

Gestion globale sur le cycle de vie des ouvrages.

ÉTUDE DE LA CONCEPTION DES PONTS MIXTES ACIER-BÉTON DANS LE CADRE D'UNE ANALYSE DE CYCLE DE VIE – SYNTHÈSE DU PROJET SBRI

André ORCESI*, Ngoc-Binh TA*, Yannick TARDIVEL, Noël ROBERT**, Nicolas HENRY**, Christian CREMONA**, Damien CHAMPENOY*****

* IFSTTAR, DMAST, 14-20 boulevard Newton, 77447 CHAMPS SUR MARNE Marne-la-Vallée Cedex 2

** SETRA, CTOA, 110 rue de Paris, 77487 Provins Cedex, Sourdun

*** CETE de l'Est, Division Ouvrages d'Art, 1 boulevard Solidarité, Metz Technopôle, 57076 Metz

1. INTRODUCTION

Les conceptions qui visent à optimiser le dimensionnement de structures pour un coût et des impacts environnementaux réduits uniquement en phase de conception/construction n'offrent qu'une perspective partielle de ces coûts et impacts sur les durées de vie effectives de ces ouvrages. Les actions de surveillance, de maintenance ou de réhabilitation ne sont en effet pas considérées, en dépit de coûts et d'impacts directs et indirects parfois considérables. Dans ce contexte, un objectif majeur est d'appréhender la gestion des ouvrages de leur construction jusqu'à leur démolition, en incluant tous les impacts économiques et environnementaux liés à leur maintenance, réparation,

réhabilitation rénovation, voire extension de leur durée de service.

Lancé en 2009 et financé par le Fond de Recherche pour le Charbon et l'Acier, le projet SBRI (Sustainable steel-composite BRIdges in built environment) a rassemblé plusieurs partenaires européens autour de la conception optimisée des ouvrages mixtes acier-béton selon une approche globale de leur cycle de vie (Figure 1).

Cette approche (SBRI 2013a, b) fait écho pour les gestionnaires et les maîtres d'ouvrages à l'enjeu de durabilité des infrastructures par des politiques d'entretien maîtrisées sur le plan social, économique et environnemental (Figure 2). La démarche présentée dans cet article présente certains des résultats du projet SBRI, combinant une analyse de la

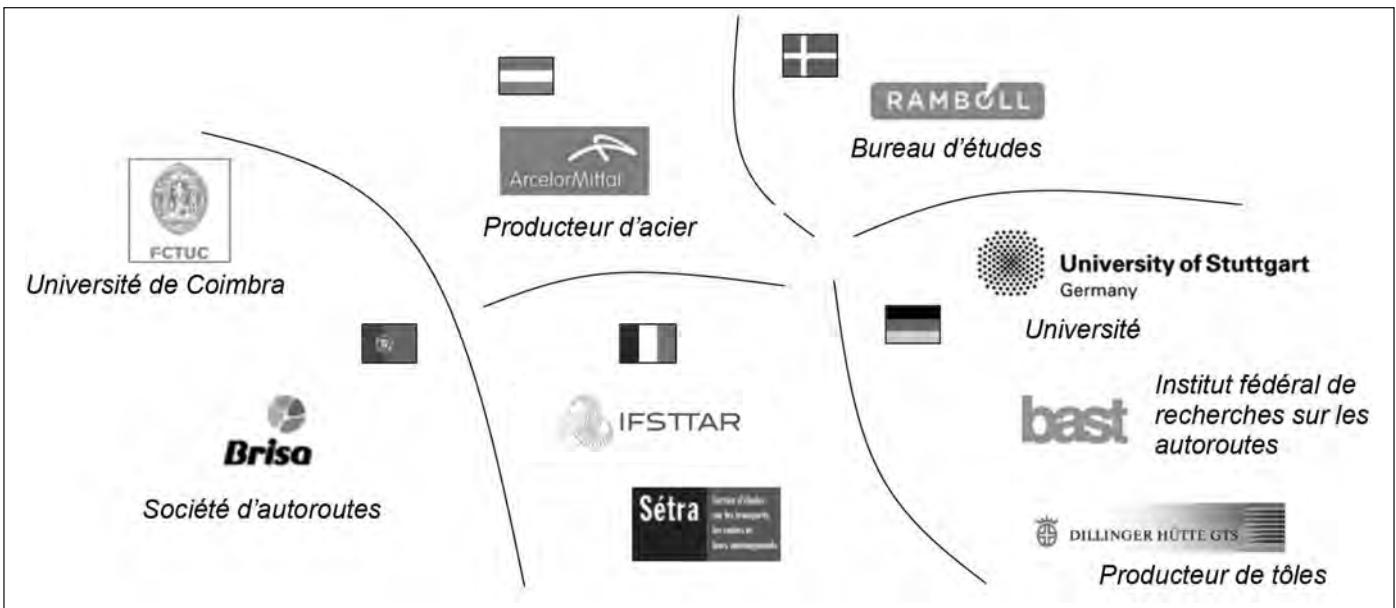


Figure 1. Partenaires européens du projet SBRI

performance des ouvrages, une analyse en coût complet et une analyse du cycle de vie. Elle propose également une réflexion sur l'identification de structures innovantes (acier autopatinable, acier HLE, ponts intégraux) selon ces trois aspects.

2. OBJECTIFS DU PROJET SBRI

L'objectif de la démarche proposée dans le projet SBRI est d'appréhender la gestion des ouvrages de leur construction jusqu'à leur démolition et valorisation des déchets, en passant par leur maintenance, réparation, réhabilitation réno-

vation, voire leur extension de durée d'usage (Gervásio et al. 2012, Maier et al. 2012, Orcesi et al. 2012).

