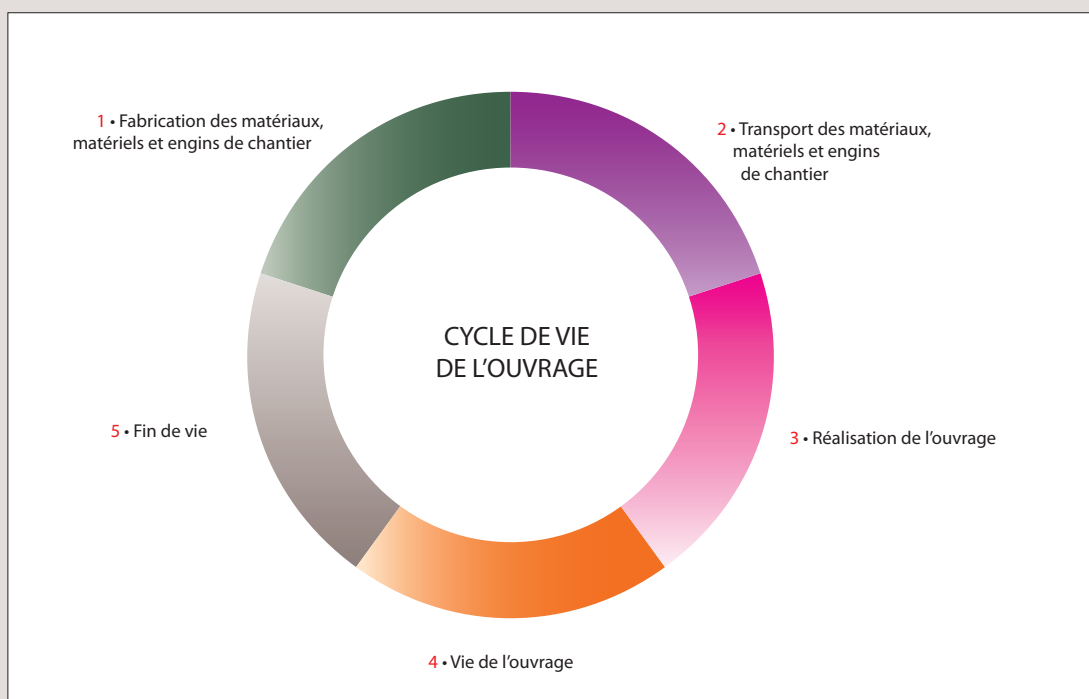
Les impacts pris en compte dans l'analyse sont relatifs :

- aux consommations en gazole utilisé par les divers intervenants pour se rendre sur le chantier ;
- aux consommations en fioul des divers matériels lors des interventions ;
- à la fabrication des diverses fournitures, produits et matériaux et à leur livraison sur le site.

ÉTAPE 5 – FIN DE VIE

Cette étape couvre la déconstruction de l'ouvrage en fin de vie (durée d'utilisation de l'ouvrage prise égale à 100 ans), le transport des matériaux dans un centre de valorisation, et leur stockage. ■

Les 5 étapes du Cycle de Vie d'un ouvrage



Présentation des solutions comparées

L'ouvrage de référence 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).

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE L'OUVRAGE DE RÉFÉRENCE

L'ouvrage de référence (Passage Supérieur en Dalle Précontrainte : PSDP), qui comporte un unique tablier, possède deux travées de 25 m de portée, pour une longueur totale de 51,53 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, coiffées par une semelle de 4 m de largeur et de 0,90 m d'épaisseur.

La pile intermédiaire est constituée d'un voile unique en béton armé de forme trapézoïdale (largeur d'environ 4,50 m en pied et 6 m en tête). Elle est fondée par l'intermédiaire de trois barrettes de section 5 m x 0,80 m et de 2,10 m de profondeur, surmontées d'une semelle de 4 m de largeur pour 6,40 m de longueur et 0,80 m d'épaisseur.

Le tablier repose sur ses appuis par l'intermédiaire de lignes de deux appareils d'appui en caoutchouc fretté. Il est équipé à ses extrémités de joints de chaussée à hiatus de soufflé 50 mm.

Le profil en travers de 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 coulé sur cintre est constitué d'une dalle nervurée de hauteur constante 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.

Le tablier est précontraint au moyen de 19 câbles de type 12 T 15,7 (Super), torons TBR de classe 1860 MPa.

