Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Paris-Est

Ecole doctorale : "Science, Ingénierie et Environnement"
Spécialité : "Structures et matériaux"

Par

NGOC-BINH TA

Titre

ETUDE DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE APPLICATION AUX PONTS MIXTES

Soutenue le 18 Septembre 2013, devant le jury composé de :

M. François BUYLE-BODIN ..... Rapporteur
Mme Anne VENTURA ..... Rapporteur
M. Guillaume HABERT ..... Examinateur
M. André ORCESI ..... Examinateur
M. Bojidar YANEV ..... Examinateur
M. Christian CREMONA ..... Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je tiens à remercier le Professeur François BUYLE-BODIN, de l'Université Lille 1, d'avoir accepté de présider ce jury. Je le remercie également, ainsi que Mme Anne VENTURA de l'Université de Nantes d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail. Toute ma gratitude s'adresse aussi aux Professeurs Guillaume HABERT de l'ETH Zürich et Bojidar YANEV de l'Université de Columbia aux Etats-Unis, qui m'ont fait l'honneur de lire ce mémoire et de participer à la soutenance de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, M. Christian CREMONA, du SETRA, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ma thèse à l'IFSTTAR et d'avoir encadré cette recherche. Sa rigueur scientifique, sa patience et ses précieux conseils ont permis à ce travail d'aboutir. Je lui en suis profondément reconnaissant et lui témoigne ici toute ma gratitude. Je remercie également M. André ORCESI de l'IFSTTAR qui m'a conseillé tout au long de ma thèse. Son aide, sa disponibilité et ses conseils m'ont grandement aidé durant cette recherche.

Je tiens à remercier pour leur accueil et l'encadrement qu'ils m'ont apportés les membres du département Matériaux et Structures à l'IFSTTAR, et en particulier MM. Thierry KRETZ, directeur du département, M. Bruno GODART, directeur adjoint, M. François TOUTLEMONDE, délégué scientifique, et M. Jean-François SEIGNOL chef du Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art.

Je suis également redevable des différents partenaires du projet européen SBRI, et en particulier du Professeur Ulrike KUHLMANN et de Mme Philippa MAIER de l'Université de Stüttgart en Allemagne, des Professeurs Luis Simões DA SILVA, Helena GERVÁSIO , Christopher BRETT de l'Université de Coimbra au Portugal, de M. Ronny WILLMS de Dillinger Hüttenwerke en Allemagne, de Mmes Nicoleta POPA, Edurne Nunez MORENO et M. Riccardo ZANON d'ArcelorMittal au Luxembourg, de M. Mickaël THIERY de l'IFSTTAR, de MM. Asger KNUDSEN, Kim Obel NIELSEN, Rune Kjærgaard ANDERSEN de Ramboll au Danemark, de Mme Vera PERDIGÃO et MM. Paulo BARROS et Nuno MARTINS de BRISA Engenharia e Gestão au Portugal, de MM. Yannick TARDIVEL, Noël ROBERT, Nicholas HENRY du SETRA, de M. Damien CHAMPENOY du CETE Est, et de M. Heinz FRIEDRICH de la BAST en Allemagne.

Ma profonde gratitude va à mes collègues du Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art à l'IFSTTAR pour le soutien qu'ils m'ont témoigné durant ces trois années : M. Lucas ADELAIDE, Mme Véronique BOUTEILLER, Mme Anne-Sophie COLAS, Mme Nina COULATY-CHIN, M. Cédric DESPREZ, M. Umair IFTIKHAR, Mme Minh ORCESI, Mme Franziska SCHMIDT, M. Xiaoyi ZHOU, ainsi qu'à tous les collègues du Laboratoire Expérimentation et Modélisation des Matériaux et des Structures. Je remercie par ailleurs Mme Adélaïde Feraille du laboratoire Navier à l'Ecole des Ponts ParisTech.

Je remercie mes amis : MM. Hoang-Quan NGUYEN, Hoang-Tuan LUU, Thanh-Hai DAO, Quy-Don LE, Hoang-Son TRAN, Mlles Thi-Thanh-An VU, Thao-Vi NGO et Mme Y-Linh LE pour leur soutien et leur aide tout au long de mon séjour en France.

Je remercie finalement ma famille : MM. Hien TA, Ngoc-Cau TA, Mme Thi-Thuc TRAN et Mlle Hoang-Thanh TA, ainsi que mon amie Mlle Cam-Nhung NGUYEN, pour leur soutien et réconfort permanent tout au long de ces trois années de thèse.

RÉSUMÉ

La pratique courante de la conception des ouvrages d'art est fortement orientée par la phase de construction. Traditionnellement, la conception des ouvrages consiste à retenir un dimensionnement qui permet d'atteindre un coût initial de construction le plus faible possible tout en respectant des exigences prescrites pour une durée de fonctionnement donnée. Cette approche est aujourd'hui révisitée pour chercher à intégrer tout le cycle de vie de l'ouvrage, c'est-à-dire considérer toutes les étapes de sa vie depuis la conception jusqu'à la fin de vie en service. En effet, les activités liées au cycle de vie de l'ouvrage durant les phases d'exploitation, de maintenance/réhabilitation, et de fin de vie génèrent des impacts tant sur le plan économique que sur les plans environnementaux et sociétaux, bien plus importants que la simple phase de conception/construction.

Chaque option de dimensionnement peut être associée à un cycle de vie différent et donc à des impacts différents. Pour cette raison et dans un contexte de développement durable, cette thèse propose une démarche méthodologique pour analyser les ouvrages dans leur cycle de vie selon trois axes : économique, environnemental et sociétal. Une analyse multicritère est alors proposée pour évaluer l'ensemble des variantes de conception et permettre d'avoir une vision globale qui aide les maîtres d'ouvrage et les gestionnaires lors de la prise de décision. Finalement, une analyse performantielle est effectuée pour permettre de prendre en compte différents scénarios de maintenance et d'optimiser les stratégies de gestion durant la vie en service. Afin d'illustrer l'ensemble des concepts mis en œuvre, une famille d'ouvrage particulière a été retenue : les ponts mixtes acier-béton.

ABSTRACT

The current practice in structural design is strongly impacted by the construction stage. Traditionally, the design process aims at selecting the solution with the lowest initial construction cost while fulfilling prescribed requirements during a fixed service life. This approach is now revisited to integrate the whole "life-cycle" of the structure, i.e to consider the structure from the design step to the end of the service life. Indeed, activities related to the structure life-cycle such as operation, maintenance/rehabilitation and end-of-life generate economic, environmental and societal impacts, which may be more significant than those at the design/construction of the structure.

Each design solution might be associated with a different life-cycle, and then with differents impacts. For this reason and within an approach of sustainable development, this PhD work proposes a framework to analyze structures during their overall life-cycle in accordance with three axes : economic, environmental and social. A multi-criteria analysis is then introduced to assess all design solutions and have a global vision that helps bridge owners and managers in the decision making process. Finally, a performance-based analysis is performed to take into account different maintenance scenarios and optimize management strategies during the service life. The proposed approach is applied to steel-concrete composite bridges for illustration.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 1
2 PRINCIPES DES DIFFÉRENTES APPROCHES DE CYCLE DE VIE 7
2.1 Analyse des coûts de cycle de vie . . . 7
2.1.1 Introduction . . . 7
2.1.2 Méthodologie . . . 8
2.1.3 Analyses récentes sur le coût de cycle de vie . . . 10
2.2 Analyse environnementale de cycle de vie . . . 12
2.2.1 Introduction . . . 12
2.2.2 Méthodologie . . . 13
2.2.3 Analyses récentes sur l'ACV . . . 16
2.3 Analyse sociétale - Impacts externes dus à la congestion du trafic routier . 21
2.3.1 Introduction . . . 21
2.3.2 Phénomène de congestion du trafic . . . 22
2.4 Synthèse . . . 25
3 APPLICATION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE 29
3.1 Introduction . . . 29
3.2 Familles d'ouvrages considérés . . . 29
3.2.1 Cas de référence . . . 30
3.2.2 Etude comparative . . . 31
3.3 Cadre méthodologique . . . 37
3.3.1 Considérations générales . . . 37
3.3.2 Données unitaires . . . 43
3.4 Etude comparatives de dimensionnement . . . 66
3.4.1 Aspects innovants sur les matériaux . . . 66
3.4.2 Aspects innovants concernant la conception . . . 93
3.4.3 Aspects innovants concernant la surveillance/maintenance . . . 109
3.4.4 Synthèse des études comparatives par famille d'ouvrages . . . 111
3.5 Analyse multicritère . . . 115
3.5.1 Présentation des outils TOPSIS et PROMETHEE . . . 116
3.5.2 Application des approches TOPSIS et PROMETHEE aux familles d'ouvrages A, B et C . . . 123
3.5.3 Synthèse sur l'analyse multicritère . . . 132
3.6 Synthèse générale . . . 132
4 DÉTERMINATION DE STRATÉGIES OPTIMALES DE CONCEPTION ET GESTION 135
4.1 Introduction . . . 135
4.2 Analyse performantielle sur le cycle de vie . . . 136
4.2.1 Introduction . . . 136
4.2.2 Modèles de performance . . . 138
4.2.3 Caractérisation des modèles de dégradation Ma1 et Ma2 . . . 140
4.3 Processus d'optimisation multiobjectif . . . 149
4.3.1 Introduction . . . 149
4.3.2 Résultats d'optimisation pour la famille A . . . 151
4.3.3 Résultats d'optimisation pour la famille B . . . 163
4.3.4 Résultats d'optimisation pour la famille C . . . 175

4.4 Etude de l'influence des seuils de performance . . . 183
4.4.1 Etude des seuils sur la protection anticorrosion . . . 183
4.4.2 Etude des seuils sur les joints des chaussées . . . 185
4.4.3 Influence sur les coûts aux usagers de deux tabliers au lieu d'un seul . . 185
4.5 Synthèse . . . 188
5 CONCLUSIONS 189

BIBLIOGRAPHIE 193
A PONTS MIXTES : TYPOLOGIE ET HISTORIQUE 209
A.1 Types de ponts mixtes . . . 209
A.1.1 Ponts mixtes de type bi-poutres . . . 209
A.1.2 Ponts mixtes en caisson . . . 210
A.1.3 Pont mixte de type poutrelles enrobées . . . 210
A.2 Histoire de la construction des ponts mixtes . . . 211
A.2.1 Evolution des matériaux . . . 212
A.2.2 Evolution des assemblages . . . 214
A.2.3 Evolution des aspects structurels dans les règlements . . . 214
B RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES 217
B.1 Famille A . . . 218
B.2 Famille B . . . 224
B.3 Famille C . . . 230
C CATÉGORIES D'IMPACT 237
C.1 Consommation des ressources énergétiques . . . 237
C.2 Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (ADP) . . . 237
C.3 Déchets non radioactifs . . . 238
C.4 Déchets radioactifs . . . 238
C.5 Consommation d'eau totale . . . 238
C.6 Potentiel de changement climatique . . . 238
C.7 Potentiel d'acidification atmosphérique (AP) . . . 239
C.8 Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP) . . . 240
C.9 Potentiel de formation de l'ozone troposphérique (PCOP) . . . 240
C.10 Potentiel d'eutrophisation (EP) . . . 241
C.11 Potentiel de toxicité humaine (HTP) . . . 241
C.12 Potentiel d'écotoxicité (ECP) . . . 241
D ALGORITHMES GÉNÉTIQUES 243
D.1 Optimisation mono-objectif . . . 244
D.1.1 Méthode de sélection . . . 244
D.1.2 Choix des paramètres . . . 244
D.2 Principe de l'optimisation multiobjectif . . . 245
D.2.1 Procédure de tri basée sur la non-dominance . . . 246
D.2.2 Procédure de tri basée sur la distance de crowding . . . 246

ABRÉVIATIONS

ACV Analyse du Cycle de Vie
ACCV Analyse des Coûts de Cycle de Vie
ACQPA Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion
AFGC Association Française de Génie Civil
AG Algorithmes Génétiques
BFUP Béton Fibré à Ultra-hautes Performances
BRISA Société d'autoroutes - Engenharia e Gestão S.A (Portugal)
CED Cumulative Energy Demand
CETE Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
DIOGEN Données d'Impact pour les Ouvrages de GENie civil
ELECTRE ELimination Et Choix Traduisant la REalité
FDES Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (selon la norme NF P01-010)
GES Gaz à Effet de Serre
GIEC Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GWP Global Warming Popential
HCM Highway Capacity Manual
HLE Haute Limite d'Elasticité
ICV Inventaire du Cycle de Vie
ISO International Organization for Standardization
MAUT Multi-Attribute Utility Theory
MHDIS Multi-group Hierarchical DIScrimination
NPGA Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA Nondominated Sorting Genetic Algorithm
ONU Organisation des Nations Unies
PIB Produit Intérieur Brut
PROMETHEE Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations
QUEWZ Queue and User cost Evaluation of Work Zones
SBRI Sustainable steel-composite BRIdges in Built Environment
SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry - Société de toxicologie et chimie de l'environnement
SETRA Service d'Etudes sur les Transports, les routes et leurs Aménagements
TOPSIS Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TRACC Techniques Routières Adaptées au Changement Climatique
UTA UTilités Additives
UTADIS UTilités Additives DIScriminantes
VEGA Vector Evaluated Genetic Algorithm

LEXIQUE

ACTUALISATION Opération mathématique permettant de comparer des montants reçus ou dépensés à différents instants. L'opérateur utilise un taux d'actualisation qui fait qu'une valeur future vaut moins aujourd'hui.

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU CYCLE DE VIE (ACV) L'analyse environnementale du cycle de vie (notée Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans ce mémoire) est une technique qui consiste à évaluer les impacts environnementaux d'un produit (bien ou service) tout au long de son cycle de vie.

ANALYSE DES COÛTS DE CYCLE DE VIE (ACCV) Analyse consistant à chiffrer tous les coûts rencontrés sur le cycle de vie d'un projet (depuis la conception/construction jusqu'à la fin de vie).

ANALYSE MULTICRITÈRE Analyse utilisée pour évaluer plusieurs solutions, connues a priori, suivant différents critères généralement conflictuels, afin d'en déduire une classification.

ANALYSE SOCIÉTALE L'analyse sociétale est caractérisée dans cette thèse uniquement par l'impact de la congestion du trafic durant la vie en service de l'ouvrage qui constitue un impact sur la société. La notion d'insécurité est prise en compte dans cette analyse à travers l'augmentation du nombre d'accidents, voire de décès, en période de maintenance sur les ouvrages. La congestion du trafic durant la vie en service, qui engendre des coûts et impacts environnementaux, peut être perçue comme une externalité dans les études économiques et environnementales mais c'est un choix qui a été fait de séparer clairement la quantification de la gêne aux usagers des impacts économiques et environnementaux liés aux actions directes du gestionnaire. Le terme analyse sociétale correspond donc dans la thèse, par abus de langage, aux externalités liées à la gêne à l'usager durant la phase de vie en service.

EXTERNALITÉ Ce terme caractérise les impacts générés par toute activité humaine, lorsque le responsable de l'activité ne tient pas totalement compte des incidences de ses actions sur les autres. Les externalités représentent donc de manière globale les contraintes et bénéfices revenant à des tiers (qui peuvent être positifs ou négatifs) que le projet a entraînés.

FIN DE VIE L'étape de fin de vie est la phase de gestion de l'ouvrage une fois que sa durée de vie en service est achevée et que sa démolition est envisagée. Des coûts et impacts environnementaux sont associés à cette étape. Dans cette thèse, les coûts de fin de vie comprennent le coût de démolition de l'ouvrage, le coût de transport, le revenu de la vente de l'acier et le coût de mise en décharge pour les déchets. Les impacts environnementaux sont ceux dus à la démolition de l'ouvrage et au transport des déchets pour la mise en décharge (méthode des stocks).

FRONT DE PARETO En économie, un optimum de Pareto est un état dans lequel on ne peut pas améliorer le bien être d'un individu sans dégrader celui d'un autre. Dans le contexte d'optimisation avec plusieurs fonctions objectifs (i.e. fonctionnelles) à minimiser ou maximiser, la recherche du front de Pareto consiste à trouver l'ensemble des solutions pour lesquelles on ne peut pas améliorer la valeur d'une fonctionnelle sans dégrader la valeur d'au moins une autre fonctionnelle.

OPTIMISATION Dans le cas mono-objectif, l'optimisation consiste à identifier les meilleures solutions à l'aide d'une fonction objectif et de contraintes prédéfinies. Dans le cas multiobjectif, l'enjeu est de déterminer les meilleures solutions possibles vis-à-vis d'un ensemble de critères souvent conflictuels. Il n'est alors généralement pas possible d'avoir une solution unique avec des indicateurs qui sont tous à la baisse (et/ou à la hausse) simultanément, sauf si ces indicateurs ne sont pas conflictuels. Plusieurs solutions sont alors déterminées et constituent le front de Pareto. Sur le front de Pareto des solutions optimales, dès qu'un critère est amélioré, un autre est dégradé. Il n'est donc pas possible de dire qu'une solution est meilleure que les autres sur l'ensemble des critères.

TAUX D'ACTUALISATION Taux annuel auquel l'effet de futurs événements est réduit pour permettre de comparer des effets survenant à des instants différents.

UNITÉ FONCTIONNELLE L'unité fonctionnelle représente une quantification de la fonction d'un produit. C'est à partir de cette unité qu'il est possible de comparer des scénarios de produits a priori différents. Comme toute unité, elle se doit d'être précise, mesurable et additive.

1 INTRODUCTION

Les infrastructures de transports telles que les routes, les ouvrages d'art, les voies ferrées, les aéroports, etc. représentent des éléments essentiels vis-à-vis du développement d'un pays à l'échelle nationale et internationale.

L'importance de ces éléments, maillons des réseaux de transports, est constamment augmentée, dans un contexte de forte progression de la demande de circulation des personnes, des biens, des marchandises, et également des services. En particulier, l'Europe présente un grand besoin de transport des marchandises et des personnes qui peut effectivement être reflété par la facture des importations pétrolières de l'ordre de 210 milliards d'euros en 2010 (Livre blanc 2011). Les décisions relatives à l'implantation de nouvelles infrastructures pèsent souvent fortement sur la croissance à l'échelle d'une région, voire d'un pays, et le secteur de la construction, qui assure le développement du réseau de transport, montre alors toute son importance.

Cette importance se situe tout d'abord sur un plan économique, le secteur de la construction constituant l'une des industries les plus importantes au monde qui impacte donc fortement la croissance économique et l'emploi (Landolfo 2012, Commission européenne 2004). En Europe, ce secteur est notamment à l'origine de 5% du Produit Intérieur Brut (PIB) avec quelques dix millions d'employés (Livre blanc 2011). Par ailleurs, les ouvrages ont une valeur patrimoniale significative à l'échelle d'un pays, ce qui implique d'établir une politique de gestion qui a un coût non négligeable. Dans le cas particulier des ouvrages d'art, le budget de maintenance est estimé entre 3000 et 6000 euros par ouvrage et par an en moyenne en Europe (PIARC 2012). En France (SETRA 2013), il a été par ailleurs estimé que le coût de remise à neuf pour le parc d'ouvrages d'art du réseau national représente 800 millions d'euros (en excluant les ouvrages spécifiques de type VIPP [1], ponts à haubans, etc.)

L'importance du secteur de la construction se situe également sur un plan environnemental car la construction, l'utilisation, la maintenance/réhabilitation et la démolition consomment des ressources naturelles et énergétiques et génèrent des déchets à grande échelle. Le secteur de la construction a par exemple généré en France environ 261 millions de tonnes de déchets en 2010, ce qui représente 80% des déchets de tous les secteurs économiques français (Eurostat 2010). Suite à l'accélération du réchauffement climatique depuis 1950, la prise en compte de l'impact des activités humaines sur l'environnement a fortement augmenté. La seule satisfaction des questions à court terme sur le besoin d'infrastructures n'est plus suffisante et il apparaît de plus en plus nécessaire d'adopter une démarche globale de développement durable qui est liée à la mise en place d'un certain nombre de normes qui impactent désormais les différents types de projets de construction. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a notamment été mis en place en 1988 par les Nations-Unies pour produire des synthèses sur le changement climatique. Dans son dernier et quatrième rapport (Pachauri et al. 2008), auquel plus de 2500 scientifiques de 130 pays ont participé, le GIEC affirme que le réchauffement climatique depuis 1950 est très probablement dû à l'augmentation des gaz à effet de serre d'origine anthropique. Par ailleurs, dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'était engagée à réduire

1. Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes

les émissions de gaz à effet de serre (GES). Lors de la conférence de l'Organisation des Nations Unies (ONU) sur le climat organisée à Doha, au Qatar, du 26 novembre au 7 décembre 2012, près de 200 pays se sont mis d'accord pour prolonger jusqu'en 2020 la durée de vie du protocole de Kyoto et poursuivre ainsi la lutte contre le réchauffement climatique. En particulier, l'objectif de l'Europe en 2020 est de réduire les émissions de GES de 20% par rapport au niveau de 1990. Tous les secteurs industriels doivent donc participer à cet effort de réduction, y compris le secteur de la construction.

Enfin, un troisième niveau est l'impact du secteur de la construction sur la société en général. Cet impact se situe à de nombreuses échelles. Une de ces facettes est la participation du secteur de construction au progrès social à travers la mise en œuvre de politiques de développement des territoires, ce qui peut fortement impacter (positivement ou négativement) le développement de secteurs essentiels tels que le logement, la santé, l'éducation. Une deuxième facette, plus négative, est la gêne qu'engendre le secteur de la construction sur les usagers de manière globale, avec par exemple des nuisances sonores, des niveaux accrus de pollution, l'augmentation du sentiment de stress des usagers subissant des retards en cas de congestion engendrée par les chantiers de construction et de maintenance, l'augmentation du nombre d'accidents, voire de décès sur les zones de chantier, etc.

Ces vingt dernières années, le concept de développement durable a acquis un degré élevé de dynamisme, autant sur le plan politique qu'économique. Si le rapport de D. Meadows au club de Rome en 1972, au titre provocateur de "les limites de la croissance", avait déjà déclenché une polémique mondiale sur l'épuisement des ressources, il revient au rapport de la commission Brundtland (1987), élaboré sous l'égide des Nations Unies et intitulé "notre futur commun", de réellement aboutir à une acceptation politique de la notion de développement durable. La définition d'un "développement qui satisfait les besoins des générations présentes sans compromettre l'aptitude des générations futures à satisfaire leurs propres besoins à commencer par les plus pauvres" est maintenant universellement acceptée.

Dans l'Union Européenne, développement et économie durables ont été reconnus comme des piliers des politiques économiques et environnementales européennes depuis 1999. Ceci a conduit à l'introduction des principes de "développement durable" dans des champs d'action variés, y compris l'industrie de la construction. Pour ainsi dire complètement méconnu pendant des décennies en dehors de l'exploitation forestière, le concept de développement durable pénètre maintenant toutes les branches de l'économie. Cependant, dans le secteur de la construction, une rapide implémentation d'un tel principe se trouve entravée considérablement par la durée de vie des produits concernés.

Dans le domaine du génie civil, l'ensemble des critères économiques, environnementaux et sociétaux influencent fortement les choix faits lors du dimensionnement des ouvrages. Face à un trafic toujours plus croissant et des coûts accrus pour l'entretien et la construction de nouveaux ouvrages, le changement progressif des consciences concernant les impacts néfastes que peuvent avoir le domaine de construction ont progressivement permis la proposition d'un certain nombre de démarches globales pour appréhender la gestion des ouvrages depuis leur construction et mise en service, jusqu'à la rénovation et l'extension de la durée d'usage, pour se terminer par la démolition et le recyclage des matériaux et des composants. Dans ce contexte, l'approche du dimensionnement se déplace aujourd'hui d'un mode de dimensionnement optimisé de la conception initiale vers un mode de dimensionnement optimisé du cycle de vie.

Lancé en 2009 et financé par le Fond de Recherche pour le Charbon et l'Acier, le projet Sustainable steel-composite BRIdges in Built Environment (SBRI) 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 1.0.1).

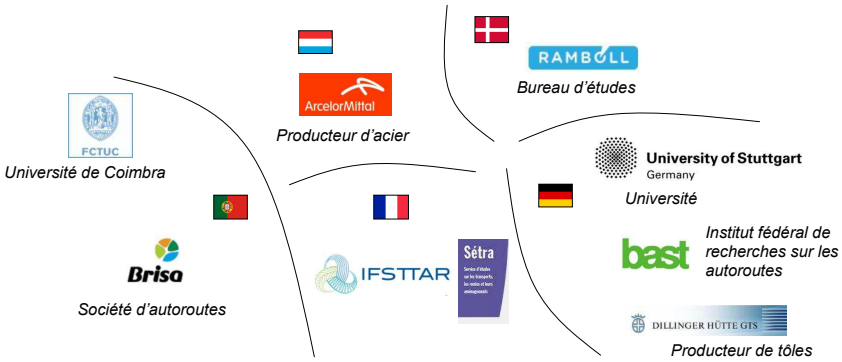


Figure 1.0.1: Partenaires européens du projet SBRI.

Ce projet dans lequel s'inscrit cette thèse, se focalise sur la conception optimisée des ouvrages mixtes acier-béton dans le cadre d'une approche globale de développement durable. Les différents concepts peuvent représenter des enjeux conflictuels qui sont abordés en évaluant les entités sur leur cycle de vie selon les axes suivants : environnemental, économique, social et technique (fonctionnel). Cette approche fait écho pour les gestionnaires et les maîtres d'ouvrages à l'enjeu de durabilité des infrastructures par des politiques d'entretien maîtrisées sur les plans économique, environnemental et social mentionnés ci-dessus. En effet, les conceptions qui visent à optimiser le dimensionnement de structures pour un coût et des impacts environnementaux réduits à la construction n'offrent qu'une perspective partielle sur la période de vie en œuvre et de fin de vie des ouvrages. En particulier, les opérations de surveillance, de maintenance ou de réhabilitation ne sont pas pleinement considérées, en dépit de coûts et d'impacts directs et indirects parfois considérables. Le champ couvert par le projet SBRI dépasse donc le seuil traditionnel constitué par la réception des ouvrages, pour s'étendre à la totalité du cycle de vie. Il associe des analyses de performance et de coût à une analyse environnementale afin de procurer la transversalité nécessaire à une approche globale. Les points d'innovation considérés dans le projet SBRI portent sur :

- les matériaux, qui 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 ;
- 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 ;
- la surveillance/maintenance : dans un contexte de diminution de l'impact économique et environnemental, l'optimisation des stratégies de surveillance et maintenance représente un enjeu majeur.

En lien avec les enjeux du projet SBRI, l'objectif majeur des travaux de cette thèse est de développer une approche méthodologique permettant d'une part d'appréhender la gestion des ouvrages de leur construction jusqu'à leur démolition, en passant par leur maintenance, réparation, réhabilitation rénovation, voire leur extension de durée d'usage, et d'autre part d'articuler plusieurs des concepts économiques, environnementaux et sociétaux au travers de différents types d'analyses : multicritère, performantielle ou encore d'optimisation.

La combinaison de ces différents concepts doit s'inscrire dans un cadre méthodologique qu'il convient de mettre en place pour pouvoir identifier le caractère innovant de solutions de dimensionnement sur le cycle de vie des ouvrages. Pour atteindre cet objectif, la démarche générale de ce travail de thèse a consisté à caractériser dans un premier temps comment les trois piliers du développement durable – économique, environnemental et sociétal – sont intégrés dans l'analyse. Le projet SBRI ayant permis d'avoir accès à un certain nombre de cas d'étude, la démarche leur a alors été appliquée dans un deuxième temps afin d'illustrer l'analyse sur le cycle de vie dans le cas des ouvrages d'art. La définition des frontières du système considéré et des hypothèses de l'étude est en particulier une étape essentielle dans ce processus. Le cadre méthodologique ayant pour vocation de permettre une comparaison de plusieurs solutions, la mise en place d'une analyse multicritère a été étudiée. Par ailleurs, il était souhaité de caractériser l'importance de la mise en place des stratégies de gestion durant la vie en service. Une approche liant une analyse performantielle à un processus d'optimisation multi-objectif a été considérée dans un troisième temps pour mettre en évidence l'importance des choix décisionnels par le gestionnaire de l'ouvrage durant la vie en service pour optimiser les stratégies de gestion.

Cette démarche a permis de diviser le mémoire en trois grandes parties, la première (chapitre 2) portant sur la méthodologie d'analyse de cycle de vie dans sa globalité. La seconde partie (chapitre 3) est relative à l'application de l'analyse de cycle de vie au dimensionnement des ouvrages, et enfin la troisième (chapitre 4) introduit des profils de performance adaptés au cas des ponts mixtes acier-béton et propose une procédure d'optimisation des stratégies de dimensionnement et de gestion des ouvrages sur leur cycle de vie.

Les objectifs liés à chacun des chapitres de la thèse sont explicités ci-dessous :

- L'objectif du chapitre 2 est de détailler les trois grands axes du développement durable - économique, environnemental, et sociétal. Après un bref état de l'art sur des études récentes appliquées au cas des ouvrages d'art, la terminologie liée à cette thèse est détaillée. L'analyse des coûts du cycle de vie concerne par exemple les coûts à la charge du gestionnaire comprenant les coûts de construction, d'inspection, de maintenance, de réhabilitation et de démolition. L'analyse environnementale du cycle de vie, quant à elle, est réalisée à l'aide d'indicateurs, quantitatifs dans la mesure du possible. Elle est constituée des deux étapes suivantes (NF P 01-010 – 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. Enfin, l'analyse sociétale concerne les impacts indirects subis par les usagers lors des actions de maintenance et de réhabilitation. Cette analyse intègre également 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). Dans cette analyse sociétale, seuls les impacts négatifs (coûts et impacts environnementaux) sont pris en compte. Les impacts positifs liés à la création de l'ouvrage ne sont pas considérés.

- L'objectif du chapitre 3 est de proposer une application des concepts de l'analyse du cycle de vie au dimensionnement d'ouvrages mixtes acier-béton. L'enjeu est de montrer comment la définition du cadre de l'étude (frontières du système, choix des intrants et des hypothèses...) permet d'effectuer une comparaison de différentes solutions. En particulier, des ponts de petite, moyenne et grande portée ont été considérés en proposant à chaque fois des variantes originales vis-à-vis d'une solution traditionnelle de dimensionnement. 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. Ces différents types d'ouvrages sont ceux considérés dans le projet SBRI, dimensionnés selon les parties communes des Eurocodes (non prise en compte d'annexes nationales). Une analyse multicritère est par ailleurs proposée en fin de chapitre pour déterminer un classement des différentes solutions de construction lorsque plusieurs critères sont considérés. Il convient de noter que les comparaisons montrées dans cette thèse n'ont pas pour objectif d'être utilisées par le lecteur comme éléments décisionnels dans d'autres études non liées à cette thèse. En effet, la famille d'ouvrages des ponts mixtes est utilisée à titre d'illustration des concepts méthodologiques proposés. Les hypothèses associées à chaque cas d'étude ne permettent donc pas de généraliser les conclusions liées aux différentes comparaisons.
- L'objectif du chapitre 4 est de conduire une analyse performantielle pour estimer le niveau de performance des différents éléments d'un pont mixte acier-béton allant des fondations/appuis jusqu'à l'ossature métallique et la dalle. Il met par ailleurs en place une procédure d'optimisation qui utilise l'analyse performantielle pour déterminer les stratégies de maintenance optimales vis-à-vis des critères de développement durable (coût du cycle de vie, impacts environnementaux, coûts aux usagers).

Cette thèse conclut sur les apports de la recherche et ouvre quelques perspectives et développements à venir.

2 PRINCIPES DES DIFFÉRENTES APPROCHES DE CYCLE DE VIE

Pour être abordé de manière satisfaisante dans le domaine de la construction des ouvrages d'art, le concept de développement durable implique d'être traité sur l'ensemble du cycle de vie, en partant de l'expression des exigences du maître d'ouvrage et du développement du concept initial de construction, en passant par la conception et la construction, jusqu'à la mise en service, l'exploitation, les inspections, la maintenance, la réhabilitation et la fin de vie en service (démolition et recyclage des matériaux et éléments). Ce concept ne peut être uniquement abordé sous le seul angle technique ou environnemental, et de nombreux enjeux conflictuels doivent être analysés et contrebalancés.

Dans ce contexte, l'objectif de ce chapitre est de rappeler les notions liées à l'analyse de cycle de vie en présentant les composantes économiques, environnementales, et sociétales de ce type d'analyse, qui peuvent être utilisées lors du processus de décision lorsque les composantes considérées représentent des intérêts conflictuels. A cet effet, le contexte normatif ainsi que des études récentes sont à chaque fois détaillés.

2.1 ANALYSE DES COÛTS DE CYCLE DE VIE

2.1.1 *Introduction*

L'Analyse des Coûts de Cycle de Vie (ACCV) d'une structure consiste à chiffrer tous les coûts rencontrés pendant sa durée en service. Dans le secteur de la construction, une telle analyse vise à proposer au maître d'ouvrage une méthode d'arbitrage pour prendre en compte toutes les charges futures associées aux différents choix d'investissement. L'ACCV doit être menée tant au niveau des différents composants de l'ouvrage qu'au niveau du système pour pouvoir fournir des informations sur l'ouvrage dans sa globalité.

Sachant qu'il existe différentes façons de distinguer les catégories de coûts pour chaque projet, les systèmes ou produits considérés (Woodward 1997), la normalisation occupe un rôle majeur puisqu'elle définit un cadre d'application et d'exigences en lien avec l'emploi des matériaux, produits et processus. En particulier, la normalisation s'étend au delà de la sphère strictement technique et aborde également le champ économique. La norme ISO 15686-5 (2008b) définit notamment deux concepts avec deux périmètres de coûts associés (FIGURE 2.1.1) :

- le coût global ("life-cycle cost") qui inclut l'ensemble des coûts supportés par le maître d'ouvrage et les utilisateurs,
- le coût global étendu ("whole life cost") qui comprend une liste plus large des coûts et bénéfices, incluant des aspects financiers et fiscaux, des éléments intangibles liés aux impacts de la construction sur l'image, la qualité d'usage, l'activité de l'organisation, ou encore des externalités, positives ou négatives, engendrées par le projet.

La norme ISO 15686-5 (2008b) préconise que l'ACCV soit considérée dès les études préalables de la réalisation d'un ouvrage. En effet, la plupart des coûts d'exploitation, de maintenance et de remplacement sont fortement impactés dès les premières étapes

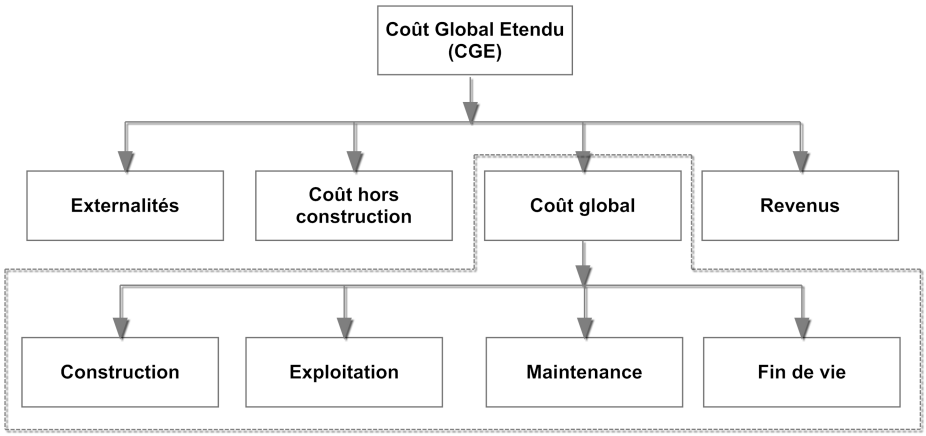


Figure 2.1.1: Périmètres du "Coût Global Etendu" et du "Coût Global" (ISO 15686-5 :2008).

du processus de conception et il est donc nécessaire d'envisager la démarche de coût global dès le choix de dimensionnement pour espérer pouvoir réduire de manière significative le coût total de cycle de vie (FIGURE 2.1.2).

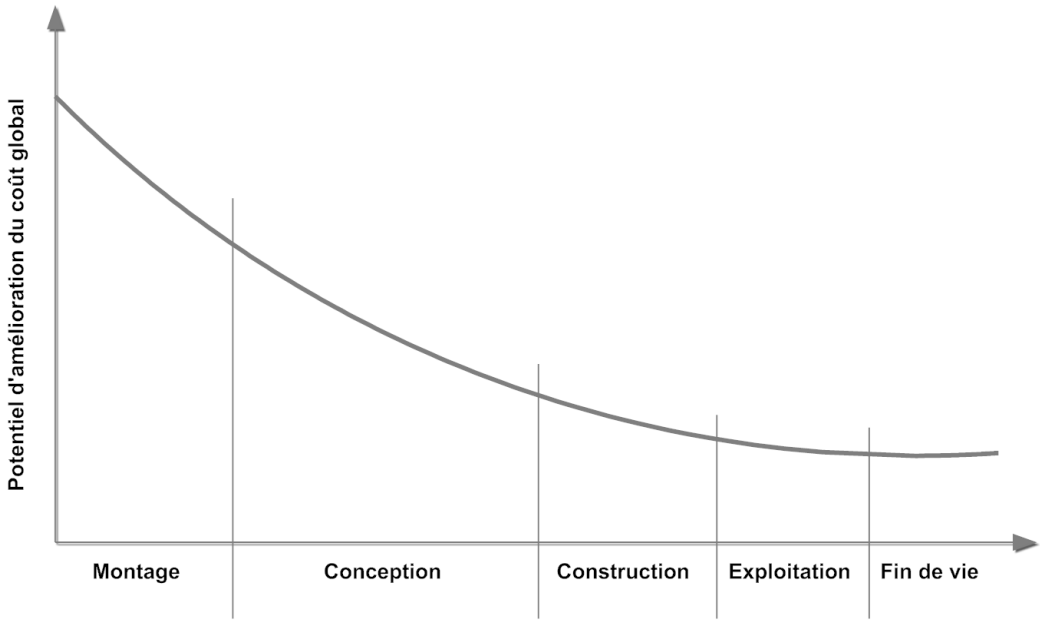


Figure 2.1.2: Possibilité d'amélioration du coût global en fonction de l'avancement du projet (ISO 15686-5 :2008b).

2.1.2 *Méthodologie*

En accord avec la norme ISO 15686-5 (2008b), le coût global comprend le coût de construction, d'exploitation, de maintenance et de fin de vie de l'ouvrage. La période d'analyse doit correspondre au cycle de vie complet de l'ouvrage, c'est à dire de sa réalisation à sa démolition. Pour chaque opération, ces coûts apparaissent à différents moments dans le cycle de vie de l'ouvrage et il n'est donc pas convenable de les comparer directement. Il existe plusieurs méthodes, dont certaines sont décrites ci-dessous, permettant de mettre au même plan le coût de ces différentes opérations :

- la détermination du délai de récupération ("payback approach"), qui calcule la période nécessaire pour rembourser l'investissement initial ;
- la méthode du coût annuel équivalent ("equivalent annual cost"), qui exprime le coût par année du coût global sur la durée de vie entière ;
- le taux de rentabilité interne ("internal rate of return"), qui est le taux d'actualisation pour lequel la valeur actuelle nette des coûts est égale à celle des bénéfices de l'investissement. Ozbay et al. (2004) recommandent l'utilisation de cette méthode dans des pays en développement où le taux d'actualisation est fortement incertain ;
- la méthode de la valeur actuelle nette ("net present value") qui applique un taux d'actualisation annuel aux différents coûts censés être rencontrés durant la durée de vie en service de l'ouvrage.

La méthode de la valeur actuelle nette mentionnée ci-dessus est l'une des méthodes les plus utilisées pour comparer des flux de trésorerie passés et futurs avec les flux actuels (Burley & Rigden 1997, Siemes et al. 1985, Troive 1999, Veshosky & Beidlenan 1992, Frangopol et al. 2001). Dans un projet de construction, les coûts de gestion (exploitation, maintenance) et de fin de vie, sont rencontrés à différents moments dans la vie en service de l'ouvrage.

La méthode de la valeur actuelle nette permet alors de ramener à une seule et même date (souvent l'année de construction de l'ouvrage) l'ensemble des coûts en appliquant un taux d'actualisation qui peut être interprété comme un taux de substitution entre le futur et le présent. La valeur actuelle nette du coût au gestionnaire peut être calculée de la façon suivante :

$$C_{gestionnaire} = C_{cons} + \sum_{i=1}^{N} \frac{C_{a,i}(t_i)}{(1+r)^{t_i}} + \frac{C_{fin}}{(1+r)^{T_f}} \tag{2.1.1}$$

où $C_{gestionnaire}$ = coût au gestionnaire sur le cycle de vie, exprimé en valeur actuelle nette, t_i = moment où l'action a_i est considérée, r = taux d'actualisation monétaire, C_{cons} = coût de construction, $C_{a,i}(t_i)$ = coût associé à l'action a_i à la date t_i, C_{fin} = coût de fin de vie, et T_f = fin de vie en service de l'ouvrage.

Afin d'illustrer la notion de taux d'actualisation qui correspond à l'évolution d'une unité monétaire dans le temps, différents taux sont considérés dans FIGURE 2.1.3. Une forte baisse du coût actualisé dans le temps est observée pour des valeurs élevées du taux d'actualisation. En outre, le choix de r = 6% ou 8% conduit à une valeur monétaire proche de zéro après soixante ans.

Ce taux varie en fait suivant les organisations. Dans le secteur privé, il représente le coût d'opportunité de l'investissement du capital. Selon la norme ISO 15686-5 (2008b), il peut être estimé à partir :

- du coût de financement contracté pour l'investissement,
- du taux de rémunération de la trésorerie,
- du taux de rentabilité du cœur de métier,
- du taux de rentabilité exigé pour un investissement jugé comme risqué.

Dans le secteur public, le taux d'actualisation est généralement établi par les autorités gouvernementales de tutelle. La norme distingue deux types de taux d'actualisation :

- le taux réel d'actualisation qui est un "facteur ou taux utilisé pour ramener une valeur future à sa valeur présente, sans tenir compte du taux d'inflation générale ou spécifique dans le coût d'un bien particulier", c'est-à-dire un taux différentiel qui prend déjà en compte l'inflation. Dans cette hypothèse, tous les coûts différés supportent le même taux d'inflation ;

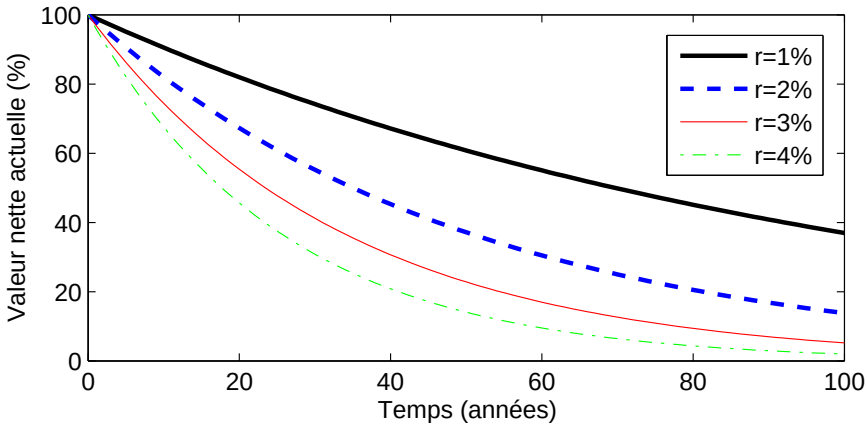


Figure 2.1.3: Evolution de la valeur nette actuelle pour différentes valeurs du taux d'actualisation r.

– le taux nominal d'actualisation qui est un "facteur ou taux utilisé pour ramener une valeur future à sa valeur présente, en tenant compte du taux d'inflation/déflation générale", c'est-à-dire un taux brut auquel il faudra appliquer des scénarios d'inflation.

La norme ISO 15686-5 (2008b) suggère d'appliquer un taux réel d'actualisation compris entre 0 et 4%. Crémona (2011) précise que des taux d'actualisation autour de 5% sont généralement considérés comme trop élevés pour comparer des coûts sur une longue période, et qu'un taux d'actualisation annuel proche de 2% ou 3% est généralement considéré comme mieux à le rendre applicable une ACCV.

Comme le montre la FIGURE 2.1.3, le choix de la valeur du taux d'actualisation est crucial puisque la valeur actuelle est très sensible à ce paramètre. En effet, plus le taux d'actualisation est grand, plus les coûts futurs sont faibles et plus le poids des actions menées dans un futur proche sera élevé. Le choix d'un taux d'actualisation élevé peut alors promouvoir des stratégies de gestion avec des faibles coûts initiaux mais des coûts de fin de vie élevés. Il est noté qu'un taux d'actualisation nul (0%) a déjà été considéré au Japon pour certains projets (Cremona 2011). De manière générale, le choix du taux d'actualisation est délicat et doit être en accord avec l'horizon dans le temps de l'étude (appelé horizon d'intervention).

2.1.3 *Analyses récentes sur le coût de cycle de vie*

Dans le cas particulier des ouvrages d'art, plusieurs études sont consacrées dans la littérature à l'ACCV des structures. Ces études, dont certaines sont détaillées ci-après témoignent d'un intérêt important de la communauté scientifique et technique vis-à-vis de la question de la prise en compte de l'intégralité des phases de cycle de vie d'une structure pour mener des analyses économiques.

Dès 1976, White & Ostwald définissent le coût du cycle de vie d'un produit comme la somme de tous les dépenses depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie utile. Selon Woodward (1997), le coût total de cycle de vie, lorsqu'il intègre le coût aux usagers peut être plus grand, voire plusieurs fois égal au coût initial d'un produit. En dépit de l'importance du coût total de cycle de vie, il est noté que le coût initial est souvent utilisé comme le critère majeur pour orienter le choix d'investissement. Dans la pratique, l'adoption des coûts de cycle de vie comme critères de décision a été relati-

vement lente ces dernières années (Lindholm & Suomala 2007, Woodward 1997). De manière concrète, Hyvönen (2003) montre que seulement 5% des grandes entreprises industrielles en Finlande utilisaient en 2003 le coût de cycle de vie comme critère de décision en comparaison des 66% d'entreprises dans le secteur de la construction en Suède (Sterner 2000). Aux Etats-Unis, seulement 40% des autorités américains utilisaient à la fin des années 90 le coût de cycle de vie pour évaluer des projets de construction (Ardit & Messiha 1999). Ceci était expliqué à cette époque par le manque de normes et de données fiables sans lesquelles la tâche de réalisation d'une étude économique de cycle de vie devient très difficile, voire impossible (Ardit et Messiha 1999).

De nombreux chercheurs et praticiens (Estes & Frangopol 1999, Vorster et al. 1991, Markow et al. 1993) ont par ailleurs proposé différentes stratégies de maintenance optimales pour des éléments structuraux de l'ouvrage. En particulier, Ferry & Flanagan (1991) ont montré que l'ACCV peut être utilisée comme un outil de gestion tout au long de la durée de vie de la structure (en ce qui concerne les inspections, la maintenance, la réhabilitation et la démolition) pour comparer différentes variantes.

Parmi ces études, certaines comparent dès le début des années 90 différentes variantes de conception. Leeming (1993) propose par exemple une comparaison entre le coût du cycle de vie d'un pont dalle de béton et celui d'un pont mixte acier/béton. Haensel (1998) compare également des ouvrages mixtes acier-béton avec des ouvrages en béton/béton précontraint. Des différences importantes sont notées en cas de remplacement de la dalle de béton, car l'ensemble de la structure doit être remplacé dans le cas d'un ouvrage en béton contrairement au cas d'un ouvrage mixte. De façon similaire, Henriksen et al. (1996) analysent l'impact économique sur le coût de cycle de vie de différentes solutions de protection des armatures du béton armé dans le cas de la construction du pont de l'Öresund entre la Suède et le Danemark, certaines utilisant des armatures en aciers inoxydables à la place d'armatures traditionnelles. Itoh & Kitagawa (2003) appliquent l'ACCV pour des ponts métalliques en comparant un pont "classique" avec sept poutres longitudinales et un pont "modifié" avec seulement trois poutres, une dalle en béton précontraint étant nécessaire pour le pont "modifié" pour mettre au profit la participation structurelle de la dalle. Les conclusions sont que le pont "modifié" nécessite un coût de cycle de vie plus faible, principalement dû au fait que le tablier en béton précontraint nécessite moins d'entretien que celui en béton armé. Plus récemment, Jutila & Sundquist (2007) et Yunovich et al. (2003) étudient l'impact de la fréquence et du coût de changement de la couche de peinture anticorrosion. Cette maintenance majeure, qui comprend généralement la préparation de la surface, le coût d'achat de la peinture et sa mise en place, peut impacter le coût total de cycle de vie de manière significative dans le cas des ouvrages mixtes acier-béton. De manière similaire, Gervasio & Da Silva (2008) comparent deux options de type de construction (un pont en béton précontraint et un pont mixte acier-béton) et arrivent à la conclusion que la variante en béton est moins chère que la variante mixte.