L'analyse économique du cycle de vie concerne aussi bien le gestionnaire que les usagers de l'ouvrage et la société. Les coûts à la charge du gestionnaire sont les coûts directs de construction, d'inspection, de maintenance, de réhabilitation et de démolition. Les coûts pour l'usager sont indirects et traduisent une monétarisation de la gêne qu'ils subissent lors des actions de maintenance et de réhabilitation. Enfin, les coûts pour la société incluent des coûts qui ne sont pas pris en charge directement par le maître d'ouvrage ou par les usagers mais de manière plus générale par la société (comme dans le cas des accidents par exemple).



Figure 2. Approche globale pour le dimensionnement des ouvrages.

L'analyse environnementale du cycle de vie est réalisée à l'aide d'indicateurs, quantitatifs dans la mesure du possible. Elle est constituée des deux étapes suivantes (NF P01-010 – AFNOR 2004): (i) la classification des impacts pour laquelle il s'agit de définir une liste pertinente de catégories d'impacts à prendre en compte, et (ii) la caractérisation des impacts qui permet de quantifier la contribution spécifique de chaque flux (consommations et rejets) affecté à la catégorie d'impact considérée. Ces contributions sont ensuite agrégées dans le but de définir un indicateur pour chaque type d'impact.

L'analyse technique/fonctionnelle consiste à caractériser la performance des ouvrages, c'est-à-dire leur capacité à remplir des exigences de sécurité, d'aptitude au service, ou encore de durabilité.

L'objectif majeur du projet SBRI est au final de combiner ces trois types d'analyse de la performance des ouvrages, économique et environnementale et de réfléchir sur l'identification de structures innovantes sur ces trois aspects pendant le cycle de vie des ouvrages (Figure 3).

3. DESCRIPTIF DES TRAVAUX

Les différents concepts économiques, environnementaux, et performantiels peuvent représenter des enjeux conflictuels qui ont été abordés en évaluant les entités sur le cycle de vie : conception/construction, inspection, maintenance, réhabilitation et enfin démolition (Ta et al. 2013). Plusieurs points d'innovations ont pu être considérés et discutés dans le cadre du projet. Pour un franchissement donné, les ouvrages ou solutions constructives sont indiquées par des lettres : un ouvrage de référence "classique" est indiqué par 0 et les variantes "innovantes" sont indiquées par des entiers positifs. Trois familles d'ouvrages ont été étudiées dans le cadre du projet (Figure 4) : des ouvrages de moyenne portée (famille A), de petite portée (famille B) et de grande portée (famille C) en considérant à chaque fois des variantes originales.

Chaque famille de solutions constructives est en fait un prétexte à l'étude d'un type de structure dont l'emploi est privilégié pour le franchissement considéré. Le projet regroupant plusieurs pays européens, les ouvrages ont naturellement été dimensionnés selon les Eurocodes en tenant compte des valeurs recommandées dans la partie commune. Quelques un des points d'innovation considérés dans le projet sont mentionnés ci-après.

3.1. Innovations sur les matériaux

Les matériaux constituent un élément important permettant d'agir sur les performances au cours des différentes phases de la vie d'un ouvrage. Ils peuvent contribuer à augmenter la durabilité, à diminuer la périodicité des opérations d'entretien ou encore à diminuer les quantités de matériaux mobilisés pour la construction de l'ouvrage. Cependant, aujourd'hui encore, de nombreuses pistes restent écartées, car évaluées dans le cadre d'une analyse restreinte au seul coût initial. Dans le cadre de la conception initiale, des matériaux à hautes performances permettent de diminuer le poids propre de la structure et d'optimiser les quantités mises en œuvre. Ainsi, l'emploi d'acières à haute limite d'élasticité (HLE) permet de diminuer le poids de la structure et influe également sur le transport des éléments de charpente. L'utilisation d'éléments préfabriqués peut également avoir un impact économique/environnemental au moment de la construction.

En termes de gains vis-à-vis des opérations d'entretien, l'emploi de matériaux spécifiques permet de diminuer la vulnérabilité de la structure aux agressions du milieu extérieur. L'utilisation d'acières autopatinables a ainsi été envisagée pour la réalisation des profils reconstitués soudés (PRS), afin de se dispenser de la réalisation et des remplacements successifs d'un système anticorrosion. L'objectif majeur étant de contribuer à diminuer les opérations de maintenance sur les ouvrages en milieu extérieur agressif ou franchissant un axe à forts enjeux, particulièrement sensible aux perturbations de trafic liées