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES TROIS SOLUTIONS ALTERNATIVES

Les trois variantes ont été dimensionnées en conservant les exigences géométriques (longueur, largeur, gabarit...) et fonctionnelles (profil en travers, équipements, trafic...) de l'ouvrage de référence.

Chaque tablier a fait l'objet d'un dimensionnement précis. Les appuis (piles et culées) tout en conservant des dimensions et formes analogues ont été adaptés aux efforts spécifiques générés par chaque solution.

Les adaptations se traduisent par des variations des volumes et des quantités d'armatures. Les équipements sont conservés en totalité pour toutes les solutions.

Les moyens humains, les matériels et engins et les délais nécessaires à la réalisation de chaque solution ont été déterminés en adaptant ceux de la solution de référence. La réalisation de chaque tablier nécessite un personnel spécifique pris en compte en substitution du personnel prévu dans la solution de référence.

Des scénarios d'entretien et de maintenance des 3 solutions alternatives ont été mis au point à partir d'une logique et d'une politique de surveillance et d'intervention analogue à la solution de référence.

Les scénarios de fin de vie sont identiques pour toutes les solutions mais intègrent des quantités différentes de matériaux à transporter dans un site de valorisation.

Solution à poutres PRAD

Le tablier PRAD (Poutres Précontraintes par Adhérence) est constitué de deux travées de 25 m de portée entraxe d'appui. Chaque travée est constituée de 11 poutres précontraintes par fils adhérents (torons 15T 15.7

classe 1860) de section en I (50 x 95) à blochet. Les poutres sont fabriquées dans l'usine de préfabrication la plus proche du chantier et livrées par camion.

Sur chantier, les poutres sont posées à l'aide d'une grue mobile, sur appuis provisoires.

Les poutres sont ensuite solidarisées par un hourdis en béton coulé en place (sur des coffrages perdus non participants) et reliées entre elles par des entretoises au niveau des appuis.

Solution mixte Acier/Béton

La solution mixte Acier/Béton est un bipoutre Acier/Béton, dont le tablier est constitué de deux poutres acier (PRS) associées à des entretoises et connectées à une dalle en béton armé. La connexion est assurée par des goujons soudés sur la semelle supérieure des poutres.

Les poutres sont en acier de nuance S 355 et S 355 N, les entretoises sont des profilés laminés. Les poutres sont fabriquées dans l'usine la plus proche du chantier par tronçon de 18 m et livrées sur chantier par camion.

Sur le site, la charpente entièrement assemblée au sol (poutres et entretoises) est mise en place au moyen de grues automotrices.

La dalle béton est réalisée par bétonnage en place et armée à un taux d'armatures de 230 kg/m².

Elle a une largeur totale de 9,60 m et une épaisseur de 25 cm au milieu et 30 cm sur les poutres. Pour les encorbellements l'épaisseur est variable de 30 à 25 cm en rive. Les poutres ont un écartement transversalement de 6 m avec des encorbellements de 1,80 m. Elles ont une hauteur constante de 1,15 m. Elles sont reliées transversalement par des entretoises (IPE 600) sur les culées et la pile et tous les 6,50 m en travée.

Les poutres ont une semelle supérieure et inférieure de largeur respective 700 et 900 mm. Leur épaisseur est variable avec un minimum de 20 mm et un maximum de 50 mm sur la pile. L'âme a une épaisseur de 15 mm.

La dalle est coulée suivant un passage classique de pianotage en 5 plots en commençant par les culées et se terminant par le dernier plot sur pile à l'aide d'un outil coffrant.

Solution mixte Bois/Béton

Le tablier du pont mixte Bois/Béton est constitué de poutres en bois lamellé collé sur lesquelles est connectée une dalle en béton armé grâce à des connecteurs métalliques. Le tablier est composé de deux travées isostatiques de 25 m de longueur.