Les études mentionnées ci-dessus permettent finalement de montrer l'importance de la prise en compte du cycle de vie total des ouvrages lorsque des comparaisons économiques de plusieurs solutions constructives sont effectuées. L'intérêt de ce type de méthodologie dans un processus de décision représente donc un enjeu important.

2.2 ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DE CYCLE DE VIE

2.2.1 *Introduction*

L'analyse environnementale de cycle de vie (notée Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans la suite de ce mémoire) est une technique qui consiste à évaluer les impacts environnementaux d'un produit (bien ou service) tout au long de son cycle de vie. Le cycle de vie comprend toutes les étapes depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la démolition (la fin de la durée de vie), y compris l'extraction et la transformation des matières premières, la fabrication, la distribution, l'utilisation, la réutilisation, la maintenance, le recyclage et la fin de vie (du berceau à la tombe comme mentionné dans l'introduction) (SETAC 1993). Guinée (2010) montre que la prise en compte des critères environnementaux s'est déroulée en plusieurs périodes :

- 1960 - 1990 : cette période correspond au début de la prise en compte des analyses environnementale avec plusieurs méthodes et approches pour mener une telle étude. En effet, les premières ACV ont eu lieu entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 avec des analyses concernant la consommation des ressources énergétiques, puis de plus en plus avec la considération d'impacts tels que l'épuisement des ressources, les différents types d'émissions et la génération de déchets. Cette période témoigne également de la divergence des approches, des terminologies et des résultats obtenus du fait du manque de discussion et de concertation scientifique au niveau international et de plate-formes communes pour réaliser des ACV ;
- 1990 - 2000 : les années 1990 voient la naissance des normes permettant de normaliser l'ACV. Une croissance remarquable concernant les activités scientifiques et la coordination dans le monde entier est observée durant cette période avec la création d'organisations telles que la Society of Environmental Toxicology and Chemistry - Société de toxicologie et chimie de l'environnement (SETAC) et de divers groupes de travail ayant permis d'aboutir à la production de guides et manuels en lien avec l'ACV. Suite à la démarche de la SETAC, l'International Organization for Standardization (ISO) a pris part à la démarche de normalisation de l'ACV à partir de 1994. Alors que la SETAC se concentrait sur le développement et l'harmonisation des méthodes par le biais de groupes de travail, l'ISO a adopté une démarche plus formelle de standardisation des méthodes et procédures ;
- 2000 - présent : depuis le début des années 2000, on assiste à une croissance continue de la demande de prise en compte des ACV lors de la réalisation d'un projet. En effet, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et la SETAC ont lancé en 2002 un partenariat international sur le thème du cycle de vie avec pour objectif de mettre en pratique la notion de cycle de vie et d'améliorer les outils, les bases de données et les indicateurs. Cette prise en compte des impacts environnementaux sur le cycle de vie au travers des ACV a été effective au niveau mondial avec notamment la promotion du recours à l'ACV par l'EPA [1] (agence de protection de l'environnement) aux Etats-Unis.

De nombreux forums et conférences permettent aujourd'hui aux chercheurs et praticiens d'échanger sur le thème de l'ACV et notamment sur les questions des données à utiliser pour l'inventaire du cycle de vie, des méthodes à adopter pour la construction des bâtiments et infrastructures, des indicateurs à utiliser pendant la vie en service et

1. Environmental Protection Agency

des concepts à introduire pour aborder la fin de vie des ouvrages, avec la valorisation des déchets. L'"International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction" organisé en France en 2012 (Ventura 2012, Ventura et al. 2012) et l'"International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering" organisé à Vienne en 2012 (Strauss et al. 2012) sont deux évènements récents qui témoignent du dynamisme des communautés scientifiques et techniques sur le thème de l'ACV. Il est également noté que le thème de l'analyse de cycle de vie des ponts et la prise en compte de l'impact sur le développement durable ont été abordés lors de l'"International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management" (Biondini & Frangopol 2012), organisée en Italie en 2012 (Maier et al. 2012, Gervasio et al. 2012).

2.2.2 *Méthodologie*

La série de normes ISO 14040 à 14044, qui ont été publiées en 1997-2000 et dont deux ont été remplacées en 2006 (ISO 14040 et 14044), ont pour but de mettre en place des concepts et méthodes permettant de mener une ACV. En particulier, la norme ISO 14040 (2006a) préconise quatre étapes pour réaliser une étude environnementale (FIGURE 2.2.1) : (i) la définition des objectifs et du champs de l'étude, (ii) l'établissement des inventaires de cycle de vie, (iii) l'évaluation des impacts et finalement (iv) l'interprétation des résultats.

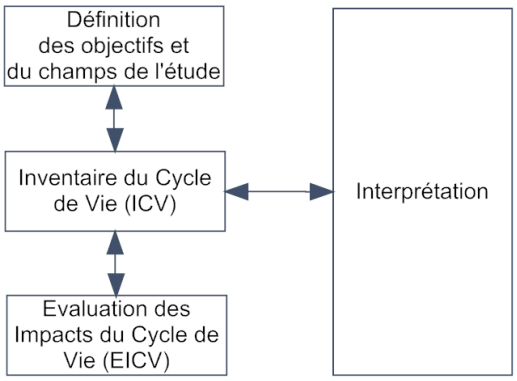


Figure 2.2.1: Etapes incluses dans une analyse environnementale (ISO 14040 : 2006a).

Depuis, de nombreuse normes telles que les normes ISO 15392 (2008a), 21930 (2007), 21931 (2010) ont été publiées pour proposer des plates-formes communes pour réaliser une ACV dans le secteur de la construction.

La norme NF P 01-010 (2004) "Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction", publiée en décembre 2004, porte sur le contenu de la déclaration des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction à travers des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (selon la norme NF P01-010) (FDES), et à cette fin précise les informations pertinentes, nécessaires et suffisantes. Elle établit les règles permettant de les délivrer et de les lire. Elle repose entre autres sur l'ISO/TR 14025, les normes ISO 14040, ISO 14041 et les principes de la norme NF EN ISO 14020 (étiquettes et déclarations environnementales).

Cette norme est la révision et le regroupement de deux normes expérimentales :

- la norme XP P 01-010-1 : "Qualité environnementale des produits de construction - Information sur les caractéristiques environnementales des produits de construction – Partie 1 : méthodologie et modèle de déclaration de données" qui portait

sur le contenu de l'information sur les caractéristiques environnementales des produits de construction,
- la norme XP P 01-010-2 : "Qualité environnementale des produits de construction - Information sur les caractéristiques environnementales des produits de construction– Partie 2 : cadre d'exploitation des caractéristiques environnementales pour application à un ouvrage donné".

2.2.2.1 *Définition des objectifs et du champ de l'étude*

C'est la première étape de l'ACV qui détaille les objectifs de l'étude, ses hypothèses et ses limites. Cette partie fondamentale décrit le schéma global de l'analyse.

OBJECTIF DE L'ÉTUDE L'importance de cette étape est de savoir précisément quelles sont les attentes pour l'étude. Un objectif de l'ACV peut être par exemple la comparaison environnementale de deux produits, services, procédés différents ou la détermination des étapes du cycle de vie qui contribuent le plus à certains impacts.

FRONTIÈRES DE L'ÉTUDE Cette étape doit fournir le contexte dans lequel l'étude est faite, y compris les limites du système, les besoins de données et les hypothèses qui doivent être prises en compte. Le modèle et la configuration du processus sont définis dans cette étape avec une description détaillée du produit étudié, y compris les procédés, matériaux ou produits nécessaires. Normalement, l'analyse exclut les stades, procédés ou matériaux qui ne sont pas significatifs pour le résultat final ou pour lesquels les données ne sont pas suffisamment précises. Tous ces facteurs conditionnent la précision des résultats et doivent être pris en compte dans la phase d'interprétation.

UNITÉ FONCTIONNELLE C'est l'unité de l'ensemble du système, à laquelle les données pour des flux d'entrée et de sortie devraient correspondre. L'unité fonctionnelle va permettre de comparer différentes ACV. Le niveau de précision de l'unité fonctionnelle dépend de l'objectif de l'étude :
- si l'analyse est très spécifique, l'unité fonctionnelle doit être également très précise ;
- si les résultats sont à comparer avec d'autres études, plus générales, la définition de l'unité fonctionnelle doit être suffisamment vague.

2.2.2.2 *Inventaire du cycle de vie (ICV)*

Il s'agit de la phase la plus complexe de l'ACV où les inventaires du cycle de vie sont définis en quantifiant les matériaux et les flux d'énergie inclus pendant la durée de vie d'un produit ou d'un système. Afin d'identifier et de quantifier ces flux d'inventaire, chaque processus principal du produit ou du système doit être subdivisé jusqu'à des processus unitaires en tenant compte des limites du système établies dans l'étape précédente. Il existe de nombreuses bases de données où les données nécessaires pour calculer les flux de sortie peuvent être trouvées. Ayant une grande influence sur la qualité des résultats, il est donc important de choisir une source de données appropriée pour construire des Inventaire du Cycle de Vie (ICV).

Ainsi, il est également possible de recueillir des données directement à partir des enquêtes sur place, dans les usines par exemple. Cette source de données peut fournir des informations très précises et exactes. Certaines entreprises construisent leurs

propres bases de données d'inventaire et définissent leurs propres valeurs ou paramètres. Ces valeurs peuvent changer en raison des variations dans les mesures, les types de matériaux impliqués, etc. En France, la base INIES met gratuitement à la disposition de tous plus de 780 FDES renseignées par les industriels volontaires. Ces déclarations objectives, qualitatives et quantitatives, délivrées selon un format standardisé sont destinées à aider les maîtres d'ouvrages, les concepteurs et les entreprises du bâtiment à évaluer la qualité environnementale de leurs projets de construction. Une étude comparative de deux versions "simplifié" et "complète" de certaines fiches menée par Lasvaux (2012) a montré que l'écart est relativement faible pour certaines catégories d'impact. Globalement, cette étude a permis d'identifier le potentiel d'amélioration pour ces fiches. Pourtant, il manque encore des données environnementales adaptées à l'évaluation des ouvrages de génie civil dans cette base. Pour cette raison, l'Association Française de Génie Civil (AFGC) a initié un groupe de travail sur les Données d'Impact pour les Ouvrages de GENie civil (DIOGEN) en 2010 (Tardivel 2012, Habert et al. 2011). Ce groupe de travail a notamment pour but de recenser et d'examiner les données existantes et de construire une base de données intégrant des processus de matériaux de type berceau jusqu'à la porte (depuis la fabrication jusqu'au départ de l'usine). Une telle base de données devrait permettre aux praticiens de réaliser rapidement une ACV pour des ouvrages de génie civil construits en France.

De la même manière, le projet européen FEDER[2] Techniques Routières Adaptées au Changement Climatique (TRACC) étudie les chantiers d'entretien des routes et vise à établir des processus adaptés pour pouvoir facilement réaliser des ACV liées à l'entretien des chaussées (Liffraud 2011).

2.2.2.3 *Evaluation des impacts*

Dans cette étape, les impacts environnementaux potentiels sont estimés et classés, caractérisés, normalisés et pondérés pour être interprétés dans la dernière étape de l'ACV (papragraphe 2.2.2.4). Les résultats obtenus lors de l'étape précédente sont analysés en déterminant chaque sous-processus pour les catégories d'impacts définies dans la première étape (paragraphe 2.2.2.1). Les résultats sont regroupés par catégories d'impact.

La méthodologie utilisée dans la phase d'évaluation de l'impact d'une ACV n'est pas encore bien définie dans les normes. En effet, il existe différentes méthodes disponibles qui calculent différentes catégories d'impact, telles que CML 2001, Eco-indicator 99, EDIP 2003, ReCiPe, CED, etc. (SimaPro 2007). En particulier, les catégories d'impact considérées dans cette thèse sont détaillées dans le TABLEAU 2.2.1 (ces différentes catégories d'impact sont décrites dans l'Annexe C) et quantifiées à l'aide du logiciel SimaPro (2007) qui utilise la base de données EcoInvent.

2.2.2.4 *Phase d'interprétation*

Dans la phase d'interprétation, tous les résultats obtenus à partir de l'inventaire et des phases d'évaluation de l'impact de l'ACV sont évalués afin d'obtenir une conclusion définitive. Dans cette phase, les aspects importants du cycle de vie peuvent être identifiés ou certaines activités peuvent être ajustées si nécessaire. Toutes les étapes font partie d'un processus itératif qui apporte des améliorations à l'ACV.

2. Fonds Européen de Développement Régional

	Catégorie d'impact	Unité
I1	Consommation des ressources énergétiques	MJ
I2	Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques	kg Sb eq.
I3	Déchets non radioactifs	kg
I4	Déchets radioactifs	kg
I5	Consommation d'eau totale	l
I6	Potentiel de changement climatique	kg CO_2 eq.
I7	Potentiel d'acidification atmosphérique	kg SO_2 eq.
I8	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg $CFC-11$ eq.
I9	Potentiel de formation de l'ozone troposphérique	kg C_2H_2
I10	Potentiel d'eutrophisation	kg PO_4^{-3}
I11	Potentiel de toxicité humaine	kg $1,4-DB$ eq.
I12	Potentiel d'écotoxicité	kg $1,4-DB$ eq.

Tableau 2.2.1: Catégories d'impact considérées dans l'analyse environnementale de cycle de vie.

L'interprétation doit être conforme à l'étape de définition des objectifs et du champ de l'étude. La phase d'interprétation peut également inclure des recommandations pour des analyses ou des recherches. Des études complémentaires peuvent par exemple être menées telles que l'étude de sensibilité, l'étude des incertitudes, etc.

Enfin, l'ACV gagne en pertinence si elle intègre d'autres critères, en plus de ceux liés à des questions environnementales, dans le processus de décision. Ces critères pouvant être de nature économique, sociétale, politique, etc.

2.2.3 *Analyses récentes sur l'ACV*

De nombreuses études ont été menées ces dernières années en lien avec l'ACV (Guinée et al. 2010, Guinée 2012). Quelques unes de ces études appliquées au secteur de la construction, et plus particulièrement des ouvrages d'art, sont détaillées ci-après.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Ce type de recherche considère un ouvrage particulier sur son cycle de vie et analyse l'impact de chacune des étapes de la vie en service, depuis la construction jusqu'à la démolition.

Steele et al. (2002) analysent par exemple un pont en voûte en briques pendant une durée de vie en service de 120 ans. A la fin de sa durée en service, le renforcement et la réparation du pont sont envisagés afin d'éviter une démolition. Cette étude montre que les impacts environnementaux causés durant la phase de construction du pont représentent une part plus importante vis-à-vis des impacts totaux de cycle de vie que celle due aux opérations de maintenance. Il est noté que la congestion du trafic

pendant la phase de renforcement et de réparation a une grande influence sur le résultat final.

De la même manière, le guide T87 (2010) propose une ACV d'un pont en béton précontraint sur l'ensemble de sa durée de vie en service de 100 ans. Tout en ne prenant pas en compte les impacts dus au trafic, les résultats montrent que la fabrication des matériaux correspond à la part la plus importante des impacts environnementaux (entre 31% et 59% des émissions totales), la phase d'exploitation avec la surveillance, l'entretien et la réparation représentant la deuxième part la plus importante vis-à-vis des émissions.

Similairement, Bouhaya et al. (2009) étudient trois scénarios de fin de vie pour un pont mixte Bois-Béton Fibré à Ultra-hautes Performances (BFUP) vis-à-vis de la consommation des ressources énergétiques et des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Ces trois scénarios diffèrent uniquement par le scénario de fin de vie des poutres en bois qui consiste à (i) mettre en décharge, (ii) brûler ou (iii) réutiliser les poutres en bois. La fabrication des matériaux, le transport, la construction, les actions de maintenance et la fin de vie étant considérés dans l'étude, les conclusions sont que la fabrication des matériaux représente une part majeure de la consommation des ressources énergétiques, et que les scénarios de fin de vie peuvent impacter certains indicateurs, notamment les GES, étant donné que les trois scénarios de fin de vie vont rejeter de manière différente le CO2 stocké par le bois durant la phase de croissance de l'arbre.

San Martin (2011) évalue par ailleurs le cycle de vie d'un pont ferroviaire en arc en acier avec un tablier en béton précontraint. Là encore, les résultats montrent que le principal contributeur aux impacts environnementaux est durant la phase de fabrication des matériaux de construction, ce qui représente 64% des résultats totaux, la production du béton et de l'acier représentant la plus grande partie des impacts globaux, suivis par la production du bois.

L'action COST C25 (Landolfo 2012) peut finalement être citée pour des travaux mettant au point une approche intégrale qui combine des critères économiques et environnementaux pour la construction de manière générale.

Parmi ces études, ayant des contextes différentes et des hypothèses d'étude propres à chaque cas, des conclusions similaires sont observées. En particulier, la production des matériaux est généralement la phase du cycle de vie la plus impactante sur le plan environnemental. Par ailleurs, la localisation du site et donc l'impact sur les distances de transport des différentes matériaux, ainsi que la perturbation du trafic durant les phases de construction et de maintenance sont des facteurs extrêmement importants.

ETUDE COMPARATIVE D'OUVRAGES D'ART

Outre l'étude du cycle de vie d'un ouvrage en particulier, certains travaux utilisent l'ACV comme base de comparaison de différents types de matériaux et méthodes de construction afin de promouvoir un type de pont, de matériau, etc.

En particulier, Collings (2006) effectue une étude comparative de trois types de ponts : un pont à poutres, un pont à haubans et un pont en arc. Différents matériaux sont considérés pour le tablier du pont : un tablier en acier, en béton et un tablier mixte acier-béton. Les principales conclusions sont que les ponts en béton génèrent moins de CO_2 et nécessitent moins de ressources énergétiques, les ponts haubans et en arc générant plus d'impacts environnementaux car ayant besoin de plus de matériaux durant leur construction qui est également plus complexe.

Quelques études proposent des comparaisons entre un pont mixte acier-béton et un pont en béton armé ou en béton précontraint. Horvath & Hendrickson (1998) pro-

posent ainsi une ACV pour comparer un ouvrage en acier avec un ouvrage en béton armé. Cette étude conclut que l'ouvrage en béton génère moins d'impacts environnementaux mais que le recyclage de la charpente métallique est cependant un atout pour l'ouvrage en acier. Toutefois, le changement de la protection anticorrosion pour l'ouvrage en acier influence considérablement les impacts totaux. Martin (2004) effectue également une ACV pour comparer un tablier mixte acier-béton et un tablier en béton précontraint. Les critères de comparaison sont la consommation des ressources énergétiques et les émissions de GES. Les conclusions sont que la variante avec le tablier mixte acier-béton consomme plus de ressources énergétiques et génère plus de GES que celle avec le tablier en béton précontraint. Plus récemment, Gervasio & Da Silva (2008) proposent une comparaison entre un pont mixte acier-béton et un pont en béton précontraint. Six catégories d'impacts sont considérées : les émissions de GES, l'acidification, l'eutrophisation, les polluants atmosphériques, la formation d'ozone troposphérique et la consommation d'eau. Ces catégories sont normalisées en utilisant des émissions totales aux Etats-Unis par habitant et par an. A l'inverse des études précédemment mentionnées, les principales conclusions sont que l'ouvrage mixte est plus avantageux vis-à-vis des impacts sur l'environnement dans l'ensemble des résultats.

Lounis et al. (2010) utilisent une ACV pour comparer une dalle en béton à hautes performances et une dalle en béton conventionnel. Les impacts environnementaux, en termes d'émissions de GES et de production de déchets sont estimés durant le cycle de vie des deux alternatives. Les différences constatées concernent les émissions de CO_2 dues à la production de ciment, la dalle en béton de haute performance générant environ trois fois moins d'émissions que la dalle en béton classique. Par ailleurs, la durée de vie plus courte de la dalle avec un béton normal conduit à une augmentation des perturbations du trafic occasionnées lors du remplacement de la dalle.

Zhang et al. (2012) étudient l'impact environnemental de deux alternatives pour remplacer le tablier d'un pont avec un système en matériau composite (Fiber reinforced polymer - FRP) et un système en béton précontraint. Trois sources d'émission de CO_2 sont considérées : la production des matériaux, le transport et la perturbation du trafic. Pour une durée de vie en service de 120 ans, l'option en béton précontraint apparaît globalement plus intéressante d'un point de vue environnemental. En effet, même si les émissions dues au matériau composite sont plus faibles au stade de la construction, le tablier en matériau composite est moins avantageux lors de l'entretien. Par ailleurs, les émissions durant la phase de démolition sont très faibles en comparaison des autres phases. L'impact des éléments non structurels (couche de roulement, étanchéité) et ceux dus au transport des matériaux à partir des sites de fabrication et vers des sites de décharge sont également importants. Des améliorations dans la fabrication de béton FRP pourraient conduire à diminuer les impacts dans le futur.

En ce qui concerne la comparaison de variantes métalliques, Widman (1998) mène une analyse sur deux types de ponts : un pont métallique en caisson et un pont mixte à poutres. Il est noté que dans la phase de construction, le CO_2 est généré principalement par le béton et l'acier (surtout pour le béton avec plus de 50% des émissions totales). Par ailleurs, les émissions dues au trafic pendant la phase d'exploitation sont prépondérantes dans le bilan des émissions totales. Le pont en caisson apparaît dans cette étude comme le meilleur choix vis-à-vis de l'aspect environnemental par rapport au pont mixte à poutres, étant donné la quantité supplémentaire de béton nécessaire pour la variante avec poutres. Comme précédemment mentionné dans le paragraphe 2.1, Itoh et Kitagawa (2003) appliquent une ACV pour comparer deux ponts métal-

liques : un pont "classique" avec sept poutres longitudinales et un pont "modifié" avec seulement trois poutres et une dalle en béton précontraint. Les deux ponts sont comparés vis-à-vis des émissions de CO_2 dans le cycle de vie. Les résultats montrent que le pont "modifié" génère moins d'émissions de CO_2, principalement dû au fait que le tablier en béton précontraint nécessite moins d'entretien que celui en béton armé. Il est noté que les éléments principalement responsables des émissions de CO_2 sont les poutres en acier, la dalle et la couche de roulement. La dalle en béton précontraint nécessite une quantité de béton plus important que celle en béton armé, ce qui génère donc plus de CO_2 durant la phase de construction. Cependant, la variante en béton précontraint avec une durée en service (120 ans) supérieure à celle du béton armé (100 ans), devient plus intéressante sur le cycle de vie.

Hammervold et al. (2011) présentent une comparaison détaillée de trois ponts en Norvège. L'analyse compare un pont en caisson métallique, un pont en caisson en béton, et un pont en arc en bois. La production des matériaux, le transport, la construction, l'exploitation (hormis les perturbations du trafic), l'entretien, la réparation et la fin de vie sont considérés. Les trois principales catégories d'impact étant le changement climatique, l'épuisement des ressources naturelles et l'acidification, cette étude montre que le pont en béton est globalement plus avantageux que les deux autres vis-à-vis des critères considérés, sauf pour l'indicateur sur le changement climatique pour lequel le pont de bois est le plus intéressant.

Habert et al. (2012) analysent l'impact d'une augmentation de la résistance mécanique du béton sur l'impact environnemental global. Si l'impact environnemental pour 1 m^3 de béton est augmenté du fait de la quantité de ciment supplémentaire nécessaire, les réductions de béton sur l'ouvrage dans sa globalité peuvent rendre ce type de choix plus intéressant que celui d'un béton ordinaire, ce qui est montré en comparant deux variante de dimensionnement et en appliquant l'ACV selon la norme ISO 14040.

Dans ces études particulières, il a été observé que les projets d'ouvrages en béton génère souvent des impacts plus faibles que les projets d'ouvrages en acier. Cependant, les ponts en béton nécessitent généralement plus de quantité de matériaux et que l'acier est également plus facilement recyclable. Dans ce contexte, la comparaison entre les deux matériaux ne peut pas être effectuée de manière générale et les conclusions dépendent fortement de chaque cas rencontré. Pourtant, ces études confirment l'importance de l'amélioration de la conception utilisant ces deux matériaux, étant donné leurs impacts environnementaux significatifs et le fait que ces matériaux soient les plus utilisés dans le secteur de la construction des ouvrages d'art. La construction des structures complexes (pont en arc, à haubans, etc.) génère souvent plus d'impacts environnementaux du fait des méthodes de construction plus complexes et des types de matériaux utilisés pendant la construction.

ETUDE DES ÉLÉMENTS D'UN OUVRAGE

Certaines études choisissent de se focaliser sur un élément particulier d'un ouvrage. Le projet COMBRI (2007) étudie notamment des ponts mixtes bi-poutre acier-béton. Il porte spécifiquement sur les vérifications des ouvrages mixtes acier-béton aux Eurocodes. Ce projet met l'accent sur l'utilisation des poutres hybrides en comparant la conception de caissons en acier normal S355 avec celle utilisant des aciers hybrides S460 et S690 qui permet d'économiser une quantité de matériaux d'environ 10% en travée et 25% aux appuis. Keoleian et al. (2008) présentent par ailleurs une ACV pour comparer deux types de joints de chaussées : un type "classique" et un autre en "com-

posite cimenté", qui est supposé avoir une durée de vie en service deux fois plus grande. La construction du pont initial est similaire pour les deux alternatives tandis que trois options de reconstruction sont considérées : le remplacement du tablier, le resurfaçage, la réparation/maintenance (des fissures, des orniérages). La perturbation du trafic au cours de ces activités est également considérée. Les conclusions sont que les joints de chaussées en "composite cimenté" génèrent des impacts environnementaux nettement plus faibles, principalement en raison d'un entretien nécessaire plus faible, la perturbation du trafic liée à la construction et la réparation générant des impacts environnementaux importants. Eriksen (2009) compare par ailleurs deux systèmes de culée de pont dans une ACV : un pont en béton de deux travées avec des culées classiques et un pont mixte acier-béton avec des culées intégrales (cf. paragraphe 3.2.2). La durée de service pour les deux ponts est de 120 ans et les catégories d'impacts concernent la santé humaine, la qualité de l'écosystème et la consommation des ressources naturelles. La méthode d'Eco-indicateur se basant sur les données Ecoinvent et les données de l'institut international de fer et d'acier sont utilisées pour le calcul. En intégrant les phases du cycle de vie, y compris le recyclage de l'acier (80% avec un rendement de 95%) et la réutilisation du béton dans la phase de fin de vie, les conclusions montrent que le choix des culées intégrales permet de générer moins d'impacts environnementaux dans toutes les catégories d'impact (la phase de construction contribuant pour une grande part aux impacts environnementaux et le recyclage et la réutilisation des matériaux influençant également considérablement les résultats). Egalement, Thiebault (2010) propose une littérature de l'ACV pour les systèmes de transport avec pour objectif de développer un outil pour effectuer l'ACV des ponts ferroviaires. En particulier, il analyse un pont avec un système à ballast ou à voie fixe. Les résultats montrent que la variante avec la voie fixée génère moins d'impacts environnementaux. L'étape de la production des matériaux est l'étape majeure du cycle de vie et que la congestion du trafic associée à la maintenance de l'ouvrage influence fortement le résultat obtenu. De la même manière, Du & Karoumi (2012) compare un pont ferroviaire avec un système de ballast ou à voie fixée et conclut que la variante à voie fixée représente un meilleur choix par rapport à celle avec le système de ballast dû à l'étape de maintenance. Tremblay et al (2012) comparent la chaussé en béton et en enrobé dans le réseau routier au Québec et concluent que l'intérêt de ces deux systèmes change avec le nombre des poids lourds (plus ce nombre est grand, meilleur la chaussée en béton devient). Il faut en effet considérer tout le réseau routier pour identifier des places à appliquer chaque type de chaussée.

Les études mentionnées ci-dessus ont permis de mettre en pratique la capacité de l'ACV à quantifier les avantages de certains matériaux, de solutions nouvelles afin de justifier leur utilisation. Mais le secteur de la construction est constamment en développement avec de nombreuse applications innovantes, tant sur les matériaux que sur les processus de fabrication et de construction. Ainsi les comparaisons et conclusions peuvent fortement changer avec le temps et il apparaît primordial de mettre en avant les conditions propres à chaque cas d'étude, tant elles ont un poids important sur le résultat final.

Il n'en reste pas moins que la méthodologie de l'ACV représente un outil très puissant pour évaluer de manière objective les différents impacts sur l'environnement d'un type de procédé de fabrication dans un cas d'étude bien particulier.

En ce qui concerne le domaine de la construction des bâtiments, qui n'a pas été abordé dans ce paragraphe mais qui constitue néanmoins un cadre de développement majeur des techniques d'analyse de cycle de vie, l'approche de l'ACV a été activement

étudiée dans le début des années 90 (Cole 1998). Des discussions menées en parallèle sur la question du changement climatique ont confirmé le besoin de développer une approche d'ACV pour le domaine de la construction des bâtiments (Kohler 2012). Au niveau mondial (Peuportier et al. 2012), des travaux sur l'application de l'ACV au bâtiment ont été menés principalement au Canada, en Australie, en Nouvelle Zélande et aux USA (IEA 2004). Au niveau européen, le projet REGENER (Peuportier et al. 1997) a permis de proposer les grandes lignes d'une méthodologie commune pour l'application de l'ACV aux bâtiments. La plupart des outils, développés en Grande Bretagne, en Finlande, en Suisse ou encore en Autriche ont été comparés dans le cadre du réseau thématique PRESCO (Peuportier et al. 2005). Le projet ENSLIC Building a par ailleurs consisté à disséminer les résultats et à promouvoir l'ACV dans le secteur de la construction (Malmqvist et al. 2011). Finalement, l'action de coordination de la recherche LoRe-LCA (Low resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making) a permis de mieux cerner les limites des pratiques actuelles et de proposer des actions de recherche ultérieures (Peuportier et al. 2011, Chevalier & Peuportier 2012). Une norme (CEN 15978 2012) définit aujourd'hui une méthode et des indicateurs communs de manière à harmoniser l'application de l'ACV dans le domaine de la construction des bâtiments.

2.3 ANALYSE SOCIÉTALE - IMPACTS EXTERNES DUS À LA CONGESTION DU TRAFIC ROUTIER

2.3.1 *Introduction*

Comme précédemment mentionné, les impacts sociétaux du secteur de la construction se situent à de nombreuses échelles avec des impacts positifs sur le développement de secteurs essentiels comme le logement, la santé, l'éducation, et des impacts négatifs tels que la gêne aux usagers (augmentation du stress, sentiment d'insécurité) engendrée par les chantiers de construction et de maintenance, l'augmentation du nombre d'accidents, voire de décès sur les zones de chantier, etc. Dans le cadre de cette thèse, sont considérés comme impacts sociétaux les impacts dus à la congestion du trafic durant la vie en service de l'ouvrage. Ces impacts peuvent être en réalité perçus comme des externalités d'impacts économiques et environnementaux, mais ils sont cependant considérés dans une analyse propre dans le sens où la congestion du trafic et son impact sur la société sont des problématiques majeures pour un gestionnaire d'ouvrage. Par ailleurs, il sera supposé dans l'étude que la construction de l'ouvrage se situe sur un nouvel itinéraire (sans perturbation des usagers lors de la construction) et qu'un ouvrage de substitution est déjà construit lors de la démolition de l'ouvrage, donc sans gêne majeure également sur les usagers de l'itinéraire routier/autoroutier. Le terme analyse sociétale correspondra donc, par abus de langage, aux externalités liées à la gêne à l'usager uniquement durant la phase de vie en service (la gêne à l'usager étant nulle durant la phase de fabrication et de fin de vie).

En particulier, en lien avec les ouvrages d'art, il apparaît que les conditions de circulation au voisinage d'un ouvrage peuvent être fortement impactées par les différentes actions sur l'ouvrage, telles que les actions de maintenance/réhabilitation (dans le cas où des fermetures des voies ou la limitation de la vitesse de circulation sont nécessaires). Ces changements de condition de circulation entraînent des phénomènes de congestion ou de perturbation du trafic qui ont à la fois des impacts sur les usagers et sur l'environnement (Adey 2002, Adey et al. 2003). D'un point de vue économique

et même si ces impacts sont difficilement directement quantifiables, le coût aux usagers peut être très grand dans certains projets où le volume de trafic est très élevé. Thompson et al. (1999) observent que le coût aux usagers peut excéder jusqu'à cinq fois le coût au gestionnaire (cf. paragraphe 2.1). Seuls les impacts négatifs sont pris en compte dans ce chapitre et cette thèse.

2.3.2 *Phénomène de congestion du trafic*

Les impacts sociétaux dus à la congestion du trafic sont fortement liés au retard dans les zones de travaux. En théorie, le temps mis pour parcourir un tronçon de route correspond au cas où un conducteur peut atteindre la vitesse maximale de sécurité compatible avec les limites de vitesse applicables et les géométries de la route. Dans la réalité, la route est partagée entre l'ensemble des conducteurs, et le temps de parcours augmente avec le volume du trafic. Dans des conditions normales sans aucun obstacle et pour un faible volume de trafic, le retard est négligeable. Toutefois, quand le volume du trafic augmente et dépasse la capacité, ou lorsque des obstacles (tels que les zones de travaux) réduisent la capacité, le retard devient non négligeable et il faut considérer les impacts de la congestion sur les usagers.

Dans ce contexte, les deux paramètres les plus importants pour étudier la congestion de trafic sont la capacité et le volume du trafic :

- la capacité du trafic est définie comme le nombre maximal de véhicules pouvant être écoulé pendant un intervalle de temps de référence dans des conditions optimales de circulation : circulation continue, loin des échangeurs, faible déclivité, chaussée sèche, sans incident, ...
- le volume de trafic est le nombre de véhicules mesuré durant un intervalle de temps. Ce nombre change selon la période dans la journée ou dans l'année. Un exemple très remarquable en zone urbaine est que le volume de trafic est très conséquent pendant les heures de pointe le matin et l'après-midi tandis que peu de véhicules circulent pendant la nuit.

Dans le domaine de la gestion des ouvrages d'art, il est important de pouvoir estimer le retard des usagers engendré par les actions de maintenance/réhabilitation. Globalement, il existe deux types de modèle pour le faire : (i) un modèle déterministe qui est largement utilisé (Abraham & Wang 1981, Dudek & Richard 1982, Morales 1987, Schonfeld & Chien 1999) et (ii) un modèle considérant l'état de circulation proche de la zone de travaux comme des ondes de choc (Richards 1956, Wirasinghe 1978).

Le modèle déterministe est recommandé dans le manuel Highway Capacity Manual (HCM) (1994) pour étudier le phénomène de file d'attente dans la zone de travaux. Ce modèle se base sur une méthode de diagramme entre le nombre cumulé de véhicules et le temps (FIGURE 2.3.1).

Tant que la courbe de capacité (en pointillés) et la courbe de demande (en trait continu) ont la même coordonnée y à un instant t donné, aucune file d'attente n'existe. Lorsque la courbe de la demande est supérieure à la courbe de capacité, il existe alors une file d'attente.

Pour un véhicule entrant dans la file d'attente à l'instant t, le retard est en fait la différence entre la courbe de la capacité et la courbe de la demande telle que mesurée le long de l'axe x. De même, le nombre de véhicules dans la file d'attente à l'instant t est la différence entre la courbe de la demande et la courbe de la capacité mesurée le long de l'axe y.

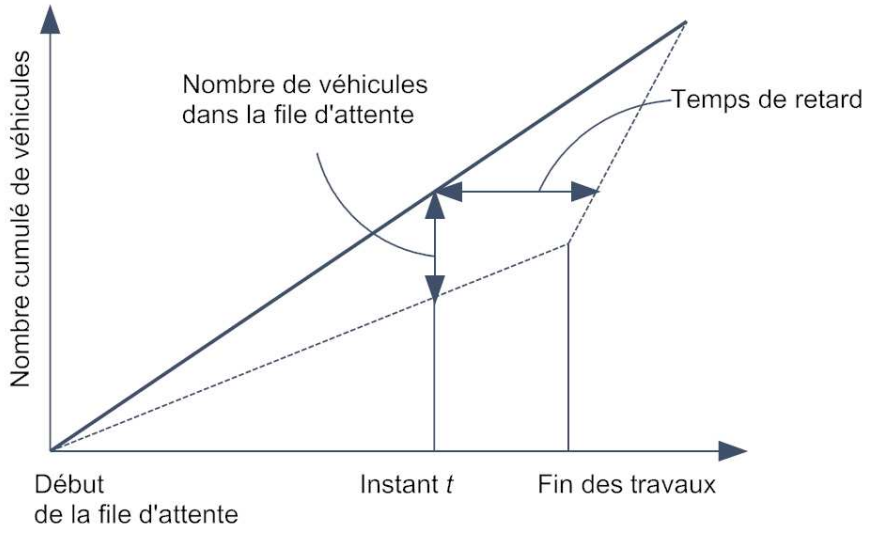


Figure 2.3.1: Méthode déterministe pour étudier la file d'attente.

Le manuel HCM (1994) estime la longueur de la file d'attente de la manière suivante :

$$D_t = \frac{L_t \times l}{N} \tag{2.3.1}$$

où : D_t = longueur de la file d'attente à l'instant t (m), L_t = nombre de véhicules dans la file d'attente à l'instant t, l = distance moyenne entre les véhicules dans la file d'attente (m), et N = nombre de voies ouvertes avant la file d'attente.

En ce qui concerne les modèles basés sur l'analyse des ondes de choc, la méthode a pour but d'évaluer le trafic et la densité du trafic dans l'espace et dans le temps. Dans cette théorie, le flux de trafic se comporte comme un fluide :

- lorsque la demande dépasse la capacité, une onde de choc se forme,
- dans le cas où la demande et la capacité deviennent égales, l'onde de choc devient stationnaire,
- si la demande diminue en dessous de la capacité, l'onde de choc se déplace vers l'avant jusqu'à ce qu'elle se dissipe au goulot d'étranglement.

La zone de travaux est alors divisée en trois zones : (i) en amont, (ii) dans la file d'attente, et (iii) en aval. Par exemple, dans le cas d'une file d'attente existant à l'instant T_1 avec le volume de trafic Q_1, supérieur à la capacité Q_3, la zone de la file d'attente est caractérisée par une densité K_2. Après une période de temps, dt, la file d'attente est devenue plus longue et le taux de croissance de l'onde de choc S est représentée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} (Q_3 - Q_1) + S(K_1) &= S(K_2) \\ S &= \frac{Q_3 - Q_1}{K_2 - K_1} \end{aligned} \tag{2.3.2}$$

où S = vitesse de l'onde de choc (km/h), Q_1 = volume de trafic ($véhicules/h$), Q_3 = capacité dans la zone de la file d'attente ($véhicules/h$), K_1 = densité du trafic dans la zone 1, K_2 = densité du trafic dans la zone 2.

La vitesse de l'onde de choc peut être négative ou positive, ce qui signifie que l'onde de choc se déplace contre ou dans le sens du trafic. La longueur de la file d'attente est alors calculée de la même façon que celle utilisée avec le modèle déterministe dans l'équation 2.3.1.

Ce deuxième type de modèle permet de mieux décrire l'état du trafic autour de la zone de file d'attente, mais est cependant plus complexe à implémenter.

Parmi les modèles déterministes, Queue and User cost Evaluation of Work Zones (QUEWZ) est un modèle développé par Memmott et Dudek (1982) pour estimer le coût aux usagers vis-à-vis de la perte de temps et de l'usage du véhicule. La version la plus récente QUEWZ-98 (Benekohal et al. 2010, Copeland 1998, Krammes et al. 1993) permet de planifier et de programmer des travaux qui entraînent la fermeture des voies. Collura et al. (2010) ont comparé QUEWZ avec d'autres modèles via des études de cas et ont montré que ce modèle est en mesure de fournir des estimations raisonnables sur les files d'attente qui sont proches des observations faites sur le terrain.

Le modèle QUEWZ-98 analyse les conditions de circulation sur un tronçon d'autoroute avec ou sans fermeture de voie et fournit une estimation des coûts aux usagers. Le coût aux usagers (C_U) calculé inclut le coût de perte de temps ($C_{Temps-perdu}$), le coût d'utilisation ($C_{utilisation}$) et le coût d'insécurité ($C_{insécurité}$) :

$$C_U = C_{Temps-perdu} + C_{utilisation} + C_{insécurité} \tag{2.3.3}$$

Ces coûts sont détaillés ci-dessous :

- le coût de perte de temps $C_{Temps-perdu}$ est dû à l'augmentation du temps de déplacement dans la zone des travaux. Il est influencé par de nombreux facteurs tels que le trafic actuel et futur, la capacité de trafic sur le pont, le calendrier des travaux, la durée et la fréquence des restrictions de capacité de trafic induites au niveau de la zone des travaux, et les coûts unitaires associés à la valeur du temps ;
- le coût d'utilisation $C_{utilisation}$ est lié à la perte de niveau de service causée par les opérations de maintenance sur les ouvrages routiers. La perturbation du trafic normal entraîne des réductions de vitesse, augmente les consommations de carburant et d'huile, engendre l'usure des pneumatiques et augmente le besoin d'entretien des véhicules ;
- le coût d'insécurité $C_{insécurité}$ se traduit par le fait que la perturbation du trafic induit un impact négatif sur la sécurité routière. En effet, elle augmente le taux d'accidents, de décès dans les zones de travaux, du fait des conditions dégradées de circulations.

A titre d'illustration, les TABLEAUX 3.3.23 et 3.3.24 dans le paragraphe 3.3.2 donnent les valeurs unitaires, utilisées pour calculer les coûts $C_{Temps-perdu}$, $C_{utilisation}$ et $C_{insécurité}$ (SBRI 2013a).

La congestion du trafic génère par ailleurs des émissions en grande proportion de polluants dans l'atmosphère. Le modèle QUEWZ-98 prend en compte la quantité de carburant consommée et l'émission de polluants tels que :

- les hydrocarbures HC qui sont des produits de l'essence incomplètement brûlés ou évaporés. L'émission de ces substances augmente quand le véhicule ralentit et diminue dans le cas contraire ;
- le monoxyde de carbone CO issu des produits du fioul incomplètement brûlés. De la même manière, la concentration de CO augmente quand la vitesse diminue ;
- l'oxyde d'azote NO_x est le produit des moteurs à combustion interne à haute compression. Contrairement aux composants HC et CO, la concentration de NO_x est proportionnelle à la vitesse.

Ces émissions sont ensuite utilisées pour calculer des impacts environnementaux dont les catégories d'impact sont présentés dans le TABLEAU 2.2.1 à l'aide de différents coefficients (Guinée 2002). Afin de différencier les impacts environnementaux dus à la congestion du trafic de ceux dus aux actions directes du gestionnaire, les douze impacts dus à la congestion du trafic sont noté Iu1 à Iu12, respectivement, en lien avec les définitions du TABLEAU 2.2.1.

Les actions de maintenance/réhabilitation étant effectuées à plusieurs instants du cycle de vie, l'évolution du trafic est alors très importante pour une évaluation pertinente des impacts dus à la congestion du trafic. Le volume de trafic peut être estimé chaque année comme :

$$ADT_t = ADT \times r_{TG}^{année_t - année_0} \tag{2.3.4}$$

où :
- ADT_t est le trafic journalier moyen à utiliser dans l'analyse à l'année t (véhicules / jour),
- r_{TG} est le taux de croissance attendue du trafic,
- $année_t$ est l'année considérée,
- $année_0$ est l'année de référence.

Outre l'augmentation du trafic, les mesures concernant la gestion du trafic en cas de travaux sont également très importantes car elles influencent fortement le volume du trafic et la capacité de la route.

Dès le début des années 80, McCasland (1983) mentionne notamment la possibilité d'utiliser la bande d'arrêt d'urgence en cas de travaux. Ceci permet d'avoir une voie de circulation en plus qui augmente considérablement la capacité de la route. Mieras (1986) décrit le projet de remplacement de la couche de roulement pour un pont à Seattle. Pour limiter la congestion de trafic, plusieurs efforts ont été réalisés : effectuer les travaux pendant la nuit, mettre en place des voies rapides pour des véhicules avec plus de deux passagers, coordonner les transports en commun.

De manière similaire, Janson et al. (1989) proposent une démarche pour la gestion du transport en cas de travaux pour minimiser les impacts de la perturbation de trafic.

2.4 SYNTHÈSE

Comme mentionné dans l'introduction, le secteur de la construction génère des impacts économiques, environnementaux, et sociétaux. Il est donc important de considérer l'ensemble de ces critères afin d'avoir une vision globale des différents paramètres en jeu qui peuvent représenter des enjeux conflictuels lorsque les entités correspondantes sont abordées sur le cycle de vie (conception/construction, inspection, maintenance, réhabilitation et enfin démolition). Dans un contexte d'amélioration des différents impacts, les matériaux constituent certainement un levier 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. Des matériaux à hautes performances peuvent par exemple permettre de diminuer le poids propre de la structure et d'optimiser les quantités mises en œuvre. En termes de gains vis-à-vis des opérations d'entretien, l'emploi de matériaux spécifiques peut également permettre de diminuer la vulnérabilité de la structure aux agressions du milieu extérieur. Les améliorations liées à la concep-

tion des ouvrages ainsi qu'à la surveillance/maintenance peuvent également aider à limiter l'impact de la maintenance des ouvrages durant la durée de vie en service en réduisant soit le nombre d'opérations, soit leur importance. L'intérêt de ce type d'approche est d'analyser l'intérêt de certaines pistes risquant d'être écartées si seulement évaluées dans le cadre d'une analyse restreinte au seul coût initial.

Dans ce contexte, l'objectif de ce chapitre a été de présenter le cadre des différents types d'analyses qui vont être menées dans la suite de ce mémoire. La méthodologie retenue se décline de la façon suivante :

- pour l'ACCV, une approche en coût global est envisagée pour déterminer une valeur actuelle nette du coût de cycle de vie à la charge du gestionnaire de l'ouvrage. Cette analyse comprend les coûts de construction, d'inspection, de maintenance, de réhabilitation et de démolition. Les coûts dus à la congestion du trafic durant la vie en service, et qui constituent une externalité dans le coût global étendu, sont considérés de manière séparée dans une analyse sociétale ;
- pour l'ACV, le cadre défini par les normes ISO 14040 (2006a) à 14044 (2006b) et la norme NF P01-010 est utilisé pour évaluer les impacts environnementaux. Cette analyse est constituée des deux étapes suivantes (NF P 01-010 – 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. Douze catégories d'impact sont en particulier considérées ;
- pour l'analyse sociétale, seuls les coûts indirects subis par les usagers (qui traduisent une monétarisation de la gêne engendrée lors des actions de maintenance et de réhabilitation) sont pris en compte. Cette analyse intègre également 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). Dans cette analyse sociétale, seuls les impacts négatifs sont pris en compte. Les impacts positifs liés à la création de l'ouvrage ne sont pas considérés. Le modèle QUEWZ (paragraphe 2.3.2) est alors utilisé pour évaluer le niveau de congestion du trafic en présence d'actions d'inspections et de maintenance. Les impacts économiques (coûts de perte du temps, d'usage et d'insécurité) et environnementaux sont alors évalués (à travers douze catégories d'impacts liées à l'émission de polluants). Ces impacts pourraient être perçus comme des externalités des analyses économique et environnementale mais c'est un choix qui est fait dans la thèse de les considérer de manière séparée ;
- les éléments généraux fournis sur l'aspect technique de la performance des ouvrages sont également pris en compte dans la suite à travers la vérification, pour chacune des variantes de dimensionnement, des différentes contraintes définies dans les Eurocodes en matière de sécurité, d'aptitude à l'usage, et de durabilité.

La suite de ce mémoire propose une description de la mise en œuvre d'une analyse globale du cycle de vie avec une application dans le chapitre 3 au dimensionnement d'ouvrages types introduits dans le cadre du projet SBRI (la démarche de ce projet étant d'appréhender la gestion des ouvrages de leur construction jusqu'à leur démolition et valorisation des déchets, en passant par leur maintenance, réparation, réhabilitation rénovation, voire leur extension de durée d'usage). Après une brève présentation des cas d'étude considérés, le cadre méthodologique fixant les hypothèses et les limites du système est détaillé. Les résultats comparatifs sont alors fournis pour

plusieurs points d'innovation. Ce chapitre propose également une analyse multicritère permettant de comparer différentes variantes lorsque des choix éventuellement contradictoires se présentent. Finalement, le chapitre 4, introduit des profils de dégradation des différents éléments d'un ouvrage d'art, qui, couplés à l'analyse de cycle de vie et à un processus d'optimisation, permettent de déterminer des stratégies de dimensionnement et de gestion optimales, en minimisant simultanément les impacts économiques, environnementaux et sociétaux tout en respectant des exigences de fonctionnalité, stabilité et de sécurité.

3

APPLICATION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE POUR LA CONCEPTION D'OUVRAGES DURABLES

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre propose une mise en œuvre des concepts de l'analyse de cycle de vie présentés dans le chapitre 2 à la question du dimensionnement des ouvrages d'art, et plus particulièrement des ponts mixtes acier-béton (cf. Annexe A). En particulier, cette analyse considère différentes options de dimensionnement qui remplissent globalement les mêmes critères de sécurité souhaités par le maître d'ouvrage. Le but de l'étude est donc de comparer ces différentes variantes sur le cycle de vie de l'ouvrage vis-à-vis d'aspects économiques, environnementaux et sociétaux afin d'identifier les variantes les plus intéressantes.