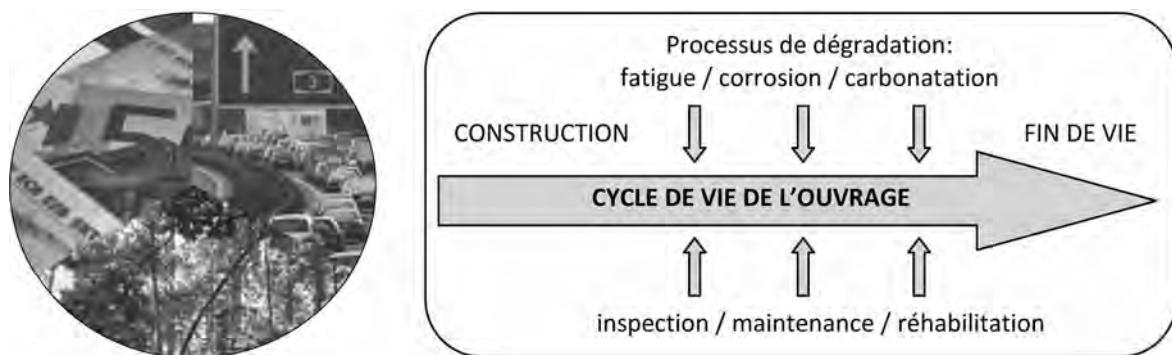
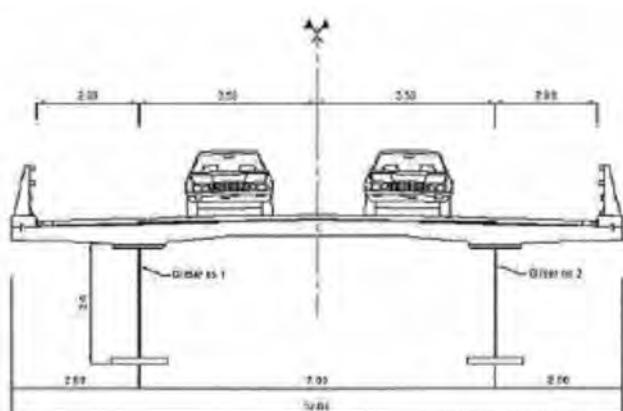
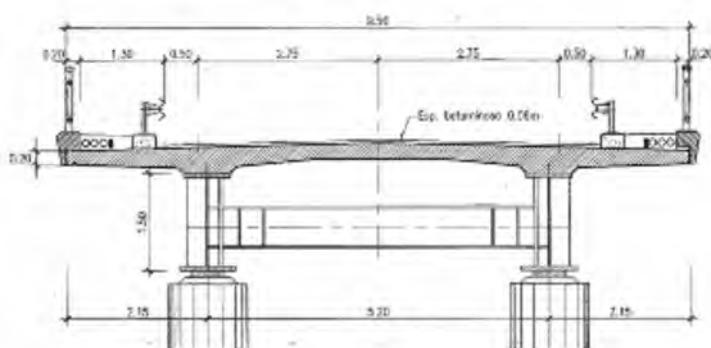


Figure 3. Gestion globale sur le cycle de vie des ouvrages.

(A)



(B)



(C)

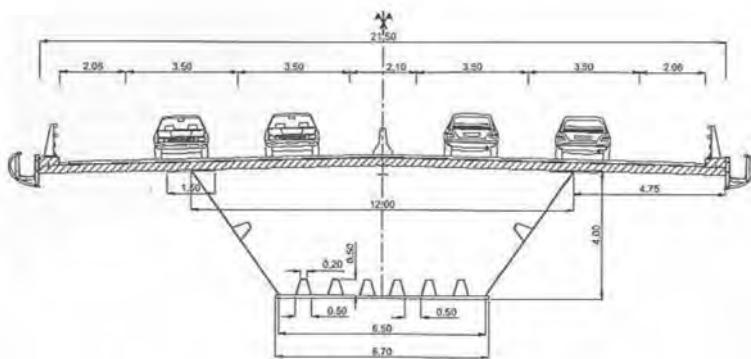


Figure 4. Familles d'ouvrages A, B et C.

à la maintenance. Dans ce contexte, la Figure 5 présente les coûts de cycle de vie (coût de construction, de vie en service, et de fin de vie) à la charge du gestionnaire pour les trois variantes A0, A1, et A2. Comme présenté dans la Figure 4, l'ouvrage de référence A0 est constitué de deux tabliers bipoutres mixtes séparés et supportant chacun un sens de circulation. Afin de réduire la masse de la charpente et donc les moyens de mise en œuvre, la variante A1 consiste à remplacer l'acier S355 des semelles des poutres principales sur appuis intermédiaires par de l'acier à haute limite d'élasticité (HLE) S460. Les âmes des poutres principales restent en acier S355. Les poutres sont donc hybrides à proximité des appuis. La variante A2 consiste à retenir pour l'acier structural un acier autopatinable afin

de réduire les opérations de maintenance au cours de la vie de l'ouvrage, et en particulier de supprimer les opérations de remplacement de la protection anticorrosion. Il est montré dans la Figure 5 que si la variante avec acier autopatinable est légèrement plus chère à la construction que la variante de référence, elle devient moins chère lorsque l'analyse économique est effectuée sur l'intégralité du cycle de vie. L'avantage de l'utilisation de l'acier autopatinable est également testée sur une des variantes de la famille B (Figure 6). Il est montré que l'absence de maintenance vis-à-vis de la protection anticorrosion permet de réduire les coûts aux usagers de manière significative par rapport à la variante de référence utilisant des aciers S355 classiques.