La dalle en béton armé d'épaisseur moyenne 16 cm est constituée de prédalles de 8 cm préfabriquées, reposant sur la charpente en bois et faisant office de coffrage perdu, associées à un béton de seconde phase, coulé en place et enrobant les connections métalliques

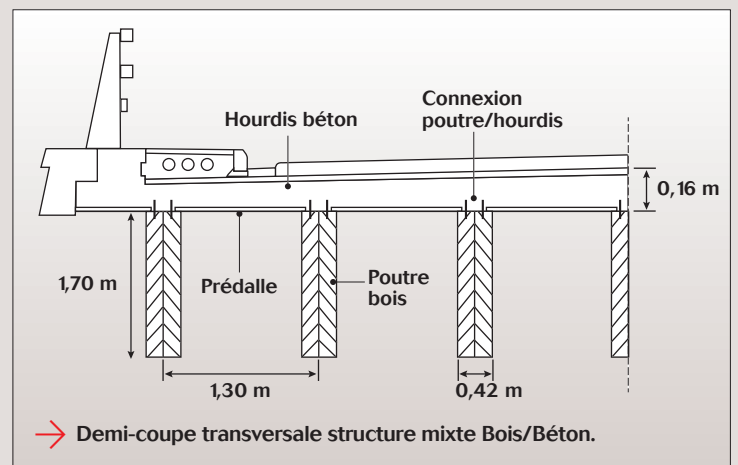
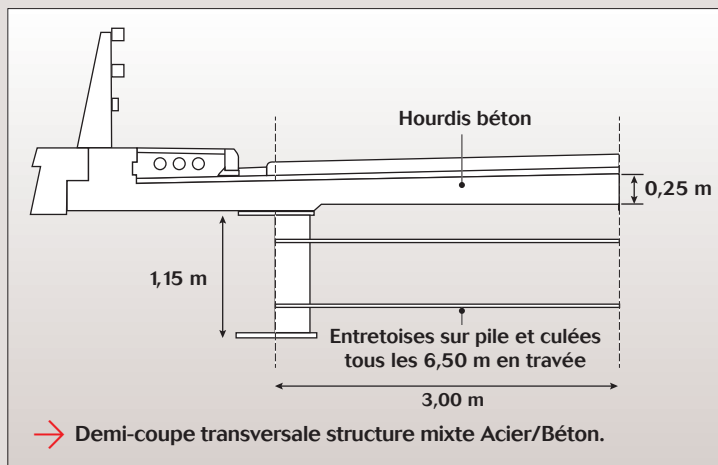
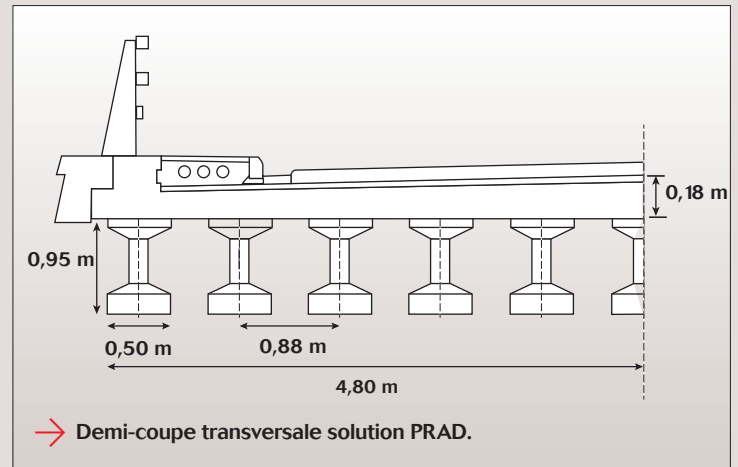
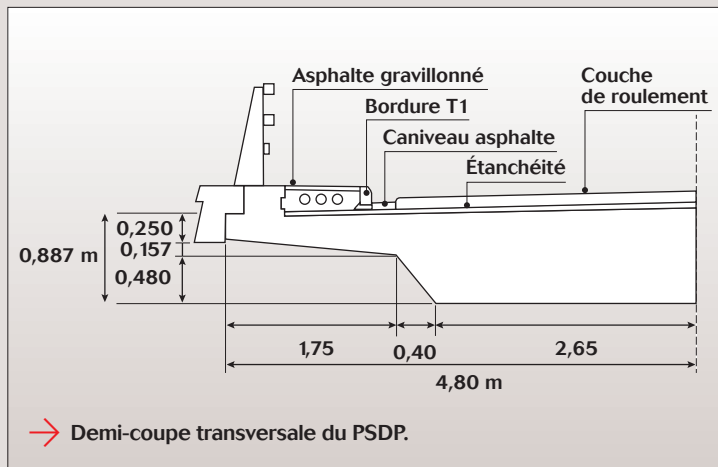
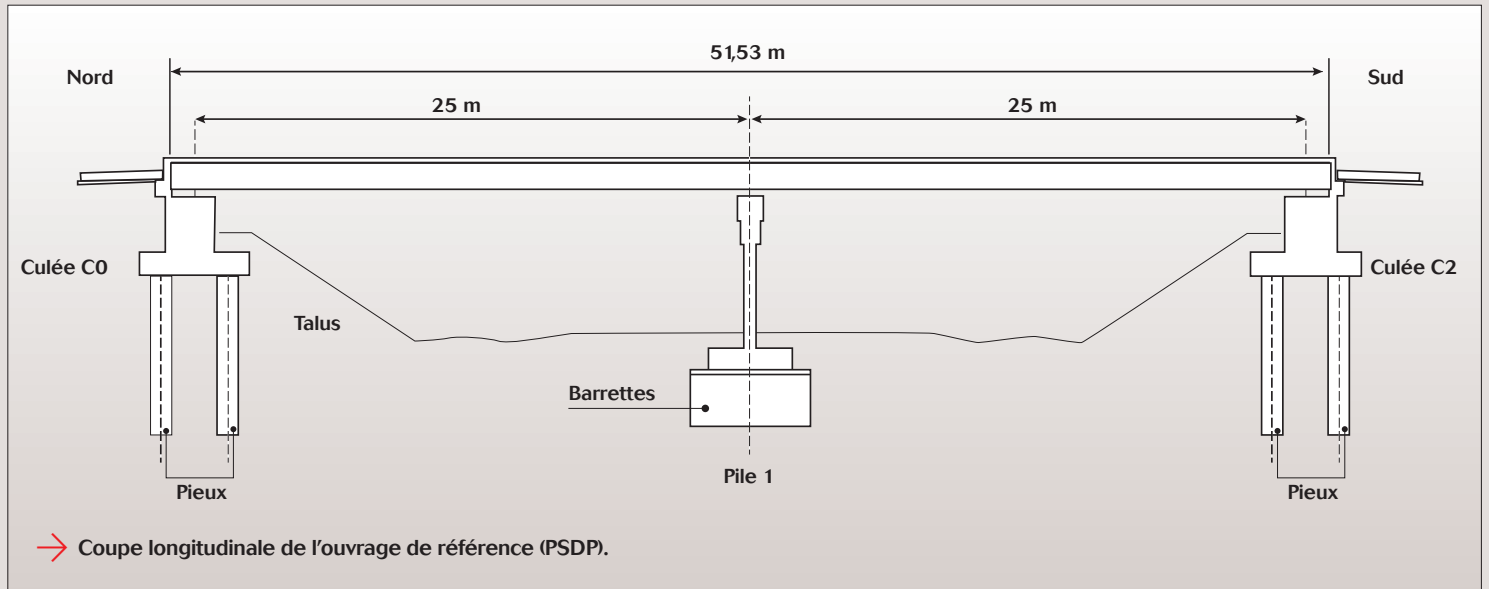
Les sept poutres en bois lamellé collé de classe GL 28 et de classe d'emploi 3, espacées de 1,3 m sont disposées symétriquement par rapport à l'axe longitudinal du tablier. La poutre de rive est positionnée à 0,9 m de la rive de manière à lui assurer un environnement hydrique sain avec une protection des pluies les plus fréquentes. Une protection par lasure est appliquée sur le bois. Les poutres ont une hauteur constante de 1,70 m et une largeur de 0,42 m (2 x 0,21).