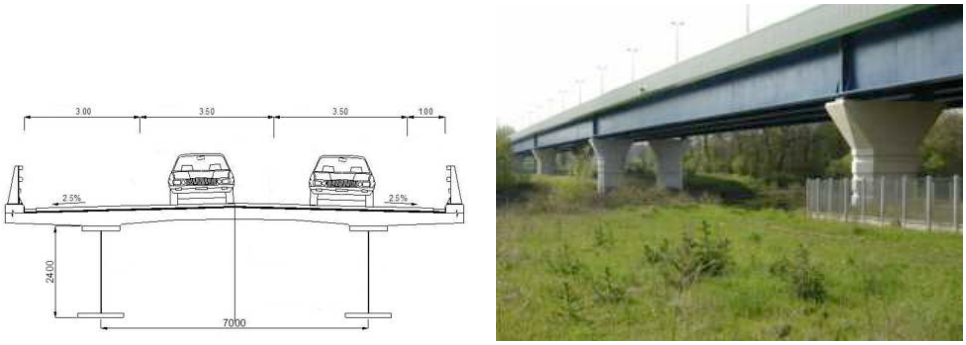
Cette étude est liée aux résultats obtenus dans le projet européen SBRI (SBRI 2013a), en ayant adapté le cadre européen du projet au contexte particulier du dimensionnement des ouvrages en France. Après avoir brièvement présenté les familles d'ouvrages considérées à titre d'illustration dans cette thèse, une application de l'analyse de cycle de vie est proposée pour mettre en exergue l'intérêt de certaines variantes originales par rapport à des solutions plus classiques de dimensionnement.

Une analyse multicritère est alors menée par famille d'ouvrages (de petite, moyenne, et grande portées) pour faire ressortir un classement des différentes variantes. Une synthèse est finalement proposée pour résumer les points majeurs de conclusion vis-à-vis de la classification des ouvrages selon des aspects économiques, environnementaux et sociétaux.

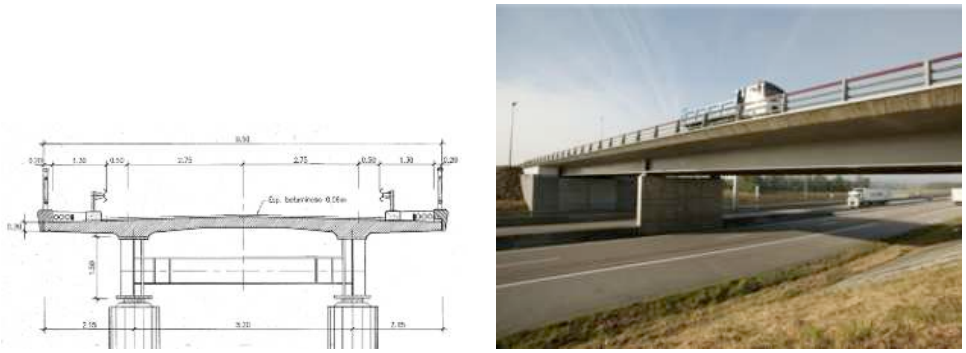
3.2 FAMILLES D'OUVRAGES CONSIDÉRÉS

Les ponts mixtes acier-béton ont été choisis dans cette thèse comme exemples d'illustration pour la réalisation des analyses comparatives. Leur large gamme de constructibilité au niveau de leur portée (petite, moyenne, grande) et de leur fonction (passage supérieur ou inférieur, viaduc autoroutier) permet d'envisager plusieurs contextes distincts et de comparer les variantes dans chaque contexte. En particulier, il a été décidé de centrer l'analyse sur trois familles d'ouvrage qui sont détaillées ci-dessous et présentées dans la FIGURE 3.2.1 :

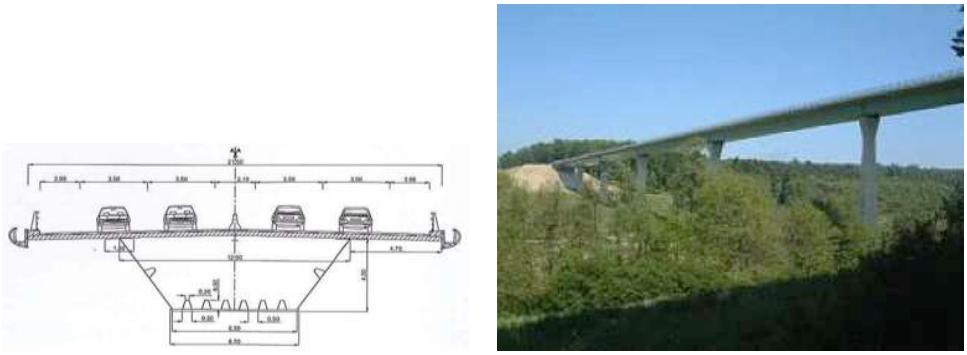
- une famille d'ouvrages autoroutiers de type mixte bi-poutres de moyenne portée (trois travées 50-60-50 m) - notée **A** (FIGURE 3.2.1a),
- une famille d'ouvrages de type passage supérieur de petite portée au dessus d'une autoroute - notée **B** (FIGURE 3.2.1b),
- une famille d'ouvrages autoroutiers de longue portée (5 travées 90-3x120-90 m) - notée **C** (FIGURE 3.2.1c).



(a) Ponts autoroutiers de moyenne portée (famille A).



(b) Passage supérieur au dessus d'une autoroute (famille B).



(c) Ponts autoroutiers en caisson de grande portée (famille C).

Figure 3.2.1: Familles A, B, C d'ouvrages considérés.

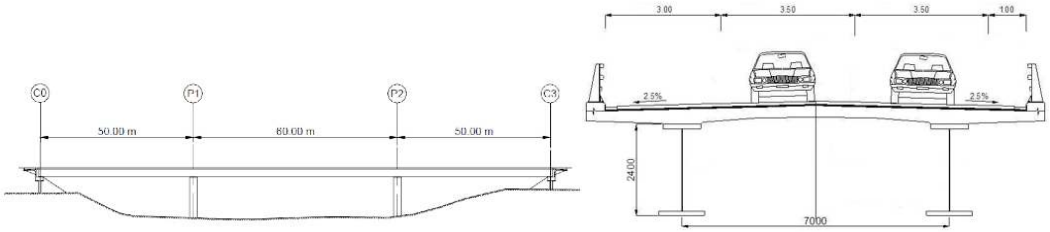
3.2.1 *Cas de référence*

Pour chaque famille d'ouvrage, une option de dimensionnement est choisie comme variante de référence dans l'étude comparative.

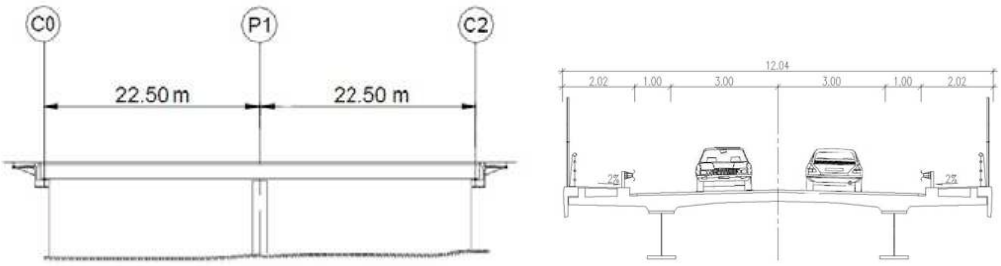
Pour la famille d'ouvrages autoroutiers de moyenne portée (famille A), une variante mixte bi-poutres à trois travées 50 m - 60 m - 50 m est notamment considérée. En particulier, deux tabliers identiques et indépendants sont construits à chaque fois pour séparer le trafic suivant les deux sens de circulation. Sur une largeur totale du tablier de 12 m, deux voies de 3,5 m de large sont aménagées avec une bande d'arrêt d'urgence de 2,0 m de large (FIGURE 3.2.2a). Chaque ouvrage est constitué de deux poutres dont chacune a une hauteur constante de 2400 mm avec des semelles inférieures et supérieures de 1000 mm et de 800 mm de large, respectivement. La distance entre les deux poutres est de 7 m.

Pour la famille d'ouvrages de petite portée (famille B), un pont mixte acier-béton de deux travées de 22,5 m chacune avec une dalle en béton préfabriquée a été choisi comme variante de référence (cf. FIGURE 3.2.2b pour les dimensions longitudinales et transversales de cet ouvrage).

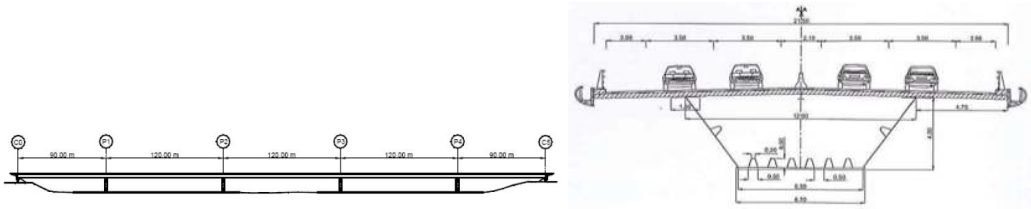
Finalement, le cas de référence pour la famille d'ouvrages de grande portée (famille C) est un pont mixte en caisson à cinq travées de 90 m, 3 x 120 m, 90 m (soit une longueur totale entre culées de 540 m). Sur une largeur de 20 m, quatre voies de 3,5 m de large sont aménagées (FIGURE 3.2.2c).



(a) cas d'étude Ao.



(b) cas d'étude Bo.



(c) cas d'étude Co.

Figure 3.2.2: Cas de référence pour les familles d'ouvrages de moyenne (Ao), petite (Bo) et longue (Co) portées (vues en profil et coupes transversale).

3.2.2 *Etude comparative*

Afin d'étudier le caractère innovant de certaines variantes de conception, plusieurs critères de dimensionnement ont été considérés en comparant chaque variante retenue à la variante de référence associée. Les variantes considérées pour les trois familles d'ouvrage sont décrites dans le TABLEAU 3.2.1.

La suite de ce paragraphe détaille les différents caractères innovants qui ont été considérés pour chacune des trois familles A, B et C.

Notation	Famille	Description
A0	Pont de moyenne portée	Variante mixte de référence
A1		Utilisation d'aciers à Haute Limite d'Elasticité (HLE)
A2		Utilisation d'aciers autopatinables
A3		Prise en compte de l'accroissement du trafic - renforcement de la charpente métallique
A4		Prise en compte de l'accroissement du trafic - renforcement des détails de fatigue
B0	Pont de petite portée	Variante mixte de référence
B1		Pont en béton - coulé en place
B2		Pont en béton - éléments préfabriqués
B3		Utilisation de culées intégrales
B4		Utilisation de travées de rive comme contre-poids
B5		Utilisation de travées de rive comme contre-poids et utilisation d'aciers autopatinables
C0	Pont de grande portée	Variante mixte de référence (un tablier)
C1		Conception avec deux tabliers
C2		Conception avec un tablier et utilisation d'aciers HLE

Tableau 3.2.1: Cas d'étude considérés pour les familles d'ouvrages A, B et C.

ASPECTS INNOVANTS SUR LES MATÉRIAUX

Différentes options de dimensionnement sont considérées pour étudier l'impact de l'utilisation de : (i) **l'acier à haute limite d'élasticité HLE** (variantes A1 et C1), et (ii) **l'acier autopatinable** (variantes A2 et B5) (SETRA 2009, 2010a, 2012).

Les aciers HLE sont des aciers à haute résistance obtenus par l'ajout d'éléments de micro-alliage (niobium, titane, vanadium, etc.) afin de minimiser l'ajout de carbone, de manganèse, etc. Ils présentent pour cette raison une soudabilité et une résistance supérieure. Ils sont utilisés pour des applications où leurs atouts (résistance, déformabilité et soudabilité) peuvent être exploités : transport, levage, etc. Leur utilisation permet souvent une réduction de poids de la structure et influe également sur le transport des éléments de charpente.

Par ailleurs, en termes de gains vis-à-vis des opérations d'entretien, l'emploi de matériaux spécifiques comme les aciers autopatinables permet de diminuer la vulnérabilité de la structure aux agressions du milieu extérieur et de se dispenser de la réalisation et des remplacements successifs d'un système anti-corrosion. La norme AFNOR 2005 les définit comme des aciers auquel un certain nombre d'éléments d'alliage, tels que le phosphore, le cuivre, le chrome, le nickel, le molybdène ont été ajoutés afin d'en accroître la résistance à la corrosion atmosphérique par la formation d'une couche auto-protectrice d'oxyde sur le métal de base sous l'influence des conditions atmosphériques. Du point de vue de l'élaboration et de sa mise en œuvre, les différences sont donc minimes (Morel 2012). Les caractéristiques mécaniques sont par ailleurs identiques à celles de l'acier classique. En particulier, les variantes mentionnées ci-dessus ont les mêmes vues en profil et coupes transversales que leur variante de référence associée, que ce soit pour les ponts bi-poutre acier-béton de moyenne portée A1 (acier HLE) ou A2 (acier autopatinable) par rapport à A0 (cf. FIGURE 3.2.2a), ou encore pour le pont mixte en caisson C2 vis-à-vis de l'ouvrage C0 (cf. FIGURE 3.2.2c).

En parallèle de l'étude sur le type de charpente métallique, une comparaison d'ouvrages mixtes acier-béton et d'ouvrages en béton est également effectuée en considérant d'abord un pont **en béton coulé sur place** (B1), ayant le même profil mais une coupe transversale différente de celle de B0 (cf. FIGURES 3.2.2b et 3.2.3), puis un pont **en béton** assemblé à l'aide **d'éléments préfabriqués** (B2), également considéré dans le cadre d'une étude comparative par rapport à la variante de référence B0 (cf. FIGURES 3.2.4).

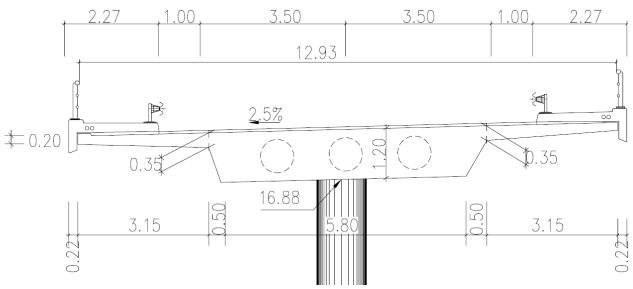
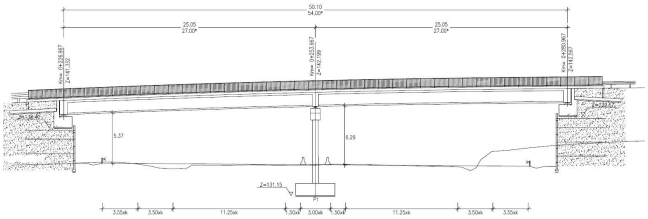


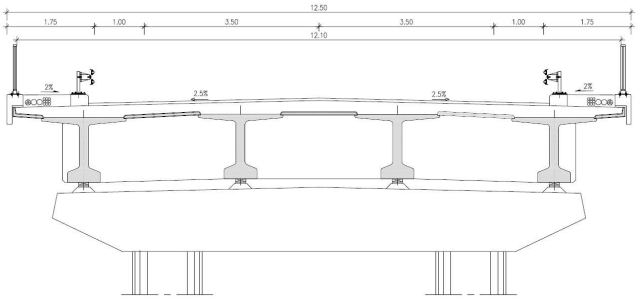
Figure 3.2.3: Pont en béton coulé sur place - famille d'ouvrages de petite portée (B1) (SBRI 2013b, BRISA 2012c).

ASPECTS INNOVANTS CONCERNANT LA CONCEPTION

Outre des différences sur les matériaux, différentes solutions concernant la concep-



(a) vue en profil



(b) coupe transversale

Figure 3.2.4: Pont en béton préfabriqué - famille d'ouvrages de petite portée (B2) (SBRI 2013b, BRISA 2012d).

tion sont étudiées avec : (i) **la prise en compte de l'évolution du trafic** par le renforcement des charpentes métalliques (variante A3) et **l'amélioration des détails de fatigue** (variante A4) (cf. FIGURES 3.2.2b et 3.2.5) pour augmenter la résistance des assemblages soudés au phénomène de fatigue.

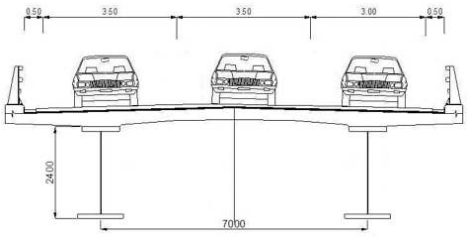
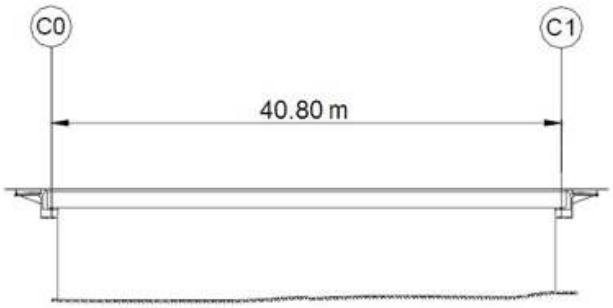


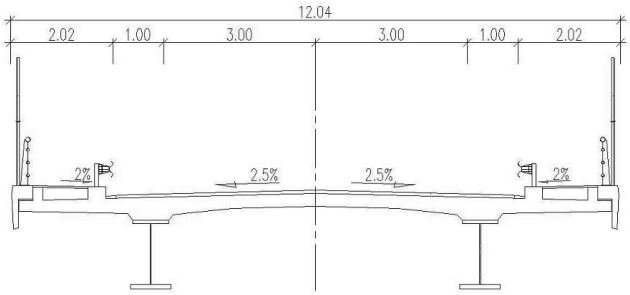
Figure 3.2.5: Coupe transversale - cas d'étude avec la prise en compte de l'évolution du trafic (A3 et A4) (SBRI 2013a).

Par ailleurs, **l'utilisation de culées intégrales** dans les cas des ponts intégraux (permettant de supprimer les appareils d'appui et les joints de chaussées) est étudiée. En particulier, une solution de pont intégral (variante B3) doit en théorie permettre de réduire sensiblement les impacts générés durant le cycle de vie de l'ouvrage en supprimant certaines des actions de maintenance programmées sur l'ouvrage (concernant les appareils d'appui et les joints de chaussées). La vue en profil et la coupe transversale de cette option de dimensionnement sont présentées dans la FIGURE 3.2.6. Cette option n'est possible que pour des ouvrages de portée réduite, moins sensibles à la dilatation thermique (Kretz 2012).

Pour la famille d'ouvrages de passages supérieurs, une conception avec des **travées de rives faisant office de contre-poids** est par ailleurs considérée (B4). Cette solution permet de supprimer la pile centrale, ce qui peut avoir un avantage vis-à-vis du trafic



(a) vue en profil

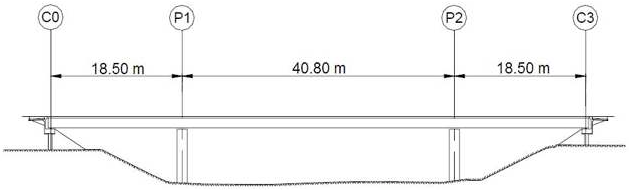


(b) coupe transversale

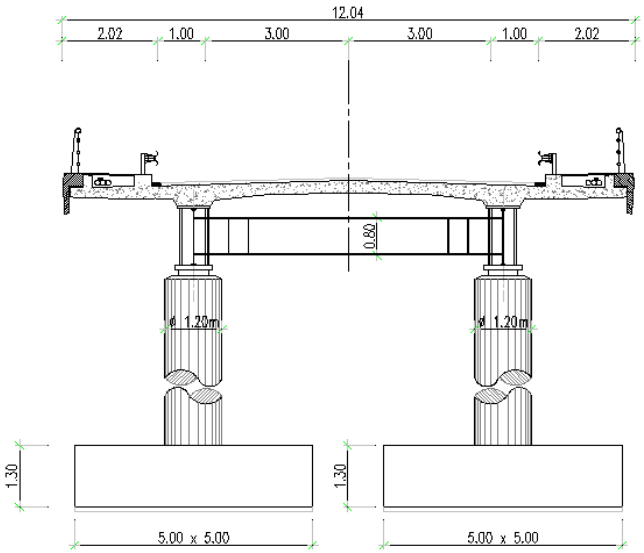
Figure 3.2.6: Pont mixte acier-béton avec des culées intégrales - famille d'ouvrage de petite portée (B3).

autoroutier, et permettre de compenser le poids de la travée centrale à l'aide des deux travées de rive. Elle permet également une réduction importante du point de vue des fondations. La vue en profil et la coupe transversale de cette option de dimensionnement sont présentées dans la FIGURE 3.2.7. Une variante de ce type de conception, qui utilise en plus une charpente métallique en acier autopatinable, a également été considérée pour étudier l'impact de l'utilisation de ce type de matériau vis-à-vis de la gêne à l'usager générée lors de la rénovation de la protection anticorrosion de la charpente métallique, qui peut être significative lorsqu'un trafic autoroutier est présent sous l'ouvrage (B5). Cette variante a la même vue en profil et la même coupe transversale que la variante B4 (cf. FIGURE 3.2.7).

Finalement, la conception d'un ouvrage de longue portée avec **deux tabliers** est étudiée (famille C), de sorte qu'un des deux soit toujours en service. Dans le cas où les analyses de cycle de vie économique, environnementale et sociétale concluraient en faveur de cette option, cela constituerait une réelle remise en cause des pratiques actuelles qui privilégient la réalisation d'un tablier unique pour des raisons évidentes de mise en place (Ta et al. 2011, Orcesi et al. 2013). Cette variante est notée C1 et possède le même profil longitudinal que les autres cas de la famille C (FIGURE 3.2.2c).



(a) vue en profil



(b) coupe transversale

Figure 3.2.7: Pont mixte acier-béton à trois travées - famille d'ouvrages de petite portée (B4 et B5).

3.3 CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Ce paragraphe détaille le cadre méthodologique considéré dans ce chapitre pour réaliser les différentes analyses de cycle de vie (l'ACCV, l'ACV, et l'analyse sociétale des impacts dus à la congestion du trafic).

Dans un premier temps, le cadre général de l'étude est explicité en spécifiant les frontières spatiales et temporelles en lien avec l'unité fonctionnelle considérée (les ouvrages des familles A, B ou C). Ces frontières sont alors caractérisées plus en détail en fonction des analyses (ACCV, ACV ou sociétales). En effet, l'accès aux données et certaines appréciations entraînent une différence dans les frontières de l'étude pour ces trois types d'analyse. Les caractéristiques technique qui conditionnent le dimensionnement et la gestion durant la vie en service sont alors introduites.

Dans un deuxième temps, les données utilisées pour mener les calculs sont détaillées. Ces données peuvent être en lien avec les coûts des matériaux, des inspections des actions de maintenance, ou bien des impacts environnementaux associés, ou bien encore des données ayant permis de quantifier le niveau de congestion pour l'analyse sociétale.

3.3.1 *Considérations générales*

3.3.1.1 *Frontières spatiales*

Les frontières spatiales de l'étude doivent permettre de caractériser le produit étudié en lien direct avec l'unité fonctionnelle qui est l'ouvrage d'art dans cette thèse.

La FIGURE 3.3.1 précise les frontières spatiales pour les trois familles d'ouvrages A, B et C. En particulier, les analyses pour la famille d'ouvrages A ne concernent que la superstructure car les fondations et les piles sont supposées être les mêmes pour toutes les variantes. Les éléments suivants sont alors considérés : les appareils d'appui, la charpente métallique, la dalle de béton et les équipements. De la même façon, seule la superstructure est considérée pour les analyses en lien avec la famille d'ouvrages C.

En ce qui concerne les variantes de la famille d'ouvrages B, certaines sont liées à des systèmes de fondation différents du point de vue des dispositions constructives. L'analyse intègre alors l'ensemble de la structure (en prenant en compte la superstructure, les culées, les piles, et les fondations).

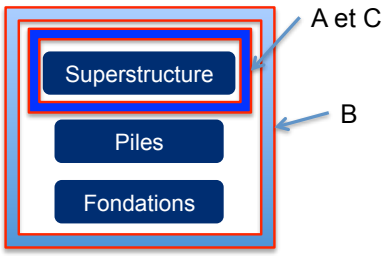


Figure 3.3.1: Frontières spatiales de l'étude pour les familles d'ouvrages A, B et C.

3.3.1.2 *Frontières temporelles*

La question de la période d'analyse est essentielle dans le cadre des analyses de cycle de vie. Dans cette thèse, la durée de vie de l'ouvrage (en général identique à la durée d'utilisation du projet) est souvent prise égale à la valeur de 100 ans qui est recommandée par les Eurocodes (Guide T87 - CIMbéton 2010, Eurocode 1990 : 2002). Le cycle de vie pendant cette durée comprend plusieurs étapes depuis l'extraction des matières premières pour les matériaux de construction jusqu'à la démolition. Il est possible de distinguer trois phases principales (FIGURE 3.3.2) : la construction, la vie en service et la fin de vie.

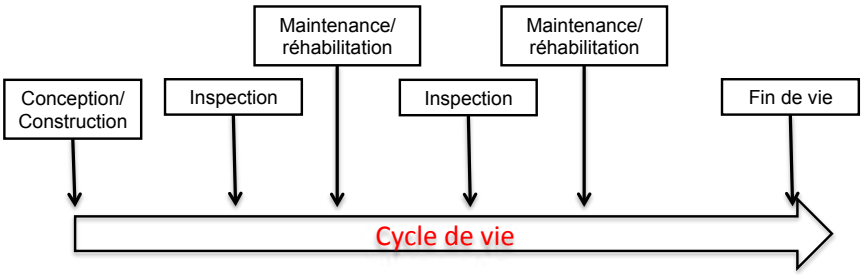


Figure 3.3.2: Illustration du cycle de vie d'un ouvrage.

3.3.1.3 *Spécification des frontières pour l'ACV, l'ACCV et l'analyse sociétale*

Ce paragraphe, et en particulier la FIGURE 3.3.3 spécifient plus en détail les frontières liées aux processus du cycle de vie d'un ouvrage. Ces processus sont naturellement liés aux étapes du cycle de vie identifiées dans la FIGURE 3.3.2 et concernent l'extraction des matériaux, la construction de l'ouvrage, sa vie en service, jusqu'à sa démolition et le transport des déchets générés au centre de stockage avec une possibilité de revente/recyclage de certains matériaux.

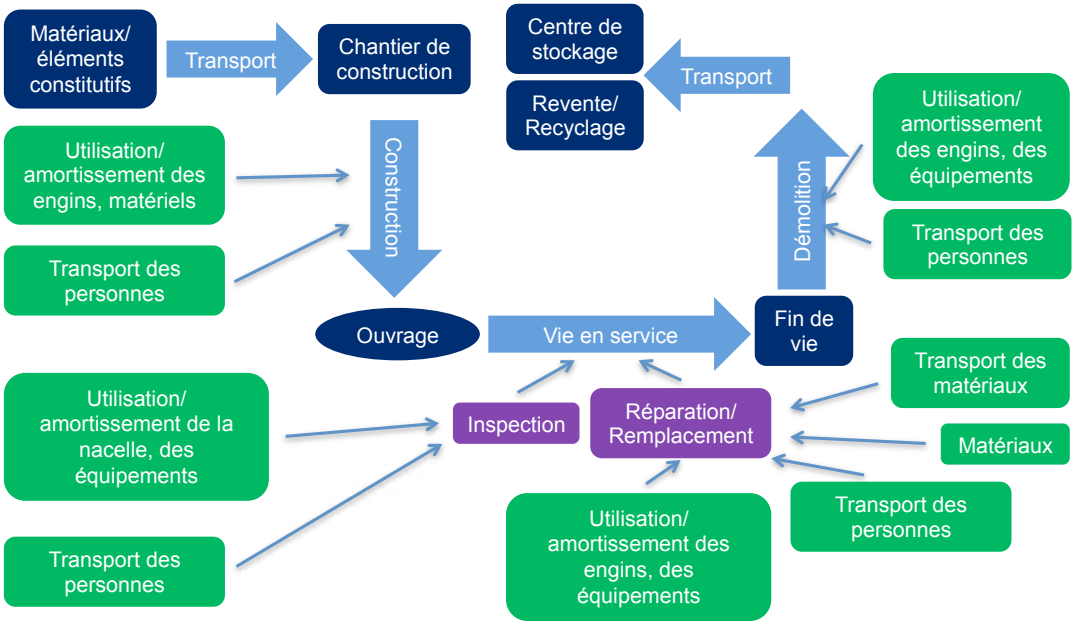


Figure 3.3.3: Frontière de l'étude des analyses.

Les différentes étapes de ce cycle de vie sont associées à des flux d'entrée et de sortie qui vont avoir des coûts et impacts particuliers à chaque fois. Principalement dû au fait que certaines informations n'étaient pas accessibles, mais aussi pour des questions de choix méthodologiques, des différences significatives existent sur les flux considérées pour l'ACCV, l'ACV, et l'analyse sociétale, qu'il convient d'expliciter. En particulier, les éléments pris ou non pris en compte sont détaillés dans le TABLEAU 3.3.1 pour ces trois types d'analyse.

			ACCV	ACV	AS
Matériaux		Matériaux/éléments constitutifs	o	o	n
		Transport des matériaux	o	o	
Construction		Transport des personnes	o	o	n
		Utilisation/amortissement des engins, matériels	o	n	
Vie en service	Inspection	Transport des personnes	o	o	o*
		Utilisation/amortissement de la nacelles, des équipements	o	n	
	Maintenance	Matériaux	o	o	o**
		Transport des matériaux	o	o	
		Transport des personnes	o	o	
		Utilisation/amortissement des engins, des équipements	o	n	
		Transport des déchets	o	o	
Fin de vie	Démolition	Transport des personnes	o	n	n
		Utilisation/amortissement des engins, des équipements	o	n	
	Transport	Transport des déchets	o	o	
	Recyclage	Recyclage/revente	o	n	

Tableau 3.3.1: Spécification des frontières pour l'ACCV, l'ACV et l'analyse sociétale (AS).
(o = prise en compte, n = non prise en compte)
(o* = restreint à la gène aux usagers durant l'inspection)
(o** = restreint à la gène aux usagers durant l'action de maintenance)

Il apparaît que l'ensemble des éléments précisés dans la FIGURE 3.3.3 sont considérés dans l'ACCV. Par contre, certains éléments ne sont pas considérés dans l'ACV dû au manque des données. Finalement, seule la vie en service est examinée concernant l'analyse sociétale car il est supposé que la construction de l'ouvrage se situe sur un nouvel itinéraire (sans perturbation des usagers lors de la construction) et qu'un ouvrage de substitution est déjà construit lors de la démolition de l'ouvrage, donc sans gêne majeure également sur les usagers de l'itinéraire routier/autoroutier. Comme mentionné dans l'introduction, seuls les impacts négatifs en termes de coûts et im-

pacts environnementaux sont pris en compte dans cette analyse sociétale. Les impacts positifs liés à la création de l'ouvrage ne sont en effet pas considérés.

Les phases de construction, de vie en service, et de fin de vie peuvent donc présenter des différences notables d'une analyse à l'autre. En particulier, la fin de vie de l'ouvrage intègre le recyclage des matériaux et donc la possibilité d'obtenir un revenu dans l'ACCV. A l'inverse, la méthode des stocks (AFNOR 2004) est utilisée dans l'ACV (pour éviter de comptabiliser deux fois le concept de recyclage), ce qui limite la fin de vie à la mise en décharge des matériaux.

3.3.1.4 *Caractéristiques techniques sur le dimensionnement et la gestion des ouvrages*

En ce qui concerne le dimensionnement des ouvrages présentés dans ce chapitre, les variantes proposées ont été calculées selon les spécifications des Eurocodes : (i) par le Service d'Etudes sur les Transports, les routes et leurs Aménagements (SETRA) pour les ouvrages de la famille A, (ii) par la Société d'autoroutes - Engenharia e Gestão S.A (Portugal) (BRISA) et le SETRA pour les ouvrages de la famille B, et par le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) de l'Est pour les ouvrages de la famille C.

Les différentes justifications de calcul ont notamment porté sur :

- les justifications des sections mixtes aux ELU (autres que la fatigue) :
  - la résistance en section (EN 1994-2, 6.2.1 et 6.2.2) ;
  - la résistance au voilement par cisaillement (EN 1994-2, 6.2.2) ;
  - la résistance au lancement (EN 1994-2, 6.5) ;
  - la résistance au glissement (connexions) (EN 1994-2, 6.6) ;
  - la résistance en fatigue (EN 1994-2, 6.8) ;
- la justification au déversement,
- les justifications à la fatigue pour la charpente et pour l'acier de renforcement,
- les justifications des sections aux ELS,
- les justifications locales de la dalle en béton.

Concernant la vie en service des ouvrages, deux types d'actions ont été considérés : les inspections et les actions d'entretien/maintenance. Le système d'inspection est très important pour un ouvrage car il permet de détecter et de suivre l'évolution de différents types d'endommagements. De plus, le système d'inspection peut aider à définir les actions de maintenance pour l'ouvrage afin d'assurer un niveau de sécurité structurale acceptable tout au long de sa durée de vie. Par ailleurs, les actions d'entretien et de maintenance pendant la vie en service de l'ouvrage, conditionnées par les budgets annuels, permettent d'assurer une qualité de service et un niveau de sécurité acceptable de l'ouvrage.

Les informations concernant les inspections (type, fréquence) sont récapitulées dans le TABLEAU 3.3.2. Ce scénario, discuté et approuvé par différents experts de la maintenance des ouvrages d'art dans le cadre du projet SBRI (BRISA 2012a) est celui qui a été défini et utilisé dans ce chapitre (hormis dans le paragraphe 3.4.3) comme scénario d'inspection standard.

Le système d'inspection est constitué des différentes visites suivantes, définies dans l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (IT-SEOA 2010) :

- l'inspection annuelle consiste à observer et recueillir des informations sur l'état de l'ouvrage par des formulaires/listes de contrôle. L'objectif est de détecter des

Types d'inspections (SBRI)	Inspections équivalentes en France	Fréquence (SBRI)
Routine	Routine	Tous les ans
Principale	Détaillée (IDP)	Tous les 6 ans
Spéciale	Exceptionnelle	Deux fois durant la vie en service

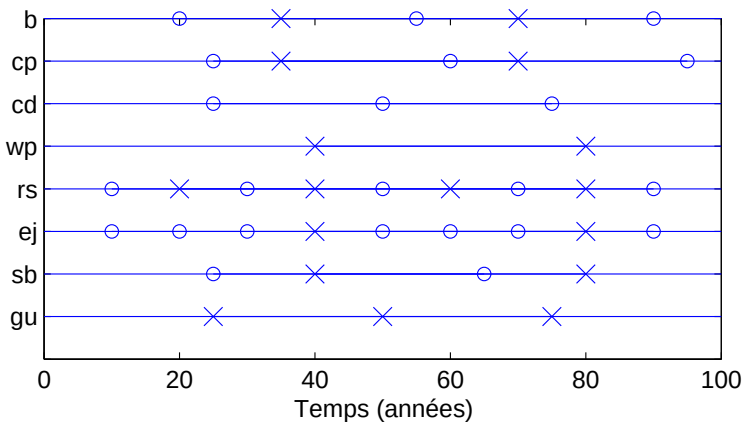
Tableau 3.3.2: Type et fréquence des inspections.

petits endommagements qui peuvent être réparés rapidement. L'équipe d'inspection se compose d'une ou deux personne(s) avec une formation spécifique ;
- l'inspection détaillée est réalisée dans le but de détecter des problèmes sur l'ouvrage tels que l'ouverture des fissures, l'endommagement de la surface du béton, etc. L'objectif est de confirmer l'état de l'ouvrage, de donner une note sur la condition de l'ouvrage et de définir des actions de maintenance/réhabilitation. L'équipe d'inspection est dirigée par une personne expérimentée dans l'inspection des ouvrages d'art ;
- l'inspection ou visite exceptionnelle est réalisée quand : (i) il est nécessaire de planifier des actions de maintenance/réhabilitation de l'ouvrage, (ii) un endommagement spécifique doit être évalué (suite à l'occurrence de phénomènes naturels extrêmes, après une collision d'un véhicule sur l'ouvrage, etc.). Des tests et des analyses en laboratoire sont utilisés pour fournir des résultats qui permettent d'évaluer les conditions et de donner des recommandations pour réparer l'ouvrage. L'objectif est d'évaluer l'état de l'ouvrage ou de définir la cause d'un endommagement spécifique et une stratégie de réhabilitation. L'équipe est dirigée par une personne expérimentée dans le domaine des inspections/auscultations des ouvrages d'art.

Le scénario standard de maintenance utilisé dans ce chapitre, se base sur des durées de vie moyennes des différents éléments d'un pont (BRISA 2012b) pour prévoir les actions de remplacement et les fréquences de maintenance couramment appliquées (TABLEAU 3.3.3). Ce TABLEAU permet de définir le calendrier de réparation et de remplacement, utilisé dans la suite de ce chapitre (hormis dans le paragraphe 3.4.3) qui est illustré dans la FIGURE 3.3.4.

Eléments	Fréquence des actions de maintenance (ans)	Durée de vie moyenne (ans)
Appareils d'appui	20	35
Protection anticorrosion	25	35
Dalle du béton	25	100
Etanchéité	-	40
Couche de roulement	10	20
Joints de chaussées	10	40
Barrières de sécurité	25	40
Corniche caniveau	-	25

Tableau 3.3.3: Durées de vie moyennes et fréquences de maintenance des éléments constructifs d'un pont mixte acier-béton.



(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)
(o=réparation x=remplacement)

Figure 3.3.4: Calendrier standard de réparation et de remplacement.

3.3.2 *Données unitaires*

Le paragraphe 3.3.1 a permis de délimiter les frontières du système étudié en lien avec la notion d'unité fonctionnelle.

La suite de ce paragraphe a maintenant pour objectif de fournir un certain nombre de données unitaires utilisées pour les trois types d'analyses de cycle de vie. Les données pour l'ACCV, l'ACV et l'analyse sociétale sont détaillées successivement en considérant à chaque fois les phases de construction, de vie en service, et de fin de vie, chacune de ces phases étant étudiée pour les familles A, B et C d'ouvrages.

3.3.2.1 *Calcul des coûts*

PHASE DE CONSTRUCTION

Pour la phase de construction, les éléments constitutifs d'un pont sont divisés en quatre grands groupes : (i) la charpente métallique, (ii) le tablier en béton, (iii) les équipements et (iv) les fondations. Les TABLEAUX 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 et 3.3.7 fournissent le détail simplifié des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages des familles A (TABLEAU 3.3.4), B (TABLEAUX 3.3.5 et 3.3.6) et C (TABLEAU 3.3.7).

		Unité	A0	A1	A2	A3	A4
b		dm^3	123	121	124	123	123
ss		kg	415500	360500	462595	431500	418000
cd	Coffrage	m^2	2296	2296	2296	2296	2296
	Equipage mobile	u	1	1	1	1	1
	Armatures	kg	130400	130400	130400	130400	130400
	Béton	m^3	656	656	656	656	656
	Réglages & finitions	m^2	2296	2296	2296	2296	2296
e	Etanchéité	m^2	1792	1792	1792	1792	1792
	Couche de roulement	m^2	352	352	352	352	352
	Joints de chaussées	m	24	24	24	24	24
	Barrières de sécurité	ml	320	320	320	320	320
	Corniches caniveaux	ml	320	320	320	320	320

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle de béton, e = équipements)

Tableau 3.3.4: Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille A.

		Unité	B0	B1	B2	B3	B4	B5
f	Déblais	m^3	548	548	548	548	548	548
	Remblais	m^3	287	287	287	287	287	287
	Revêtement de pente	m^2	268	268	268	268	268	268
	Coffrage - parties cachées	m^2	610	610	610	610	610	0
	Coffrage - parties vues	m^2	275	275	275	275	275	300
	Armatures	kg	45785	45785	45785	45785	45785	50000
	Palplanches	kg	0	0	0	0	0	0
	Béton - C16/20	m^3	38	38	38	38	38	0
	Béton - C20/25	m^3	0	0	0	0	0	0
	Béton - C30/37	m^3	461	461	461	461	461	0
	Béton - C35/45	m^3	24	24	24	24	24	370
b	Dispositifs de vérrouillage	u	8	8	12	8	8	0
	Appareil d'appui en élastomère	u	6	4	12	6	6	0
	Appareils à pôt	u	0	0	0	0	0	0
ss		kg	64180	0	0	58343	52076	57210

(f = fondations, b = appareils d'appui, ss = charpente métallique)

Tableau 3.3.5: Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille B - partie 1.

		Unité	B0	B1	B2	B3	B4	B5
cd	Echafaudage	u	0	1	1	0	0	0
	Coffrage	m^2	597	732	111	597	597	566
	Coffrage perdu	m^2	0	44	312	0	0	0
	Armatures	kg	36700	36837	19735	50000	50000	31400
	Acier de précontraint	kg	0	6839	1664	0	0	0
	Béton - C30/37	m^3	0	0	192	0	0	0
	Béton - C35/45	m^3	0	409	0	0	0	0
	Béton léger	m^3	0	0	42	0	0	0
	Béton à faible retrait	m^3	0	0	0	0	0	0
	Béton préfabriqué	m^3	181	0	0	230	230	157
	Poutre en béton préfabriqué	u	0	0	8	0	0	0
	Réglages & finitions	m^2	833	833	1693	833	833	833
e	Etanchéité	m^2	503	634	634	405	405	456
	Couche de roulement	m^2	72	69	67	78	78	65
	Joints de chaussées	m	23	27	27	27	27	0
	Détails pour des culées	u	4	4	4	4	4	0
	Barrière de sécurité	ml	90	0	0	90	90	82
	Glissières - simple	ml	90	96	90	90	90	82
	Balustrade	ml	0	96	124	0	0	0
	Corniche caniveau	ml	90	0	0	90	90	0
	Caniveau (béton)	ml	0	0	0	0	0	0
	Corniche (béton)	ml	0	90	124	0	0	82

(cd = dalle de béton, e = équipements)

Tableau 3.3.6: Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille B - partie 2.

		Unité	C0	C1	C2
b		dm^3	1866	2014	1758
ss		kg	5485000	6233000	4249000
cd	Coffrage	m^2	12590	15357	12590
	Equipage mobile	u	1	1	1
	Armatures	kg	628000	952000	628000
	Béton	m^3	3076	3734	3076
	Réglages & finitions	m^2	12590	15357	12590
e	Etanchéité	m^2	11189	11115	11189
	Couche de roulement	m^2	2096	2030	2096
	Joints de chaussées	m	43	43	43
	Barrières de sécurité	ml	1080	1080	1080
	Glissières - simple	ml	0	1080	0
	Glissières - double	ml	540	0	540
	Corniches caniveaux	ml	1080	1080	1080

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle de béton, e = équipements)

Tableau 3.3.7: Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille C.

Comme mentionné dans le paragraphe 3.3.1.4, les familles d'ouvrages A et C sont dimensionnées en France. Les coûts unitaires pour l'analyse sont alors ceux pris dans des appels d'offre récents en France (coûts 2011). L'année de base de l'étude ayant été fixée en 2008 (SBRI 2013a), les coûts de 2011 sont ramenés en 2008 en utilisant l'EQUATION 3.3.1 (Boudrand 2011).

$$\frac{P_{2008}}{P_{2011}} = 0,15 + 0,85\frac{I_{2008}}{I_{2011}} \tag{3.3.1}$$

où I_{2008} et I_{2011} = indices utilisés en 2008 et 2011, respectivement et P_{2008} et P_{2011} = coûts en 2008 et 2011, respectivement. L'indice utilisé pour la partie béton du pont est l'indice TP 02 tandis que celui pour la partie métallique du pont est l'indice TP13. Le TABLEAU 3.3.8 montre les indices utilisés pour actualiser les coûts unitaires de construction (SETRA 2010b).

Pour la famille B, le dimensionnement a été réalisé dans le projet SBRI en lien avec des projets de construction récents au Portugal. Les données économiques sont alors naturellement issues de projets de construction au Portugal (coûts 2008) fournis dans le cadre du projet SBRI.

Ce paragraphe détaille les coûts de construction pour la charpente métallique.

	Indice	
	TP 02	TP 13
Juin 2008	629,5	557,3
Juin 2011	684,8	572,5

Tableau 3.3.8: Indices utilisés pour ajuster les prix dans les activités de construction.

En ce qui concerne la famille d'ouvrage A, le détail des coûts pour les poutres en acier inclut la conception, l'achat de l'acier (S355 et/ou S460), la fabrication, le transport, la mise en peinture (ou la préparation de surface dans le cas où l'acier autopatinable est utilisé) et le montage. Le coût de transport est estimé pour une distance de 300 km et la protection anticorrosion correspond à la classe C4ANV. Le montage intègre seulement l'assemblage de la charpente métallique sur le chantier, la mise en place par lançage n'étant pas prise en compte.

La fabrication de la charpente métallique nécessite plusieurs étapes qui incluent le découpage, le soudage à pleine pénétration, le soudage d'angle, l'assemblage, le soudage des raidisseurs, les frais d'expédition et des frais divers. Les FIGURES 3.3.5a et 3.3.5b illustrent les coûts de construction de la charpente métallique pour les cas A0, A1, A2, A3 et A4. En ce qui concerne le coût de l'achat et celui de fabrication, il est observé par rapport à la variante de référence A0 une légère diminution pour la variante A1 avec les aciers HLE (du fait de la réduction de la quantité d'acier), une augmentation du coût pour la variante A2 (du fait des surépaisseurs nécessaires), une légère augmentation pour la variante A3 (la voie de trafic supplémentaire nécessitant une augmentation de la quantité d'acier), et une augmentation quasiment nulle pour la variante A4 (le traitement post-soudure permettant de limiter les augmentations d'acier). Par ailleurs, le coût de mise en peinture/préparation de surface est beaucoup plus faible pour la variante A2 (Figure 3.3.5b) car seule la préparation de surface est requise pour cette variante avec des aciers autopatinables. Par ailleurs, la Figure 3.3.6 donne un aperçu de la répartition du coût de fabrication (montré dans la Figure 3.3.5a) pour chaque variante. Ces coûts ont été fournis par l'entreprise Berthold (2012) (bureau d'études français spécialisé dans le secteur du bâtiments et des travaux publics).

En ce qui concerne la famille B, seules les variantes B0, B3, B4 et B5 sont concernées par le coût de la charpente métallique, les variantes B1 et B2 étant constituées toutes les deux d'un tablier en béton. Le détail des coûts pour les poutres en acier (variantes B0, B3, B4 et B5) inclut la conception, l'achat de l'acier S355, la fabrication, le transport, la mise en peinture (ou la préparation de surface pour les aciers autopatinables) et le montage. Les FIGURES 3.3.7a et 3.3.7b détaillent le coût unitaire par kg associé au coût de construction des poutres en acier pour les variantes B0, B3 et B4 (acier standard) d'une part et B5 (acier autopatinable) d'autre part. Comme pour la famille A, le coût de transport est estimé pour une distance de 300 km et la protection anticorrosion correspond à la classe C4ANV. Le montage couvre seulement l'assemblage de la charpente métallique sur le chantier et la mise en place par grutage. Comme pour la famille A, un léger surcôut est constaté pour la variante avec les aciers autopatinables (le coût d'achat au kg étant légèrement plus élevé), avec toutefois un coût de mise en peinture/préparation de surface significativement plus faible (seule la préparation de surface étant nécessaire).