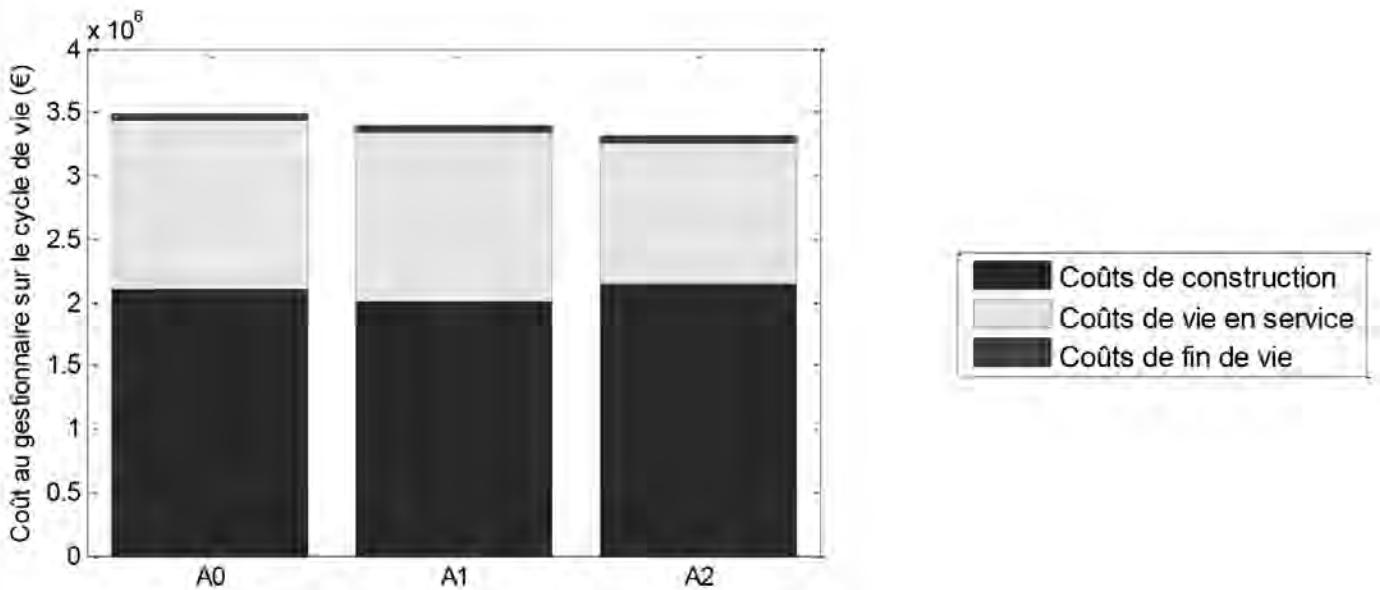


Figure 5. Coût de cycle de vie pour chaque ouvrage de la famille A (A0=variante de référence, A1= variante avec utilisation d'acières HLE, A2=variante avec utilisation d'acier autopatinable).

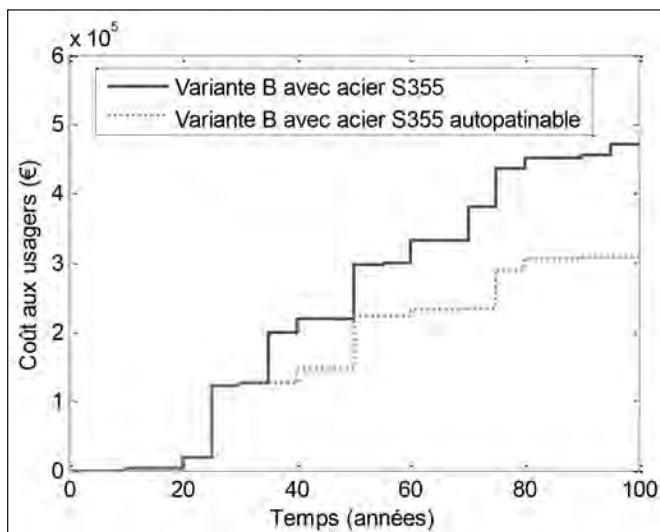


Figure 6. Coût aux usagers pour deux variantes de la famille B, une utilisant des aciers S355 et l'autre utilisant des aciers S355 autopatinables.

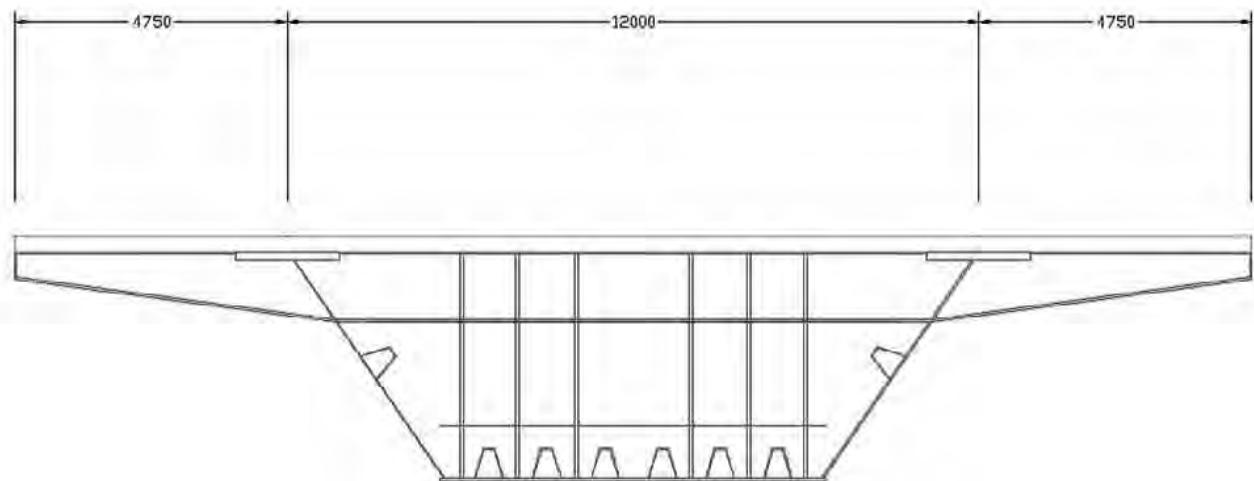
3.2. Innovations sur la conception

Les améliorations liées à la conception des ouvrages visent principalement à limiter l'impact de la maintenance des ouvrages (qui constitue une part importante des bilans économiques et environnementaux) en réduisant soit le nombre d'opérations, soit leur importance. Plusieurs options ont été considérées parmi lesquelles privilégier la réalisation d'ouvrages à deux tabliers (Figure 7) de sorte qu'un des deux soit toujours en service (cette option a été étudiée dans le cadre d'ouvrages de très grandes portées et constitue une évolution par rapport aux pratiques actuelles qui privilégient la réalisation d'un tablier unique pour des

raisons de coûts à la construction). En particulier, la Figure 8 montre le gain financier qui peut être atteint pour les usagers lorsque deux tabliers sont construits au lieu d'un seul. Cet écart est principalement dû au fait que la possibilité d'ouverture de voie supplémentaire au trafic (en utilisant une bande d'arrêt d'urgence) est plus importante et facilitée lorsqu'il y a deux tabliers au lieu d'un seul.