Les poutres en bois sont préalablement fabriquées en usine. Elles sont transportées par camion jusqu'au chantier. Leur mise en place est effectuée, travée par travée, au moyen d'une grue équipée d'un palonnier. ■

PRINCIPALES QUANTITÉS

ÉTAPE	DÉSIGNATION	UNITÉS	PSDP	PRAD	MIXTE ACIER/BÉTON	MIXTE BOIS/BÉTON
Étape 1 MATÉRIAUX STRUCTURANTS	Béton Fondation semelles et culées	m ³	258	258	248	180
	Béton Piles	m ³	63	63	60	61
	Béton Tablier	m ³	365	115	145	92
	Armatures passives	kg	60 209	63 002	57 950	40 060
	Armatures de précontrainte	kg	14 165	9 404	-	-
	Béton poutres PRAD	m ³	-	167	-	-
	Acier pour poutres	t	-	-	70	-
	Bois pour poutres	m ³	-	-	-	250
	TOTAL BÉTON	m³	686	603	453	333
Étape 1 ÉQUIPEMENTS	Corniches préfabriquées	ml	97	97	97	97
	Appareil d'appui en élastomère fretté	dm ³	109	110	109	170
	BN 4	ml	136	136	136	136
	Joints de chaussées	ml	14	14	14	14
	Chape d'étanchéité	m ²	487	487	487	487
	Asphalte gravillonné	t	27	27	27	27
	Couche de roulement BBSG	t	60	60	60	60
	Asphalte sur trottoirs	t	8	8	8	8
	Bordures béton T1	ml	103	103	103	103
	Dalles béton pour perrés	m ²	144	144	144	144
Étape 1 MATÉRIAUX DIVERS	Primaire d'étanchéité	kg	50	50	50	50
	Tube d'auscultation	ml	260	260	260	260
	Peinture acier – Peinture bois	kg	-	-	666	170
	Coffrage bois	m ³	7	12,8	7	7
	Remblais d'apport	m ³	530	780	630	720
Étape 2 TRANSPORT	Transport béton BPE	l de gazole	3 196	2 244	2 320	1 845
	Transport poutres/PRAD/Acier/Bois	l de gazole	-	2 770	570	250
	Transport autres matériaux structurants	l de gazole	1 621	380	380	280
	Transport équipements	l de gazole	1 532	1 532	1 532	1 532
	Transport matériaux nécessaires à la construction de l'ouvrage	l de gazole	945	1 325	1 095	1 215
	Transport matériel et engins de chantier	l de gazole	1 855	1 855	1 855	1 855
	TOTAL TRANSPORT	l de gazole	9 149	9 161	7 832	6 223
Étape 3 RÉALISATION DE L'OUVRAGE	Consommation d'eau	m ³	30	26,5	26,5	26,5
	Consommation d'électricité	kW	10 000	8 846	8 846	8 846
	Consommation de gazole	l de gazole	200	177	177	177
	Moyens humains	l de gazole	7 384	6 834	6 834	6 834
	Matériels et engins de chantiers	l de fioul	23 000	21 070	21 070	21 070
Étape 4 ENTRETIEN ET MAINTENANCE	Moyens humains	l de gazole	1 065	1 200	1 320	1 200
	Matériels et engins de chantiers	l de fioul	32 850	29 460	29 460	29 460
	Couche de roulement BBSG	t	490	490	490	490
	Asphalte	t	76	76	76	76
	Mortier de réparation	t	16	12	12	12
	BN4	ml	104	104	104	104
	Poutre PRAD	m ³	-	8	-	-
	Poutre acier	t	-	-	4,4	-
	Poutre bois	m ³	-	-	-	18
Peinture et lasure	kg	-	-	900	250	
Étape 5 FIN DE VIE	Déconstruction de l'ouvrage	l de fioul	4 000	4 000	4 500	3 500
	Transport des matériaux de démolition	l de gazole	2 200	1 900	3 160	1 790
	Concassage du béton	l de fioul	3 000	2 600	2 260	2 250