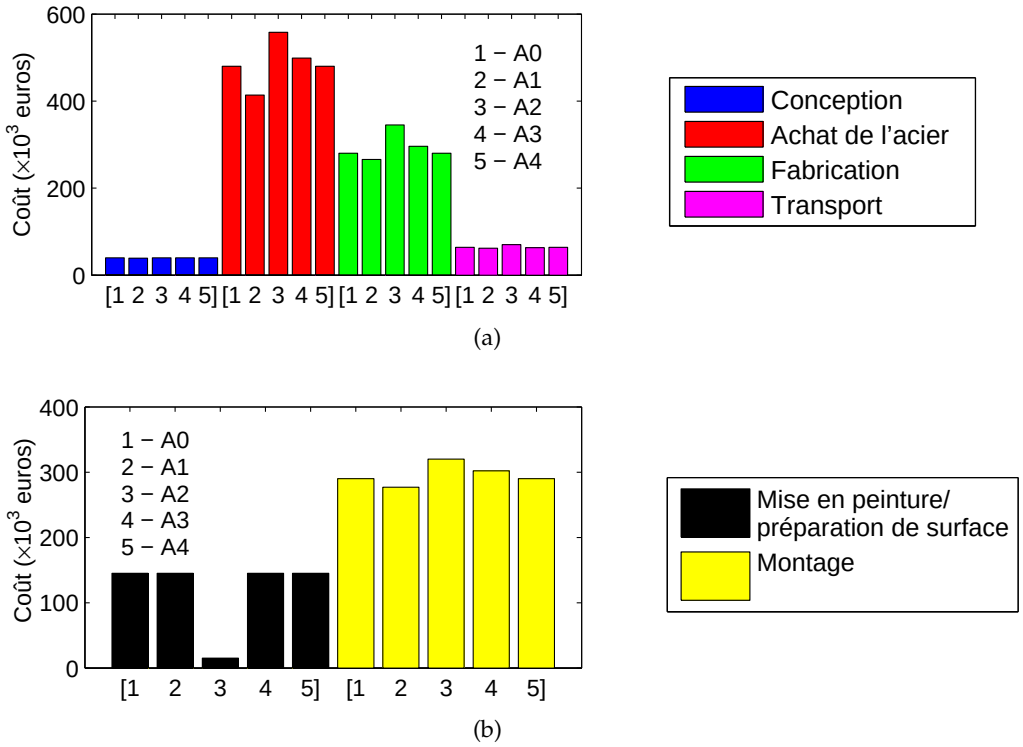


Figure 3.3.5: Détail des coûts de la charpente métallique - famille A.

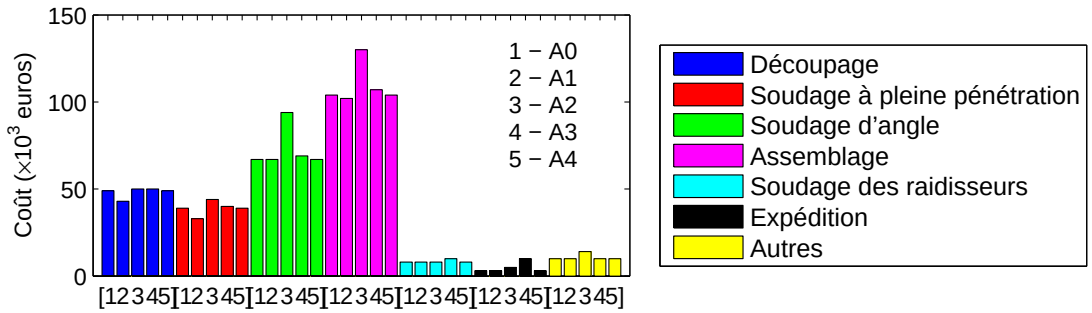


Figure 3.3.6: Détail des coûts de fabrication de la charpente métallique - famille A (cf. FIGURE 3.3.5).

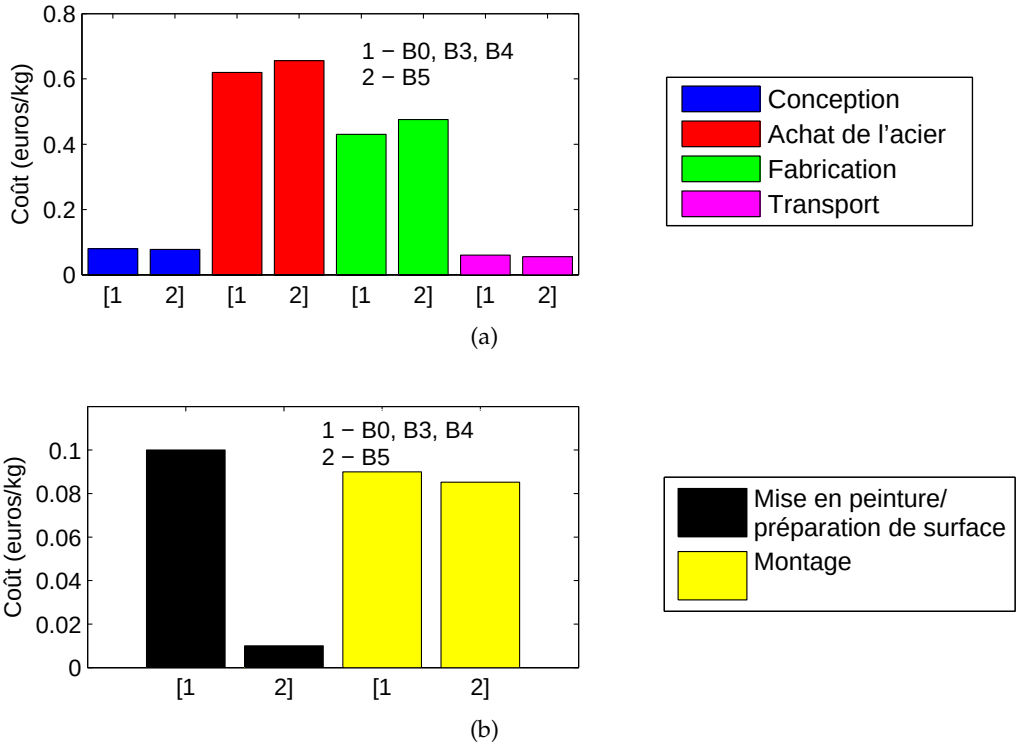


Figure 3.3.7: Détail des coûts de la charpente métallique - famille B.

Pour la famille d'ouvrage C, le coût unitaire par kg pour la charpente métallique en caissons (FIGURE 3.3.8a) inclut la conception, l'achat d'acier structurant (S355, S460 ou S690), la fabrication, le transport, la mise en peinture (protection anti-corrosion) et le montage (comme pour la famille A, les coûts ont été estimés par l'entreprise Berthold). De même que pour les familles A et B, le coût de transport est estimé pour une distance de 300 km et la protection anticorrosion correspond à la classe C4ANV pour la partie extérieure du caisson et C3ANI pour la partie intérieure. Le montage couvre seulement l'assemblage de la charpente métallique sur le chantier, la mise en place par lançage n'étant pas prise en compte.

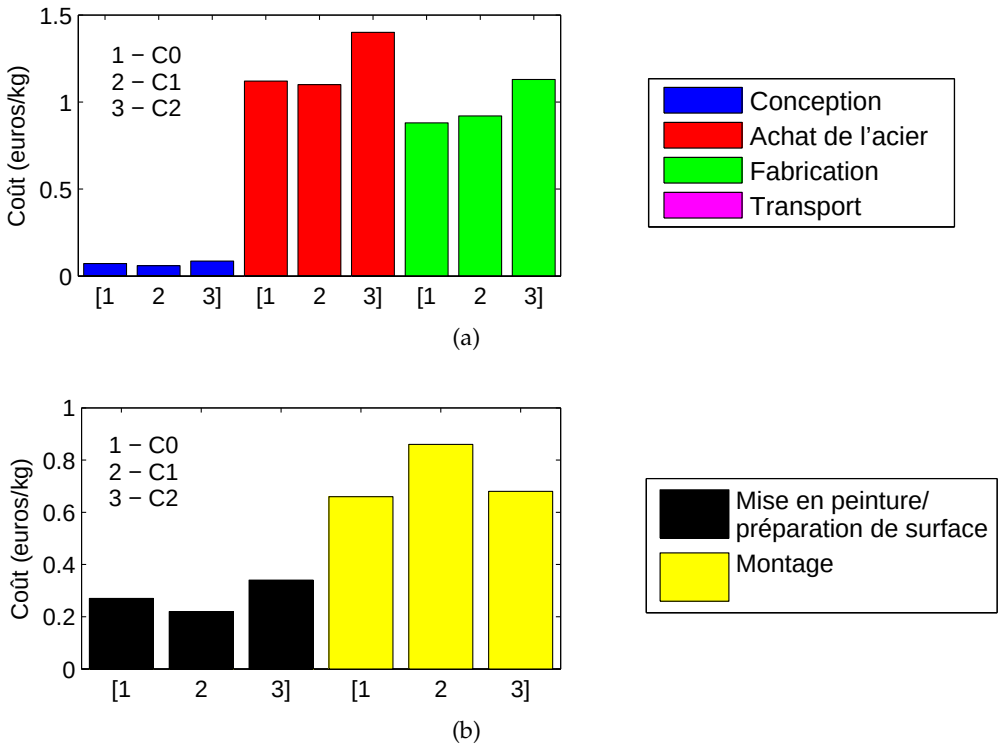


Figure 3.3.8: Coûts détaillés de la charpente métallique - famille C.

En ce qui concerne le coût de construction de la dalle de béton, pour les familles d'ouvrages A et C, les composants constitutifs de la dalle de béton sont : le béton coulé en place, le coffrage pour la dalle de béton, le coffrage mobile, les aciers de renforcement, le réglage et la finition. Le TABLEAU 3.3.9 propose une répartition des coûts unitaires utilisés pour calculer les coûts de construction de la dalle de béton pour les ouvrages A et C (l'équation 3.3.1 est alors utilisée pour convertir ces coûts en € 2008).

	Unité	Coût (en € 2011)	
		Famille A	Famille C
Béton (C35/45)	m^3	250	250
Aciers de renforcement	t	1500	1500
Coffrage	m^2	60	60
Equipage mobile	u	100000	200000
Réglage et finition	m^2	3	3

Tableau 3.3.9: Coûts unitaires concernant la dalle de béton pour les familles A et C.

Pour la famille d'ouvrages B, les composants de la dalle de béton sont : le béton coulé sur place ou préfabriqué, le coffrage pour la dalle de béton, les aciers de renforcement ou précontraints. Le TABLEAU 3.3.10 indique la répartition des coûts unitaires utilisés pour calculer les coûts de construction pour les ouvrages B. Dans ce tableau, le béton C35/45 est utilisé pour l'ensemble des variantes en distinguant cependant le coût des poutres en béton préfabriqué. Le béton C30/37 est utilisé pour la variante B2 afin de relier les différentes poutres préfabriquées.

		Unité	Coût (en € 2008)
			Famille B
Béton	C35/45	m^3	97
	C30/37	m^3	63
Poutre en béton préfabriqué (C35/45)		u	10576
Aciers de renforcement		t	650
Aciers précontraints		t	2440
Coffrage		m^2	20
Coffrage perdu		m^2	82

Tableau 3.3.10: Coûts unitaires concernant la dalle de béton pour la famille d'ouvrages B.

Concernant les équipements et les appareils d'appui, les coûts associés issus d'appels d'offre récents en France sont présentés dans le TABLEAU 3.3.11 (de même que précédemment, les coûts en € 2011 sont exprimés par la suite en € 2008 à l'aide de l'équation 3.3.1). Dans cette thèse, les éléments de protection tels que l'étanchéité sont intégrés dans l'ensemble dénommé "équipements". Les "équipements" incluent donc l'étanchéité, la couche de roulement, les joints de chaussées, les barrières de sécurité et les corniches caniveaux.

	Unité	Coût (en € 2011)
Appareil d'appui (élastomère)	dm^3	40
Etanchéité	m^2	1800
Couche de roulement	t	100
Joints de chaussées	m	2000
Barrière de sécurité	ml	220
Glissière de sécurité - single	ml	60
Glissière de sécurité - double	ml	100
Corniches caniveaux	ml	100

Tableau 3.3.11: Coûts unitaires considérés pour les appareils d'appui, les équipements et les éléments de protection.

En ce qui concerne les fondations et les piles, ces éléments ne sont considérés que pour la famille d'ouvrages B. Les coûts unitaires utilisés dans l'ACCV sont présentés dans le TABLEAU 3.3.12. L'utilisation des différents types de béton est la suivante :

- C16/20 : béton de propreté utilisé près des fondations et des culées,
- C25/30 et C30/37 : béton utilisé pour les fondations des piles et les piles (variantes B0, B1, B2, B3),
- C35/45 : béton utilisé pour les piles (variantes B4, B5).

		Unité	Coût (en € 2008)
			Famille B
Béton	C35/45	m^3	97
	C30/37	m^3	63
	C25/30	m^3	58
	C16/20	m^3	49
Acier de renforcement		t	650
Coffrage - parties cachées		m^2	13
Coffrage - parties vues		m^2	20
Remblais		m^3	2
Excavation		m^3	3

Tableau 3.3.12: Coûts unitaires concernant les fondations et les piles pour la famille d'ouvrages B.

PHASE DE VIE EN SERVICE

Comme mentionné dans le paragraphe 2.1, la phase de vie en service est associée d'une part à un système d'inspection, et d'autre part à des actions de maintenance. Ces différentes actions interviennent à des instants différents et il convient de les actualiser pour pouvoir les comparer. Dans l'ensemble des ACCV menées pour les familles d'ouvrages A, B et C, la valeur actuelle nette du coût au gestionnaire est déterminée comme indiqué dans l'Equation 2.1.1 en fixant le taux d'actualisation r à 2%.

Le calendrier d'inspection est issu des valeurs du TABLEAU 3.3.2 et les coûts associés sont fournis dans le TABLEAU 3.3.13.

	Unité	Coût (en € 2008)		
		Famille A	Famille B	Famille C
Routine	u	450	385	855
Principale	u	7240	4600	16400
Spéciale	u	14400	10450	22755

Tableau 3.3.13: Coûts unitaires concernant les différents types d'inspections.

Pour les actions de maintenance/remplacement, les coûts unitaires des différentes actions, correspondant au calendrier de maintenance du TABLEAU 3.3.3, sont fournis dans le TABLEAU 3.3.14.

	Action	Unité	Coût (en € 2008)
b	Réparation	u	1430
	Remplacement	u	350
cp	Réparation	m^2	75
	Remplacement	m^2	50
cd	Réparation	m^2	350
wp	Remplacement	m^2	202
rs	Réparation	m^2	11,50
	Remplacement	m^2	11,40
ej	Réparation	m	4670
	Remplacement	m	281,50
sb	Réparation	ml	420
	Remplacement	ml	50
gu	Remplacement	ml	89

Tableau 3.3.14: Coûts unitaires concernant aux actions de maintenance (réparation/remplacement).
(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)

PHASE DE FIN DE VIE EN SERVICE

Les coûts de démolition de l'ouvrage sont ceux de la dernière étape de son cycle de vie (cf. TABLEAU 3.3.15) (FCTUC 2012). Il est noté que la revente des aciers en fin de vie (aciers structuraux et de renforcement) constitue un bénéfice pour le gestionnaire. Comme indiqué dans l'Equation 2.1.1, ces coûts sont ajoutés au coût de construction et de vie en service, en utilisant un taux d'actualisation de 2%, pour déterminer finalement le coût $C_{gestionnaire}$ du cycle de vie à la charge du gestionnaire.

	Unité	Coût (en € 2008)
Démolition de l'ouvrage	m^2	100
Revente de l'acier	t	100

Tableau 3.3.15: Coûts unitaires concernant la fin de vie.

3.3.2.2 *Calcul des impacts environnementaux*

Comme mentionné dans le paragraphe 2.2, les impacts environnementaux sont calculés à l'aide du logiciel SimaPro qui utilise la base des données EcoInvent. Différentes méthodes sont utilisées pour calculer les douze catégories d'impact (I1 à I12 dans le TABLEAU 2.2.1) telles que CML2001 (pour les catégories d'impact I2, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12), EDIP2003 (pour I3 et I4), ReCiPe (pour I5) et CED (pour I1).

PHASE DE CONSTRUCTION

Le processus de construction, considéré dans le paragraphe 3.3.1 pour déterminer les coûts de construction, est maintenant utilisé pour estimer les différents impacts environnementaux (en lien avec les quantités de matériaux spécifiées dans les TABLEAUX 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 et 3.3.7).

Les impacts associés à la construction de la charpente métallique, des éléments en béton, des aciers de renforcement, des équipements et des appareils d'appui et des fondations/piles sont caractérisés en détaillant à chaque fois ce qui est pris (ou non pris) en compte pour le calcul des impacts, du fait du manque de données.

En ce qui concerne la charpente métallique, le manque de connaissance sur l'évaluation des impacts associés à la production des différents types d'acier a conduit à modéliser le processus de la même façon pour tous les types d'acier, hormis pour l'acier autopatinable qui ne comporte pas de couche de protection anticorrosion.

Les données utilisées pour modéliser les processus de fabrication de l'acier structurant sont issues des travaux de Gomes et al. (2012) (cf. FIGURE 3.3.9). Dans cette figure, l'utilisation/amortissement des engins, des équipements et des échafaudages n'est pas pris en compte (en gris dans la FIGURE 3.3.9).

L'ensemble des processus permettant de modéliser la fabrication des charpentes métalliques est regroupé dans le TABLEAU 3.3.16. Il est constaté que l'énergie nécessaire pour le laminage à chaud est estimée à 0,035 kMh/kg (Gomes et al. 2012). Comme pour l'ACCV, la distance de transport pour acheminer la charpente métallique est de 300 km.

La protection anticorrosion pour la charpente métallique est un système de peinture de Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion (ACQPA) avec les informations détaillées dans le TABLEAU 3.3.17 (utilisées pour les classes C3ANI et C4ANV de protection anticorrosion), la quantité de peinture nécessaire pour 100 m^2 étant 75 kg (SETRA 2011).

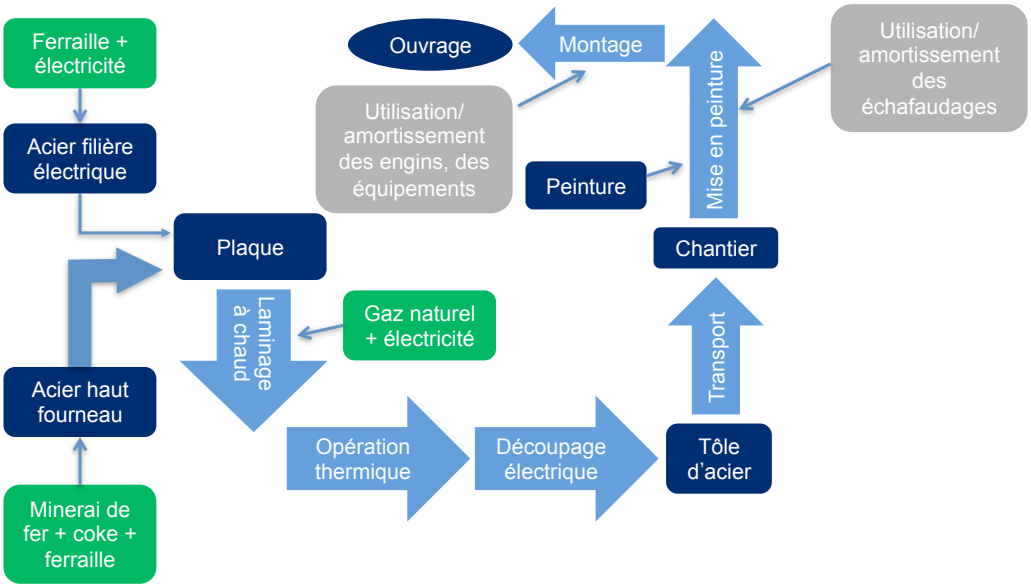


Figure 3.3.9: Schéma-clé des processus pris en compte pour la production de l'acier structurant.

	Unité	
"steel, converter, unalloyed, at plant/RER"	kg	0,67
"steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER"	kg	0,33
"hot rolling steel"	kg	1
"electricity, medium voltage, at grid"	kWh	0,035

Tableau 3.3.16: Ensemble des processus pour l'acier structurant dans SimaPro (Gomes et al. 2012).

Pour la dalle de béton, le processus de fabrication est illustré dans la FIGURE 3.3.10. Les deux composants principaux sont le béton coulé en place et les aciers de renforcement. Comme dans la FIGURE 3.3.9, l'amortissement des engins, des équipements et des coffrages n'est pas pris en compte dans la FIGURE 3.3.10.

Pour le béton, le TABLEAU 3.3.18 indique les différents matériaux constitutifs (FIGURE 3.3.10) et les quantités nécessaires pour produire 1 m^3 de béton (Marceau et al. 2007). La quantité de ciment augmente logiquement avec la classe de résistance en compression. La distance de transport entre le site de production du béton et le chantier est de 100 km.

Les données utilisées pour les aciers de renforcement (hormis l'amortissement des engins et des équipements) dans la modélisation du processus de fabrication sont basées sur les résultats de Gomes et al. (2012) (cf. FIGURE 3.3.11).

En particulier, l'énergie nécessaire pour le laminage à chaud est estimée à 0,035 kMh/kg (Gomes et al. 2012). Les processus dans SimaPro qui permettent de modéliser la fabrication des aciers de renforcement sont détaillés dans le TABLEAU 3.3.19. La distance de transport entre le site de production et le chantier est de 100 km.

	Epaisseur sèche (μm)	ESV (%)	Poids volumique (kg/l)
Couche 1	65	60	2
Couche 2	125	80	1,4
Couche 3	40	50	1,2

Tableau 3.3.17: Données utilisées pour calculer la quantité de peinture pour la protection anti-corrosion (SETRA 2011).
(ESV = Extrait sec en volume exprimé en pourcentage)

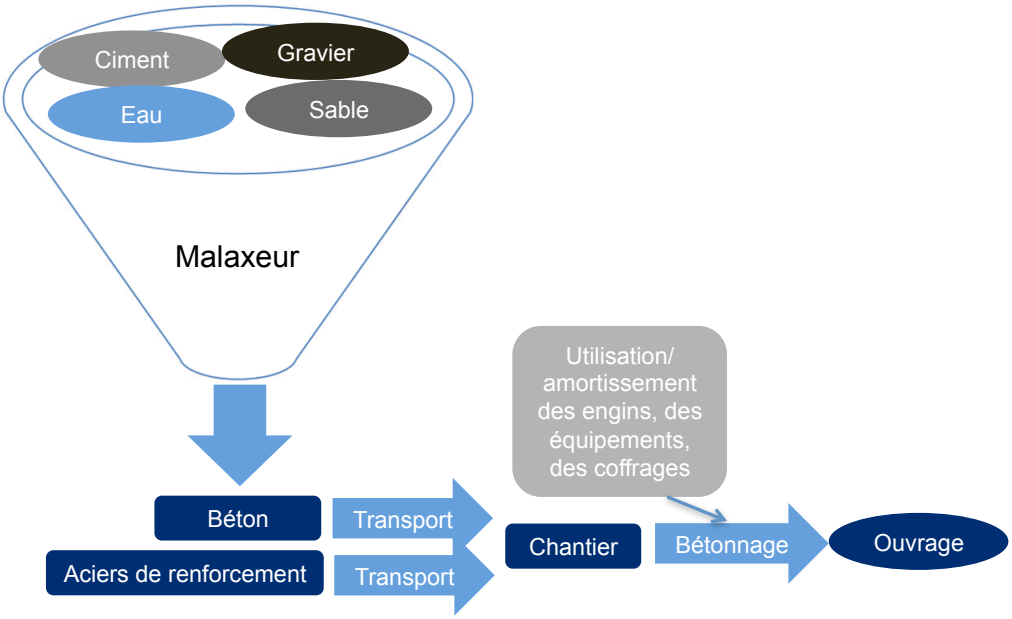


Figure 3.3.10: Schéma-clé des processus pris en compte pour la production du béton.

Pour 1 m^3 de béton	Unité	C30/37	C35/45
Ciment	kg	279	335
Gravier	kg	1187	1187
Sable	kg	771	712
Eau	kg	141	141

Tableau 3.3.18: Matériaux constitutifs pour 1 m^3 de béton (Marceau et al. 2007).

	Unité	
"steel, converter, unalloyed, at plant/RER"	kg	0,02
"steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER"	kg	0,98
"hot rolling steel"	kg	1
"electricity, medium voltage, at grid"	kWh	0,035

Tableau 3.3.19: Ensemble des processus pour les aciers de renforcement dans SimaPro (Gomes et al. 2012).

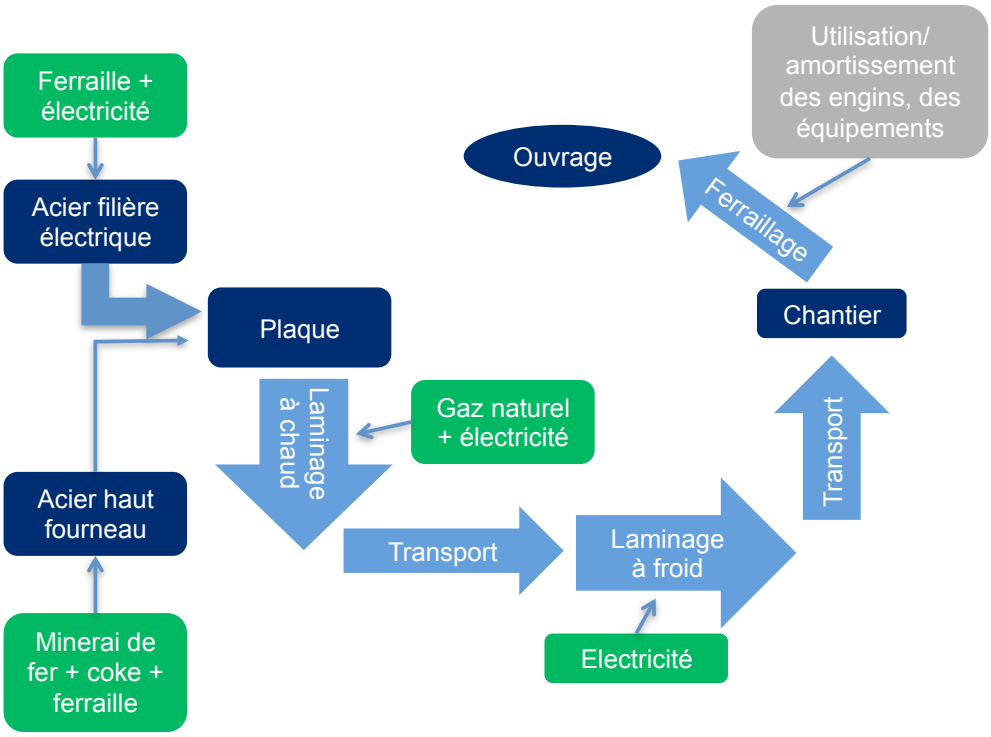


Figure 3.3.11: Schéma-clé des processus pris en compte pour la production des aciers de renforcement.

Pour les équipements et appareils d'appui, dû au manque de données, seuls quelques éléments sont pris en compte pour l'estimation des impacts environnementaux tels que les appareils d'appui en élastomère, l'étanchéité et la couche de roulement.

Pour les autres éléments, bien que le manque d'information ne permette pas de les modéliser dans SimaPro, leur transport jusqu'au chantier (100 km) est quand même considéré.

Pour les fondations et les piles, les quantités de béton et d'acier sont considérées dans l'ACV avec les processus de fabrication précédemment présentés. Les matériaux constitutifs pour 1 m^3 de béton sont détaillés dans le TABLEAU 3.3.20. La distance de transport du site de production au chantier de construction est de 100 km.

Pour 1 m^3 de béton	Unité	C16/20	C25/30	C30/37	C35/45
Ciment	kg	179	223	279	335
Gravier	kg	1127	1127	1187	1187
Sable	kg	831	831	771	712
Eau	kg	141	141	141	141

Tableau 3.3.20: Matériaux constitutifs pour 1 m^3 de béton (Marceau et al. 2007).

PHASE DE VIE EN SERVICE

Le processus pour une inspection est montré dans la FIGURE 3.3.12. Dû au manque de connaissances sur l'évaluation des impacts pour chacune des étapes de l'inspection, seul le transport de l'équipe d'inspection (100 km) est pris en compte.

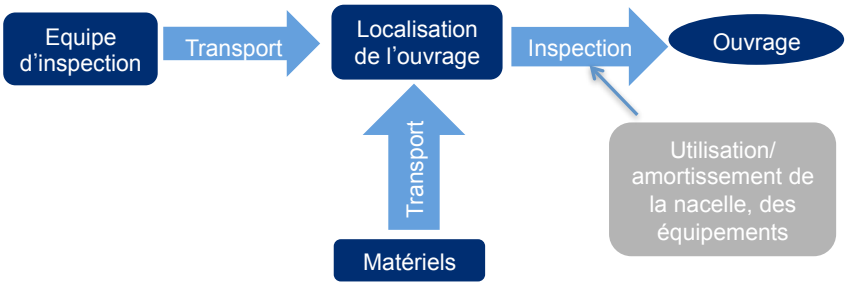


Figure 3.3.12: Schéma-clé des processus pris en compte pour une inspection.

Le processus d'une action de maintenance/réhabilitation est illustré dans la FIGURE 3.3.13, dans laquelle les impacts environnementaux des matériaux, du transport ainsi que celui des équipes d'intervention, et finalement du transport des déchets sont pris en compte. Pour les éléments où les informations sur le matériau ne sont pas disponibles, seul le transport des matériaux est pris en compte (TABLEAU 3.3.22).

Dans le cas particulier de l'opération de changement de la protection anticorrosion, les impacts incluent :

- la mise en place du chantier,
- le décapage,
- la mise en place de la couche de peinture anticorrosion (matériaux),
- le transport des déchets au centre de traitement,
- le traitement des déchets toxiques.

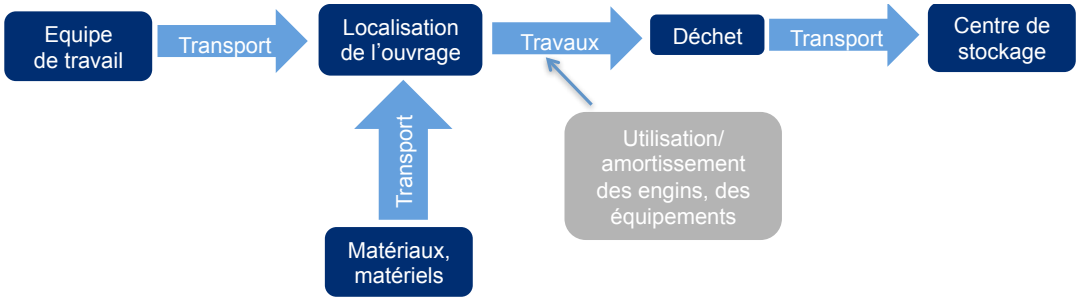


Figure 3.3.13: Schéma-clé des processus pris en compte pour une action de maintenance/réhabilitation.

Un chantier de changement de protection anticorrosion est en réalité très lourd et très toxique (ce type de chantier est soumis à des règles sanitaires strictes). Dans cette thèse, seuls la mise en place de la peinture et le transport des déchets (sable utilisé) ont été quantifiés à l'aide du TABLEAU 3.3.21. Les autres étapes n'ont pas été comptabilisées par manque des données.

	Unité	Déchets générés	Action équivalente - SBRI
Décapage	kg/m^2	35	Remplacement
Cosmétique	kg/m^2	-	Réparation

Tableau 3.3.21: Déchets générés lors des actions de maintenance concernant la protection anticorrosion (SETRA 2011).

	Unité		Réparation	Remplacement
b	u	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	inclus	100 km
		Matériaux	0	0
		Transport des déchets	inclus	50 km
cp	m^2	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	inclus	inclus
		Matériaux	0	0
		Transport des déchets	50 km	50 km
cd	m^2	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	inclus	100 km
		Matériaux	0	0
		Transport des déchets	50 km	50 km
wp	m^2	Transport des personnes	100 km	
		Transport des matériaux	100 km	
		Matériaux	0	
		Transport des déchets	60 km	
rs	m^2	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	100 km	100 km
		Matériaux	0	0
		Transport des déchets	60 km	60 km
ej	m	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	inclus	inclus
		Matériaux	n	n
		Transport des déchets	10 km	10 km
sb	ml	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	inclus	100 km
		Matériaux	n	n
		Transport des déchets	50 km	50 km
gu	ml	Transport des personnes	100 km	100 km
		Transport des matériaux	inclus	100 km
		Matériaux	n	n
		Transport des déchets	10 km	10 km

Tableau 3.3.22: Processus pris en compte pour les actions de maintenance.
(0 = prise en compte, n = non prise en compte)
(inclus = matériaux transportés avec l'équipe de travail)
(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)

PHASE DE FIN DE VIE EN SERVICE

Pour la phase de fin de vie, l'ACV est menée selon la "méthode des stocks" qui consiste à considérer que la mise en décharge est la fin de l'étude (AFNOR 2004). Contrairement à l'ACCV, le recyclage de l'acier n'est donc pas pris en compte dans l'ACV dans la suite de cette thèse.

3.3.2.3 *Calcul des externalités liées à la congestion du trafic*

HYPOTHÈSES CONCERNANT LE TRAFIC ROUTIER

En ce qui concerne la gêne aux usagers et l'impact de la congestion, le trafic considéré est caractérisé par le nombre de véhicules passant sur et/ou sous le pont en une heure. Le trafic de référence est un trafic autoroutier au Portugal de 36260 véhicules/jour pour une autoroute 2x2 voies (FCTUC 2012, SBRI 2013a) (FIGURE 3.3.14). Ce trafic comprend les quatres catégories de véhicule suivantes :

- catégorie 1 : moto ou véhicule de hauteur inférieure à 1,10 m, avec ou sans remorque.
- catégorie 2 : véhicule avec deux essieux de hauteur égale ou supérieure à 1,10 m.
- catégorie 3 : véhicule avec trois essieux de hauteur égale ou supérieure à 1,10 m.
- catégorie 4 : véhicule avec trois ou plusieurs essieux de hauteur égale ou supérieure à 1,10 m.

La répartition des véhicules est 80%, 8%, 10% et 2% pour les catégories 1, 2, 3 et 4, respectivement.

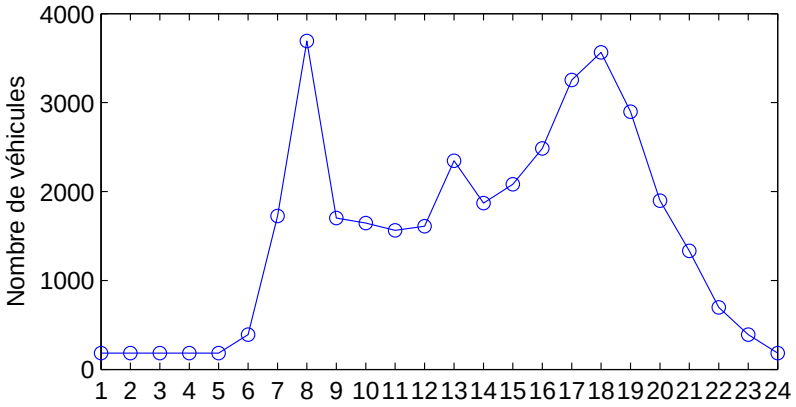


Figure 3.3.14: Distribution journalière du trafic de référence (FCTUC 2012, SBRI 2013a).

Partant de ce trafic de référence, les trafics considérés pour les familles d'ouvrages A, B et C sont détaillés ci-après :

- l'analyse sociétale pour les ouvrages de la famille A ne concerne que le trafic au dessus de l'ouvrage. Toutes les variantes dans la famille A sont composées de deux ouvrages de deux voies dans le même sens de circulation (2x2 voies au total). Le calcul est donc mené pour chaque sens de circulation avec un trafic de 18130 véhicules/jour (la moitié du trafic de référence) (FIGURE 3.3.15), le résultat étant ensuite multiplié par deux.
- l'analyse sociétale pour les ouvrages de la famille B concerne le trafic au dessus de l'ouvrage (2 voies) et celui en dessous de l'ouvrage (2x3 voies) avec la possibilité de passer en 2x4 voies à partir de l'année 25 pour tenir compte de l'accroissement de trafic pour toutes les variantes. En particulier, le trafic au dessus de l'ouvrage est pris égal à 9070 véhicules/jour (1/4 du trafic de référence) pour caractériser

un trafic moins important que celui sur l'autoroute. Le calcul est donc mené avec 9070 véhicules/jour pour le trafic au dessus et 48870 véhicules/jour (1,5 fois le trafic de référence) pour le trafic sous l'ouvrage (FIGURE 3.3.16).

– l'analyse sociétale pour les ouvrages de la famille C ne concerne que le trafic au dessus de l'ouvrage. Deux variantes C0 et C2 concernent 1 ouvrage de 4 voies (2x2 voies) tandis que la variante C1 concerne 2 ouvrages de 2 voies avec une possibilité de basculer une partie de trafic d'un ouvrage sur l'autre. Le calcul est donc mené à chaque fois avec deux sens de circulation d'un trafic de 36260 véhicules/jour (1 fois le trafic de référence) (FIGURE 3.3.14).

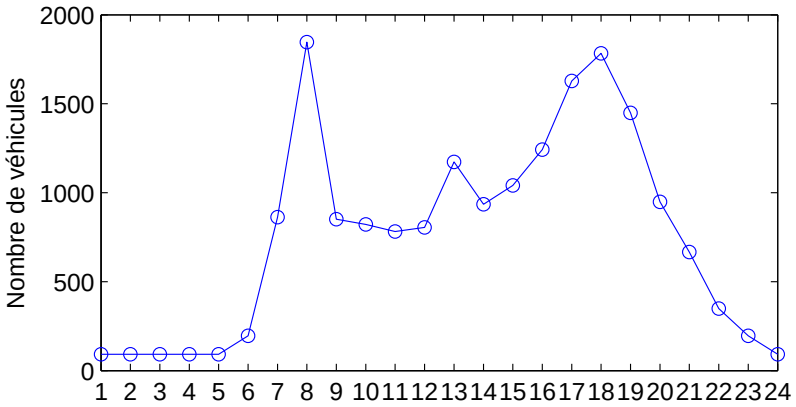


Figure 3.3.15: Distribution journalière du trafic pour la famille A (FCTUC 2012, SBRI 2013a).

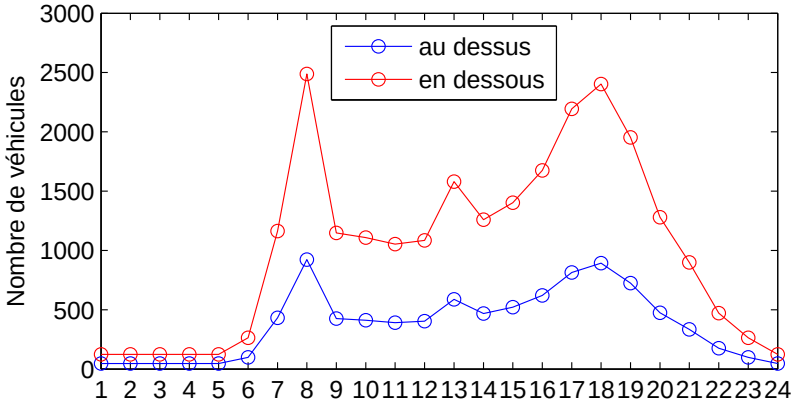


Figure 3.3.16: Distribution journalière du trafic pour la famille B (FCTUC 2012, SBRI 2013a).

De plus, ces trafics sont supposés augmenter dans le temps (2% pour les 10 premières années, 1% pour les 10 années suivantes, puis 0,5% par an jusqu'à la fin de vie en service). L'évolution du trafic est montrée dans la FIGURE 3.3.17 pour les familles A et C et dans la FIGURE 3.3.18 pour la famille B (au dessus et en dessous de l'ouvrage).

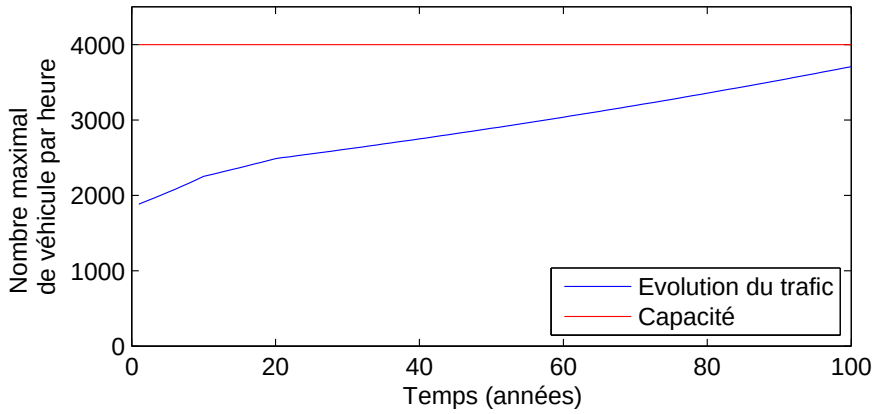
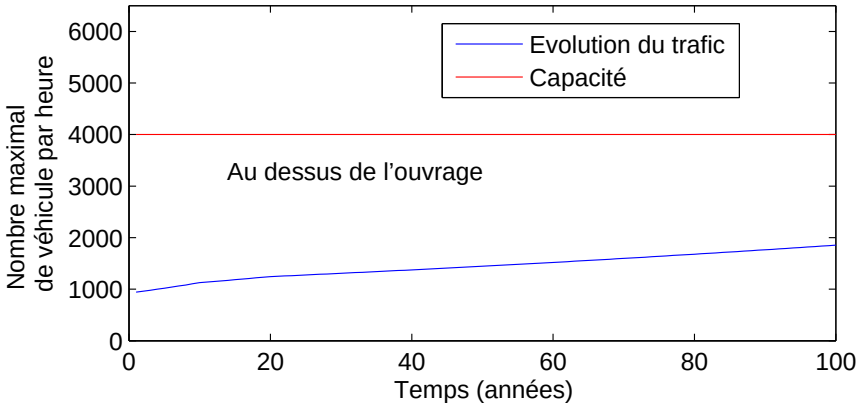
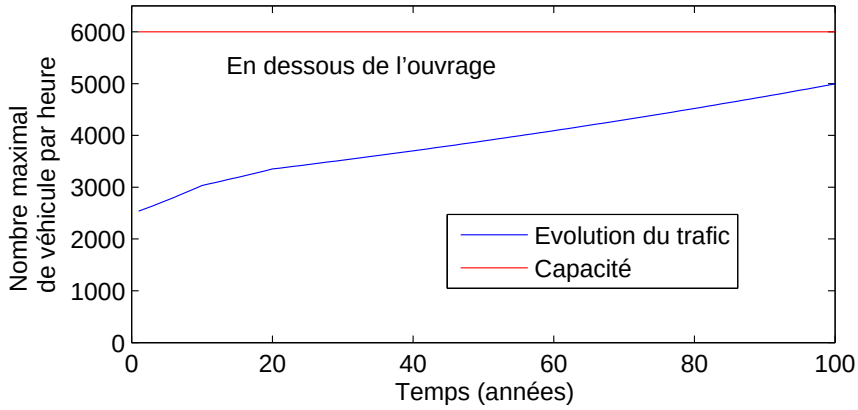


Figure 3.3.17: Evolution du trafic passant sur l'ouvrage pour les familles A et C.



(a) sur l'ouvrage



(b) sous l'ouvrage

Figure 3.3.18: Evolution du trafic (a) sur et (b) sous l'ouvrage pour les ponts de la famille B.

CALCUL DES COÛTS ET IMPACTS DURANT LA VIE EN SERVICE

Pendant la phase de vie en service, l'aspect sociétal est considéré en parallèle de l'ACCV et de l'ACV pour caractériser la gêne aux usagers (via un calcul de coûts et d'impacts environnementaux dus à la congestion du trafic).

Les coûts unitaires aux usagers sont présentés dans les TABLEAUX 3.3.23 et 3.3.24 (SBRI 2013a, Gervasio 2012). Ces coûts caractérisent d'une part les coûts d'utilisation du véhicule et les coûts de la valeur du temps, et d'autre part les coûts des accidents. Ces différents coûts sont à relier au modèle de congestion de trafic utilisé dans l'étude (QUEWZ-98).

Catégorie de véhicule	Coût unitaire (€ 2008)	
	Coût d'utilisation	Valeur du temps
1	0,17	7,75
2	0,12	6,20
3	0,83	62,90
4	0,67	9,30

Tableau 3.3.23: Coûts unitaires pour les coûts aux usagers.

Type d'accident	Coût (€ 2008)
Avec des blessés légers	41600
Avec des blessés sévères	93600
Avec des décès	520000

Tableau 3.3.24: Coûts unitaires pour les accidents.

Pour les impacts environnementaux dus à la congestion du trafic, le modèle QUEWZ-98, détaillé dans le paragraphe 2.3.2, permet d'estimer la quantité de carburant consommée et l'émission des hydrocarbures HC, du monoxyde de carbone CO, et de l'oxyde d'azote NOx. Ces différents types d'émission sont alors quantifiés à l'aide des indicateurs Iu1 à Iu12.

Vis-à-vis de l'aspect sociétal, l'inspection est effectuée pendant seulement quelques heures. Il est supposé que cette opération est réalisée aux moments où la densité de trafic est suffisamment faible pour ne pas occasioner de gêne aux usagers.

Concernant les actions de maintenance/remplacement (en lien avec le calendrier de maintenance de la FIGURE 3.3.4), les hypothèses concernant la restriction du trafic sont détaillées dans le TABLEAU 3.3.25. Les durées de chantier sont également estimées à partir de ce tableau.

Pour pleinement évaluer la gêne aux usagers, deux scénarios d'entretien sont étudiés pour le calcul des coûts aux usagers et des impacts environnementaux générés par la congestion du trafic : (i) un scénario de "jour" où les actions sur les appareils d'appui, la protection anticorrosion (réparation uniquement), la chaussée (réparation uniquement), les joints de chaussée et les barrières de sécurité sont menées pendant la journée (de 8h à 17h) et (ii) un scénario de "nuit" semblable au scénario de "jour", pour lequel ces opérations sont effectuées pendant la nuit (de 21h à 6h). Pour les deux scénarios, les restrictions sont maintenues 24h/24 pour des actions lourdes et

de longue durée telles que la réparation de la dalle de béton, le remplacement de la protection anticorrosion, de l'étanchéité, de la chaussée et des corniches canniveaux.

Par manque d'information, il n'a pas été possible de quantifier de manière exhaustive les différences des coûts des interventions de jour ou de nuit. Ainsi, le travail de nuit représente un surcoût pour le gestionnaire. Il peut également influencer le risque des accidents du travail mais ce sujet n'est pas traité dans cette thèse.

	Action	Unité	Taux de travail	Restrictions	
			(Unité/jour)	Au dessus	En dessous
b	Réparation	u	0,5	vitesse limitée	-
	Remplacement	u	0,67	vitesse limitée	-
cp	Réparation	m^2	100	-	1 voie fermée
	Remplacement	m^2	50	-	1 voie fermée
cd	Réparation	m^2	12,50	-	1 voie fermée
wp	Remplacement	m^2	50	1 voie fermée	-
rs	Réparation	m^2	50	1 voie fermée	-
	Remplacement	m^2	50	1 voie fermée	-
ej	Réparation	m	3,50	1 voie fermée	-
	Remplacement	m	3,50	1 voie fermée	-
sb	Réparation	ml	36	vitesse limitée	-
	Remplacement	ml	36	vitesse limitée	-
gu	Remplacement	ml	10	vitesse limitée	-

Tableau 3.3.25: Taux de travail et restrictions concernant le trafic au dessus et en dessous de l'ouvrage pendant les actions de maintenance (réparation/remplacement). (b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)

3.4 APPLICATION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE À DES ÉTUDES COMPARATIVES DE DIMENSIONNEMENT

Ce paragraphe détaille les analyses de cycle de vie (cf. chapitre 2) effectuées en considérant les cas d'étude du paragraphe 3.2 et les scénarios de gestion du paragraphe 3.3.1.4. Comme il a été mentionné au paragraphe 3.3.1.4, l'objectif est de mener une analyse comparative afin de quantifier l'avantage de certains variantes originales vis-à-vis de solutions traditionnelles de dimensionnement (Ta et al. 2012). Les résultats sont donc présentés en grande majorité sous la forme d'écarts relatifs par par rapport à la variante de référence associée (les résultats en valeur absolue sont fournis dans l'Annexe B de ce mémoire).

3.4.1 *Aspects innovants sur les matériaux*

3.4.1.1 *Utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité*

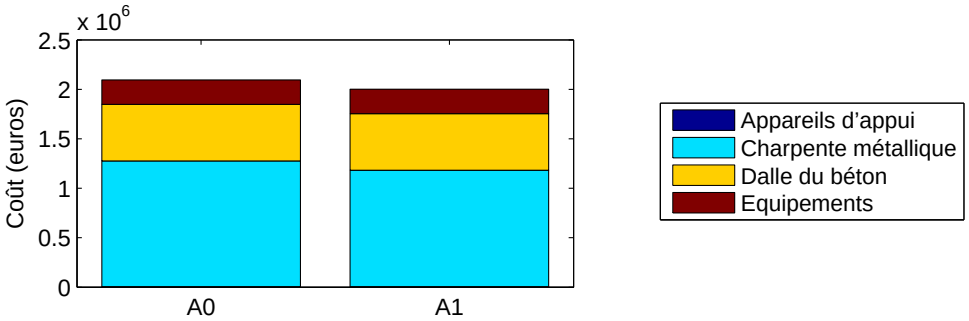
Afin de mettre en évidence l'avantage des aciers HLE, deux études comparatives sont proposées dans ce paragraphe, la première pour une variante de la famille A (variante A1 par rapport à A0) et la deuxième pour une variante de la famille C (variante C2 par rapport à C0) (cf. paragraphe 3.2.2).