Une autre option qui a été testée est de prendre en compte la transformation d'une bande d'arrêt d'urgence en voie de circulation pour véhicules légers et poids lourds (variante A3, cf. Figure 9) en raison d'un accroissement futur de trafic (en considérant ainsi un dimensionnement spécifique vis-à-vis des phénomènes de fatigue). En effet, pour limiter le phénomène de fatigue – et donc les opérations de maintenance ou de vieillissement prématûr – dû à une éventuelle croissance du trafic, la variante A3 consiste à dimensionner l'ouvrage pour 3 voies (unidirectionnelles) restreintes qui correspondent à une utilisation future "optimisée" de l'ouvrage (Figure 9a). Dans ce cas de figure, la voie supportant les poids lourds étant extrêmement excentrée, c'est le critère de fatigue qui devient dimensionnant en travée. Ceci conduit à une légère augmentation de la quantité d'acier mise en œuvre, principalement dans les semelles des poutres principales. Il est montré que l'augmentation du coût de mise en œuvre reste minime. Cette variante A3 permet pourtant de réduire considérablement les différents impacts environnementaux (Figure 10) dans le cas où il y a effectivement un passage à trois voies dès le début de la vie en service de l'ouvrage. Il est noté que l'unité fonctionnelle est constituée par le tablier du pont, qui doit assurer le franchissement de la brèche par la voie autoroutière pendant une durée de service de 100 ans. L'ensemble des étapes du cycle de vie est inclus dans le périmètre d'analyse, depuis l'extraction des matériaux jusqu'à la fin de vie de l'ouvrage.

(a)



(b)

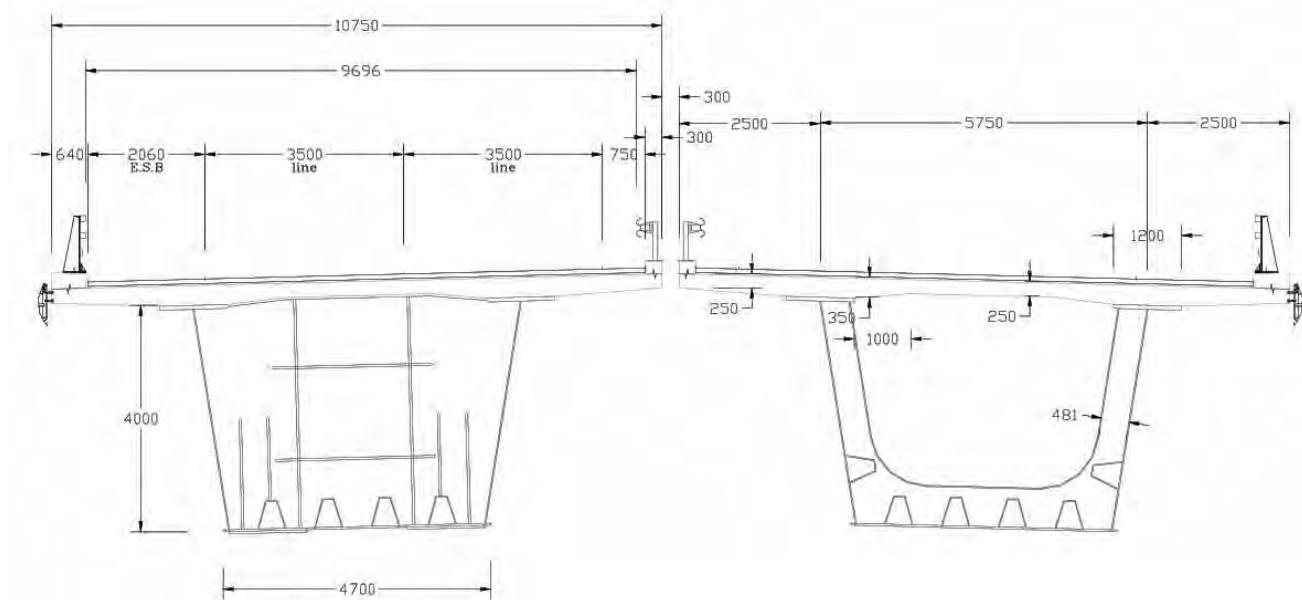


Figure 7. Construction d'ouvrages (a) à un tablier et (b) à deux tabliers pour la famille C.