Schémas des ouvrages étudiés



IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX : VALEURS POUR CHAQUE ÉTAPE DU CYCLE DE VIE ET SYNTHÈSE GÉNÉRALE

	CONSOMMATION DE RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES	ÉPUISEMENT DES RESSOURCES	CONSOMMATION D'EAU	DÉCHETS SOLIDES	CHANGEMENT CLIMATIQUE	ACIDIFICATION ATMOSPHÉRIQUE	POLLUTION DE L'AIR	POLLUTION DE L'EAU	FORMATION D'OZONE PHOTOCHIMIQUE
	1 000 MJ	kg équivalent antimoine	1 000 litres	1 000 kg	1 000 kg équivalent CO ₂	kg équivalent SO ₂	1 000 m ³	1 000 m ³	kg équivalent éthylène
ÉTAPE 1 – Fabrication des matériaux, matériels, et engins de chantier									
PSDP BPE	3 306	1 542	2 220	105	381	1 317	27 000	99	79
PRAD	3 595	1 536	2 235	98	364	1 282	28 335	112	76
Acier/Béton	4 103	3 656	3 429	207	468	2 370	48 100	917	250
Bois/Béton	6 825	1 412	1 718	305	228	1 422	28 150	158	120
ÉTAPE 2 – Transport des matériaux, matériels, et engins de chantier									
Béton BPS	354	168	34	< 1	28	230	2 856	36	37
PRAD	391	185	37	< 1	31	254	3 155	40	40
Acier/Béton	301	142	28	< 1	24	195	2 420	30	31
Bois/Béton	267	128	26	< 1	22	175	2 178	27	28
ÉTAPE 3 – Réalisation de l'ouvrage									
PSDP BPE	1 346	592	165	< 1	95	326	3 103	127	30
PRAD	1 232	544	125	< 1	88	300	2 861	117	28
Acier/Béton	1 232	544	150	< 1	88	300	2 861	117	28
Bois/Béton	1 232	544	150	< 1	88	300	2 861	117	28
ÉTAPE 4 – Vie de l'ouvrage									
PSDP BPE	3 534	1 625	540	46	156	558	8 365	187	12
PRAD	3 417	1 565	542	46	147	548	8 413	174	13
Acier/Béton	3 547	1 627	577	67	154	572	9 463	184	16
Bois/Béton	3 709	1 590	553	56	145	582	7 724	262	17
ÉTAPE 5 – Fin de vie									
PSDP BPE	372	176	34	< 1	28	95	896	38	9
PRAD	344	163	32	< 1	26	85	791	35	8
Acier/Béton	398	189	37	< 1	31	118	1 189	41	13
Bois/Béton	305	144	28	< 1	23	78	731	31	7
SYNTHÈSE GÉNÉRALE									
PSDP BPE	8 913	4 103	2 999	151	689	2 527	42 223	486	167
PRAD	8 979	3 992	2 971	145	657	2 469	43 555	478	166
Acier/Béton	9 581	6 157	4 221	275	764	3 555	64 039	1 288	339
Bois/Béton	12 338	3 818	2 474	361	505	2 557	41 644	596	200

Sources de données

Les données environnementales utilisées dans cette ACV comparative sont issues en particulier de :

- la base de données DIOGEN de l'Association Française de Génie Civil : AFGC ;
- bases de données publiques (FDES répertoriées dans la base INIES) ;
- bases de données internationales accessibles *via* Internet.

Certaines données ont été aussi collectées auprès des organismes tels que, l'ATILH pour le ciment, le SNBPE pour le béton, l'UNPG pour les granulats.

Partenaires et experts associés à l'étude

Cette analyse du cycle comparative a été réalisée dans le cadre d'un partenariat associant Cimbéton et Egis Structures & Environnement.

Les différentes solutions étudiées ont été dimensionnées par des spécialistes pour chaque type de structure (PRAD, mixte Acier/Béton, mixte Bois/Béton).

L'étude a été supervisée par des experts du réseau de l'Équipement.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX : DÉCOMPOSITION DES ÉTAPES EN POURCENTAGE

	CONSUMMATION DE RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES	ÉPUISEMENT DES RESSOURCES	CONSUMMATION D'EAU	DÉCHETS SOLIDES	CHANGEMENT CLIMATIQUE	ACIDIFICATION ATMOSPHÉRIQUE	POLLUTION DE L'AIR	POLLUTION DE L'EAU	FORMATION D'OZONE PHOTOCHIMIQUE
	1 000 MJ	kg équivalent antimoine	1 000 litres	1 000 kg	1 000 kg équivalent CO ₂	kg équivalent SO ₂	1 000 m ³	1 000 m ³	kg équivalent éthylène
PSDP BPE									
Total	8 913	4 103	2 999	151	689	2 527	42 220	486	167
Étape 1	37	38	74	69	55	52	64	20	47
Étape 2	4	4	1	<1	4	9	7	7	22
Étape 3	15	14	6	<1	14	13	7	26	18
Étape 4	40	40	18	31	23	22	20	38	7
Étape 5	4	4	1	<1	4	4	2	8	5
PRAD									
Total	8 979	3 992	2 971	145	657	2 469	43 560	478	166
Étape 1	40	38	75	68	55	52	65	23	46
Étape 2	4	5	1	<1	5	10	7	8	24
Étape 3	14	14	4	<1	13	12	7	25	17
Étape 4	38	39	18	32	22	22	19	36	8
Étape 5	4	4	1	<1	4	3	2	7	5
MIXTE ACIER/BÉTON									
Total	9 581	6 157	4 221	275	764	3 555	64 040	1 288	339
Étape 1	43	59	81	75	61	67	75	71	74
Étape 2	3	2	1	<1	3	5	4	2	9
Étape 3	13	9	4	<1	12	8	5	9	8
Étape 4	37	26	14	24	20	16	15	14	5
Étape 5	4	3	1	<1	4	3	2	3	4
MIXTE BOIS/BÉTON									
Total	12 338	3 818	2 474	360	505	2 557	41 640	596	200
Étape 1	55	37	69	84	45	56	68	27	60
Étape 2	2	3	1	<1	4	7	5	5	14
Étape 3	10	14	6	<1	17	12	7	20	14
Étape 4	30	42	22	15	29	23	19	44	9
Étape 5	2	4	1	<1	5	3	2	5	4