COMPARAISON DES VARIANTES A1 ET A0

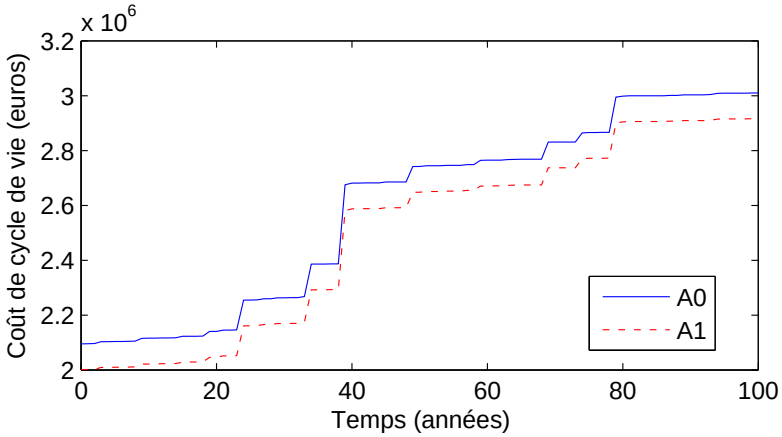
Vis-à-vis de l'aspect économique, les FIGURES 3.4.1a, 3.4.1b et 3.4.1c détaillent respectivement les coûts de construction, l'évolution des coûts au gestionnaire durant la vie en service (le coût à l'instant initial dans la FIGURE 3.4.1b correspondant au coût de construction), et le coût de cycle de vie total pour les deux options de dimensionnement A0 et A1, respectivement. Il est noté qu'un détail plus approfondi de ces coûts est fourni dans l'Annexe B de ce mémoire.

Dans la FIGURE 3.4.1a, on constate que (i) l'acier représente une part importante dans le coût total de la construction, (iii) le coût concernant les appareils d'appui est négligeable par rapport aux autres coûts, (iv) le coût des équipements est moins important que celui de l'acier et du béton. Par ailleurs, l'utilisation d'aciers à haute résistance (S460) (variante A1) permet de réduire légèrement la quantité d'acier, ce qui explique la diminution du coût total de construction pour A1 (-4,48%/A0), même si l'acier de type S460 est plus cher que l'acier standard - S355 (cf. paragraphe 3.2.2). Il est cependant noté que le coût de construction des deux variantes semble relativement proche, étant donné le niveau élevé de variabilité observé dans les appels d'offre (IFSTTAR 2012, cf. Annexe B).

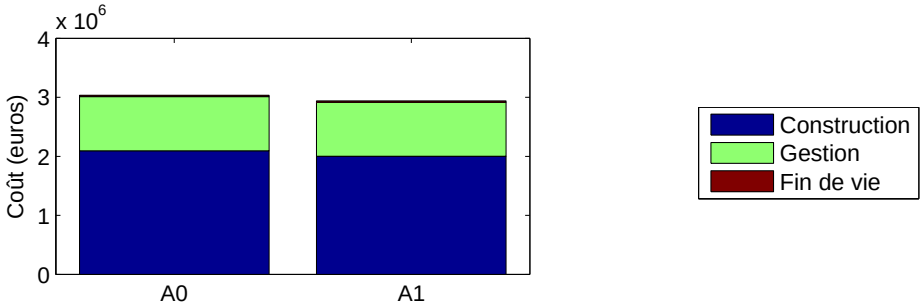
Concernant le cycle de vie, les FIGURES 3.4.1b et 3.4.1c montrent que la variante A1, moins chère à la construction, continue d'être plus avantageuse sur le cycle de vie total. Les coûts de fin de vie sont négligeables par rapport aux coûts de construction ou de maintenance car ces coûts sont rencontrés à l'année 100 et sont actualisés avec un taux annuel d'actualisation fixé à 2%.



(a) Etape de construction.



(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la vie en service.



(c) Coût du cycle de vie total.

Figure 3.4.1: Comparaison des coûts de cycle de vie - A1 par rapport à A0.

Le TABLEAU 3.4.1 synthétise finalement le coût à la construction et sur le cycle de vie pour la variante A0 et l'écart relatif pour A1. Ce tableau montre que la différence entre les deux variantes s'atténue légèrement lorsque l'on passe de la phase de construction à la phase de fin de vie, étant donné qu'il n'y a pas de différence de coûts durant la vie en service (l'écart relatif est donc nul pour la phase de gestion "ges", cf. TABLEAU 3.4.1b). Concernant le coût de fin de vie, il est égal, comme mentionné dans le paragraphe 3.3, à la somme des coûts de démolition de l'ouvrage, de transport et de mise en décharge des déchets à laquelle on soustrait le revenu de la vente de l'acier. La variante A1 ayant moins d'acier, le revenu suite à la vente des aciers est moins important que dans le cas de la variante de référence A0, ce qui entraîne un coût de fin de vie plus important (cf. TABLEAU 3.4.1b). Finalement, par rapport au cas de référence A0, la variante A1 est associée à un coût total de cycle de vie plus faible (-3,07%/A0).

	Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE
	A0	Δ(A1)/A0 (%)
b	6000 €	-1,57
ss	1270000 €	-7,39
cd	572000 €	0
e	248000 €	0
Total	2096000 €	-4,48

(a) Etape de construction

	Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE
	A0	Δ(A1)/A0 (%)
cons	2096000 €	-4,48
ges	915000 €	0
fin	24000 €	+2,67
Total	3035000 €	-3,07

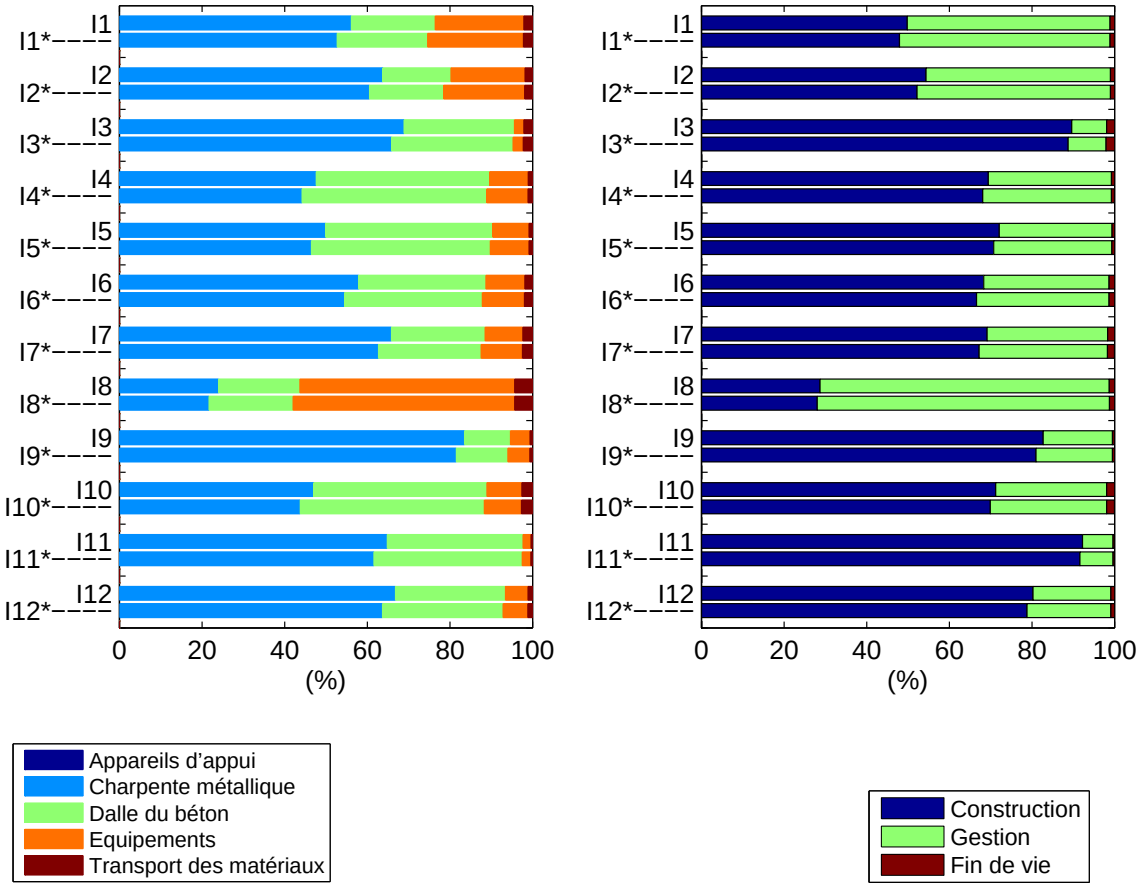
(b) Cycle de vie total

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service : inspection, maintenance, fin = fin de vie)

Tableau 3.4.1: Comparaison des coûts - A1 par rapport à A0.

La FIGURE 3.4.2 montre les impacts environnementaux (notés $I1$ à $I12$ pour A0, et $I1^*$ à $I12^*$ pour A1) générés lors de la phase de construction et sur le cycle de vie total pour les variante A1 et A0. Des conclusions similaires à celles observées dans l'AECV sont obtenues ici à savoir que : (i) l'acier représente une part importante dans les impacts environnementaux de la construction pour toutes les catégories d'impact, (ii) les impacts des appareils d'appui sont négligeables, (iii) les équipements génèrent moins d'impact que ceux de l'acier et du béton. Si la répartition entre les appareils d'appui, la charpente métallique, la dalle de béton, les équipements, le transport des matériaux est relativement proche pour la majorité des catégories d'impact, il est observé une différence pour l'impact $I8$ (destruction de la couche d'ozone) pour lequel la partie des équipements, intégrant les enrobés de chaussée, influence en grande partie cet indicateur.

Les douze impacts sont détaillés dans le TABLEAU 3.4.2 pour l'étape de construction et le cycle de vie total. Une diminution de l'écart relatif de la variante A1 par rapport à A0 est cependant notée dans l'ensemble des cas dès que l'on passe de la phase de construction au cycle de vie total.



(a) Phase de construction

(b) Cycle de vie total

Figure 3.4.2: Comparaison des impacts environnementaux - A1 par rapport à A0.

		Etape de construction		Cycle de vie total	
		Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE	Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE
		A0	Δ(A1)/A0 (%)	A0	Δ(A1)/A0 (%)
I1	MJ	14151425	-7,43	28394798	-3,74
I2	kg Sb eq.	7104	-8,45	13061	-4,63
I3	kg	111018	-9,14	123881	-8,26
I4	kg	21	-6,27	30	-4,38
I5	l	9108	-6,6	12631	-4,78
I6	kg CO_2 eq.	913362	-7,68	1336701	-5,29
I7	kg SO_2 eq.	2912	-8,72	4209	-6,09
I8	kg $CFC-11$ eq.	6,50E-02	-3,18	2,26E-01	-0,95
I9	kg C_2H_2	384	-11,06	464	-9,17
I10	kg PO_4^{-3}	699	-6,16	981	-4,45
I11	kg $1,4-DB$ eq.	2324816	-8,57	2519740	-7,92
I12	kg $1,4-DB$ eq.	286308	-8,84	356636	-7,13

Tableau 3.4.2: Comparaison des impacts environnementaux - A1 par rapport à A0.

COMPARAISON DES VARIANTES C2 ET C0

Les coûts totaux de construction pour les options de dimensionnement C0 et C2 sont présentés dans la FIGURE 3.4.3a (cf. Annexe B pour le détail du calcul des coûts). Il est noté que le coût de la construction est moins élevé pour l'option C2 avec l'utilisation des poutres hybrides avec des aciers à haute limite d'élasticité (S355, S460 et S690) du fait de la diminution des quantités de matériaux utilisés. Il est également noté que l'acier représente une part majeure dans le coût de construction des ponts mixtes caissons acier-béton. En ce qui concerne les coûts durant la durée de vie en service, une comparaison est proposée dans la FIGURE 3.4.3b (comme dans la FIGURE 3.4.1b les coûts à l'instant initial dans cette figure incluent le coût de construction). En ajoutant le coût de fin de vie, la comparaison des coûts totaux de cycle de vie est finalement présentée dans la FIGURE 3.4.3c. Le détail des coûts pour C0 et le comparatif des écarts relatifs entre C2 et C0 pour chaque étape du cycle de vie est fourni dans le TABLEAU 3.4.3. Il est observé qu'il n'y a pas de modification du classement des variantes que ce soit à l'étape de construction ou sur le cycle de vie de l'ouvrage. En ce qui concerne les coûts à la charge du gestionnaire, il n'y a en effet pas de différence majeure durant la durée de vie en service qui pourrait entraîner un changement de la classification de ces deux variantes sur le plan économique.

	Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE
	C0	Δ(C2)/C0 (%)
b	70000 €	-5,79
ss	16685000 €	-6,63
cd	2562000 €	0
e	1117000 €	0
Total	20434000 €	-5,43

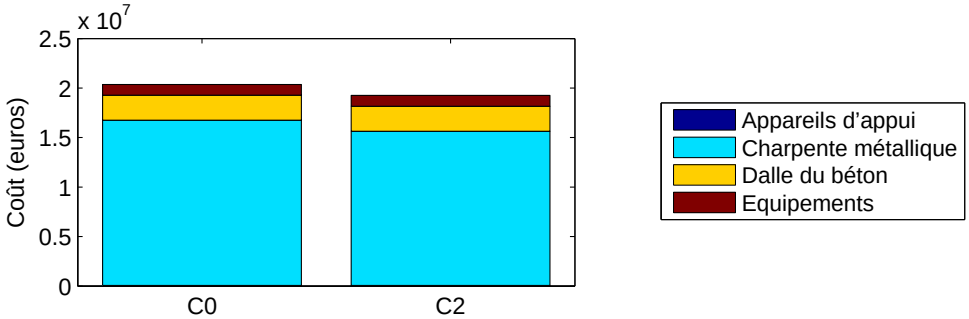
(a) Etape de construction

	Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE
	C0	Δ(C2)/C0 (%)
cons	20434000 €	-5,43
ges	4797000 €	-0,52
fin	108000 €	+13,41
Total	25339000 €	-4,42

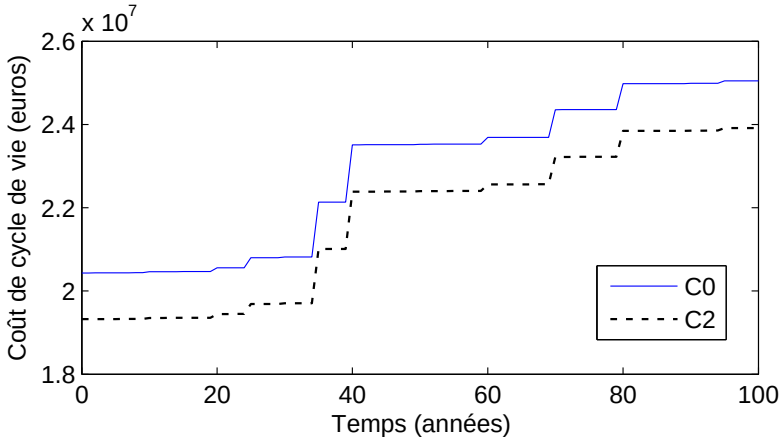
(b) Cycle de vie total

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service (inspection, maintenance), fin = fin de vie)

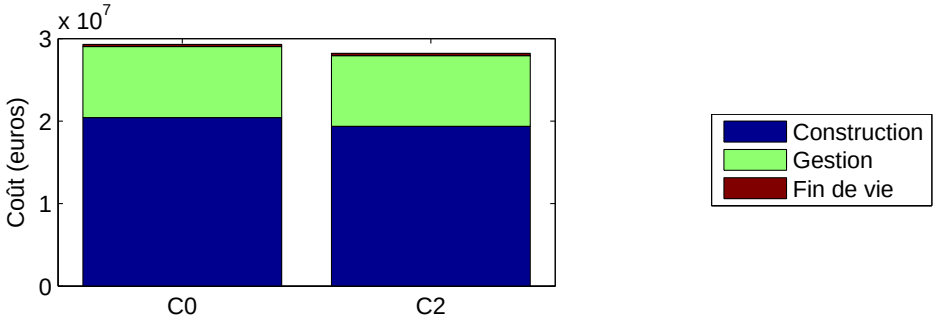
Tableau 3.4.3: Comparaison des coûts - C2 par rapport à C0.



(a) Etape de construction.



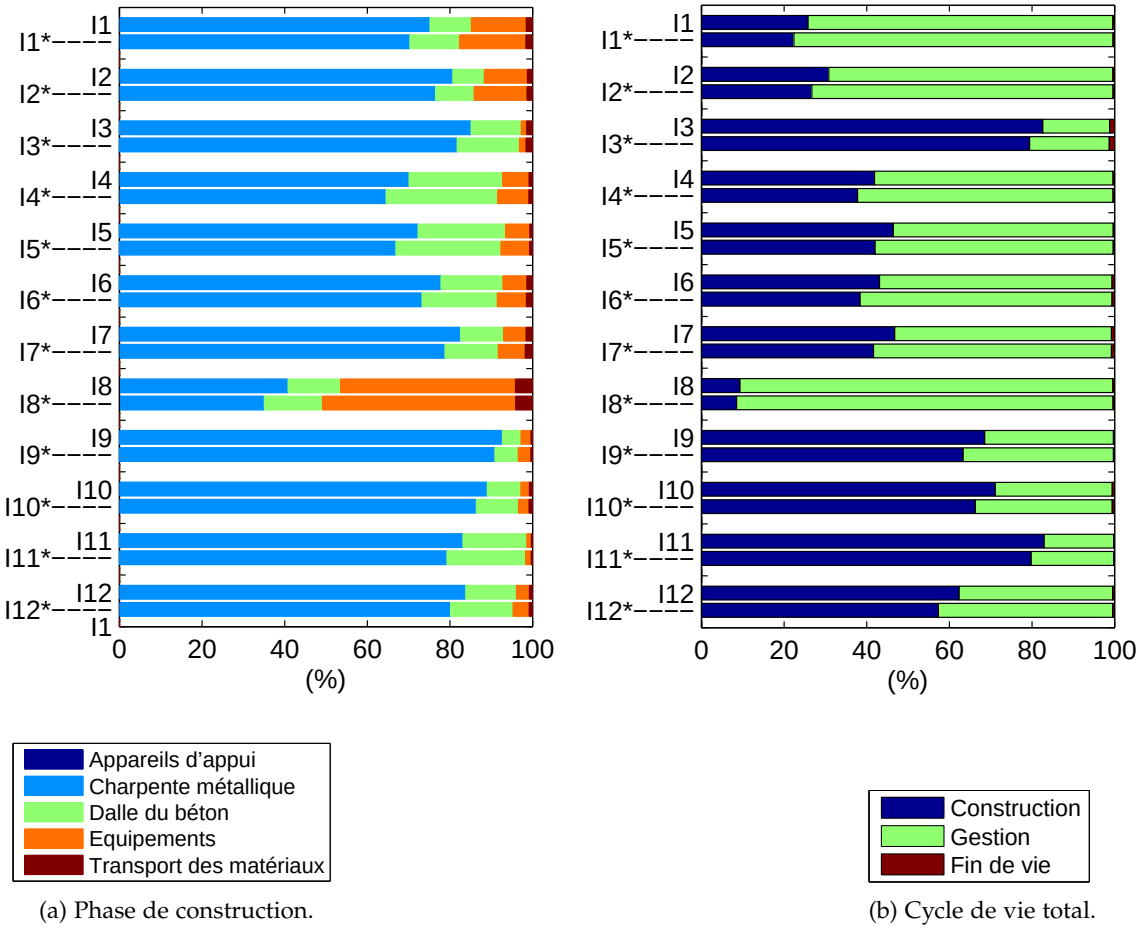
(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total.

Figure 3.4.3: Comparaison des coûts de cycle de vie - C2 par rapport à C0.

En ce qui concerne l'ACV, la FIGURE 3.4.4 montre les impacts environnementaux (notés $I1$ à $I12$ pour Co, et $I1^*$ à $I12^*$ pour C2) générés lors de la phase de construction et sur le cycle de vie total pour les variante C2 et Co. Des conclusions similaires à celles observées dans l'AECV sont obtenues ici à savoir que : (i) l'acier représente une part majoritaire dans les impacts environnementaux de la construction pour toutes les catégories d'impact (hormis pour $I8$ qui est fortement impacté par la production/-maintenance des enrobés qui sont comptabilisés en tant qu'équipements), (ii) les impacts des appareils d'appui sont négligeables, (iii) les équipements génèrent moins d'impact que ceux de l'acier et du béton.



(a) Phase de construction.

(b) Cycle de vie total.

Figure 3.4.4: Comparaison des impacts environnementaux - C2 par rapport à Co.

Les douze impacts sont détaillés dans le TABLEAU 3.4.4 pour l'étape de construction et le cycle de vie total. Comme dans le cas de la comparaison de A1 avec A0 (cf. TABLEAU 3.4.2) une diminution de l'écart relatif de la variante C2 par rapport à Co est notée dans l'ensemble des cas lorsque l'on passe de l'étape de construction au cycle de vie total. La différence entre les deux variantes ne concernant que la phase de construction (le scénario de maintenance est supposé le même pour les poutres caisson des variantes Co et C2), le fait d'intégrer les impacts dans les phases de vie en service et de fin de vie entraîne automatiquement une diminution de l'écart relatif.

		Etape de construction		Cycle de vie total	
		Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE	Variante de référence	Utilisation d'aciers HLE
		Co	Δ(C2)/Co (%)	Co	Δ(C2)/Co (%)
I1	MJ	136455979	-17,17	528483748	-4,48
I2	kg Sb eq.	72940	-18,38	236302	-5,71
I3	kg	1164901	-19,44	1409684	-16,19
I4	kg	184	-15,9	440	-6,7
I5	l	82097	-16,37	176748	-7,64
I6	kg CO_2 eq.	8809928	-17,75	20436946	-7,72
I7	kg SO_2 eq.	29960	-18,89	64043	-8,92
I8	kg $CFC-11$ eq.	4,65E-01	-9,53	5	-0,94
I9	kg C_2H_2	4550	-20,95	6634	-14,4
I10	kg PO_4^{-3}	17405	-20,19	24473	-14,42
I11	kg $1,4-DB$ eq.	23820658	-18,77	28715536	-15,6
I12	kg $1,4-DB$ eq.	2981503	-19,01	4778099	-11,91

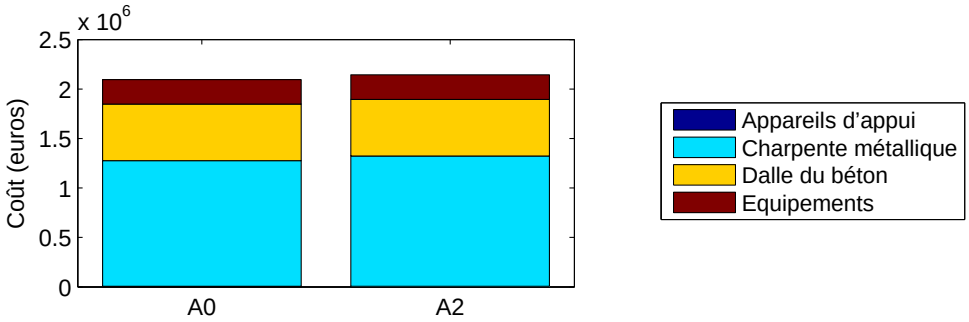
Tableau 3.4.4: Comparaison des impacts environnementaux - C2 par rapport à Co.

3.4.1.2 *Utilisation de l'acier autopatinable*

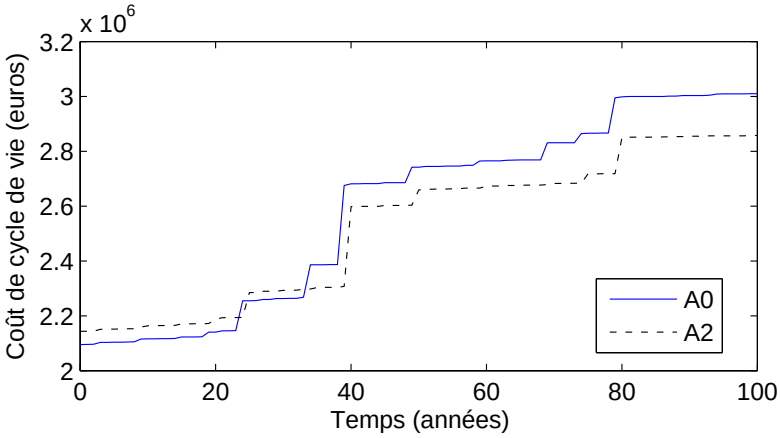
COMPARAISON DES VARIANTES A2 ET A0

La FIGURE 3.4.5a détaille les coûts de construction pour les options de dimensionnement A0 et A2. Comme dans le paragraphe 3.4.1.1, la charpente métallique et la dalle de béton apparaissent comme les plus importants contributeurs au coût de construction. Cependant, à l'inverse de la variante A1 dans la FIGURE 3.4.1a, la variante avec l'utilisation de l'acier autopatinable est plus chère à la construction que la variante de référence (+2,29%/A0), ce qui s'explique par le fait que l'utilisation de l'acier autopatinable conduit à une augmentation significative de la quantité d'acier. En effet, cette solution nécessite une augmentation de l'épaisseur de 2,0 mm sur chaque surface visible de la charpente (AFNOR 2005, Circulaire 1985, Berthold 2012) et le coût d'achat de l'acier autopatinable est légèrement plus élevé.

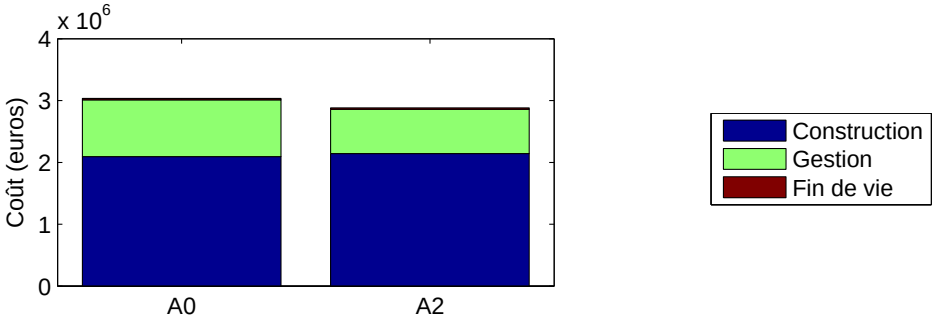
Concernant l'ensemble du cycle de vie, la FIGURE 3.4.5b montre l'évolution des coûts à la charge du gestionnaire durant la durée de vie en service. Il est intéressant de noter que les deux courbes se croisent entre la 30ème et 40ème année dans la FIGURE 3.4.5b et que l'écart se creuse à l'année 70. Ce constat est dû au fait que le remplacement du système de protection anti-corrosion est programmé aux années 35 et 70 dans cette étude (cf. FIGURE 3.3.4). La comparaison des coûts sur le cycle de vie est montrée dans la FIGURE 3.4.5c et la variante A2 est logiquement moins chère que A0 compte tenu du scénario durant la vie en service (FIGURE 3.3.4).



(a) Etape de construction.



(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total.

Figure 3.4.5: Comparaison des coûts de cycle de vie - A2 par rapport à A0.

Finalement, le TABLEAU 3.4.5 synthétise les coûts de cycle de vie pour A0 et A2. La variante A2 est donc associée à un coût de cycle de vie plus faible (-5,05%/A0 pour A2). Comme pour la variante A1 dans la FIGURE 3.4.1c, il est observé dans la FIGURE 3.4.5c que les coûts de fin de vie sont négligeables par rapport aux coûts de construction ou de maintenance car ces coûts sont rencontrés à l'année 100 et sont actualisés avec un taux annuel d'actualisation fixé à 2%.

	Variante de référence	Utilisation d'aciers autopatinables
	A0	Δ(A2)/A0 (%)
b	6000 €	+1,00
ss	1270000 €	+3,77
cd	572000 €	0
e	248000 €	0
Total	2096000 €	+2,29

(a) Etape de construction

	Variante de référence	Utilisation d'aciers autopatinables
	A0	Δ(A2)/A0 (%)
cons	2096000 €	+2,29
ges	915000 €	-21,94
fin	24000 €	-2,29
Total	3035000 €	-5,05

(b) Cycle de vie total

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service : inspection, maintenance, fin = fin de vie)

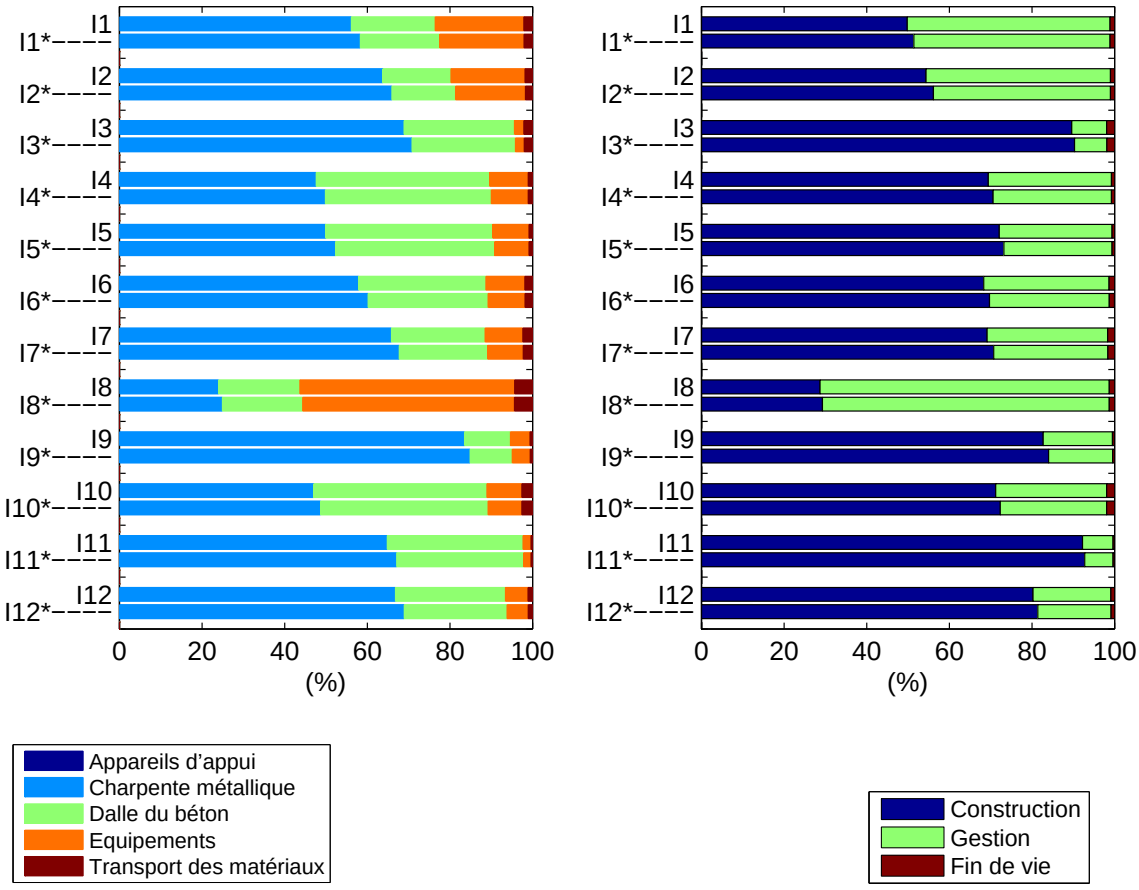
Tableau 3.4.5: Comparaison des coûts - A2 par rapport à A0.

Il apparaît clairement que l'utilisation de l'acier autopatinable permet de supprimer les actions de maintenance liées à la protection anticorrosion (-21,94%/A0 sur le coût de gestion). Une telle variante permet d'obtenir un coût de cycle de vie plus faible (-5,5%/A0) malgré un coût de construction plus élevé (+2,29%/A0).

La FIGURE 3.4.6 montre les impacts environnementaux (notés $I1$ à $I12$ pour A0, et $I1^*$ à $I12^*$ pour A2) générés lors de la phase de construction d'une part, et sur le cycle de vie total d'autre part. Il est intéressant d'observer que si la contribution des différents composants est relativement proche entre A0 et A2 à la construction, la part de la charpente métallique est logiquement légèrement plus importante pour A2, compte tenu de la quantité d'acier supplémentaire nécessaire pour les surépaisseurs de tôles.

Les douze impacts sont détaillés dans le TABLEAU 3.4.6 pour les variantes A0 A2. Il apparaît que les impacts sur le cycle de vie total des deux ouvrages sont relativement proches, avec des impacts cependant plus importants pour A2. Du point de vue environnemental et sans inclure la contribution due à la congestion du trafic, il n'y a donc pas de changement de la classification entre une variante utilisant des aciers classiques et une autre utilisant des aciers autopatinables. Il est cependant noté que l'écart relatif entre les deux variantes diminue lorsque l'on passe de l'étape de construction à celle du cycle de vie total. De plus, la variante A2 est fortement pénalisée par le fait que seuls les matériaux utilisés pour le système de protection anti-corrosion sont comptabilisés dans les impacts environnementaux. La mise en place du chantier de remplacement (avec des systèmes de traitement des déchets) n'est donc pas prise en

compte, ce qui peut expliquer pourquoi la quantité d'acier supplémentaire n'est pas atténuée dans l'ACV par la suppression d'un chantier de remplacement lourd.



(a) Phase de construction.

(b) Cycle de vie.

Figure 3.4.6: Comparaison des impacts environnementaux - A2 par rapport à A0.

		Etape de construction		Cycle de vie total	
		Variante de référence	Utilisation d'aciers autopatinables	Variante de référence	Utilisation d'aciers autopatinables
		A0	Δ(A2)/A0 (%)	A0	Δ(A2)/A0 (%)
I1	MJ	14151425	+6,33	28394798	+3,04
I2	kg Sb eq.	7104	+7,21	13061	+3,81
I3	kg	111018	+7,79	123881	+6,94
I4	kg	21	+5,34	30	+3,65
I5	l	9108	+5,62	12631	+4
I6	kg CO_2 eq.	913362	+6,55	1336701	+4,44
I7	kg SO_2 eq.	2912	+7,42	4209	+5,05
I8	kg $CFC-11$ eq.	6,50E-02	+2,67	2,26E-01	+0,61
I9	kg C_2H_2	384	+9,45	464	+7,76
I10	kg PO_4^{-3}	699	+5,2	981	+3,58
I11	kg $1,4-DB$ eq.	2324816	+7,32	2519740	+6,72
I12	kg $1,4-DB$ eq.	286308	+7,54	356636	+6

Tableau 3.4.6: Comparaison des impacts environnementaux - A2 par rapport à A0.

COMPARAISON DES VARIANTES B5 ET B4

La FIGURE 3.4.7a détaille les coûts de construction pour les deux options de dimensionnement B4 et B5. Comme dans le cas de la comparaison de A0 avec A2, l'utilisation d'aciers autopatinables (B5) génère logiquement des coûts de construction plus élevés que ceux avec l'acier classique (B4) en raison de l'augmentation des épaisseurs des charpentes métalliques et du coût d'achat légèrement plus élevé pour ce type d'acier.

En ce qui concerne le cumul des coûts au gestionnaire durant la durée de vie en service, la FIGURE 3.4.7b montre l'évolution des coûts à la charge du gestionnaire durant la durée de vie en service. Pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le cas de la FIGURE 3.4.5b, les deux courbes se croisent entre la 30ème et 40ème année dans la FIGURE 3.4.7b. La comparaison des coûts sur le cycle de vie est montrée dans la FIGURE 3.4.8b et la variante B5 est logiquement moins chère que B4 compte tenu du scénario durant la vie en service (FIGURE 3.3.4). Finalement, le TABLEAU 3.4.7 synthétise les coûts de cycle de vie pour B4 et B5. La variante B5 est donc associée à un coût de cycle de vie plus faible (-6,52%/B4).

	Pont mixte à 3 travées	
	B4	Δ(B5)/B4 (%)
f	88000 €	0
b	6000 €	0
ss	200000 €	+12,96
cd	92000 €	0
e	86000 €	0
Total	472000 €	+5,51

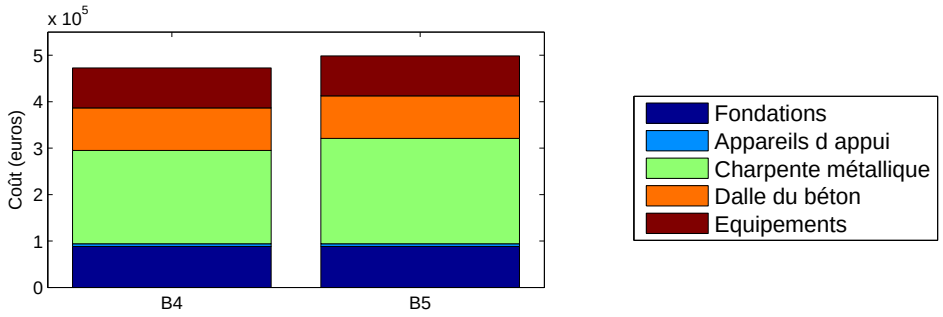
(a) Etape de construction

	Pont mixte à 3 travées	
	B4	Δ(B5)/B4 (%)
cons	472000 €	+5,51
ges	447000 €	-19,41
fin	15000 €	-1,60
Total	934000 €	-6,52

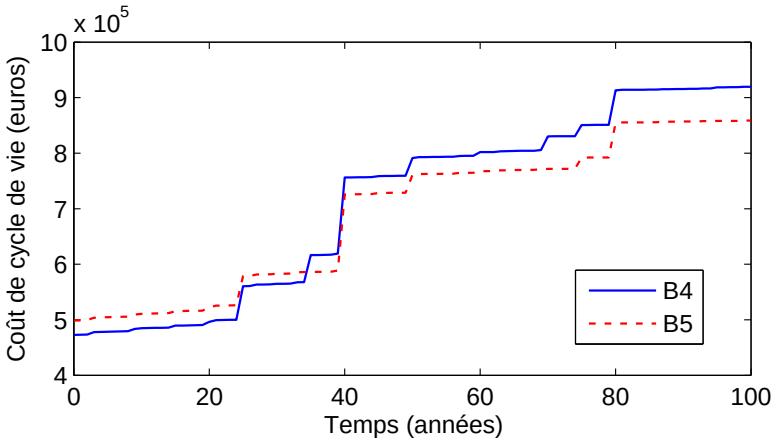
(b) Cycle de vie total

(f = fondations, b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service (inspection, maintenance), fin = fin de vie)

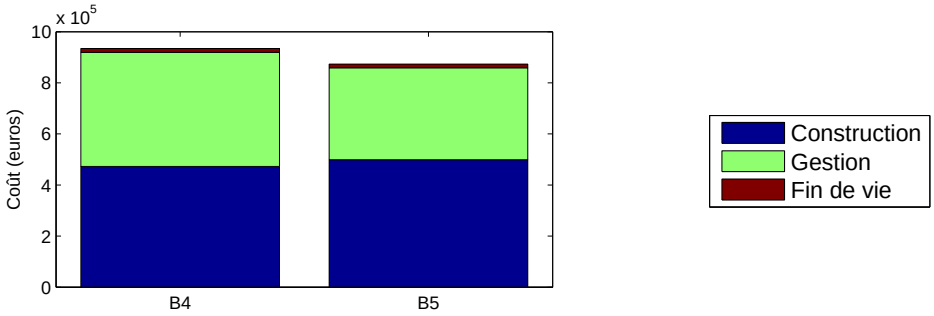
Tableau 3.4.7: Comparaison des coûts - B5 par rapport à B4.



(a) Etape de construction.



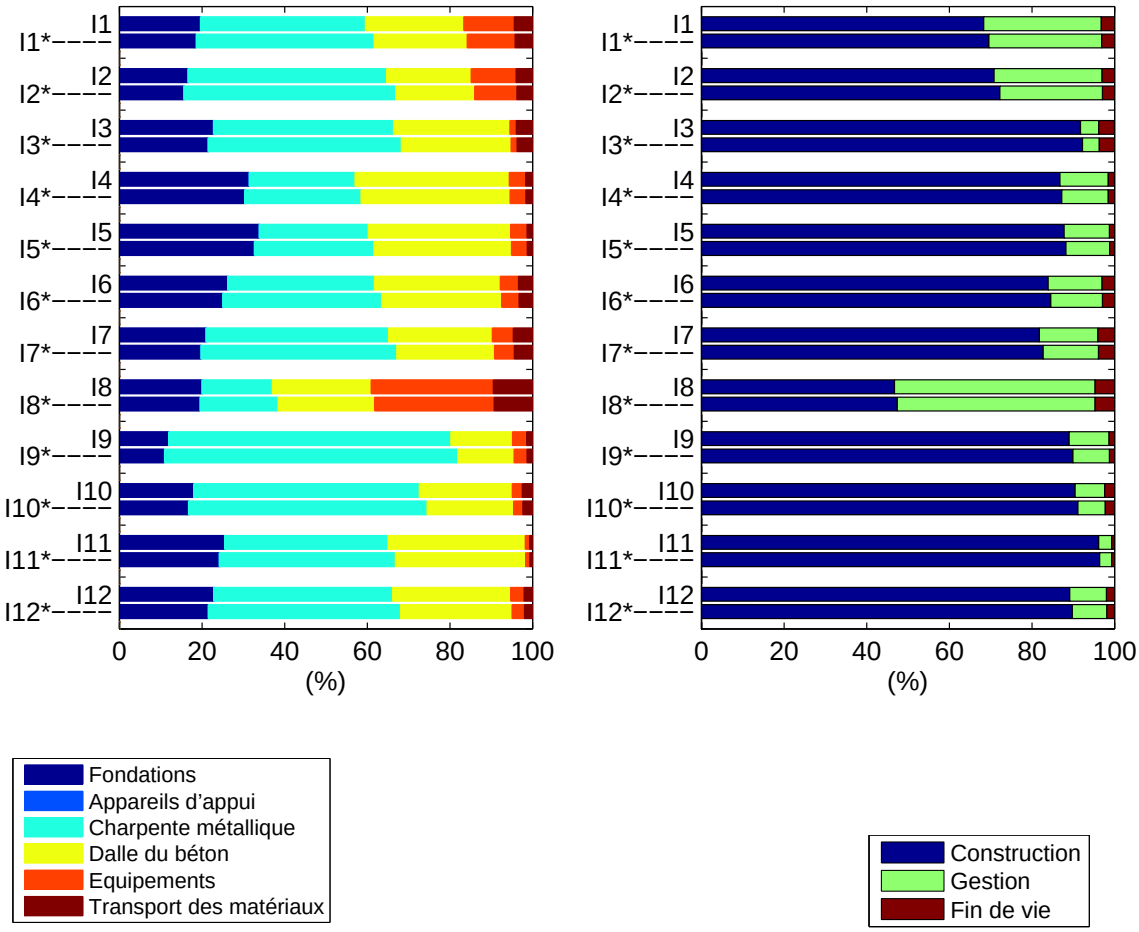
(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total.

Figure 3.4.7: Comparaison des coûts de cycle de vie - B5 par rapport à B4.

La FIGURE 3.4.8 montre la comparaison des impacts (notés $I1$ à $I12$ pour B4, et $I1^*$ à $I12^*$ pour B5) entre deux variantes B4 et B5. Ces résultats sont détaillés dans le TABLEAU 3.4.8. Comme dans le cas de la comparaison entre A0 et A2, il n'est pas observé de changement de classification entre B4 et B5 lorsque l'on passe de la construction au cycle de vie total, même si l'écart relatif entre B4 et B5 est réduit.



(a) Phase de construction.

(b) Cycle de vie total

Figure 3.4.8: Comparaison des impacts environnementaux - B5 par rapport à B4.

		Etape de construction		Cycle de vie total	
		Variante de référence	Utilisation d'aciers autopatinable	Variante de référence	Utilisation d'aciers autopatinable
		B4	Δ(B5)/B4 (%)	B4	Δ(B5)/B4 (%)
I1	MJ	6967126	+5,49	10196625	+3,6
I2	kg Sb eq.	3307	+6,62	4668	+4,55
I3	kg	61625	+6	67140	+5,48
I4	kg	14	+3,51	16	+3
I5	l	6056	+3,62	6896	+3,14
I6	kg CO_2 eq.	522826	+4,89	623023	+4,07
I7	kg SO_2 eq.	1519	+6,08	1856	+4,88
I8	kg $CFC-11$ eq.	3,09E-02	+2,35	6,62E-02	+0,85
I9	kg C_2H_2	166	+9,4	186	+8,3
I10	kg PO_4^{-3}	764	+7,51	845	+6,73
I11	kg $1,4-DB$ eq.	1343335	+5,44	1396951	+5,2
I12	kg $1,4-DB$ eq.	155169	+5,96	174001	+5,27

Tableau 3.4.8: Comparaison des impacts environnementaux - B5 par rapport à B4.

Comme pour les coûts au gestionnaire, le cas d'étude avec l'utilisation de l'acier autopatinable (B5) procure un coût aux usagers inférieur à celui obtenu pour B4 en raison de l'absence des opérations de maintenance liées à la protection anticorrosion (FIGURE 3.4.9). Cette conclusion est observée à la fois de jour comme de nuit. Il est par ailleurs globalement montré que la réalisation des travaux de nuit permet de diminuer les coûts aux usagers d'environ 1,21% à 100 ans de durée de vie en service (TABLEAU 3.4.9). Ce constat doit néanmoins être nuancé par le fait que les travaux de maintenance coûtent plus cher au gestionnaire si effectués de nuit (tarifs horaires plus importants) et que les conditions de travail peuvent être dégradées (avec un impact difficilement quantifiable sur la qualité de la maintenance).

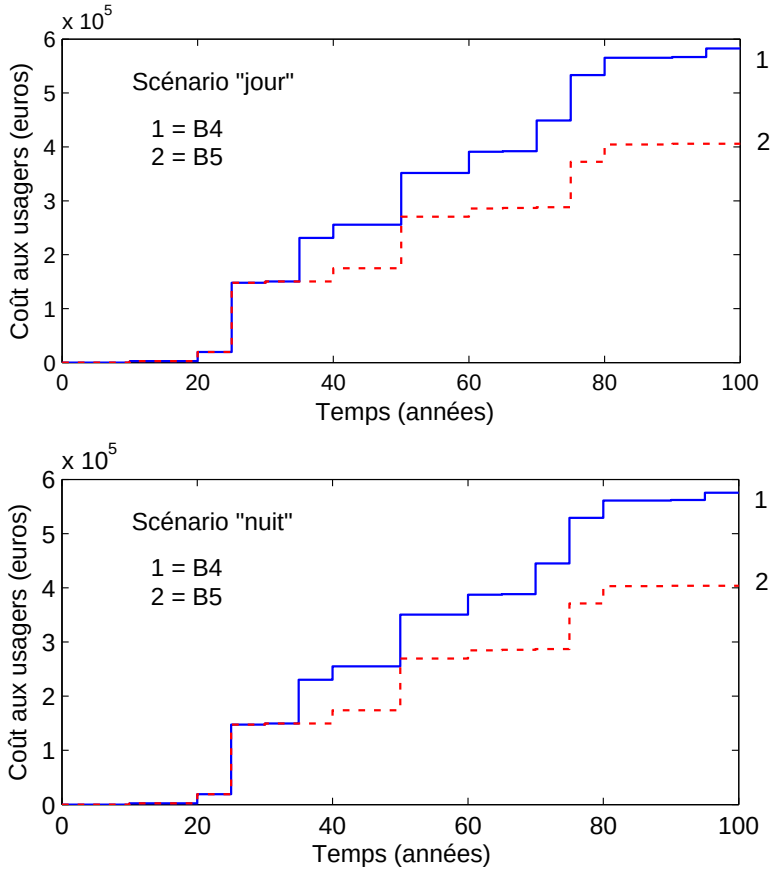


Figure 3.4.9: Comparaison des coût aux usagers - B5 par rapport à B4.

Le TABLEAU 3.4.10 confirme finalement le gain substantiel sur l'ensemble des 12 impacts environnementaux rendant compte de la congestion du trafic. Il est donc important de prendre en compte les résultats de ce tableau en plus de ceux du TABLEAU 3.4.8 pour pleinement évaluer l'intérêt de l'acier autopatinable d'un point de vue environnemental.

	Pont mixte à 3 travées	
	B4	Δ(B5)/B4 (%)
"jour"	583000 €	-30,35
"nuit"	576000 €	-29,83
Δ(nuit)/jour (%) pour B4	-1,21	

Tableau 3.4.9: Comparaison des coûts aux usagers - B5 par rapport à B4.