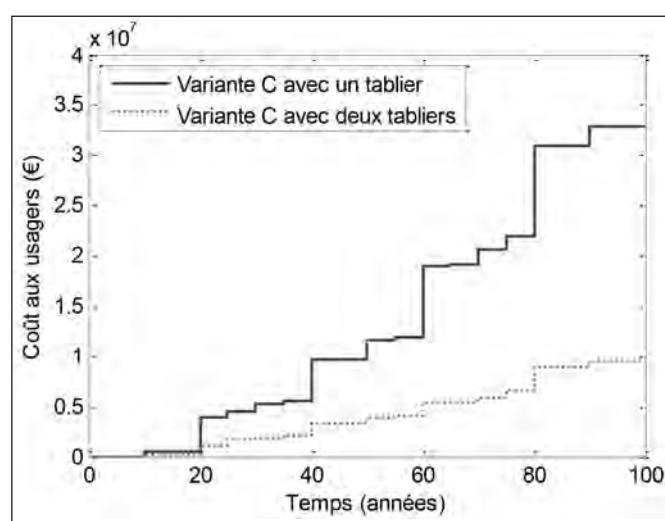
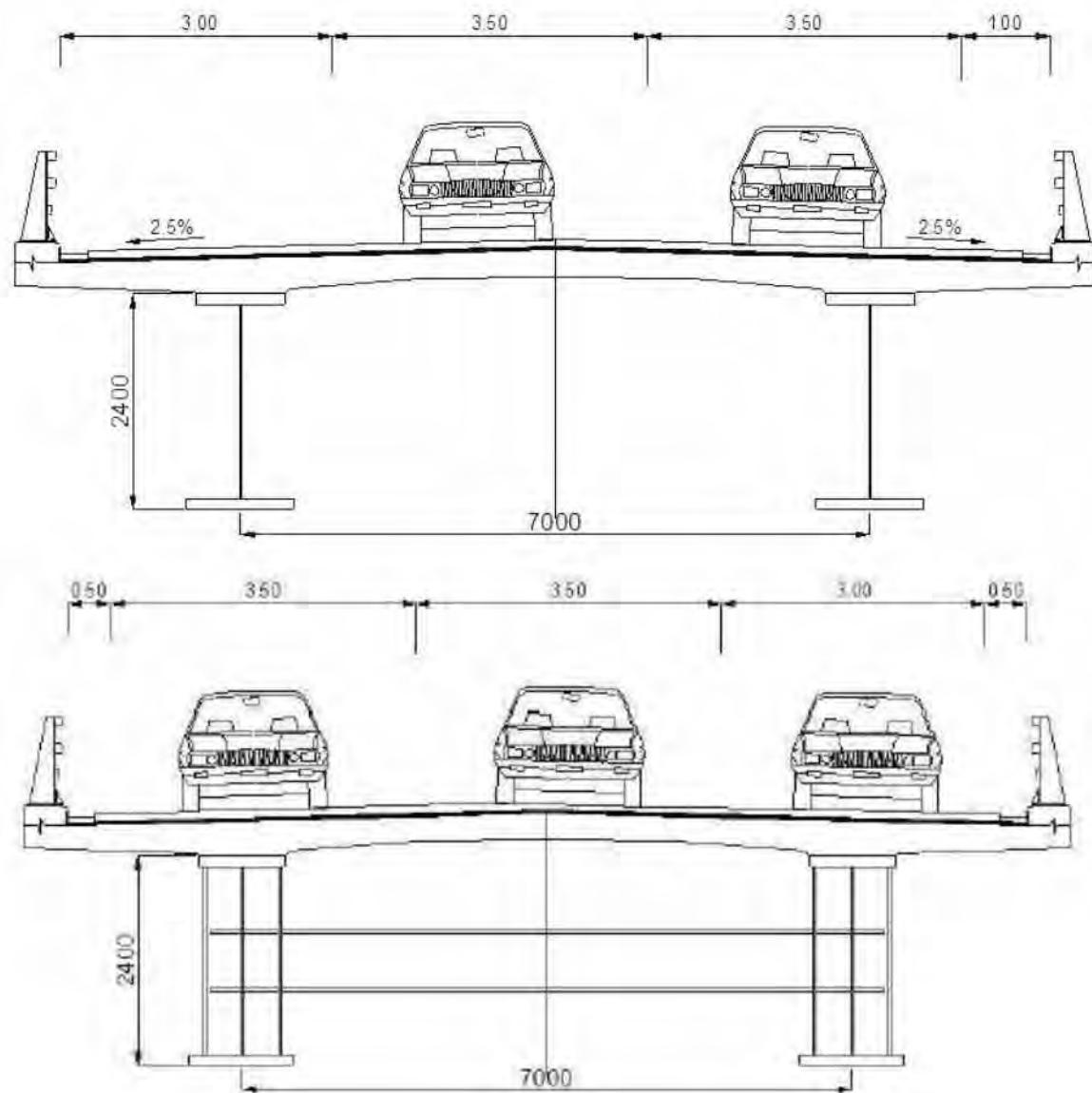


Figure 8. Coût aux usagers pour deux variantes de la famille C, une présentant un seul tablier et l'autre deux tabliers indépendants.

(a)



(b)

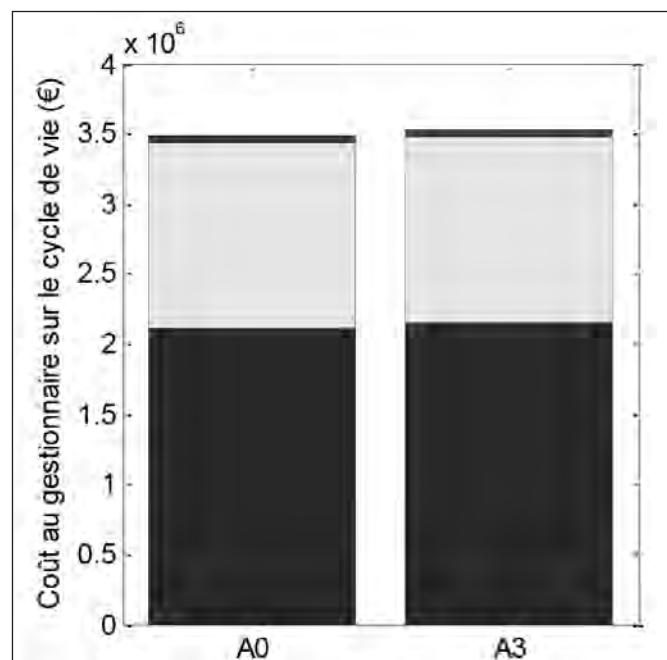


Figure 9. Comparaison de la variante de référence A0 avec une variante prenant en compte l'accroissement futur de trafic (variante A3).