ANALYSE DE SENSIBILITÉ : résultats (en pourcentage) induits par la variation du paramètre par rapport à la valeur totale

IMPACT ENVIRONNEMENTAL	PSDP BPE				PRAD				ACIER/BÉTON					BOIS/BÉTON			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Consommation de ressources énergétiques	0	-5	1	-20	-4	2	-1	-19	-2	-2	-1	1	-19	-2	1	1	-15
Épuisement des ressources	0	-5	1	-20	-4	2	-1	-20	-3	-6	0	1	-13	-3	1	2	-21
Consommation d'eau	-5	-1	0	-9	-1	0	0	-9	-1	-5	0	0	-7	-1	0	1	-11
Déchets solides	-5	-1	0	-15	-1	0	0	-16	-1	-6	0	0	-12	0	0	0	-8
Changement climatique	-1	-14	1	-11	-10	2	-1	-11	-10	-4	-1	1	-10	-10	1	2	-14
Acidification atmosphérique	-1	-11	2	-11	-8	4	-2	-11	-6	-6	-1	2	-8	-6	2	3	-11
Pollution de l'air	-1	-9	2	-10	-7	3	-1	-10	-6	-6	-1	1	-7	-5	2	3	-9
Pollution de l'eau	-1	-1	2	-19	-1	3	-2	-18	0	-9	0	1	-7	-1	1	2	-22
Formation d'ozone photochimique	-4	-7	6	-4	-8	9	-4	-4	-3	-8	-2	3	-3	-3	4	7	-4

Analyse et synthèse de l'ACV comparative

RÉPARTITION DES IMPACTS PAR ÉTAPE

Le tableau « Impacts Environnementaux : décomposition des étapes en pourcentage » donne pour chaque impact, pour les 4 solutions étudiées, la répartition en pourcentage des différentes étapes du Cycle de Vie par rapport à la valeur globale de l'impact. L'analyse des résultats permet de mettre en évidence la part déterminante de 2 étapes du Cycle de Vie quel que soit le type d'ouvrage et pour tous les impacts.

Étape 1 – Fabrication des matériaux, matériels et engins de chantier : pour cette étape, la production des matières premières (ciments, acier...) est la plus impactante.

Étape 4 – Vie de l'ouvrage : les enrobés bitumineux constituant la couche de roulement ont une contribution significative dans le bilan global, compte tenu des scénarios d'entretien retenus.

Le classement global des étapes pour les 4 ouvrages est le suivant :

- Étape 1 – Fabrication ;
- Étape 4 – Vie de l'ouvrage ;
- Étape 3 – Réalisation de l'ouvrage ;
- Étape 2 – Transport ;
- Étape 5 – Fin de vie.

COMPARAISON DES 4 OUVRAGES ÉTUDIÉS

Les valeurs des impacts environnementaux pour les 5 étapes du Cycle de Vie et le total du Cycle de Vie pour les 4 ouvrages étudiés sont synthétisées dans le tableau intitulé « Impacts environnementaux : valeurs pour chaque étape et synthèse générale ».

■ Aucun type d'ouvrage se distingue par des valeurs d'impacts toutes plus faibles ou toutes plus élevées que les autres solutions.

■ Chaque solution obtient pour quelques impacts des valeurs plus faibles que les autres solutions.