		Scénario de "jour"		Scénario de "nuit"	
		B4	Δ(B5)/B4 (%)	B4	Δ(B5)/B4 (%)
Iu1	MJ	12374531	-34,36	296000	-33,54
Iu2	kg Sb eq.	5420	-34,36	11981426	-33,54
Iu3	kg	2954	-34,36	5248	-33,54
Iu4	kg	2	-34,36	2860	-33,54
Iu5	l	997	-34,36	2	-33,54
Iu6	kg CO_2 eq.	148637	-33,92	965	-33,16
Iu7	kg SO_2 eq.	1198	-34,04	144300	-33,25
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	1,24E-01	-34,44	1162	-33,59
Iu9	kg C_2H_2	349	-30,85	1,20E-01	-30,73
Iu10	kg PO_4^{-3}	193	-33,96	347	-33,16
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	124715	-34,26	187	-33,47
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	38004	-34,32	36810	-33,50

Tableau 3.4.10: Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - B5 par rapport à B4.

3.4.1.3 *Comparaison de variantes mixtes acier-béton avec des variantes en béton*

COMPARAISON DES VARIANTES B1, B2 ET B0

L'objectif est ici de comparer des variantes mixtes acier-béton avec des variantes uniquement en béton pour lesquelles la dalle de béton peut être soit coulée sur place (B1), soit préfabriqué (B2). La FIGURE 3.4.10a détaille les coûts de construction pour les différentes options de dimensionnement (TABLEAU 3.2.1). Pour chaque option, il est possible d'évaluer la différence relative des coûts de construction par rapport au cas de référence (B0). En particulier, il est logiquement observé que le béton représente la contribution la plus importante à la construction pour B1 et B2. Au stade de construction, c'est la variante B1 qui est la moins chère (-1,89%/B0), suivie par la variante de référence B0, puis par la variante B2 qui est la plus chère des trois options (+12,52%/B0). Il est noté que de la précontrainte est requise pour B2, ce qui justifie les coûts de construction plus élevés.

En ce qui concerne les coûts de cycle de vie, une comparaison des variantes étudiées est proposée dans la FIGURE 3.4.10b. Il n'y a pas de croisement des courbes durant la durée de vie en service pour ces trois variantes, le remplacement de la protection anticorrosion n'étant pas nécessaire pour les variantes B1 et B2, mais la surface de béton avec des actions d'entretien de maintenance étant plus onéreuse pour ces deux variantes. En ajoutant le coût de fin de vie, la comparaison des coûts totaux de cycle de vie est présentée dans la FIGURE 3.4.10c. On observe que le coût de fin de vie est relativement plus bas pour les ponts mixtes acier-béton que pour le pont en béton, ce qui peut être expliqué par le fait que l'acier est supposé être vendu à la fin de la vie en service et est donc considéré comme un revenu partiel. Toutefois, comme dans les comparaisons précédentes, les coûts de fin de vie étant actualisés depuis l'année 100 avec un taux d'actualisation de 2%, semblent négligeables par rapport aux coûts de construction et de maintenance.

	Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué
	B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)
f	84000 €	0	0
b	5000 €	-25,03	+87,54
ss	88000 €	-100	-100
cd	48000 €	+170,15	+215,73
e	49000 €	+7,34	+33,48
Total	274000 €	-1,89	+12,52

(a) Etape de construction

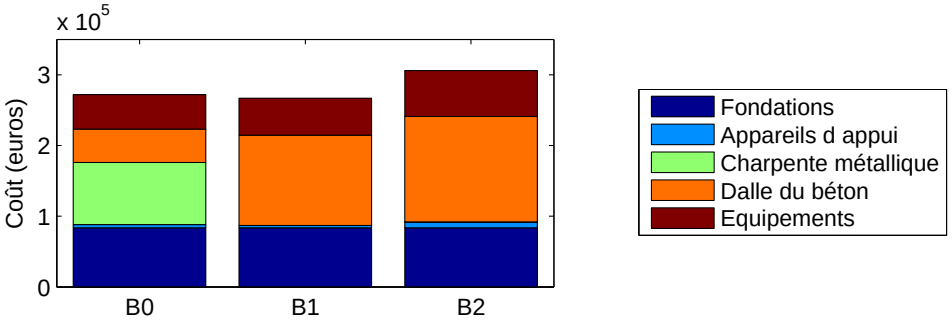
	Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué
	B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)
cons	274000 €	-1,89	+12,52
ges	264000 €	+2,44	+16,16
fin	10000 €	+22,76	+31,44
Total	548000 €	-0,63	+14,61

(b) Cycle de vie total

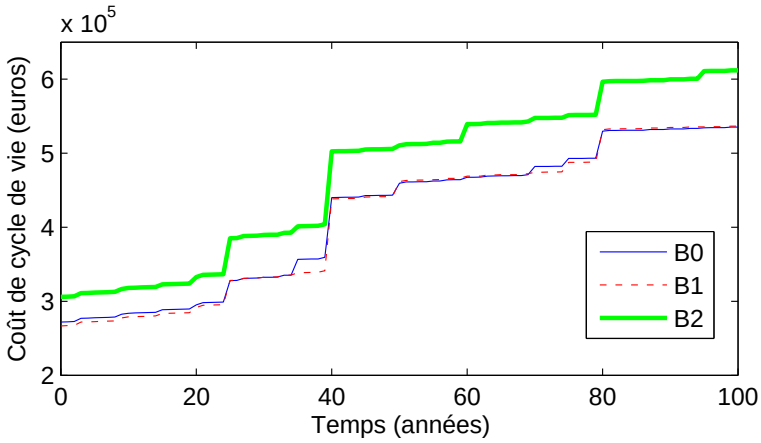
(f = fondations, b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)

(cons = construction, ges = vie en service (inspection, maintenance), fin = fin de vie)

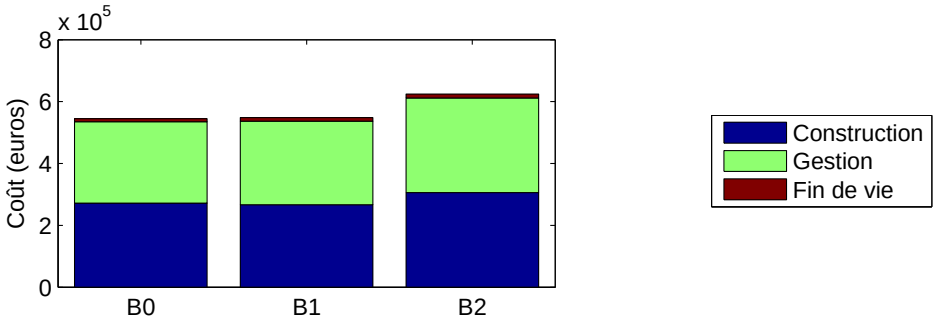
Tableau 3.4.11: Comparaison des coûts - B1, B2 par rapport à B0.



(a) Etape de construction.



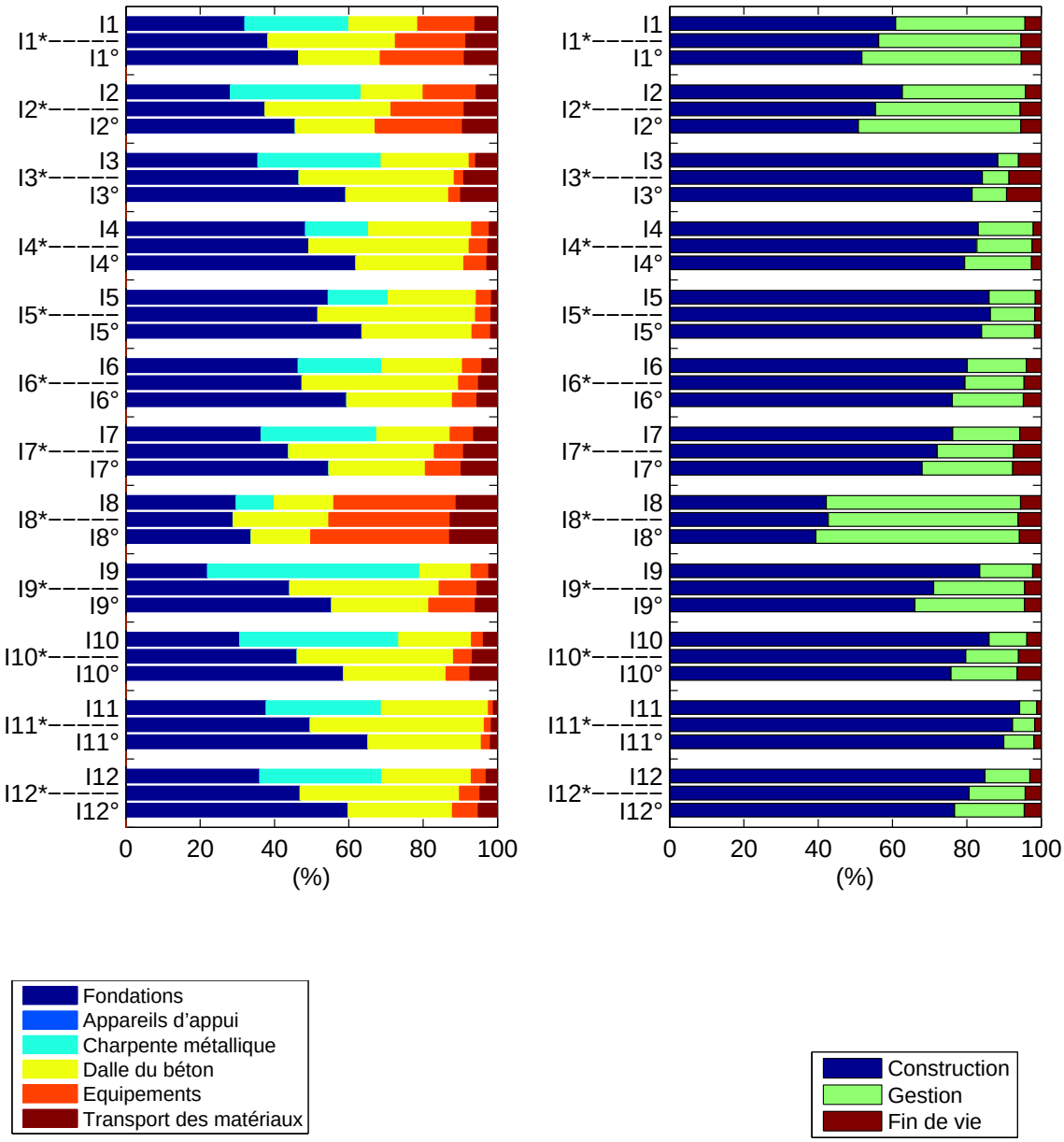
(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total.

Figure 3.4.10: Comparaison des coûts - B1, B2 par rapport à B0.

Du point de vue environnemental, les résultats sont montrés dans la FIGURE 3.4.11 (en notant les impacts $I1$ à $I12$ pour B0, $I1^*$ à $I12^*$ pour B1 et $I1^\circ$ à $I12^\circ$ pour B2) et dans le TABLEAU 3.4.12. De manière globale, si la variante B2 apparaissait comme la plus chère, c'est celle qui permet de réduire les plus les impacts environnementaux par rapport à B0, que ce soit à la construction ou sur le cycle de vie complet. Ce constat tient surtout aux différences de béton nécessaires à l'étape de construction (moins de béton nécessaire pour B2 par rapport à B1), même si de la précontrainte est nécessaire pour B2.



(a) Phase de construction.

(b) Cycle de vie total.

Figure 3.4.11: Comparaison des impacts environnementaux - B1, B2 par rapport à B0.

		Etape de construction			Cycle de vie		
		Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué	Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué
		B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)	B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)
Iu1	MJ	4357008	-16,24	-31,08	7160608	-9,45	-18,99
Iu2	kg Sb eq.	1976	-24,92	-38,28	3155	-15,15	-23,93
Iu3	kg	35440	-23,74	-39,99	40125	-19,96	-34,88
Iu4	kg	9	-1,83	-21,92	11	-1,4	-18,34
Iu5	l	4336	+5,29	-14,32	5042	+4,88	-12,23
Iu6	kg CO_2 eq.	361419	-2,18	-21,97	451235	-1,45	-17,84
Iu7	kg SO_2 eq.	944	-17	-33,41	1239	-12,25	-25,37
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	2,25E-02	+2,82	-12,06	5,34E-02	+1,47	-5,77
Iu9	kg C_2H_2	87	-50,08	-60,21	104	-41,36	-49,66
Iu10	kg PO_4^{-3}	427	-33,5	-47,67	496	-28,27	-40,6
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	748436	-23,98	-42,07	794375	-22,42	-39,31
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	89474	-23,27	-39,77	105399	-19,22	-33,33

Tableau 3.4.12: Comparaison des impacts environnementaux - B1 et B2 par rapport à B0.

Concernant la gêne aux usagers, la répartition et l'évolution du trafic sont les mêmes que celles considérées pour les variantes B4 et B5. La distinction entre un scénario de "jour" et de "nuit" est encore considérée. Les coûts aux usagers sont plus élevés pour le cas d'étude B2 (+44,48%/B0) car cet ouvrage a une surface de béton sous l'ouvrage plus importante à maintenir, ce qui entraîne des perturbations de trafic plus conséquentes sous l'ouvrage.

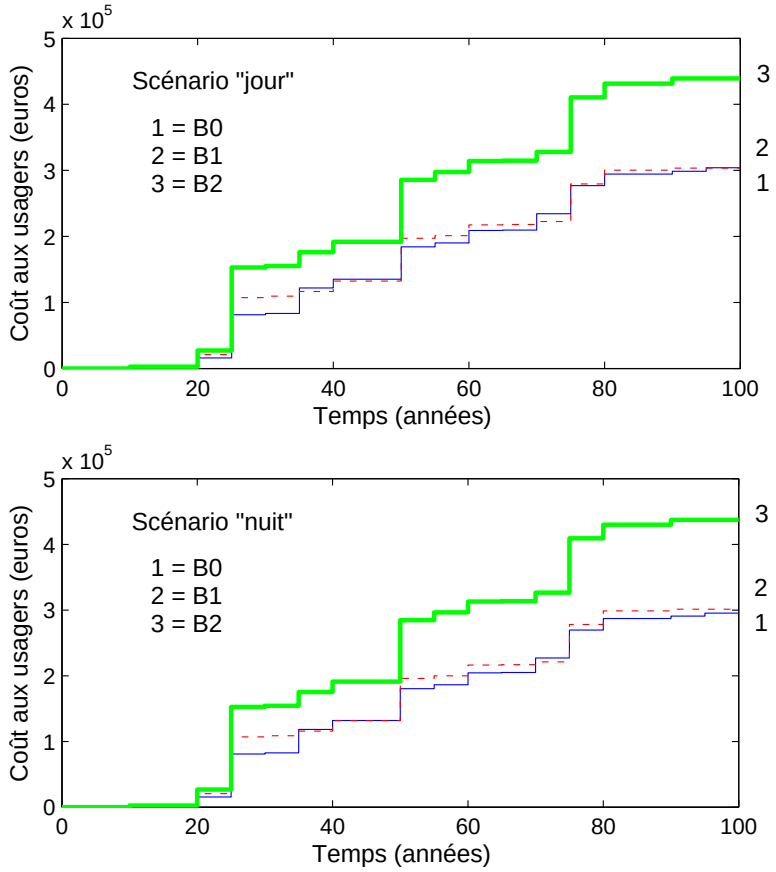


Figure 3.4.12: Comparaison des coûts aux usagers - B1, B2 par rapport à B0.

	Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué
	B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)
"jour"	304000 €	-0,24	+44,48
"nuit"	296000 €	+1,99	+48,00
Δ(nuit)/jour pour B0 (%)	-2,82		

Tableau 3.4.13: Comparaison des coûts aux usagers à 100 ans - B1, B2 par rapport à B0.

		Scénario de "jour"			Scénario de "nuit"		
		Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué	Variante de référence (mixte)	Béton coulé en place	Béton préfabriqué
		B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)	B0	Δ(B1)/B0 (%)	Δ(B2)/B0 (%)
Iu1	MJ	12374531	-4,89	+39,58	11981426	-2,44	+43,48
Iu2	kg Sb eq.	5420	-4,89	+39,58	5248	-2,44	+43,48
Iu3	kg	2954	-4,89	+39,58	2860	-2,44	+43,48
Iu4	kg	2	-4,89	+39,58	2	-2,44	+43,48
Iu5	l	997	-4,89	+39,58	965	-2,44	+43,48
Iu6	kg CO_2 eq.	148637	-4,84	+39,75	144300	-2,62	+43,31
Iu7	kg SO_2 eq.	1198	-4,77	+39,74	1162	-2,45	+43,44
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	1,24E-01	-4,87	+39,49	1,20E-01	-2,32	+43,54
Iu9	kg C_2H_2	349	-5,07	+41,22	347	-4,74	+41,86
Iu10	kg PO_4^{-3}	193	-4,66	+39,72	187	-2,29	+43,51
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	124715	-4,91	+39,67	120915	-2,58	+43,41
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	38004	-4,88	+39,61	36810	-2,47	+43,47

Tableau 3.4.14: Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - B1 et B2 par rapport à B0.

3.4.2 *Aspects innovants concernant la conception*

3.4.2.1 *Prise en compte de l'évolution du trafic*

COMPARAISON DES VARIANTES A3, A4 ET A0

La FIGURE 3.4.13a détaille les coûts de construction pour les options de dimensionnement A0, A3 et A4. La variante avec la prise en compte de l'évolution du trafic (pouvant supporter trois voies de trafic) par renforcement de la charpente (A3) est plus chère que la variante de référence (+2,15%/A0) à l'étape de construction du fait des quantités d'acier supplémentaires.

La variante A4 apparaît alors extrêmement intéressante car suite à un traitement post-soudure de la charpente entre les raidisseurs et la semelle inférieure à mi-travée (Maier 2012), l'augmentation de trafic peut être prise en compte tout en ayant une faible différence de coût entre A4 et A0 (+0,36%/A0).

Concernant la durée de vie en service, la FIGURE 3.4.13b montre l'évolution et la comparaison des coûts de cycle de vie. Il est observé que le classement entre les trois variantes ne change pas au cours du temps. Le TABLEAU 3.4.11 synthétise finalement les coûts de cycle de vie. Par rapport au cas de référence, les variantes A3, A4 sont associées à des coûts de cycle de vie plus élevés (+1,48%/A0 pour A3 et +0,25%/A0 pour A4).

	Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic	
	A0	Δ(A3)/A0 (%)	Δ(A4)/A0 (%)
b	6000 €	+0,46	+0
ss	1270000 €	+3,54	+0,60
cd	572000 €	0	0
e	248000 €	0	0
Total	2096000 €	+2,15	+0,36

(a) à l'étape de construction

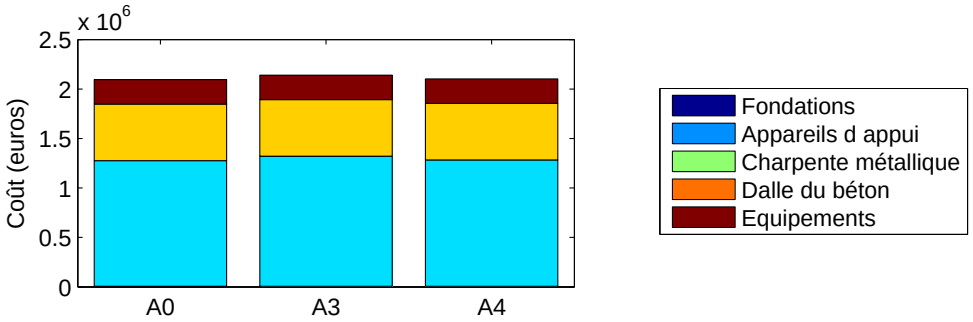
	Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic	
	A0	Δ(A3)/A0 (%)	Δ(A4)/A0 (%)
cons	2096000 €	+2,15	+0,36
ges	915000 €	0	0
fin	24000 €	-0,78	-0,12
Total	3035000 €	+1,48	+0,25

(b) sur le cycle de vie total

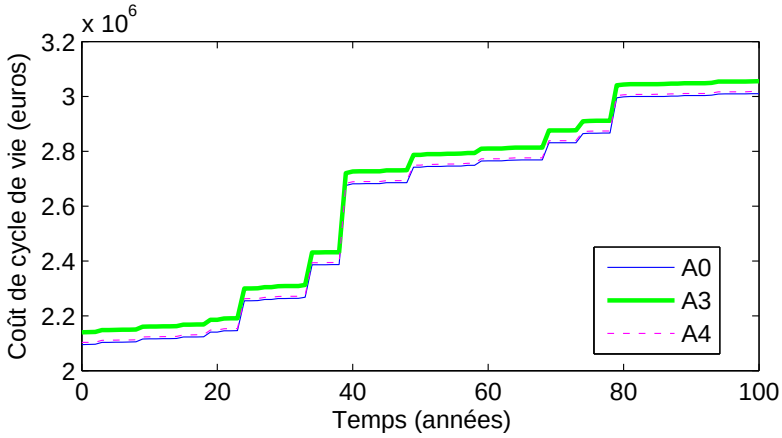
(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)

(cons = construction, ges = vie en service : inspection, maintenance, fin = fin de vie)

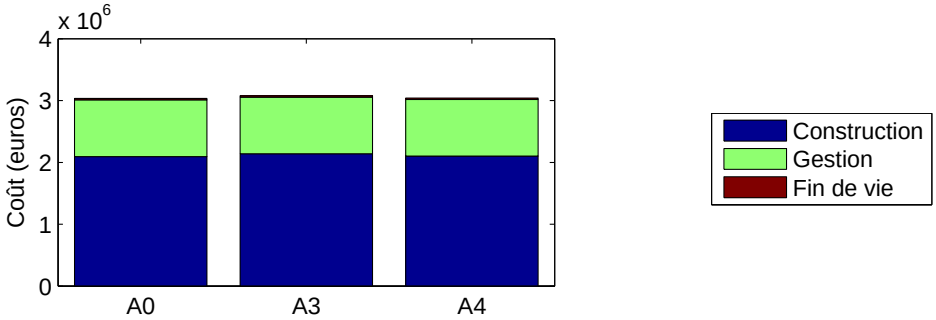
Tableau 3.4.15: Comparaison des coûts - A3, A4 par rapport à A0.



(a) Etape de construction



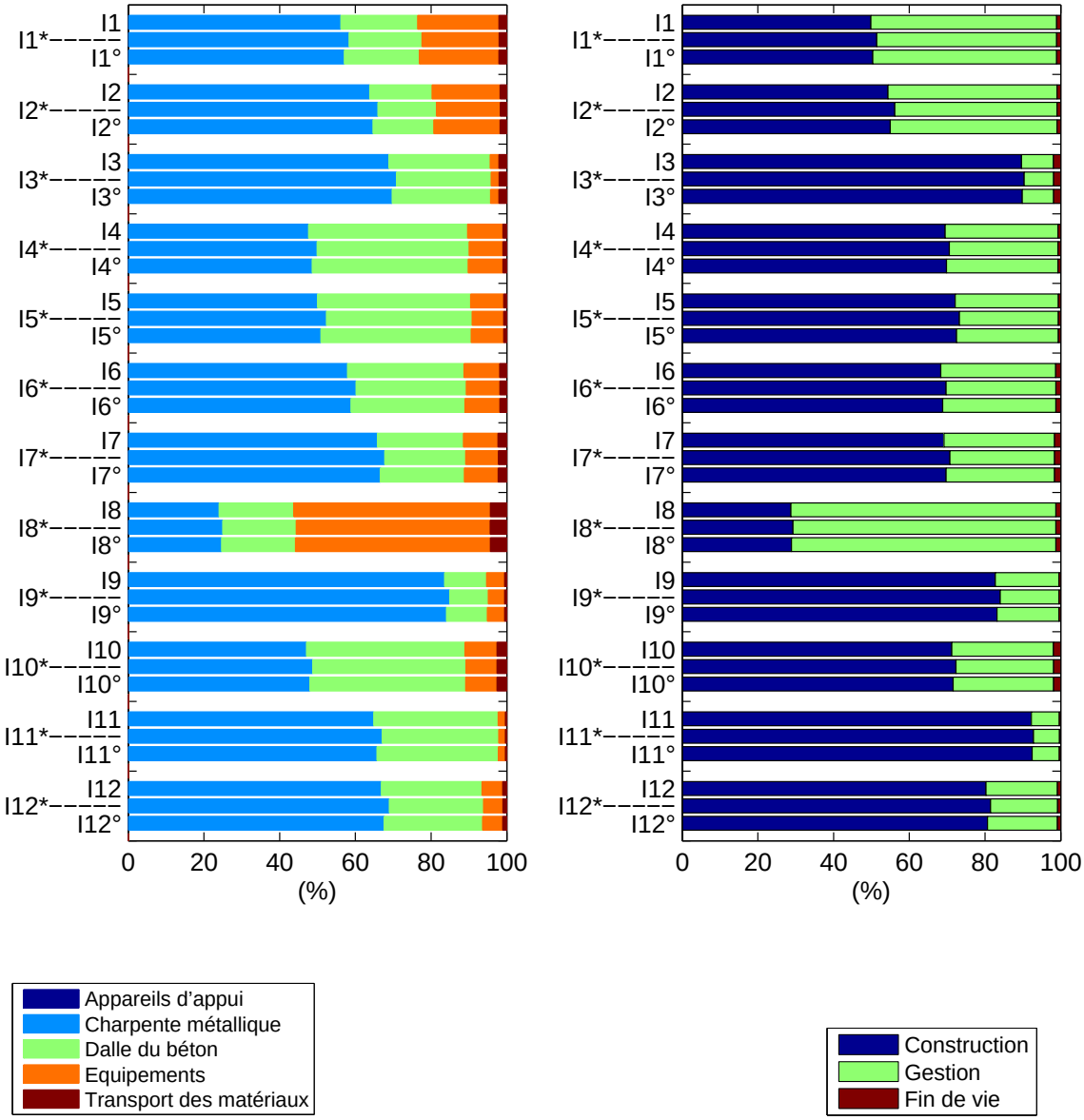
(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la durée de vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total

Figure 3.4.13: Comparaison des coûts de cycle de vie - A3, A4 par rapport à A0.

Du point de vue des impacts environnementaux, la FIGURE 3.4.14 illustre les différents impacts environnementaux (notés $I1$ à $I12$ pour A0, $I1^*$ à $I12^*$ pour A3 et $I1^\circ$ à $I12^\circ$ pour A4) pour les variantes A0, A3, A4 d'une part à l'étape de construction, et d'autre part sur le cycle de vie total.



(a) Phase de construction.

(b) Cycle de vie total.

Figure 3.4.14: Comparaison des impacts environnementaux - A3, A4 par rapport à A0.

Les douze impacts sont détaillés dans le TABLEAU 3.4.16. Les impacts sont légèrement plus élevés pour A3 et A4 (du point de vue du gestionnaire) et que l'écart relatif entre A0 et A3 puis A0 et A4, ne change pas significativement lorsque l'on passe de l'étape de construction au cycle de vie total.

		Etape de construction			Cycle de vie		
		Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic		Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic	
		A0	Δ(A3)/A0 (%)	Δ(A4)/A0 (%)	A0	Δ(A3)/A0 (%)	Δ(A4)/A0 (%)
I1	MJ	14151425	+2,16	+0,34	28394798	+1,09	+0,17
I2	kg Sb eq.	7104	+2,46	+0,38	13061	+1,35	+0,21
I3	kg	111018	+2,66	+0,42	123881	+2,4	+0,38
I4	kg	21	+1,82	+0,29	30	+1,27	+0,2
I5	l	9108	+1,92	+0,3	12631	+1,39	+0,22
I6	kg CO_2 eq.	913362	+2,23	+0,35	1336701	+1,54	+0,24
I7	kg SO_2 eq.	2912	+2,54	+0,4	4209	+1,77	+0,28
I8	kg $CFC-11$ eq.	6,50E-02	+0,92	+0,14	2,26E-01	+0,28	+0,04
I9	kg C_2H_2	384	+3,22	+0,5	464	+2,67	+0,42
I10	kg PO_4^{-3}	699	+1,79	+0,28	981	+1,3	+0,2
I11	kg $1,4-DB$ eq.	2324816	+2,49	+0,39	2519740	+2,3	+0,36
I12	kg $1,4-DB$ eq.	286308	+2,57	+0,4	356636	+2,07	+0,32

Tableau 3.4.16: Comparaison des impacts environnementaux - A3, A4 par rapport à A0.

Les coûts aux usagers pour les cas d'étude A3/A4 sont en baisse de 44,87% par rapport à ceux des variantes A0 (TABLEAU 3.4.17), pour le scénario de "jour", étant donné qu'il y a une possibilité d'avoir trois voies de circulation au lieu de deux, sans compromettre la durée de vie de fatigue. Cet écart est significativement réduit si le travail est effectué pendant la nuit, le trafic pendant cette tranche horaire étant moins dense que pendant la journée (TABLEAU 3.4.17 et FIGURE 3.4.15).

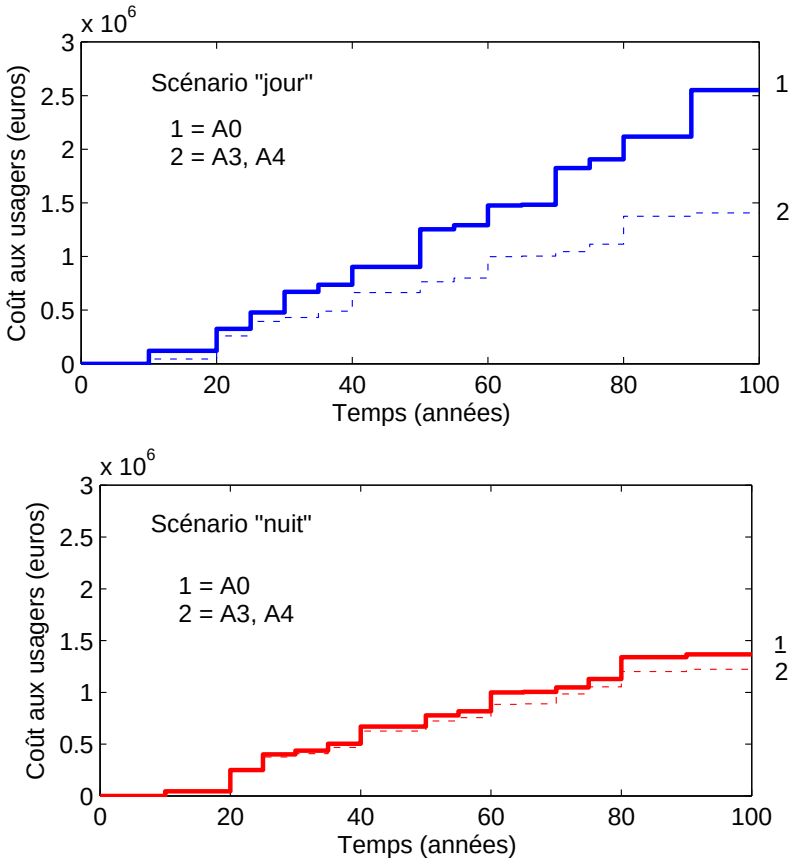


Figure 3.4.15: Comparaison des coûts aux usagers - A3, A4 par rapport à A0.

En ce qui concerne l'écart des impacts environnementaux, le TABLEAU 3.4.18 montre que les variantes A3 et A4 sont très intéressantes par rapport à A0, le gain substantiel étant néanmoins réduit lorsque les travaux sont programmés de nuit.

	Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic
	A0	Δ(A3, A4)/A0 (%)
"jour"	2552000 €	-44,87
"nuit"	1367000 €	-10,52
Δ(nuit)/jour pour A0	-46,44%	

Tableau 3.4.17: Comparaison des coûts aux usagers - A3, A4 par rapport à A0.

		Scénario de "jour"		Scénario de "nuit"	
		Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic	Variante de référence	Prise en compte de l'évolution du trafic
		A0	Δ(A3, A4)/A0 (%)	A0	Δ(A3, A4)/A0 (%)
Iu1	MJ	81894425	-35,08	52779611	-1,43
Iu2	kg Sb eq.	35875	-35,08	23120	-1,44
Iu3	kg	19543	-35,07	12597	-1,43
Iu4	kg	15	-35,07	10	-1,43
Iu5	l	6599	-35,08	4253	-1,44
Iu6	kg CO_2 eq.	1041053	-38,03	618230	+2,2
Iu7	kg SO_2 eq.	8161	-36,48	4990	+1,72
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	8,37E-01	-36,03	5,34E-01	-1,99
Iu9	kg C_2H_2	2885	-45,34	1184	+31,62
Iu10	kg PO_4^{-3}	1364	-38,55	798	+2,87
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	810327	-33,94	528202	-0,78
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	251179	-34,97	161582	-1,07

Tableau 3.4.18: Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - A3, A4 par rapport à A0.

3.4.2.2 *Utilisation de culées intégrales*

Comme il a été mentionné dans le paragraphe 3.2.2, l'utilisation de culées intégrales permet de supprimer les joints de chaussées et les appareils d'appui. Un enjeu majeur est alors de quantifier la différence avec une variante de référence sur le cycle de vie. Par manque d'information sur les impacts environnementaux dus à la mise en place et à la maintenance des joints de chaussées, les gain liés à la variante B3 ne sont pas comptabilisés dans ce paragraphe que par la diminution de la congestion de trafic.

COMPARAISON DES VARIANTES B3 ET B0

Les résultats des coûts à la construction, et des coûts totaux de cycle de vie sont fournis dans les FIGURES 3.4.16a, 3.4.16b et 3.4.16c, respectivement. Une forte réduction est observée dès l'étape de construction (-13,35%/B0).

L'écart relatif est de plus accentué (-15,09%/B0) sur le cycle de vie total étant donné que le pont avec des culées intégrales permet de réduire considérablement les coûts de maintenance (aucun appareil d'appui et joint de chaussées n'étant nécessaire, la quantité de travail de maintenance est considérablement réduite).

	Variante de référence (mixte)	Mixte, Culées intégrales
	B0	Δ(B3)/B0 (%)
f	84000 €	-2,65
b	5000 €	-100
ss	88000 €	-10,86
cd	48000 €	-11,58
e	49000 €	-30,15
Total	274000 €	-13,35

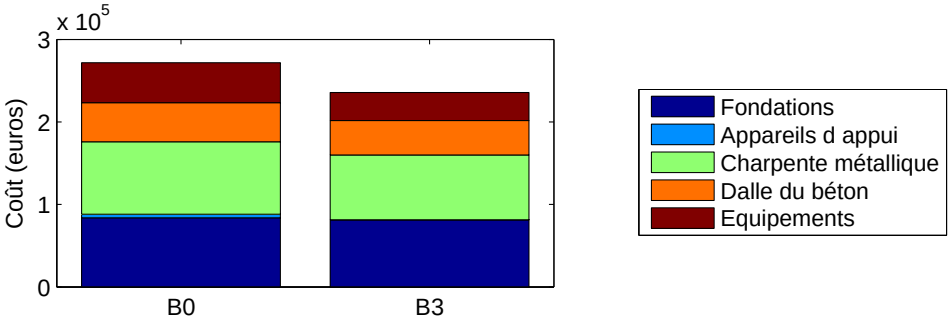
(a) à l'étape de construction

	Variante de référence (mixte)	Mixte, Culées intégrales
	B0	Δ(B3)/B0 (%)
cons	274000 €	-13,35
ges	264000 €	-16,96
fin	10000 €	-13,11
Total	548000 €	-15,09

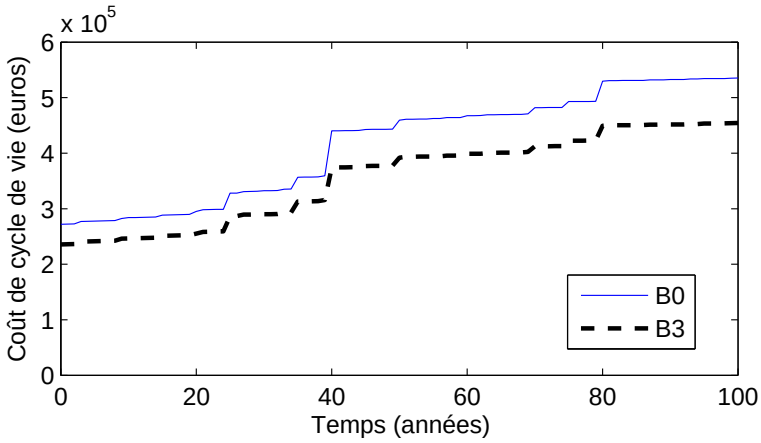
(b) sur le cycle de vie total

(f = fondations, b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service (inspection, maintenance), fin = fin de vie)

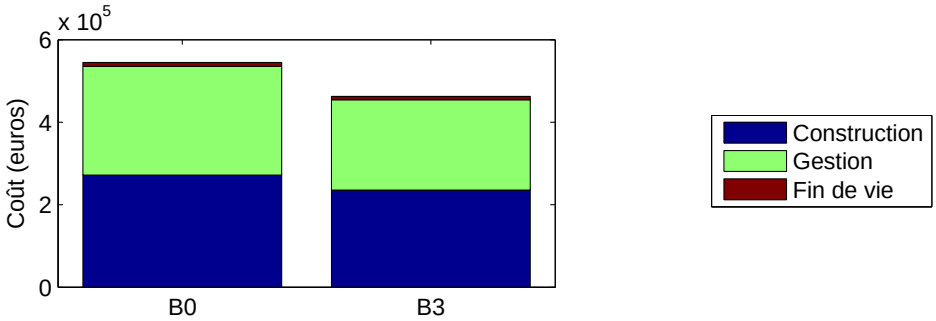
Tableau 3.4.19: Comparaison des coûts - B3 par rapport à B0.



(a) Etape de construction.



(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la durée de vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total

Figure 3.4.16: Comparaison des coûts de cycle de vie - B3 par rapport à B0.

Concernant les coûts aux usagers, le même trafic que celui considéré pour la comparaison des variantes B4 et B5 est utilisé dans ce paragraphe. On observe que les ponts intégraux nécessitent moins d'actions de maintenance grâce à leur conception et, par conséquent, permettent de réduire le niveau de perturbation du trafic durant la durée de vie en service. Ce gain se retrouve donc dans la FIGURE 3.4.17, qui montre l'évolution des coûts aux usagers à 100 ans, dans le TABLEAU 3.4.20 qui effectue une comparaison du coût total aux usagers, de jour comme de nuit, et finalement dans le TABLEAU 3.4.21 qui montre les impacts environnementaux à 100 ans dus à la congestion du trafic.

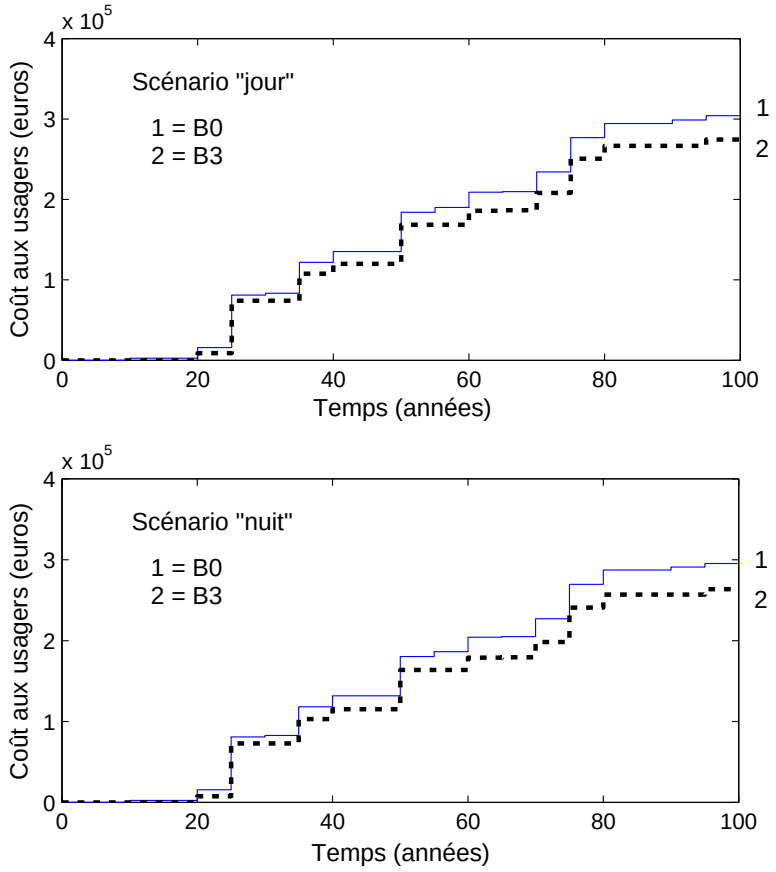


Figure 3.4.17: Comparaison des coût aux usagers - B3 par rapport à B0.

	Variante de référence (mixte)	Mixte, Culées intégrales
	B0	Δ(B3)/B0 (%)
"jour"	303000 €	-9,69
"nuit"	296000 €	-10,77
Δ(nuit)/jour (%)	-2,82	

Tableau 3.4.20: Comparaison des coût aux usagers - B3 par rapport à B0.

		Scénario de "jour"		Scénario de "nuit"	
		Variante de référence (mixte)	Mixte, Culées intégrales	Variante de référence (mixte)	Mixte, Culées intégrales
		B0	Δ(B3)/B0 (%)	B0	Δ(B3)/B0 (%)
Iu1	MJ	12374531	-8,49	11981426	-9,55
Iu2	kg Sb eq.	5420	-8,49	5248	-9,55
Iu3	kg	2954	-8,49	2860	-9,55
Iu4	kg	2	-8,49	2	-9,55
Iu5	l	997	-8,49	965	-9,55
Iu6	kg CO_2 eq.	148637	-8,92	144300	-9,87
Iu7	kg SO_2 eq.	1198	-8,78	1162	-9,77
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	1,24E-01	-8,39	1,20E-01	-9,49
Iu9	kg C_2H_2	349	-12,01	347	-11,96
Iu10	kg PO_4^{-3}	193	-8,8	187	-9,82
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	124715	-8,62	120915	-9,62
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	38004	-8,54	36810	-9,58

Tableau 3.4.21: Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - B3 par rapport à B0.

3.4.2.3 *Construction d'ouvrages de longue portée avec deux tabliers à la place d'un seul*

La comparaison dans ce paragraphe porte sur la famille d'ouvrages de longue portée (pont en caisson) en considérant d'une part un ouvrage avec un seul tablier pour les deux sens de trafic (variante Co) et un ouvrage avec deux tabliers supportant chacun un sens de circulation (variante C1). La variante avec deux tabliers étant plus chère à la construction, l'intérêt de ce paragraphe est de quantifier les gains qu'il est possible de dégager avec une telle variante. L'étude de cette variante se limite à la superstructure. L'intégration des piles et des fondations dans l'analyse est donc une étape nécessaire dans une étude ultérieure à cette thèse pour rendre exhaustives les conclusions.

COMPARAISON DES VARIANTES C1 ET CO

Comme dans les comparaisons précédentes, le détail des coûts à la construction, durant la durée de vie en service, et sur le cycle de vie total, est proposé dans la FIGURE 3.4.18. La variante C1 est la plus chère dès la construction pour le gestionnaire et aucune action particulière ne permet de modifier cet écart avec Co durant le cycle de vie. Globalement, l'écart est d'environ 19% à la construction et de 18% sur le cycle de vie, ce qui est fortement lié à l'augmentation de 18,24% du coût de la charpente métallique (cf. TABLEAU 3.4.22).

	Variante de référence	Variante avec deux tabliers
	Co	Δ(C1)/Co (%)
b	70000 €	+7,93
ss	16685000 €	+18,24
cd	2562000 €	+30,86
e	1117000 €	+0,07
Total	20434000 €	+18,79

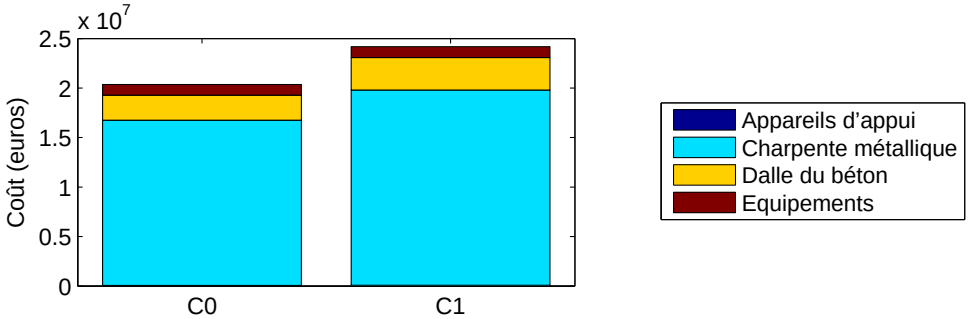
(a) Etape de construction

	Variante de référence	Variante avec deux tabliers
	Co	Δ(C1)/Co (%)
cons	20434000 €	+18,79
ges	4797000 €	+14,08
fin	108000 €	-9,94
Total	25339000 €	+17,78

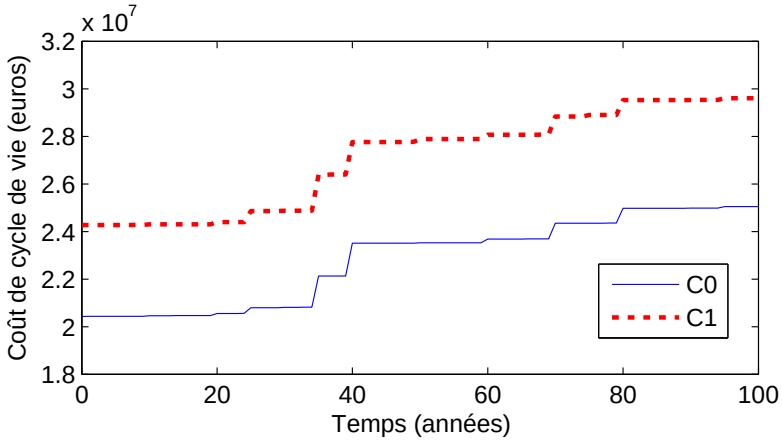
(b) Cycle de vie total

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service (inspection, maintenance), fin = fin de vie)

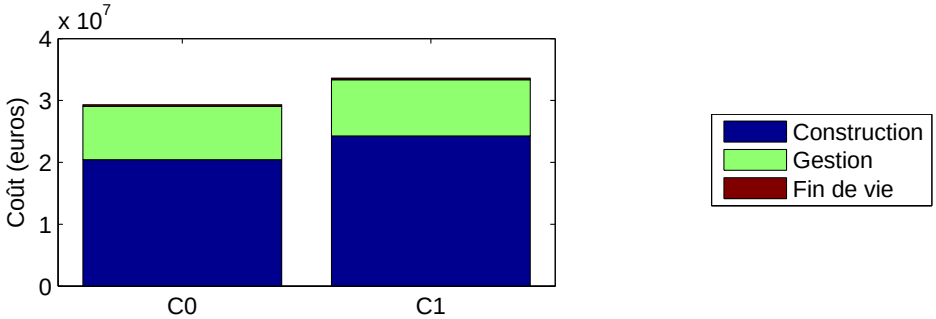
Tableau 3.4.22: Comparaison des coûts - C1 par rapport à Co.



(a) Etape de construction.



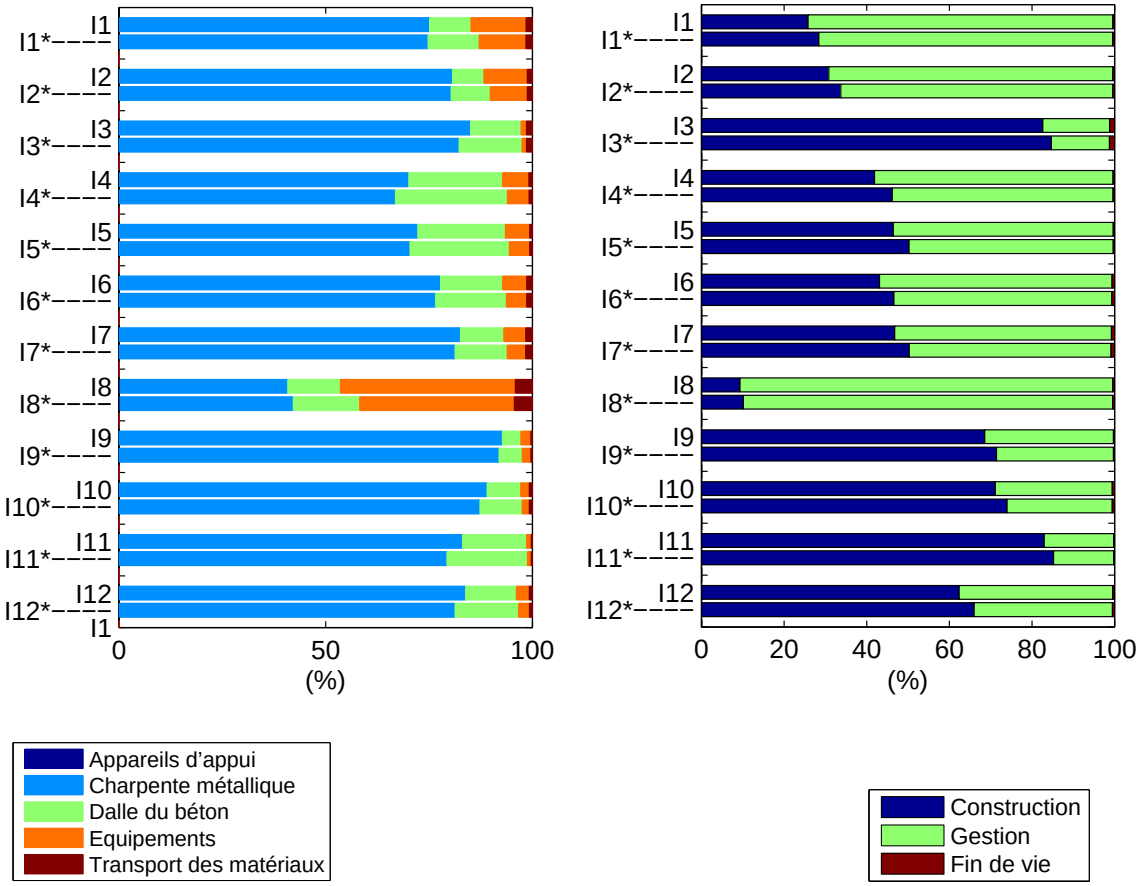
(b) Cumul des coûts au gestionnaire durant la durée de vie en service.