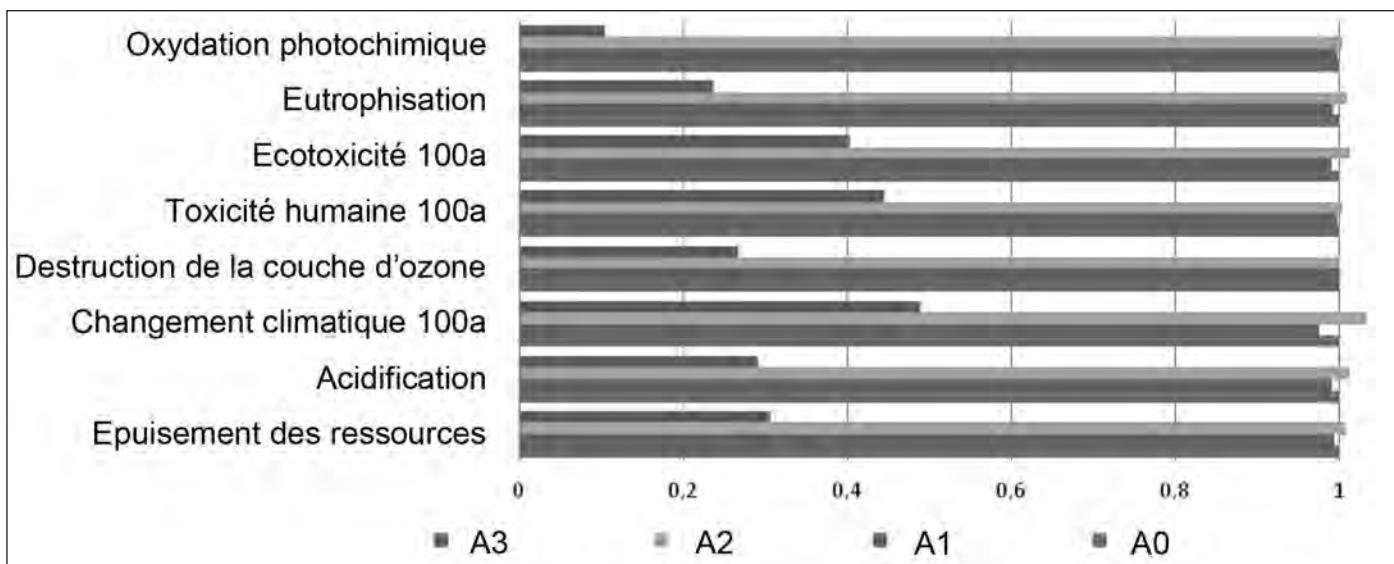


Figure 10. Comparaison des impacts environnementaux pour les variantes

A0=variante de référence, A1=variante avec utilisation d'acières HLE, A2=variante avec utilisation d'acier autopatinable, et A3=variante prenant en compte l'accroissement futur de trafic.

3.3. Innovations sur la surveillance/maintenance

Dans un contexte de diminution de l'impact économique et environnemental, plusieurs solutions de surveillance et maintenance ont pu être discutées. Différents contextes d'évolution de la performance des ouvrages ont été considérés pour dégager des scénarios moyens ou pessimistes,

en fonction des ressources disponibles, et ainsi donner des grandes tendances des différents impacts pouvant exister durant la durée de vie en service. La Figure 11 est ainsi un exemple de l'évolution des coûts de maintenance au cours de la durée de vie en service de l'ouvrage avec une fourchette de coûts qui est délimitée par le cas où le scénario normal de maintenance est appliquée (selon un calendrier de maintenance qui a été défini par les différents partenaires

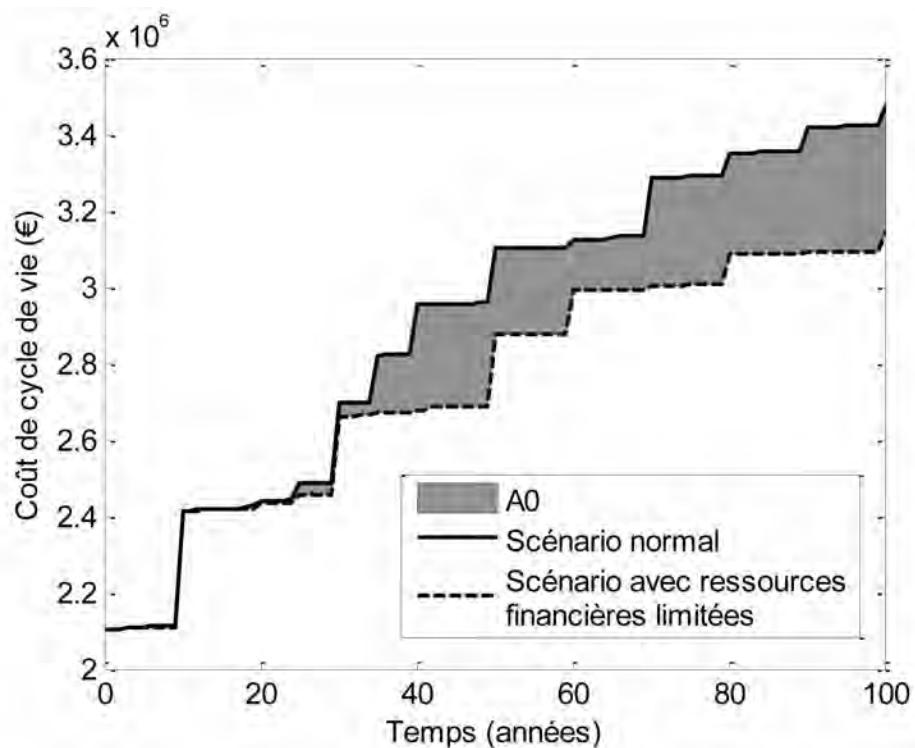


Figure 11. Scénarios de maintenance envisageant le cas où les ressources financières sont limitées.