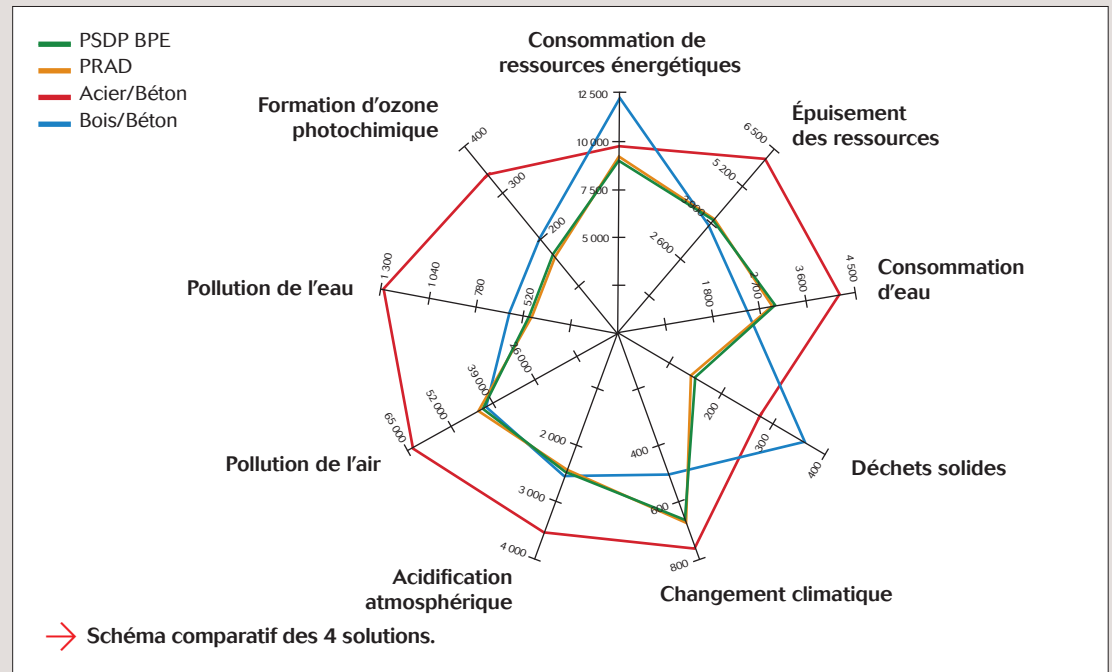
- Une analyse intégrant la globalité des résultats aboutit au classement suivant des 4 solutions alternatives :
 - PSDP BPE ;
 - PRAD ;
 - Mixte Bois/Béton ;
 - Mixte Acier/Béton.

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'évaluer l'incidence de paramètres clés sur les valeurs des impacts pour les 4 solutions étudiées et pour les diverses étapes du Cycle de Vie.

- **PSDP PBE :** béton du tablier BHP 80 MPa au lieu de 40 MPa (résultats en % induits par la variation du paramètre par rapport à la valeur totale ; *colonne 1*) – Tous les ciments remplacés par du CEM III A (2) – Distance de transport du béton BPE 50 km au lieu de 29 km (3) – Scénario d'entretien divisé par 2 (4) ;
- **PRAD :** tous les ciments des bétons BPE remplacés par du CEM III A (5) – Distance de transport des poutres 800 km au lieu de 400 km (6) et 200 km au lieu de 400 km (7) – Scénario d'entretien divisé par 2 (8) ;

- **mixte Acier/Béton :** tous les ciments des bétons BPE remplacés par du CEM III A (9) – Poutres en acier à haute limite élastique (10) – Distance de transport des poutres 200 km au lieu de 800 km (11) et 1600 km au lieu de 800 km (12) – Scénario d'entretien divisé par 2 (13) ;
- **mixte Bois/Béton :** tous les ciments des bétons BPE remplacés par du CEM III A (14) – Distance de transport des poutres 500 km au lieu de 100 km (15) et 1 000 km au lieu de 100 km (16) – Scénario d'entretien divisé par 2 (17). ■



RATIO CLÉ

Le tableau ci-dessous donne la valeur de chaque impact pour les 4 ouvrages étudiés en fonction du mètre carré de surface totale du tablier (500 m²).

IMPACT ENVIRONNEMENTAL	UNITÉS	PSDP BPE	PRAD	ACIER/BÉTON	BOIS/BÉTON
Consommation de ressources énergétiques	1 000 MJ	17,8	18,0	19,2	24,7
Épuisement des ressources	kg équivalent antimoine	8,2	8,0	12,3	7,6
Consommation d'eau	1 000 litres	6,0	5,9	8,4	5,0
Déchets solides	1 000 kg	0,3	0,3	0,6	0,7
Changement climatique	1 000 kg équivalent CO ₂	1,4	1,3	1,5	1,0
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂	5,1	4,9	7,1	5,1
Pollution de l'air	1 000 m ³	84	87	128	83
Pollution de l'eau	1 000 m ³	1,0	1,0	2,5	1,2
Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène	0,3	0,3	0,7	0,4