(c) Coûts du cycle de vie total.

Figure 3.4.18: Comparaison des coûts de cycle de vie - C1 par rapport à C0.

Sur le plan environnemental, la FIGURE 3.4.19 montre les impacts environnementaux (notés $I1$ à $I12$ pour C0, et $I1^*$ à $I12^*$ pour C1) générés lors de la phase de construction/ et sur le cycle de vie complet.



(a) Phase de construction

(b) Cycle de vie total

Figure 3.4.19: Comparaison des impacts environnementaux - C1 par rapport à C0.

Les douze impacts sont détaillés dans le TABLEAU 3.4.23 pour l'étape de construction et le cycle de vie total. Comme pressenti, la variante C1 est liée à des impacts plus élevés, vues les quantités de matériau nécessaires supplémentaires.

		Etape de construction		Cycle de vie total	
		Variante de référence	Variante avec deux tabliers	Variante de référence	Variante avec deux tabliers
		Co	Δ(C1)/Co (%)	Co	Δ(C1)/Co (%)
I1	MJ	136455979	+14,26	528483748	+3,78
I2	kg Sb eq.	72940	+14,09	236302	+4,44
I3	kg	1164901	+17,57	1409684	+14,71
I4	kg	184	+19,08	440	+8,06
I5	l	82097	+16,65	176748	+7,79
I6	kg CO_2 eq.	8809928	+15,42	20436946	+6,75
I7	kg SO_2 eq.	29960	+15,43	64043	+7,36
I8	kg $CFC-11$ eq.	4,65E-01	+9,73	5	+1,01
I9	kg C_2H_2	4550	+14,62	6634	+10,08
I10	kg PO_4^{-3}	17405	+15,86	24473	+11,37
I11	kg $1,4-DB$ eq.	23820658	+19,14	28715536	+15,92
I12	kg $1,4-DB$ eq.	2981503	+17,19	4778099	+10,81

Tableau 3.4.23: Comparaison des impacts environnementaux - C1 par rapport à Co.

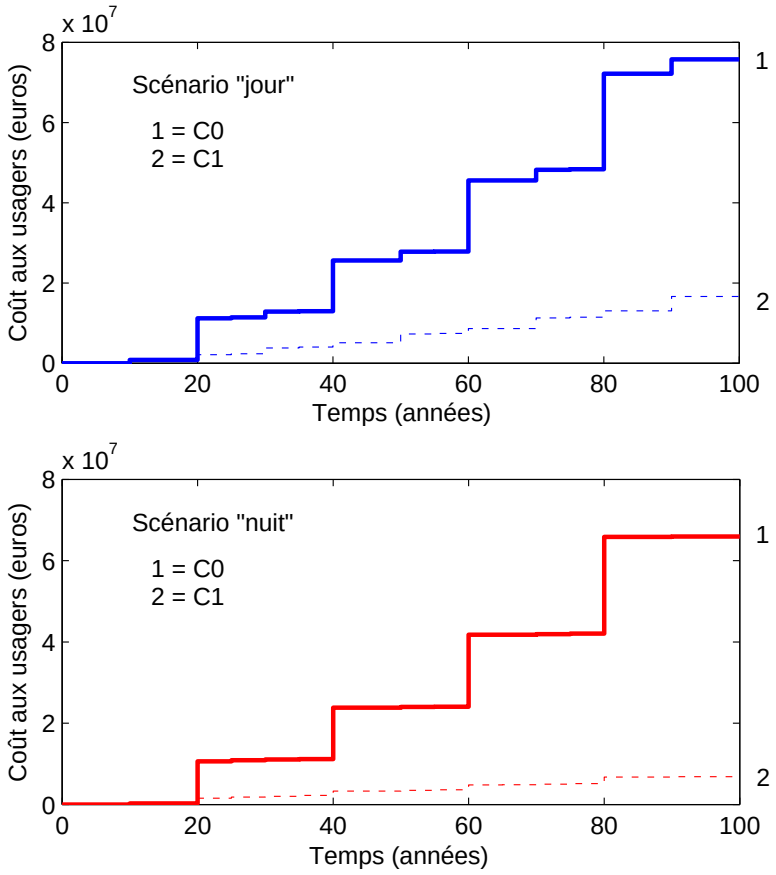


Figure 3.4.20: Comparaison des coût aux usagers - C1 par rapport à C0.

	Variante de référence (mixte)	Mixte, Culées intégrales
	C0	Δ(C1)/C0 (%)
"jour"	75751000 €	-78,02
"nuit"	65954000 €	-89,61
Δ(nuit)/jour (%) pour C0	-12,93	

Tableau 3.4.24: Comparaison à 100 ans des coût aux usagers - C1 par rapport à C0.

La variante C1, de part sa configuration, permet de dégager une voie supplémentaire par rapport à la variante C0, en cas de maintenance lourde, ce qui se ressent en termes de coûts aux usagers qui sont plus faibles pour C1. De même, les impacts environnementaux à 100 ans dus à la congestion du trafic (cf. TABLEAU 3.4.25) sont significativement plus faibles pour C1 par rapport à C0, ce qui confirme l'intérêt des variantes avec deux tabliers.

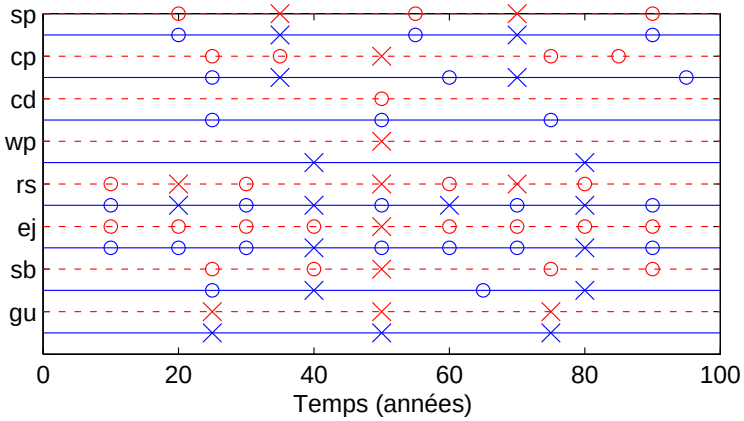
		Scénario de "jour"		Scénario de "nuit"	
		Variante de référence	Variante avec deux tabliers	Variante de référence	Variante avec deux tabliers
		Co	Δ(C1)/Co (%)	Co	Δ(C1)/Co (%)
Iu1	MJ	1052180243	-58,85	874224586	-70,83
Iu2	kg Sb eq.	460958	-58,86	382996	-70,84
Iu3	kg	251037	-58,85	208579	-70,82
Iu4	kg	195	-58,85	162	-70,83
Iu5	l	84801	-58,86	70458	-70,84
Iu6	kg CO_2 eq.	18851316	-67,74	15863173	-80,5
Iu7	kg SO_2 eq.	134243	-65,32	112574	-77,9
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	11	-59,54	9	-71,67
Iu9	kg C_2H_2	114051	-79,24	97770	-92,43
Iu10	kg PO_4^{-3}	25569	-68,33	21510	-81,22
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	10202820	-58,01	8479157	-69,8
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	3285491	-59,34	2732414	-71,35

Tableau 3.4.25: Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - C1 par rapport à Co.

3.4.3 *Aspects innovants concernant la surveillance/maintenance*

En complément du scénario de gestion introduit dans le paragraphe 3.3.1.4 et qui été utilisé pour toutes les comparaisons des paragraphes 3.4.1.1 et 3.4.2, deux scénarios de maintenance supplémentaires sont considérés dans ce paragraphe à la place du scénario standard de maintenance illustré dans la FIGURE 3.3.4. Ces deux calendriers sont illustrés dans les FIGURES 3.4.21 et 3.4.23(SBRI 2013a).

Le premier est un scénario associé à "**un manque de ressources financières**". Il s'agit alors de réduire le nombre des actions de maintenance durant le cycle de vie en laissant le pont atteindre un état de dégradation plus avancé à la fin de sa vie en service (100 ans). Dans ce scénario, le nombre des inspections est supposé être le même que celui pour le scénario standard. Concernant les actions de maintenance, la comparaison avec le scénario de maintenance "standard" est illustrée dans la FIGURE 3.4.21 et les coûts sur le cycle de vie sont détaillés dans la FIGURE 3.4.22.



(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)
(o=réparation x=remplacement)

Figure 3.4.21: Scénarios de maintenance standard avec "manque de ressources financières" (en pointillé).

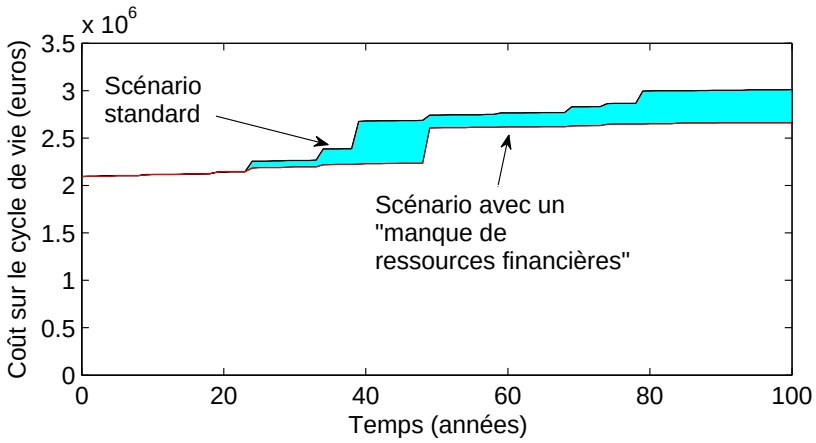
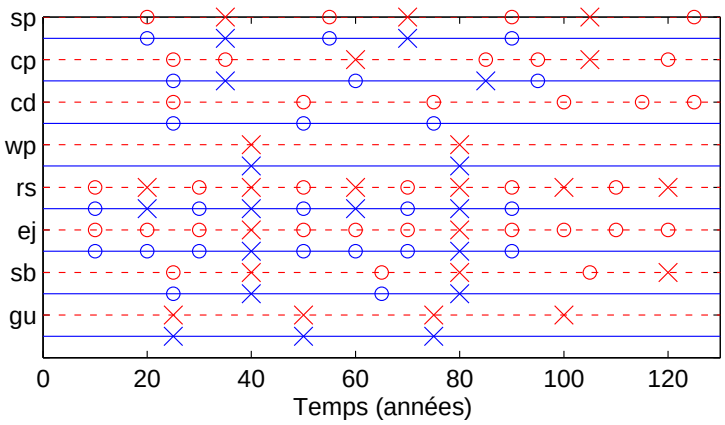


Figure 3.4.22: Coût de cycle de vie de la variante A0 avec deux scénarios de maintenance : "standard" et "avec un manque de ressources financières".

Le deuxième scénario correspond à une "**prolongation de la durée de vie en service**" qui se base sur l'hypothèse que l'ouvrage pourra être maintenu en service à 100 ans afin de prolonger la vie en service de 30 ans (soit une durée de service de 130 ans au total), sachant que cette décision est prise à l'année 80. Des inspections et actions de maintenance supplémentaires sont alors ajoutées dans le but de prolonger la durée de vie en service. Le nombre d'inspections spéciales est alors de quatre au lieu de deux pendant le cycle de vie (les fréquences des inspections routines et principales n'étant pas modifiées). Le scénario de maintenance est composé du même scénario "standard" jusqu'à l'année 80 (FIGURE 3.4.23). La comparaison des coûts du scénario standard et du scénario avec "prolongation de durée de vie en service" sont montrée dans la FIGURE 3.4.24.



(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)
(o=réparation x=remplacement)

Figure 3.4.23: Scénarios de maintenance standard avec "prolongation de durée de vie en service" (en pointillé).

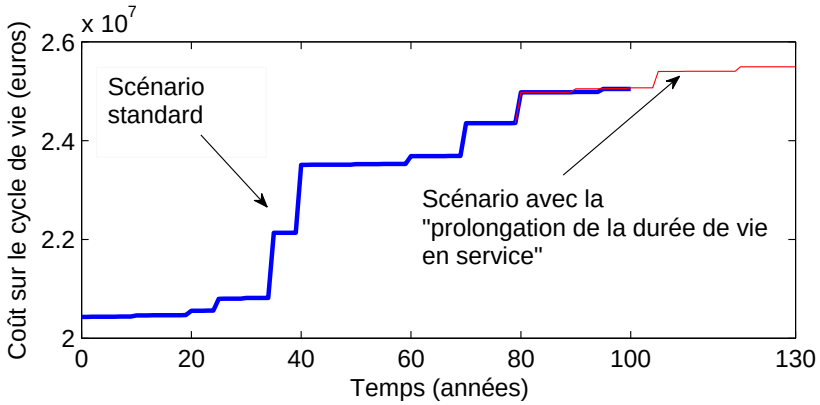


Figure 3.4.24: Coût de cycle de vie de la variante Co avec deux scénarios de maintenance : "standard" et "prolongation de durée de vie en service".

3.4.4 *Synthèse des études comparatives par famille d'ouvrages*

Les paragraphes 3.4.1 à 3.4.3 ont montré des comparaisons de dimensionnement par type d'innovation (sur les matériaux, la conception, et la surveillance/maintenance). Ce paragraphe propose une lecture différente des résultats par famille d'ouvrages en montrant à chaque fois les écarts relatifs des différentes variantes (en termes de coûts et impacts) par rapport à la variante de référence associée (A0 pour la famille A, B0 pour la famille B, C0 pour la famille C). L'ensemble des comparaisons des différentes variantes est fourni en valeur absolue dans l'annexe B de ce mémoire de thèse. Les écarts relatifs dans la suite de ce paragraphe comprennent pour l'ACCV : le coût de construction ΔC_{cons}, le coût de vie en service ΔC_{ges}, le coût de fin de vie ΔC_{fin} ; pour l'ACV : les douze impacts environnementaux notés ΔI1 à ΔI12 ; pour l'analyse sociétale : le coût aux usagers ΔC_U et les douze impacts environnementaux dus à la congestion du trafic notés ΔIu1 à ΔIu12.

Cette présentation des résultats a pour objectif de faire le lien avec l'analyse multicritère du paragraphe 3.5 en montrant comment les choix entre les variantes peut éventuellement être contradictoire suivant les critères considérés.

3.4.4.1 *Synthèse pour la famille A*

La comparaison pour la famille A est effectuée en prenant en compte les écarts relatifs des variantes A1, A2, A3, A4 par rapport à la variante de référence A0. La FIGURE 3.4.25 permet de visualiser ces écarts relatifs pour chaque critère considéré.

Si l'on considère uniquement les critères environnementaux (△I1 à △I12), il existe un classement des variantes qui ne change pas d'un critère à l'autre. Depuis la meilleure solution jusqu'à la moins bonne, on trouve les variantes A1, A0, A4, A3 et A2. De même, si seuls les critères sociétaux sont considérés ($\triangle C_U$, △Iu1 à △Iu12), il existe également un classement qui ne change pas d'un critère à l'autre mais différent de celui avec seulement les critères environnementaux. En effet, les variantes A3 et A4 forment un premier groupe et A0, A1, A2, un deuxième groupe. A l'intérieur de chacun de ces deux groupes, les coûts et impacts sont confondus car il n'y a pas de distinction vis-à-vis de la gêne aux usagers. Le premier groupe est plus intéressant que le deuxième sur l'ensemble des critères étant donnée la voie de trafic supplémentaire et la congestion du trafic plus faible. Finalement, le classement avec seulement les critères économiques considérés ($\triangle C_{cons}$, $\triangle C_{ges}$, $\triangle C_{fin}$) évolue d'un critère à l'autre. Le classement depuis la meilleure jusqu'à la moins bonne solution est (i) à la construction : A1, A0, A4, A3 et A2, (ii) durant la vie en service : A2, puis A0, A1, A3 et A4 confondus et (iii) en fin de vie A2, A3, A4, A0 et A1. Comme mentionné précédemment, cette lecture synthéthique des résultats des comparaisons pour la famille A doit permettre de voir comment certaines solutions ressortent comme meilleures que les autres suivant les critères considérés. En particulier, le classement est ferme pour les cas suivants :

- si seuls les impacts environnementaux sont considérés,
- si seuls les impacts sociétaux sont considérés.

La comparaison est en revanche plus complexe lorsque seuls les critères économiques sont pris en compte. Le cas où tous les critères, économiques, environnementaux et sociétaux sont considérés, est également un cas où le classement suivant les indicateurs est contradictoire. Dans ces conditions, une analyse multicritère est justifiée quand les

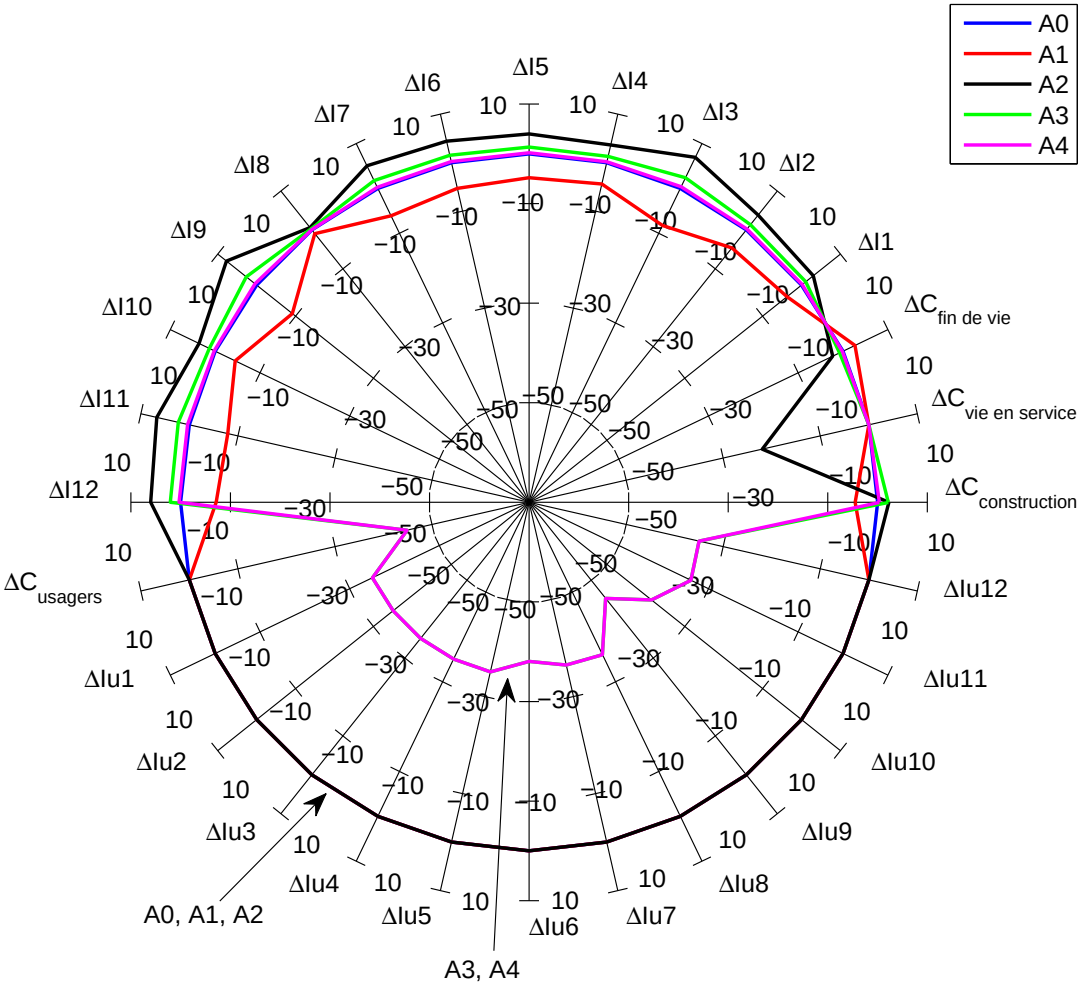


Figure 3.4.25: Synthèse des études comparatives de la famille A.

critères économiques sont considérés seuls ou quand tous les critères (économiques, environnementaux et sociétaux) sont pris en compte.

3.4.4.2 *Synthèse pour la famille B*

Comme pour la famille A au paragraphe précédent, une comparaison pour la famille B est illustrée dans la FIGURE 3.4.26 en présentant les écarts relatifs des coûts/impacts des différentes variantes par rapport à la variante de référence B0. Comme mentionné dans le paragraphe 3.4.2.2, le manque d'information sur les gains environnementaux pour la variante B3 limite la possibilité de comparaison sur le plan de l'ACV. Dans ce contexte, seuls les critères économiques et sociétaux sont illustrés dans la FIGURE 3.4.26.

Lorsque seuls les critères sociétaux sont considérés ($\triangle C_U$, $\triangle$Iu1 à $\triangle$Iu12), le classement ne change pas d'un critère à l'autre. De la meilleure à la moins bonne solution, on trouve les variantes B3, B1, B0, B5, B2 et B4. Pour les variantes avec les plus fortes différences par rapport à B0, on trouve notamment la variante B3 avec les culées intégrales qui permet une réduction de la gêne aux usagers en supprimant les opérations d'entretien des joints de chaussée. A l'inverse, la variante B4 est pénalisée par la surface très importante du tablier et donc l'augmentation de la durée des opérations

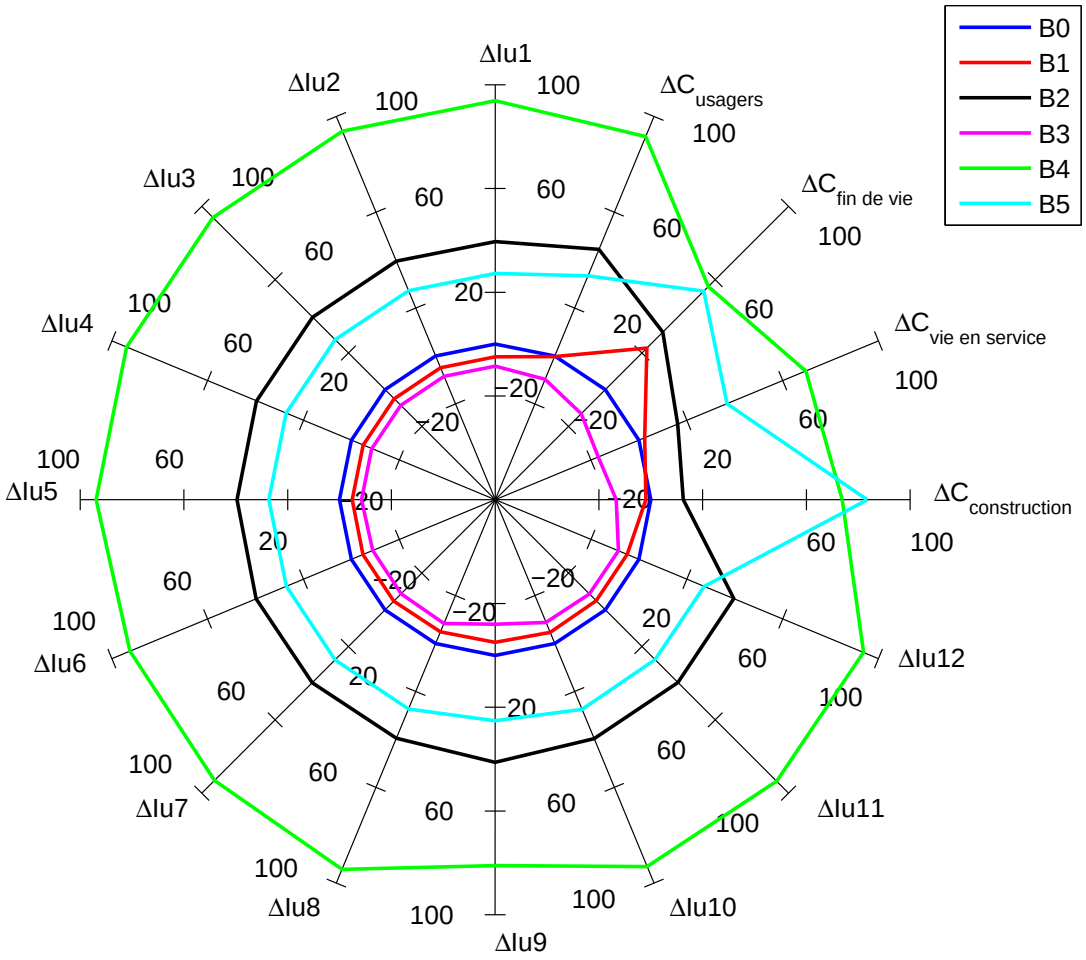


Figure 3.4.26: Synthèse des études comparatives de la famille B.

d'entretien. La variante B5 avec les poutres en acier autopatinable apparaît alors très intéressante en permettant de supprimer les chantiers de remplacement de la protection anticorrosion. Lorsque seuls les critères de l'ACCV sont pris en compte, certains indicateurs peuvent mener à des choix contradictoires. Les classements de la meilleure à la moins bonne variante sont en effet les suivants : (i) B3, B1, B0, B2, B4 et B5 à la construction, et (ii) B3, B0, B1, B2, B5 et B4 pour la vie en service et la fin de vie.

Il y a donc une inversion de classement pour B0, B1 d'une part, et B4 et B5 d'autre part, entre la phase de construction et les phases de vie en service/fin de vie. Cette comparaison des variantes de la famille B justifie au final le recours à une analyse multicritère lorsque seuls les critères économiques ou tous les critères (économiques et sociétaux) sont pris en compte dans le choix décisionnel.

3.4.4.3 *Synthèse pour la famille C*

Les ouvrages C0, C1 et C2 sont comparés dans ce paragraphe et les résultats de l'ACCV, l'ACV et l'analyse sociétale sont illustrés dans la FIGURE 3.4.27.

Pour les critères environnementaux seulement ($\triangle$I1 à $\triangle$I12) et quel que soit le critère retenu, C2 est la meilleure solution (aciers HLE), suivie de C0 et C1 (pénalisée par les quantités d'aciers supplémentaires pour la construction de deux tabliers).

Pour les critères sociétaux seulement ($\triangle C_U$ et $\triangle$Iu1 à $\triangle$Iu12) et quel que soit le critère retenu, C1 est la meilleure solution (dû au fait d'avoir un bénéfice de gestion

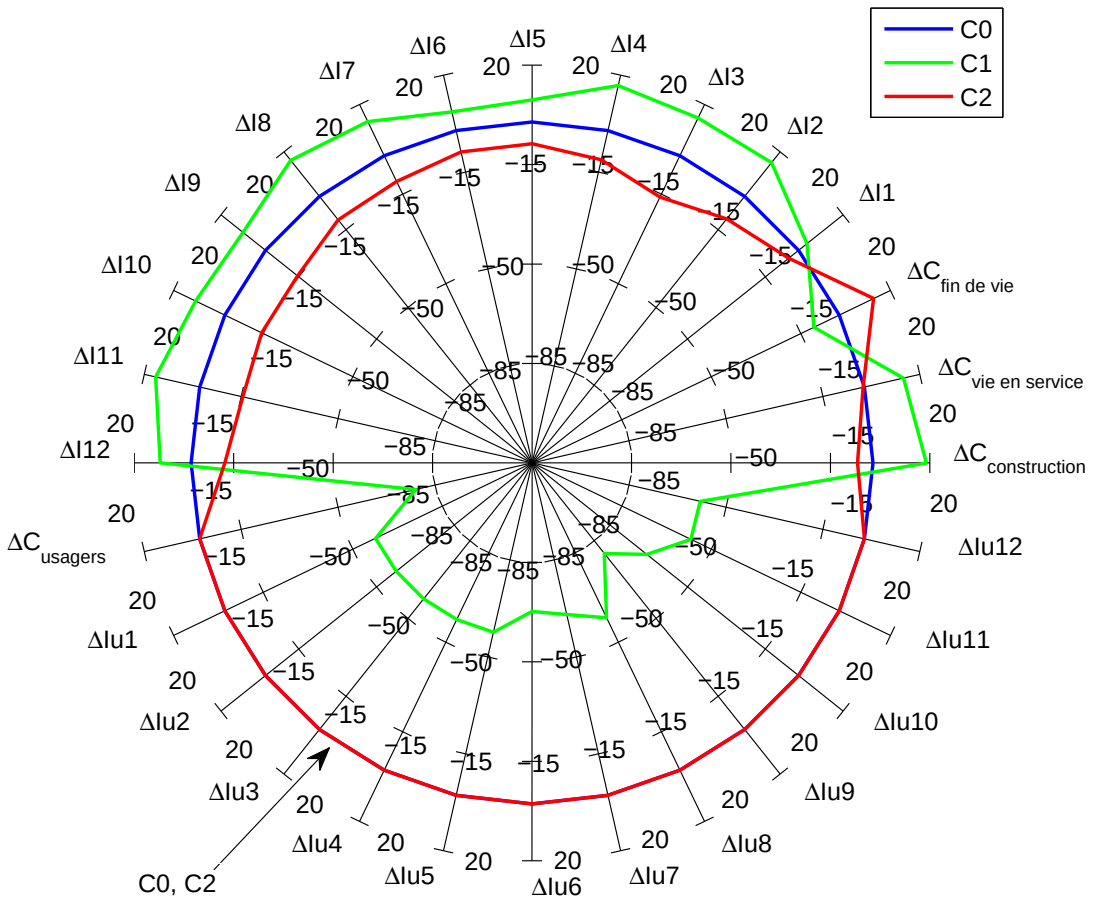


Figure 3.4.27: Synthèse des études comparatives de la famille C.

avec deux tabliers), suivie de C0 et C2 qui sont confondues car équivalentes du point de vue de la gêne aux usagers.

Enfin pour les critères de l'ACCV, le classement évolue avec de la meilleure à la moins bonne solution C2, C0 et C1 à la construction, C0 = C2 et C1 durant la vie en service, et C1, C0 et C2 en fin de vie.

Cette comparaison permet de justifier le recours à l'analyse multicritère lorsque seuls les critères de l'ACCV sont considérés, ou bien lorsque tous les critères sont pris en compte.

3.5 ANALYSE MULTICRITÈRE

Généralement, un ensemble de solutions possibles peuvent être identifiées mais une seule option de dimensionnement est finalement choisie pour passer à l'étape de construction. Ceci amène à se poser la question "comment choisir ?" pour le maître d'ouvrage avec une réponse qui n'est parfois pas simple à trouver. Il s'agit donc de prendre en compte plusieurs facteurs et de faire un choix avec les informations disponibles. En effet, chaque option de dimensionnement génère sur le cycle de vie un coût au gestionnaire (paragraphe 2.1), des impacts environnementaux (paragraphe 2.2), un coût aux usagers et des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic (paragraphe 2.3). Dans ce contexte, l'analyse multicritère peut être utilisée pour évaluer plusieurs solutions, connues a priori, suivant différents critères généralement conflictuels, afin d'en déduire une classification.

De nombreuses approches, basées sur des techniques d'analyse qualitative sophistiquées, existent pour effectuer une analyse multicritère :

- les méthodes ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) (Roy 1968, 1987, 1991, Roy & Bouyssou 1993), qui ont été initialement introduites par Roy (1968), à travers le développement de la méthode ELECTRE I. Plusieurs extensions ont alors été proposées, y compris ELECTRE II, III, IV, IS et TRI (Roy 1991). Ces méthodes portent sur différents types de problèmes, y compris le choix (ELECTRE I, IS), le classement (ELECTRE II, III, IV) et le tri/la classification (ELECTRE TRI) ;
- la méthode Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) (Keeney 1993), qui étend la théorie de l'utilité traditionnelle au cas multidimensionnel. L'objectif de la méthode de MAUT est de modéliser et représenter le système préférentiel dans une fonction d'utilité. La fonction d'utilité est alors une fonction non-linéaire définie sur l'espace des critères.
- la méthode UTilités Additives (UTA) (Jacquet-Lagrèze & Siskos 1982), qui est une méthode mise au point pour résoudre les problèmes de classement. L'objectif de cette méthode est de développer une fonction d'utilité additive qui est la plus cohérente possible avec la politique de jugement ;
- la méthode UTilités Additives DIScriminantes (UTADIS) (Jacquet-Lagrèze 1995, Doumpos & Zopounidis 2002), qui est une méthode UTA développée pour des problèmes de tri/classification.
- la méthode Multi-group Hierarchical DIScrimination (MHDIS) (Zopounidis & Doumpos 2000) qui étend le cadre de la méthode UTADIS aux problèmes de tri/classification complexes.

Ce paragraphe n'est pas exhaustif en termes de méthodologies d'analyses multicritère, l'objectif étant de voir comment appliquer cette approche au problème du dimensionnement des grandes familles d'ouvrages introduites dans les paragraphes précédents de ce chapitre et de classer les différentes variantes de ces familles en termes d'impacts économiques, environnementaux, et sociétaux.

La méthode de choix de la meilleure solution est en général fortement conditionnée par la façon avec laquelle le décideur exprime ses préférences. Cette notion de prise en compte de préférences (exprimées sous forme de poids attribué à chaque critère) est un point majeur qui distingue les méthodes de comparaison multicritère des techniques d'optimisation mathématique multiobjectif qui considèrent un problème de sélection avec contraintes, et où les solutions ne sont pas connues a priori (il est noté

que les méthodes d'optimisation multiobjectif sont abordées dans le chapitre 4 de ce mémoire).

Deux techniques permettant de mener une analyse multicritère sont considérées dans ce paragraphe. La première, appelée Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), est une approche permettant de déterminer un critère unique de synthèse en comparant les différentes solutions à des solutions dites idéale et anti-idéale. La deuxième appelée Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) est une approche qui se base sur des techniques dites de surclassement en effectuant des comparaisons par paires de solutions possibles en se basant sur des fonctions de préférence. Cette méthode a été considérée dans les années 80 avec les travaux de Brans et Vincke (1985), avec notamment l'introduction des méthodes PROMETHEE I et II. Le principe de fonctionnement de ces deux méthodes étant différent, il sera intéressant de comparer les résultats obtenus dans le cadre de cette analyse.

3.5.1 *Présentation des outils TOPSIS et PROMETHEE*

3.5.1.1 *Comparaison à l'aide de l'outil TOPSIS*

Le principe de la méthode TOPSIS (Lai et al. 1994, Ren et al. 2007) est de choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale (meilleure sur tous les critères) et qui s'éloigne le plus possible de la pire solution (celle qui dégrade tous les critères).

La méthodologie de TOPSIS peut être résumée à l'aide des étapes suivantes :

- Etape 1 : pour les différents variantes V_i ($i = 1, 2, ..., n$) étant liées aux critères C_j ($j = 1, 2, ..., m$), une matrice permettant d'attribuer chacun des critères (un critère par colonne) aux différentes variantes (une variante par ligne) est construite et notée $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$ (TABLEAU 3.5.1). Cette matrice regroupe les données d'entrée pour l'analyse multicritère.

	C_1	C_2	...	C_m
V_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1m}
V_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2m}
...	...	...	...	...
V_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nm}

Tableau 3.5.1: Matrice de performance pour m critères associés à n variantes.

- Etape 2 : la matrice $\mathbf{X}$ est normalisée comme indiquée ci-dessous pour déterminer une matrice $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times m}$, où $a_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2$, $i = 1, 2, ..., n$ et $j = 1, 2, ..., m$.
- Etape 3 : les solutions, idéales et anti-idéales, sont ensuite déterminées de la manière suivante :

$$\mathbf{A}^+ = (a_{i1}^+, a_{i2}^+, ..., a_{im}^+) \tag{3.5.1}$$

$$\mathbf{A}^- = (a_{i1}^-, a_{i2}^-, ..., a_{im}^-) \tag{3.5.2}$$

où $a_{i1}^+ = \underset{1 \leq i \leq n}{max}(a_{ij})$ et $a_{i1}^- = \underset{1 \leq i \leq n}{min}(a_{ij})$ avec $j = 1, 2..., m$.

– Etape 4 : une mesure, basée sur la distance Euclidienne de dimension n est introduite pour calculer la distance de chaque solution i à la solution idéale ($\mathbf{D}^+$) et anti-idéale ($\mathbf{D}^-$) de la manière suivante :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} W_j (a_{ij}^+ - a_{ij})^2} \tag{3.5.3}$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} W_j (a_{ij}^- - a_{ij})^2} \tag{3.5.4}$$

où W_j est le poids associé au critère j.

– Etape 5 : pour chaque variante i, le ratio suivant est calculé :

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \tag{3.5.5}$$

avec $i = 1, 2..., n$.

– Etape 6 : les différentes variantes peuvent être classées suivant le ratio R_i.

Un exemple d'application est présenté ci-après avec quatre variantes (quatre entreprises) et trois critères (Fiabilité, Autofinancement, Coût du contrat) pour illustrer cette méthode (Hammami 2003). Dans cet exemple, l'objectif est de maximiser les deux premiers critères et de minimiser le dernier critère.

	Fiabilité (%)	Autofinancement (%)	Coût du contrat (€)
V_1	78	94	10000
V_2	82	86	15000
V_3	80	75	22000
V_4	88	90	25000

Tableau 3.5.2: Matrice de performance pour 3 critères associés à 4 variantes.

La matrice de performances $\mathbf{X}$ est détaillée ci-après (Etape 1)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 78 & 94 & 10000 \\ 82 & 86 & 15000 \\ 80 & 75 & 22000 \\ 88 & 90 & 25000 \end{bmatrix} \tag{3.5.6}$$

Dans la matrice $\mathbf{X}$, chaque ligne représente une variante possible et chaque colonne représente l'ensemble des valeurs pour un critère particulier (les critères associés au différentes colonnes n'ayant pas forcément la même unité). Chaque valeur dans le vecteur $\mathbf{W}$ est à mettre en lien (et donc chaque colonne) dans la matrice $\mathbf{X}$. Dans cet exemple, le vecteur de poids considéré est $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0,45 & 0,35 & 0,20 \end{bmatrix}$. ce vecteur permet de caractériser le poids que l'utilisateur attribue à chaque critère.

Etape 2 : A titre d'exemple, le terme a_{11} de la matrice $\mathbf{A}$ est calculé de la manière suivante : $a_{11} = \frac{78}{\sqrt[2]{78^2+82^2+80^2+88^2}} = 0,4751$. Plus généralement, la matrice $\mathbf{A}$ est donnée ci-dessous :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,4751 & 0,5431 & 0,2641 \\ 0,4995 & 0,4969 & 0,3961 \\ 0,4873 & 0,4333 & 0,5810 \\ 0,5360 & 0,5200 & 0,6602 \end{bmatrix} \tag{3.5.7}$$

.

Etape 3 : les solutions, idéale et anti-idéale, sont $\mathbf{A}^+ = \begin{bmatrix} 0,5360 & 0,5431 & 0,2641 \end{bmatrix}$ et $\mathbf{A}^- = \begin{bmatrix} 0,4751 & 0,4333 & 0,6602 \end{bmatrix}$, respectivement.

Etape 4 : les distances de chaque solution à la solution idéale et anti-idéale sont regroupées dans les vecteurs $\mathbf{D}^+$, $\mathbf{D}^-$ et calculées à l'aide du système de poids $\mathbf{W}$, respectivement.

$$\mathbf{D}^+ = \begin{bmatrix} 0,0274 \\ 0,0350 \\ 0,0773 \\ 0,0796 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{D}^- = \begin{bmatrix} 0,1001 \\ 0,1156 \\ 0,1359 \\ 0,1671 \end{bmatrix} \tag{3.5.8}$$

Etape 5 : le ratio pour chacune des quatre variantes est indiqué dans le vecteur suivant :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0,7851 \\ 0,7676 \\ 0,6374 \\ 0,6773 \end{bmatrix} \tag{3.5.9}$$

Dans ce vecteur, $R(1)$ a la plus grande valeur. C'est donc la variante 1 (première ligne dans $\mathbf{X}$) qui apparaît comme la meilleure alternative selon la méthodologie TOPSIS.

Il est par ailleurs intéressant de représenter dans le plan D^-/D^+ les distances D_i^+ et D_i^- pour avoir une idée de la répartition des variantes. Dans la suite de ce paragraphe, les valeurs $max(D_i^-)$, $min(D_i^-)$, $min(D_i^+)$ et $max(D_i^+)$ sont systématiquement mises en évidence par des ronds grisés (voir les points A, B, C et D dans la FIGURE 3.5.1). Il est noté que la meilleure solution est logiquement celle qui se rapproche le plus du point A dans la FIGURE 3.5.1 (dans le sens où elle minimise D_i^+ et maximise D_i^-, la plus mauvaise étant celle qui se rapproche le plus du point C (car elle minimise D_i^- et maximise D_i^+).

3.5.1.2 *Comparaison à l'aide de la méthodologie PROMETHEE*

Le principe de la méthode PROMETHEE est de procéder à une comparaison par paires des alternatives dans chaque critère simple afin de déterminer des relations binaires partielles dénotant la force de préférence d'une alternative particulière par rapport à une autre.

Comme pour la méthode TOPSIS, la table d'évaluation, constituée de m critères pour n variantes, est le point de départ de la méthode PROMETHEE (cf. TABLEAU 3.5.1). Deux types d'information sont également nécessaires, à savoir :

- les poids pour des critères à considérer $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_n \end{bmatrix}$;
- la fonction de préférence pour chaque critère séparé $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & \dots & f_n \end{bmatrix}$.

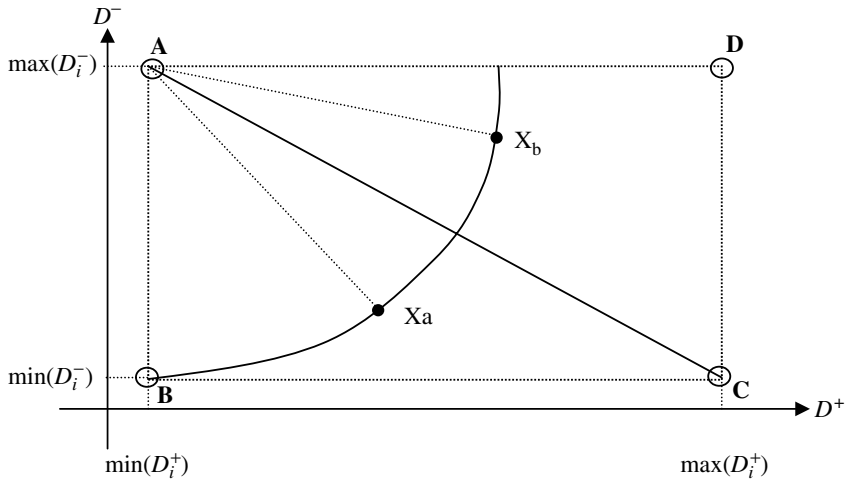


Figure 3.5.1: Mise en évidence des valeurs $max(D_i^-)$, $min(D_i^-)$, $min(D_i^+)$ et $max(D_i^+)$ dans le plan D^-/D^+.

Les variantes sont comparées par paire : $\mathbf{V}(a) = (x_{a1}, x_{a2}, ..., x_{am})$ et $\mathbf{V}(b) = (x_{b1}, x_{b2}, ..., x_{bm})$ où la différence entre $x_{aj} - x_{bj}$ (en supposant que $\mathbf{V}(a)$ est meilleure que $\mathbf{V}(b)$ par rapport au critère j, cela revient à avoir x_{aj} est meilleur que x_{bj}) est ramenée à un degré de préférence $p_j(a, b)$ s'étendant de 0 à 1 (cf. FIGURE 3.5.2).

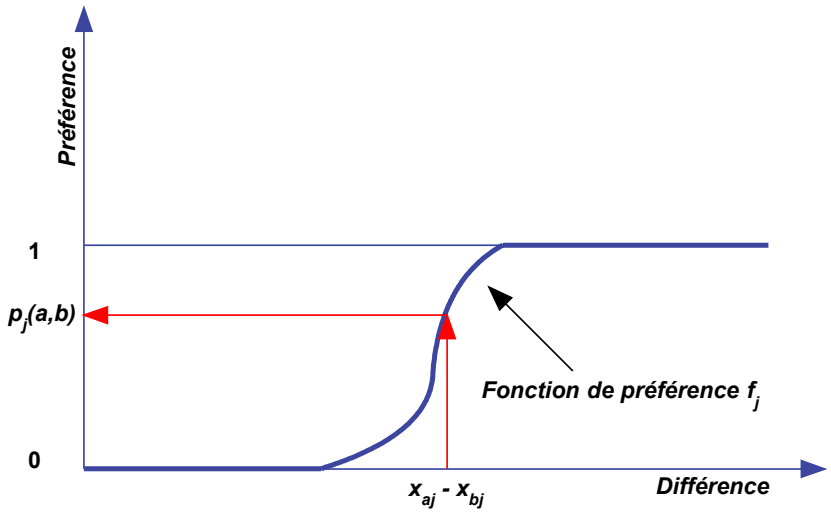


Figure 3.5.2: Exemple d'une fonction de préférence.

La fonction de préférence associée au critère f_j est une fonction non décroissante. Pour chaque critère, le décideur peut choisir une des six formes de courbes présentées dans le TABLEAU 3.5.3. Dans ce tableau, suivant la fonction de préférence choisie, l'utilisateur est amené à fixer les paramètres p_j, q_j et/ou σ. Le seuil q_j peut alors être interpreté comme un niveau d'indifférence, le seuil p_j comme un niveau de stricte préférence, et le seuil σ comme une valeur intermédiaire entre q_j et p_j (dans la suite de ce mémoire, σ est la valeur moyenne du critère concerné pour l'ensemble des variantes). Les formes "Vrai-critère", "Quasi-critère", et "Pseudo-critère I" sont généralement utilisées pour des évaluations qualitatives et réparties en échelons. Pour le "Vrai-critère", la préférence est par exemple acquise dès lors qu'un échelon de différence existe. Pour le "Quasi-critère", la valeur de q_j correspond au nombre d'échelons nécessaires

pour obtenir une préférence non négligeable. Le "Pseudo-critère I" est du même type mais introduit une nuance entre préférences faible et forte. Le "Pseudo-critère II" et le "Critère gaussien" sont plutôt réservés aux mesures quantitatives, le critère gaussien permettant par ailleurs de lisser le critère de préférence et de rendre dérivable la fonction associée.

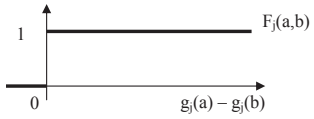
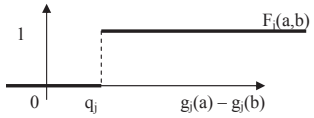
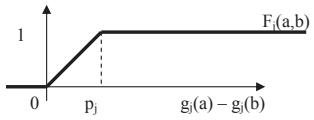
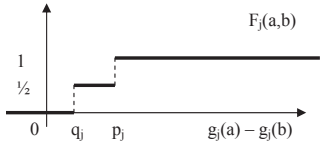
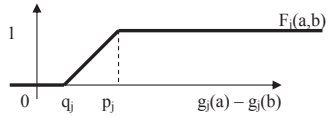
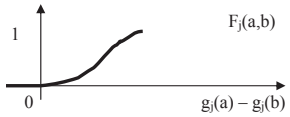
Forme	Illustration	Fonctions $f_j(a,b)$
Vrai-critère		$\begin{cases} 1 & si \quad g_j(a) > g_j(b) \\ 0 & si \quad g_j(a) \leq g_j(b) \end{cases}$
Quasi-critère		$\begin{cases} 1 & si \quad g_j(a) - g_j(b) > q_j \\ 0 & si \quad g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$
Pré-critère		$\begin{cases} 1 & si \quad g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a)-g_j(b)}{p_j} & si \quad 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & si \quad g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \end{cases}$
Pseudo-critère I		$\begin{cases} 1 & si \quad g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{1}{2} & si \quad q_j < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & si \quad g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$
Pseudo-critère II		$\begin{cases} 1 & si \quad g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a)-g_j(b)}{p_j-q_j} & si \quad q < g_{jj}(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & si \quad g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$
Critère gaussien		$1 - exp(-\frac{g_j(a)-g_j(b)}{2\sigma^2})$

Tableau 3.5.3: Fonctions de préférence de PROMETHEE.