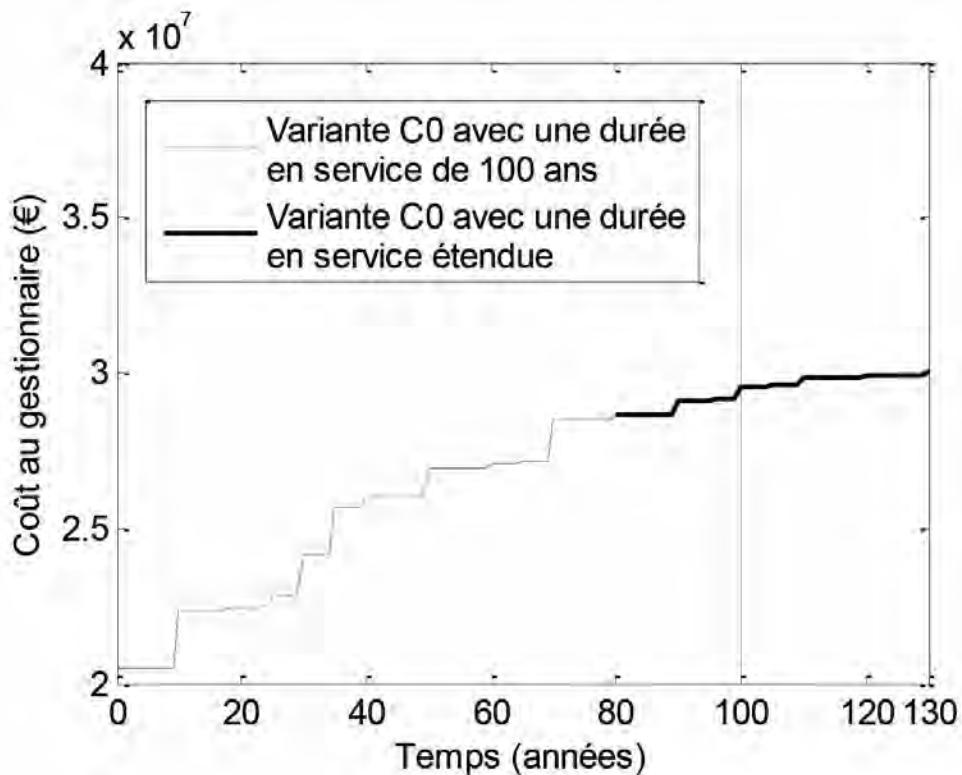


Figure 12. Scénarios de maintenance envisageant le cas où la durée de vie en service est allongée jusqu'à 130 ans.

du projet) et le cas où les ressources financières sont limitées et pour lequel certaines inspections/actions de maintenance sont effectuées moins fréquemment (ce scénario est susceptible d'affecter l'état général de l'ouvrage mais préserve l'impératif de sécurité). La possibilité d'étendre la durée en service en fin de vie des ouvrages a également été abordée dans le cas de la famille des ouvrages de grande portée (famille C, cf. Figure 12). Pour cette famille d'ouvrage, un scénario a été envisagé pour évaluer quelles seraient les actions à entreprendre en fin de vie de l'ouvrage pour espérer allonger sa durée de vie en service, et dans le cas présent, permettre à l'ouvrage d'atteindre une durée d'utilisation de 130 ans.

4. CONCLUSIONS

Le projet SBRI a permis de développer un cadre de réflexion sur la mise en place d'une approche globale sur le cycle de vie pour le dimensionnement des ponts mixtes. Plusieurs points d'innovations (ponts intégraux, acier HLE, acier autopatinable) ont pu être considérés et discutés. D'une manière générale, les ouvrages étudiés dans le cadre du projet SBRI se veulent représentatifs des ouvrages actuellement construits dans les pays des différents acteurs du projet. En raison à la fois du domaine d'emploi classique des ouvrages mixtes et de la nature des différents partenaires, les ouvrages étudiés sont essentiellement ceux que l'on rencontre habituellement sur des itinéraires autoroutiers urbains et inter-urbains.

Les conclusions et recommandations du projet (innovations sur les matériaux, la conception, la surveillance et la maintenance) sont donc en lien direct avec les thématiques actuelles sur l'intégration des principes de développement durable dans la conception et gestion des ouvrages tant au plan national qu'Européen.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le programme du Fonds de recherche du charbon et de l'acier pour son soutien financier au projet SBRI. Les auteurs remercient également M. Grégor Kozlowski de l'entreprise Berthold, pour les détails financiers fournis sur les différents types d'assemblage des poutres structurantes des variantes du projet SBRI.

6. RÉFÉRENCES

- Gervásio, H., Simões da Silva, L., Perdigão, V., Barros, P., Orcesi, A., Nielsen, K. (2012). Life-cycle analysis of highway composite bridges; proceedings of the 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, July 8-12, 2012.
- Maier, P., Kuhlmann, U., Tardivel, Y., Robert, N., Raoul, J., Perdigão, V., Martins, N., Barros, P., Friedrich, H., Krieger, J.: (2012). Steel-composite bridges – holistic approach applied to European Case Studies; proceedings of the 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management; Stresa, Italy; July 8-12, 2012.

Orcesi A., Ta N.-B. & Cremona, C. (2012). A comparative life-cycle costs analysis of steel-concrete composite bridges. In: proceedings of the 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna Austria. October 3-6, 2012.

SBRI (2013a). Sustainable Steel-Composite Bridges in Built Environment (SBRI) – Final report.

SBRI. (2013b). Sustainable Steel-Composite Bridges in Built Environment (SBRI) – Handbook.

Ta N.-B., Orcesi A. & Cremona, C. (2013). A holistic approach for analyzing bridges crossing a highway: proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, June 16-20, 2013, Columbia University, New York, USA.