Une fois les fonctions de préférence choisies, PROMETHEE permet de comparer deux variantes $V(a)$ et $V(b)$ avec des degrés de préférence $\mathbf{P}(a,b) = \left[p_j(a,b)\right]_{j=1,2,..m}$ et $\mathbf{P}(b,a) = \left[p_j(b,a)\right]_{j=1,2,..m}$.

$$\varphi^+(a) = \mathbf{P}(a,b) \times \mathbf{W} \quad \varphi^-(a) = \mathbf{P}(b,a) \times \mathbf{W} \tag{3.5.10}$$

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \tag{3.5.11}$$

où $\varphi(a)$ = flux net, un indice global de préférence de a par rapport à b, calculé comme la différence entre le flux de surclassement positif $\varphi^+(a)$ et le flux de surclassement négatif $\varphi^-(a)$.

A titre d'illustration, l'exemple dans le paragraphe 3.5.1.1 est appliqué ci-après avec la fonction de préférence de type (1) - Vrai-critère (TABLEAU 3.5.3).

En comparant les variantes 1 (a) et 2 (b) pour le critère 1 avec l'objectif de le maximiser, il vient $x_{a1} < x_{b1}$ (78 < 82), et donc $p_1(a,b)$ = 0 et $p_1(b,a)$ = 1.

De la même manière, il vient $\mathbf{P}(a,b) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ et $\mathbf{P}(a,b) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. Selon l'EQUATION 3.5.10 :

$$\begin{aligned} \varphi^+(a) &= 0 \times 0,45 + 1 \times 0,35 + 1 \times 0,20 = 0,55 \\ \varphi^-(a) &= 1 \times 0,45 + 0 \times 0,35 + 0 \times 0,20 = 0,45 \end{aligned} \tag{3.5.12}$$

Les variantes sont ensuite comparées par paire et les flux de surclassement positif et négatif sont regroupés dans le TABLEAU 3.5.4.

	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1		0,55	0,55	0,55
V_2	0,45		1	0,2
V_3	0,45	0		0,2
V_4	0,45	0,8	0,8	

Tableau 3.5.4: Comparaison par paire de variantes (fonction de préférence "Vrai-critère").

Le flux net pour les quatre variantes est finalement calculé à l'aide de l'EQUATION 3.5.11 et les valeurs sont regroupées dans le TABLEAU 3.5.5.

	V_1	V_2	V_3	V_4
φ^+	0,55	0,55	0,22	0,68
φ^-	0,45	0,45	0,78	0,32
φ	**0,1**	**0,1**	**-0,56**	**0,36**

Tableau 3.5.5: Matrice de flux de surclassement (fonction de préférence "Vrai-critère").

Dans ce vecteur, $\varphi(4)$ a la plus grande valeur. C'est donc la variante 4 (dernière ligne dans **X**) qui apparaît comme la meilleure alternative selon la méthodologie PROMETHEE avec la fonction de préférence de type "Vrai-critère".

Le calcul est maintenant reconsidéré en choisissant la fonction de préférence avec le critère gaussien (en fixant le paramètre σ pour chaque critère dans le TABLEAU 3.5.3 à la valeur moyenne des critères des différentes variantes). Les variantes sont comparées par paire et les flux de surclassement positif et négatif sont regroupés dans le TABLEAU 3.5.6.

	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1		$9{,}07.10^{-3}$	$4{,}82.10^{-2}$	$5{,}90.10^{-2}$
V_2	$5{,}35.10^{-4}$		$1{,}75.10^{-2}$	$2{,}86.10^{-2}$
V_3	$1{,}34.10^{-4}$	0		$2{,}76.10^{-3}$
V_4	$3{,}33.10^{-3}$	$1{,}58.10^{-3}$	$7{,}39.10^{-3}$	

Tableau 3.5.6: Comparaison par paire de variantes (fonction de préférence "Critère gaussien").

Les résultats concernant le flux net sont finalement montrés dans le TABLEAU 3.5.7. Dans ce vecteur, $\varphi(1)$ a la plus grande valeur. C'est donc la variante 1 (première ligne dans **X**) qui apparaît maintenant comme la meilleure alternative selon la méthodologie PROMETHEE avec la fonction de préférence de type "Critère gaussien". Cette différence de résultats par rapport au TABLEAU 3.5.5 montre l'impact du choix des fonctions de préférence sur les résultats de l'analyse multicritère.

	V_1	V_2	V_3	V_4
φ^+	$3{,}88.10^{-3}$	$1{,}56.10^{-2}$	$9{,}64.10^{-4}$	$4{,}10.10^{-3}$
φ^-	$1{,}33.10^{-3}$	$3{,}55.10^{-3}$	$2{,}44.10^{-2}$	$3{,}01.10^{-2}$
φ	$3{,}75.10^{-2}$	$1{,}20.10^{-2}$	$-2{,}34.10^{-2}$	$-2{,}60.10^{-2}$

Tableau 3.5.7: Matrice de flux de surclassement (fonction de préférence "Critère gaussien").

Dans la suite de ce chapitre, seule la fonction de préférence avec le "Critère gaussien" est considérée, étant donné le caractère quantitatif de l'analyse menée. Cette fonction est par ailleurs associée à des résultats cohérents avec ceux obtenus par l'approche TOPSIS.

3.5.2 *Application des approches TOPSIS et PROMETHEE aux familles d'ouvrages A, B et C*

Dans ce paragraphe, une sélection de critères environnementaux, économiques et sociétaux est proposée pour mener l'analyse multicritère (TABLEAU 3.5.8). Le coût à la construction (C_{cons}), le coût de vie en service (C_{ges}) et le coût de fin de vie (C_{fin}) sont pris en compte pour les critères économiques. Enfin, les coûts aux usagers et les impacts Iu1 à Iu12 sont considérés pour les critères sociétaux avec la prise en compte de la gêne aux usagers et des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic.

Le paragraphe 3.4.4 ayant montré l'intérêt de considérer simultannément seuls les critères économiques ou tous les critères pour les trois familles A, B et C (sans les critères environnementaux pour la famille B), trois systèmes de poids, détaillés dans le TABLEAU 3.5.8, sont donc considérés pour évaluer l'influence de ces critères dans la prise de décision. Le système de poids *W*1 met par exemple toute l'importance sur les critères économiques, le système *W*2 sur tous les critères et le système *W*3 sur tous les critères hormis les critères environnementaux pour la famille B. En parallèle de l'étude menée avec les systèmes *W*2 et *W*3, deux systèmes *W*2*bis* et *W*3*bis*, qui ne considèrent que les impacts I2, I6, I8 et I9 pour les critères environnementaux et Iu2, Iu6, Iu8 et Iu9 pour les critères sociétaux, sont considérés pour les familles A, B et C, respectivement. L'objectif de ces deux systèmes de poids supplémentaires est de voir comment la classification évolue quand seule une partie des impacts environnementaux est considérée (le choix des indicateurs retenu est en lien avec les indicateurs pris en compte par Du & Karoumi (2012)).

De nombreuses autres combinaisons pourraient être considérées. Cette étude se limite à ces systèmes de poids suite à l'analyse du paragraphe 3.4.4 qui a permis de cibler les catégories d'indicateurs confliectuels. Ces systèmes couvrent de plus une large variation possible des préférences d'un gestionnaire, et l'intérêt est plus porté sur la méthodologie que sur le choix d'un système de pondération à proprement parlé (qui est propre à chaque contexte dans tous les cas).

Dans les paragraphes suivants, l'idée est de considérer l'ensemble des variantes par famille d'ouvrages afin de déterminer une classification. Par ailleurs, il est noté que le système de poids est normalisé dans le cas de la méthode de PROMETHEE (de telle sorte que la somme de tous les poids soit égale à 1).

3.5.2.1 *Comparaison des variantes de la famille A*

La première comparaison à l'aide des méthodologies TOPSIS et PROMETHEE porte sur la famille d'ouvrages A.

APPROCHE TOPSIS

Les résultats du calcul du ratio R_i pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4 sont présentés dans le TABLEAU 3.5.9 et la visualisation des distances D_i^+ et D_i^- est proposée dans la FIGURE 3.5.3. Il est noté que les variantes Ai les plus intéressantes sont celles qui maximisent le ratio R_i (valeurs en gras dans le TABLEAU 3.5.9). La classification apparaît cohérente au regard des analyses menées dans le paragraphe 3.4. D'un point de vue strictement économique (poids *W*1), la variante A2 est la plus intéressante, suivie par les variantes A1, A0, A4 et A3. Lorsque tous les critères sont considérés (poids *W*2), la variante A4 est la mieux notée, suivie de très près par la variante A3, les variantes A1, A2 et A0 étant distancées dans le classement. Ce résultat

		Système de poids					
		*W*1	*W*2	*W*3		*W*2*bis*	*W*3*bis*
Env.	I1	0	1	0	I2	1	0
	I2	0	1	0	I6	1	0
	...	...	...	...	I8	1	0
	I12	0	1	0	I9	1	0
Eco.	C_{cons}	1	1	1	C_{cons}	1	1
	C_{ges}	1	1	1	C_{ges}	1	1
	C_{fin}	1	1	1	C_{fin}	1	1
Soc.	C_U	0	1	1	C_U	1	1
	Iu1	0	1	1	Iu2	1	1
	Iu2	0	1	1	Iu6	1	1
	...	...	...	...	Iu8	1	1
	Iu12	0	1	1	Iu9	1	1

Env. = critères environnementaux, Eco. = critères économiques,
Soc. = critères sociétaux (congestion du trafic)

Tableau 3.5.8: Détail des critères et des systèmes de poids considérés.

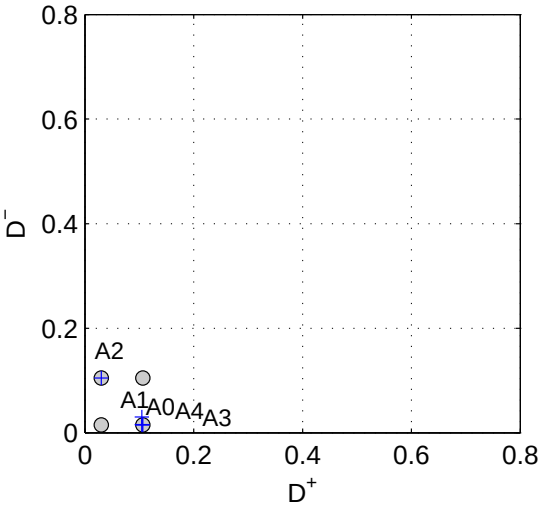
montre l'impact très significatif que peut avoir la gêne aux usagers dans le processus décisionnel. Pour le système *W*2*bis*, les résultats sont sensiblement les mêmes qu'avec *W*2, hormis une inversion de classement entre les variantes A1 et A2 (les variantes A4 et A3 se détachant toujours nettement par rapport à A2, A1 et A0). Le fait de réduire le nombre d'indicateurs où A1 était mieux classée que A2, a donc, dans un cas particulier, une influence sur le classement final, sans toutefois remettre en cause la très bonne position des variantes A4 et A3.

Variante	*W*1	*W*2	*W*2*bis*
A0	0,13	0,10	0,10
A1	0,22	0,20	0,19
A2	**0,78**	0,13	0,20
A3	0,13	0,81	0,76
A4	0,13	**0,83**	**0,77**

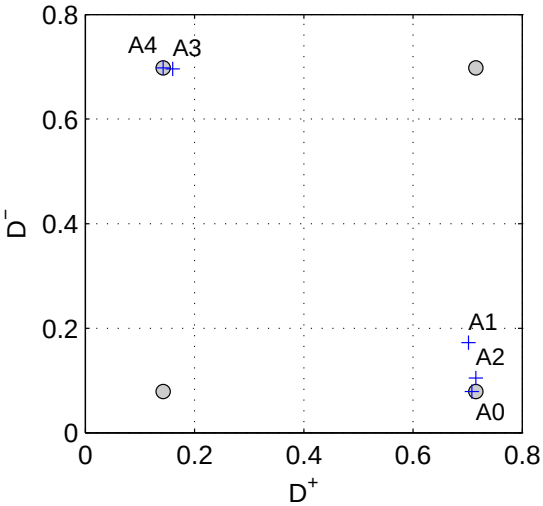
Tableau 3.5.9: Ratios R_i obtenus pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4.

APPROCHE PROMETHEE

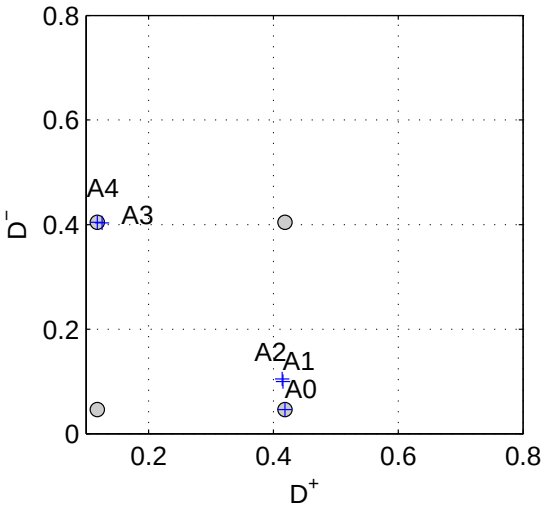
Les résultats obtenus avec la méthode PROMETHEE sont détaillés dans la FIGURE 3.5.4 pour les systèmes de poids *W*1, *W*2 et *W*2*bis*. Les fonctions de préférence utilisées sont de type gaussien pour tous les critères (TABLEAU 3.5.3). Il est noté que plus les valeurs associées aux variantes sont importantes (en étant positives), meilleure est la classification de cette variante par rapport aux autres. Les résultats obtenus avec



(a) système de poids W1.



(b) système de poids W2.



(c) système de poids W2bis.

Figure 3.5.3: Visualisation des distances D_i^+ et D_i^- pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4.

cette deuxième approche mènent exactement aux mêmes conclusions que celles avec la méthode TOPSIS.

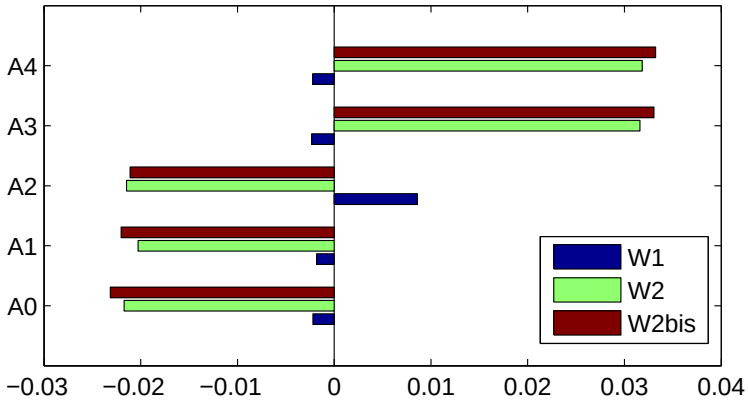


Figure 3.5.4: Résultats de l'analyse multicritère par PROMETHEE pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4.

3.5.2.2 *Comparaison des variantes de la famille B*

APPROCHE TOPSIS

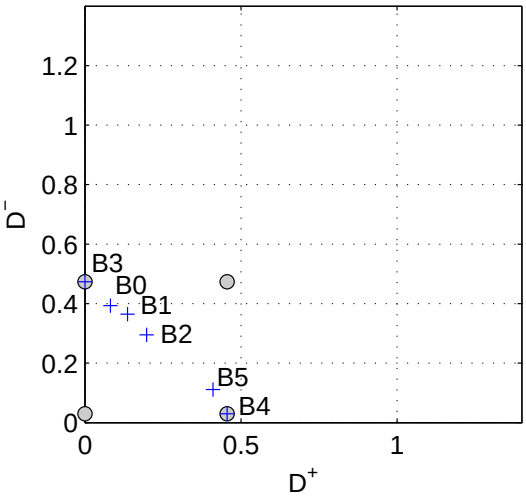
Comme pour les variantes de la famille A, celles de la famille B sont considérées ici pour mener l'étude comparative. Dans l'ensemble des cas, il apparaît que la variante avec les culées intégrales est le meilleur choix et que la variante B4 avec l'utilisation des travées de rive comme contre-poids est le moins bon choix. D'un point de vue économique, la variante B2 avec un tablier en béton assemblé par élements préfabriqués est pénalisée par des coûts de construction et de gestion élevés, et par une gêne élevée aux usagers dans le cas où des travaux de maintenance sont programmés sous le pont. Les variantes B4 et B5 sont les plus pénalisées du fait des surcoûts très significatifs par rapport à toutes les autres variantes, que ce soit à la construction, durant la vie en service, ou en fin de vie de l'ouvrage. Ceci s'explique par la longueur nettement plus importante pour B4 et B5 par rapport aux autres ouvrages. Ce dimensionnement représente pourtant quelques avantages, tels que la facilité de mise en place du tablier ou encore l'absence de pile centrale. Il est par ailleurs intéressant de noter que la variante B5 se rapproche fortement de la variante B2 (FIGURES 3.5.5b et 3.5.5c) pour *W*3 et *W*3*bis* et qu'elle est même meilleure que B2 avec *W*3.

Variante	*W*1	*W*3	*W*3*bis*
B0	0,83	0,90	0,87
B1	0,73	0,89	0,83
B2	0,60	0,53	0,54
B3	**1,00**	**1,00**	**1,00**
B4	0,06	0,02	0,04
B5	0,21	0,56	0,47

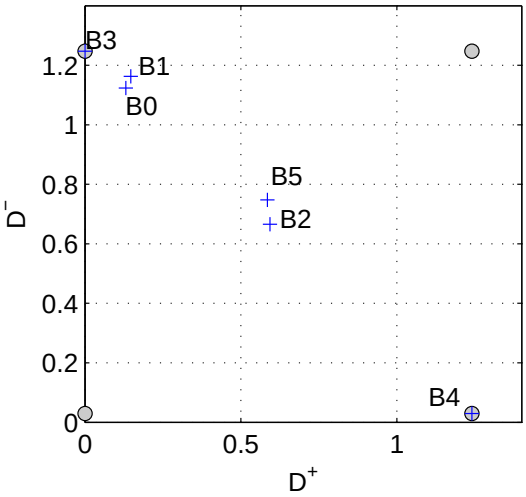
Tableau 3.5.10: Ratios R_i obtenus pour les variantes B*i* avec i = 0, 1, 2, 3, 4 et 5.

APPROCHE PROMETHEE

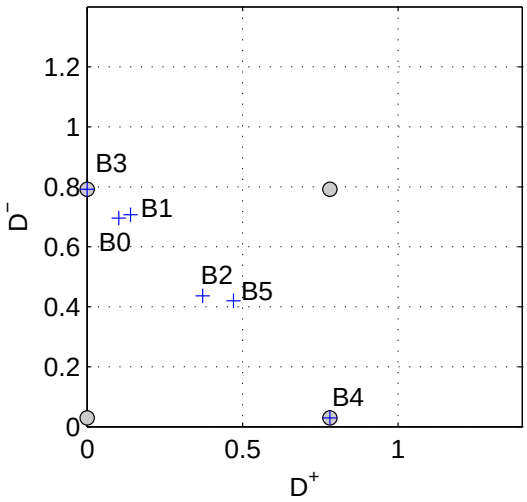
Les fonctions de préférence utilisées sont de type gaussien pour tous les critères (TABLEAU 3.5.3). Les résultats obtenus sont présentés dans la FIGURE 3.5.6. Le même constat qu'avec la méthode TOPSIS peut être effectué : (i) la variante avec les culées intégrales est celle qui est globalement la meilleure variante, (ii) les variantes B0 et B1 sont globalement en deuxième position avec un classement entre ces deux variantes qui peut s'inverser lorsque *W*1, *W*3 et *W*3*bis* sont choisis, (iii) la variante B2 est meilleure que les variantes B4 et B5 pour *W*1 mais les deux solutions B2 et B5 sont équivalentes pour *W*3, et (iv) la variante B4 est toujours la moins bien classée.



(a) système de poids W1.



(b) système de poids W3.



(c) système de poids W3bis.

Figure 3.5.5: Visualisation des distances D_i^+ et D_i^- pour les variantes Bi avec i = 0, 1, 2, 3, 4 et 5.

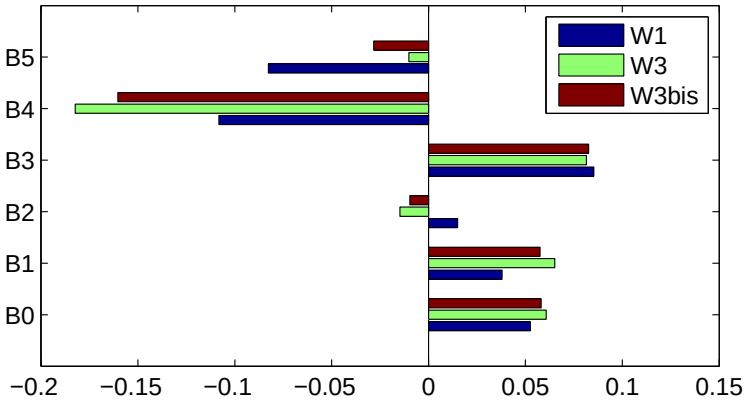


Figure 3.5.6: Résultats de l'analyse multicritère par PROMETHEE pour les variantes Bi avec i = 0, 1, 2, 3, 4 et 5.

3.5.2.3 *Comparaison des variantes Co, C1 et C2*

La comparaison des variantes des ouvrages de grande portée est finalement effectuée dans ce paragraphe.

APPROCHE TOPSIS

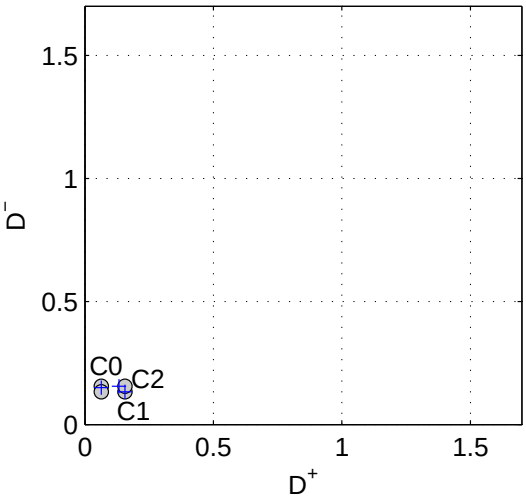
De manière globale, la variante Co est intéressante lorsque l'on considère des critères économiques seulement (poids $W1$). Si les variantes Co et C2 présentent le même coût de vie en service (C_{ges}), c'est finalement le revenu plus important en fin de vie pour Co (avec la revente des aciers) qui l'emporte sur le gain de coût à la construction pour C2. Ce résultat est dû au fait que l'analyse multicritère traduit les différences entre variantes à l'aide d'écarts relatifs et que le poids des comparaisons par rapport aux valeurs absolues perd en importance. L'écart relatif pour C_{cons} et C_{fin} est donc du même ordre de grandeur (les poids sur chaque critère sont par ailleurs identiques) même si les coûts en question sont significativement plus importants à la construction qu'en fin de vie, ce qui explique pourquoi la variante C2 est plus intéressante que C1 dans ce cas de figure. Cependant, la variante C1 avec deux tabliers apparaît la meilleure dans les deux cas où l'on ajoute les critères environnementaux et sociétaux (poids $W2$ et $W2bis$) (cf. TABLEAU 3.5.11 et FIGURE 3.5.7), sans grande modification entre $W2$ et $W2bis$.

Variante	$W1$	$W2$	$W2bis$
Co	**0,70**	0,15	0,18
C1	0,46	**0,76**	**0,75**
C2	0,54	0,24	0,25

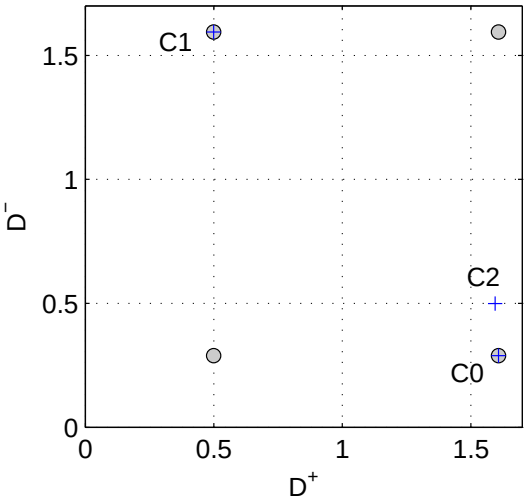
Tableau 3.5.11: Ratios R_i obtenus pour les variantes Ci avec i = 0, 1 et 2.

APPROCHE PROMETHEE

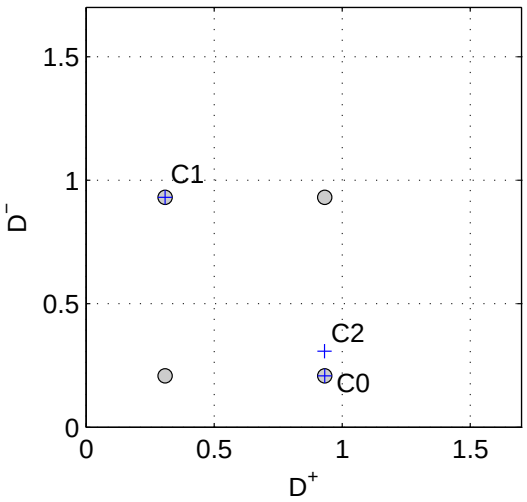
Les fonctions de préférence utilisées sont de type gaussien pour tous les critères (TABLEAU 3.5.3). Comme dans tous les cas précédents, l'approche PROMETHEE mène aux mêmes résultats que ceux obtenus avec TOPSIS. Dans la FIGURE 3.5.8, si la variante Co est en première position par rapport à des critères économiques ($W1$), la variante C1 avec deux tabliers est celle qui est la mieux notée dès lors que l'on considère tous les critères (poids $W2$ ou $W2bis$).



(a) système de poids W1.



(b) système de poids W2.



(c) système de poids W2bis.

Figure 3.5.7: Visualisation des distances D_i^+ et D_i^- pour les variantes Ci avec i = 0, 1 et 2.

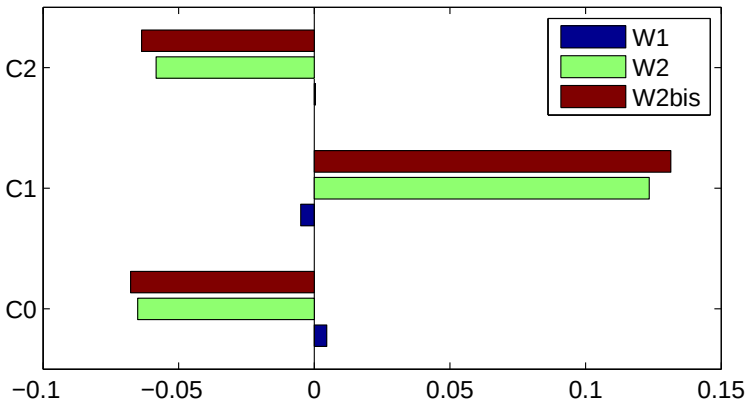


Figure 3.5.8: Résultats de l'analyse multicritère par PROMETHEE pour les variantes Ci avec i = 0, 1 et 2.

3.5.3 *Synthèse sur l'analyse multicritère*

L'étude menée dans ce paragraphe a eu pour objectif d'appliquer deux types d'approches de classification multicritère pour dégager un classement entre plusieurs variantes. Il ressort que les conclusions obtenues avec les deux approches sont identiques et permettent de dégager l'intérêt de certaines solutions de dimensionnement considérées comme originales. L'intérêt de l'outil d'analyse multicritère est non seulement de donner une seule note à un ouvrage vis-à-vis d'autres ouvrages mais également de visualiser si les solutions sont proches les unes des autres ou bien fortement distinctes. Dans les études menées, l'intégration des critères sociétaux a notamment été un facteur fortement discriminant des différentes variantes considérées. Par ailleurs, le système de préférences lié aux poids mis sur chaque critère influence considérablement le résultat final et il convient d'être prudent sur les résultats des analyses menées, tant il peut être délicat de favoriser un critère d'impact par rapport à un autre. Toutes les données n'étaient pas pleinement établies pour l'ensemble des matériaux et des processus mis en jeu dans cette analyse, comme par exemple la connaissance des impacts environnementaux générés par les chantiers de remplacement des systèmes de protection anti-corrosion, ou encore par la mise en place et la maintenance d'équipements des ouvrages tels que les joints de chaussées, ce qui ne permet pas de conclure de manière ferme sur le classement de toutes les variantes. Néanmoins, ce type d'analyse montre qu'il est possible de mettre en évidence des grandes tendances qui peuvent aider un gestionnaire lors de la prise de décision.

3.6 SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Ce chapitre a présenté une application de l'analyse de cycle de vie à la question du dimensionnement de trois familles d'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. La thèse étant liée au projet SBRI qui a regroupé plusieurs pays européens, les ouvrages ont naturellement été dimensionnés selon les Eurocodes en tenant compte des valeurs recommandées dans la partie commune.

Les cas d'étude considérés ont notamment permis d'illustrer comment les différents concepts économiques, environnementaux, et sociétaux peuvent représenter des enjeux conflictuels sur le cycle de vie. Une quantification du gain procuré par le choix de certaines solutions de dimensionnement originales a par ailleurs été effectuée tout d'abord par rapport aux choix des 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. Ainsi, l'intérêt de l'emploi d'aciers à haute limite d'élasticité (HLE) a pu être mis en évidence. L'utilisation d'aciers autopatinables a par ailleurs été envisagée afin de se dispenser de la réalisation et des remplacements successifs d'un système anticorrosion. Le gain avec ce type d'ouvrages a pu être mis en évidence en ce qui concerne les coûts au gestionnaire sur le cycle de vie, même si le coût à la construction est légèrement plus élevé. Il a également été possible de montrer l'intérêt de ce matériau pour des ouvrages de petite portée franchissant un axe à forts enjeux, particulièrement sensible aux perturbations de trafic liées à la maintenance.

Des améliorations liées à la conception des ouvrages ont également été analysées. Plusieurs options ont été considérées parmi lesquelles (i) remplacer les joints de chaussées par des appuis intégraux, supprimant ainsi une opération de maintenance lourde, (ii) privilégier la réalisation d'ouvrages à deux tabliers de sorte qu'un des deux soit toujours en service (pour des ouvrages de très grande portée), ou encore (iii) prendre en compte la transformation d'une bande d'arrêt d'urgence en voie de circulation pour véhicules légers et poids lourds en raison d'un accroissement futur de trafic (en considérant ainsi un dimensionnement spécifique vis-à-vis des phénomènes de fatigue). Il a été observé que dans le cas où les améliorations impactent directement le trafic sur et sous l'ouvrage, les gains vis-à-vis des coûts aux usagers et des impacts environnementaux générés par la congestion sont significatifs. Il est également noté que le manque d'information sur l'ensemble des critères environnementaux n'a pas permis de mettre pleinement en évidence l'intérêt de certaines variantes vis-à-vis des impacts environnementaux (comme pour le cas des ponts avec des culées intégrales pour lesquels les données relatives aux joints de chaussée n'étaient pas disponibles dans cette étude).

Une analyse de l'évolution des scénarios de gestion a enfin été considérée et deux solutions particulières de surveillance et maintenance ont pu être analysées. Ces deux solutions de gestion particulières permettent de dégager des scénarios dans lesquels il est envisagé d'étendre la durée de vie en service, et également des scénarios plus pessimistes pour lesquels un manque de ressources financières est envisagé.

En ce qui concerne l'ACCV, la phase de construction a généralement le poids le plus important sur le cycle de vie (en valeur absolue), par rapport au coût de vie en service et surtout de fin de vie qui apparaît alors marginal. Cette conclusion est plus nuancée pour les ouvrages de moyenne portée pour lesquels la phase de vie en service a un poids plus important, ce qui peut s'expliquer par le choix des coûts unitaires de construction pour cette famille d'ouvrages dans le cadre du projet SBRI.

Pour l'ACV, la phase de construction a également un poids très important sur le cycle de vie (en valeur absolue, cf. Annexe B), suivie par la phase de vie en service et celle de fin de vie. Les ouvrages de grande portée ont notamment la phase de vie en service avec le poids le plus important. Cette phase dépend en effet en grande majorité des actions de maintenance sur la couche de roulement qui est très étendue pour les ouvrages de grande portée. Enfin, pour toutes les familles d'ouvrages, les impacts environnementaux de fin de vie sont faibles par rapport aux deux autres phases car seul le transport des matériaux au centre de stockage est considéré (méthode des stocks).

Pour l'analyse sociétale, il est montré que des gains importants vis-à-vis de la congestion de trafic peuvent être obtenus avec des surcoûts maîtrisés à la construction.

Une méthode d'analyse multicritère a finalement été présentée qui prend en compte tous les coûts dans l'analyse économique, les impacts dans l'analyse environnementale et les coûts aux usagers dans l'analyse sociétale. Ce type d'approche permet de comparer différents cas d'étude bien que ces unités (coût, impact) soient très différentes les unes des autres. L'analyse multicritère est particulièrement intéressante dans le sens où l'évaluation d'une solution se fait souvent en considérant plusieurs critères à la fois. Il est donc important d'utiliser de telles méthodes pour fournir, in fine, un outil d'aide à la décision aux gestionnaires d'ouvrages d'art. Le TABLEAU 3.6.1 propose une vue synthétique des avantages et inconvénients identifiées pour chaque variante par rapport à la variante de référence correspondante. Cette synthèse est proposée en

lien d'une part avec les comparaisons directes des impacts économiques, environnementaux et sociétaux, et d'autre part en considérant l'analyse multicritère (les notations "=" et "N/A" sont utilisées lorsque les impacts sont égaux ou lorsqu'il n'y a pas assez d'information pour effectuer l'analyse, respectivement). De manière qualitative, plus la variante est avantageuse par rapport à un critère, plus elle cumule de signe "+". Inversement, plus elle est défavorable par rapport à un critère, plus elle cumule de signe "-". De manière générale, les écarts les plus significatifs entre variantes ont été observés pour l'analyse sociétale durant la vie en service, et ce pour les familles d'ouvrages de petite, moyenne, et grande portée. Le gain où l'excédent de congestion de trafic peuvent donc peser significativement dans le processus décisionnel pour l'ensemble des familles d'ouvrages étudiées. Finalement, il est noté que l'analyse performantielle est sous-jacente dans ce chapitre dans le sens où le niveau de performance des ouvrages est jugé satisfaisant dans les conditions normales de dimensionnement, de construction, et d'entretien/maintenance. L'intérêt du chapitre suivant est de proposer des profils de performance évoluant avec le temps et tenant compte des diverses incertitudes inhérentes à la gestion des ouvrages. L'introduction de profils de performance est alors proposée en lien avec une méthodologie d'optimisation multiobjectif pour rechercher des stratégies de dimensionnement et de gestion optimales sur le cycle de vie.

	AECV	ACV	ASCV	Multicritère
A0	Variante de référence			
A1	+	+	=	++
A2	++	- - -	=	+
A3	- -	- -	+	+++
A4	-	-	+	++++
B0	Variante de référence			
B1	-	N/A	+	-
B2	- -	N/A	- -	- -
B3	+	N/A	++	+
B4	- - - -	N/A	- - -	- - - -
B5	- - -	N/A	-	- - -
C0	Variante de référence			
C1	–	-	+	++
C2	-	+	=	+

Tableau 3.6.1: Synthèse des avantages (+) et inconvénients (-) des différentes variantes par rapport aux variantes de référence associées.

4

DÉTERMINATION DE STRATÉGIES OPTIMALES DE CONCEPTION ET GESTION

4.1 INTRODUCTION

Le chapitre 3 a proposé une approche globale du dimensionnement et de la gestion des ouvrages d'art en accord avec des objectifs de développement durable. Les exigences techniques ont à chaque fois été prises en compte au travers du respect de règlements et de normes (européennes dans le cadre de cette thèse) pour la partie dimensionnement, et d'avis d'experts pour la partie gestion durant la vie en service. Des calendriers d'inspections et d'actions d'entretien/de maintenance ont notamment été utilisés pour estimer les différents impacts sur le cycle de vie. L'analyse multicritère a alors été utilisée pour classer les différentes solutions, et ce pour les différentes familles d'ouvrages considérées.

Ce chapitre se propose d'aller plus loin dans la notion de maximisation du bénéfice procuré par une variante particulière en essayant de minimiser l'ensemble des impacts associés qui peuvent toucher non seulement des aspects sociétaux, environnementaux et économiques, mais également des aspects techniques durant la durée de vie en service des ouvrages. L'objectif n'est donc plus de comparer différentes solutions de gestion déjà établies, mais de proposer un cadre théorique permettant de rechercher, à l'aide d'un programme d'optimisation mathématique, un ensemble de solutions optimales. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'introduire des techniques de modélisation de la prise de décision, permettant d'une part de modéliser le niveau de performance des ouvrages sur l'ensemble du cycle de vie (pour satisfaire des exigences de fonctionnalité, stabilité et de sécurité), et d'autre part de minimiser un ensemble d'objectifs liés à différents types d'impacts traduisant des enjeux de développement durable.

En lien avec cet objectif, ce chapitre est organisé comme suit. Dans un premier temps, une analyse performantielle est proposée pour quantifier le niveau de performance des différentes parties d'ouvrages à l'aide d'indicateurs de qualité et prendre en compte l'impact des différentes actions de maintenance sur le cycle de vie. En particulier, deux modèles de dégradation basés sur la théorie des chaînes de Markov (nommés Ma1 et Ma2) sont introduits dans ce chapitre. Dans un deuxième temps, un cadre d'optimisation multiobjectif est considéré pour permettre de modéliser le processus décisionnel dans les méthodes de gestion des ouvrages d'art et déterminer des solutions optimales vis-à-vis d'un ensemble de critères pouvant être conflictuels. Cette approche est alors appliquée aux trois familles d'ouvrages de petite (famille B), moyenne (famille A) et grande (famille C) portées introduites dans le chapitre précédent, en recherchant cette fois-ci des stratégies de gestion optimisées sur le cycle de vie.

4.2 ANALYSE PERFORMANTIELLE SUR LE CYCLE DE VIE

4.2.1 *Introduction*

La notion de performance représente le respect d'exigences que la structure doit remplir au cours du temps (Cremona 2011). Ce respect d'exigences peut être lié à des aspects (i) de sécurité ou d'intégrité qui préconisent qu'une structure résiste à l'ensemble des actions qu'elle aura à subir pendant sa construction et son utilisation en situation normale, (ii) d'aptitude à l'emploi ou au service qui sont liés à la possibilité de maintien de l'exploitation de la structure, (iii) de durabilité qui sont souvent difficiles à définir car plusieurs sens leur sont associés dans la pratique tels que "l'aptitude d'une entité (structure ou élément) à demeurer en état d'accomplir ses performances de sécurité structurale", ou encore "l'aptitude au service dans des conditions données d'utilisation et de maintenance sur une durée de service définie".

Au cours de la durée de vie en service d'une structure, la perte de performance se produit avec le temps. Cette perte est liée à plusieurs paramètres tels que l'état initial de l'ouvrage, l'environnement de l'ouvrage (les conditions atmosphériques, la nature et le comportement du sol,...) et les conditions d'utilisation de l'ouvrage. Les différents mécanismes peuvent : (1) être linéaires comme la propagation de la corrosion, (2) ralentir au cours du temps comme la carbonatation ou la pénétration des chlorures dans le béton, (3) s'accélérer dans le temps, comme pour le phénomène de fatigue, (4) avoir une allure discontinue dans le cas de chargement exceptionnels ou de chocs dus à des accidents, (5) exprimer la ruine de l'ouvrage causée par un évènement exceptionnel, (6) se dérouler en deux phases : une première ou c'est la couche protectrice de la structure qui se dégrade et une deuxième où c'est la structure elle-même qui subit une dégradation (FIGURE 4.2.1 - Cremona 2011).

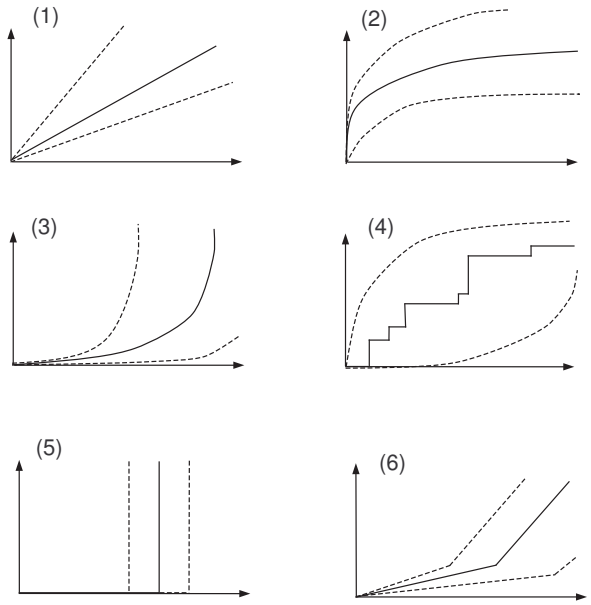
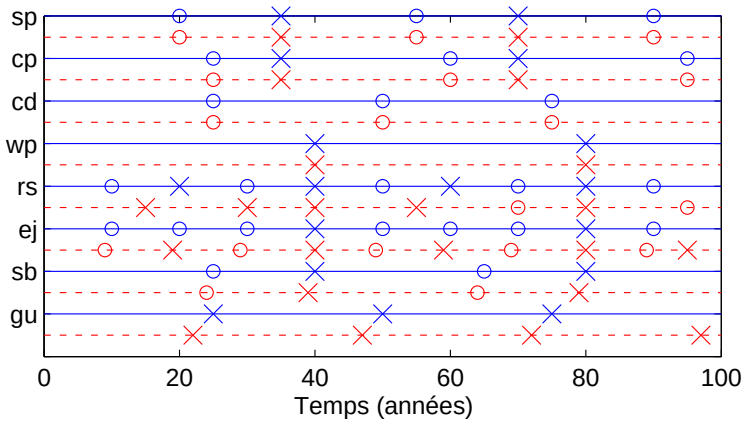


Figure 4.2.1: Profils de dégradation dans le temps.

La détermination de l'évolution de la performance de l'ouvrage dans le temps est cruciale pour planifier les actions de maintenance et de remplacement tout en assurant le bon fonctionnement de l'ouvrage. A titre d'exemple, deux scénarios de maintenance, notés sc_1 et sc_2, sont considérés dans la FIGURE 4.2.2 et le TABLEAU 4.2.1. pour évaluer l'impact du choix entre ces scénarios sur les coûts et les impacts environnementaux de cycle de vie.



(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)
(o=réparation x=remplacement)

Figure 4.2.2: Calendriers de maintenance sc_1 et sc_2 pour la variante A0.

	Scénario sc_1	$\Delta(sc_2)/sc_1$ (%)
$C_{gestionnaire}$	3035000 €	+4,7
I_{total}	203	+2,4
C_U	2541000 €	+19,7
$I_{usagers}$	300	+27,4

Tableau 4.2.1: Coûts et impacts pour les deux scénarios de maintenance sc_1 et sc_2.

Ces deux scénarios sont en particulier appliqués à la variante A0 à titre d'illustration. Bien que peu différents sur le plan technique (cf. FIGURE 4.2.2, les scénarios diffèrent seulement d'une ou deux années pour la couche de roulement, les joints de chaussées, les barrières de sécurité, et la maintenance des caniveaux), il est observé des écarts plus ou moins sensibles (TABLEAU 4.2.1) sur le coût total de cycle de vie au gestionnaire ($C_{gestionnaire}$), l'impact environnemental (I_{total}), le coût aux usagers (C_U) et l'impact environnemental ($I_{usagers}$) généré par la congestion du trafic, les différences les plus élevées étant observées pour les indicateurs liés à la congestion du trafic.

Dans ce paragraphe, le coût $C_{gestionnaire}$ est calculé en utilisant l'EQUATION 2.1.1 et que l'impact I_{total} est calculé (sans unité) en agglomérant les impacts I6, I8, et I9 suivant la démarche proposée par Du & Karoumi (2012) et comme indiqué dans l'équation ci-dessous :

$$I_{total} = \sum_i w_i \frac{I_i}{N_i} \tag{4.2.1}$$

où : w_i = coefficient de pondération, I_i = impact environnemental généré, N_i = coefficient de normalisation. Les différents coefficients sont montrés dans le TABLEAU 4.2.2.

	Unité	Coefficient de normalisation	Coefficient de pondération
I6	ton CO_2 eq./habitant/année	8,7	1,12
I8	kg $CFC-11$ eq./habitant/année	0,103	4,4
I9	kg C_2H_4 eq./habitant/année	22	1,0

Tableau 4.2.2: Coefficients de normalisation et de pondération (Stranddorf et al. 2003, Du & Karoumi 2012).

Par ailleurs, le coût aux usagers est calculé comme dans le chapitre 3 en utilisant le modèle de trafic QUEWZ-98 (paragraphe 2.3) et les valeurs unitaires des TABLEAUX 3.3.23 et 3.3.24. Finalement, de même que pour I_{total}, l'impact environnemental $I_{usagers}$ est calculé en agglomérant Iu6, Iu8, et Iu9 (cf. Equation 4.2.1). Les différences notées dans le TABLEAU 4.2.1 montrent l'importance d'affiner les conclusions en fonction des stratégies de maintenance appliquées durant la durée de vie en service des ouvrages.

4.2.2 *Modèles de performance*

Dans le domaine de la construction, certains modèles de type déterministe peuvent être rencontrés. Il s'agit alors d'extrapoler la performance dans le futur en faisant un lien entre la condition (paramètre technique ou indicateur) et les variables descriptives (âge, trafic, environnement extérieur, etc.). C'est en effet une technique couramment utilisée dans le domaine des chaussées. En particulier, Molzer et al. (1998) donnent un exemple d'une équation pour prédire la performance des chaussées (caractérisée par des fissures) en fonction des paramètres tels que le trafic journalier, l'épaisseur et l'âge de la couche d'asphalte. Pourtant, il est noté que ces modèles ont besoin d'informations détaillées pour être calibrés et qu'ils ne permettent pas de prendre en compte les différents types d'incertitude.

Parmi les modèles probabilistes de dégradation, certains modèles introduisent la notion d'état limite. La performance peut alors être caractérisée par la probabilité de défaillance de la structure de se trouver dans le domaine dit de défaillance comme c'est le cas dans le cadre de la théorie de la fiabilité (Cremona 2003, 2005). Différentes fonctions peuvent être considérées pour déterminer l'état limite : Stewart (2001) a par

exemple montré deux exemples sur la limite de flexion et la fissure longitudinale de la structure ; Frangopol et al. (1997) ont considéré la corrosion des aciers de renforcement ; Zhao et al. (1994), Chung et al. (2003, 2006) ont étudié la fatigue des ponts métalliques ; Sommer et al. (1993), Nowak et al. (1998) et Czarnecki & Nowak (2008) ont considéré la corrosion des ponts métalliques, etc.

Cependant, ce type de modèle de dégradation nécessite là encore des informations très détaillées sur les paramètres mis en jeu. L'objectif dans cette thèse étant de proposer une approche utilisée dès l'étape de conception de l'ouvrage, il peut être utile d'introduire des modèles, certes probabilistes mais ne nécessitant pas de renseigner tous les paramètres du processus physiques de dégradation. On parle alors de modèles non paramétriques. Parmi ces modèles, celui basé sur la théorie des chaînes de Markov est particulièrement intéressant. Contrairement à la théorie de la fiabilité, cette approche, qui repose sur la théorie des processus stochastiques initialisée par les travaux de Markov (1907), n'a pas besoin d'informations sur le processus physique de la dégradation de l'ouvrage. Elle est donc particulièrement intéressante et permet de s'adapter au caractère global de l'étude.

L'hypothèse fondamentale de la théorie des chaînes de Markov est que la probabilité pour un système de passer dans un état donné à l'instant t ne dépend que de l'état dans lequel il est à cet instant donné et non des instants précédents. Dans ce modèle où l'échelle du temps est discrétisée, seul l'état présent compte pour déterminer les états futurs. De plus, lorsque les probabilités de passage d'un état à un autre ne dépendent pas du temps, on parle de chaînes homogènes dans le temps. Dans le cas des différentes parties d'ouvrages, le processus peut être discrétisé par exemple en considérant chaque année durant la vie en service de l'ouvrage. L'introduction de matrices de transition permet de décrire l'évolution de l'état de la structure et la probabilité d'être dans chacune des classes définies au préalable. En effet, l'état d'un élément de l'ouvrage peut être classé dans différentes classes (1 à N, normalement de plus en plus dégradées). A chaque année i, un vecteur $\mathbf{q}(i)$ contenant les probabilités d'être dans les classes précédemment mentionnées exprime alors la performance de l'élément. Dans le cas d'un processus de Markov homogène, le vecteur $\mathbf{q}_{(i+1)}$ peut alors être déterminé à partir de celui de l'année précédente par l'équation :

$$\mathbf{q}(i+1) = \mathbf{P}\mathbf{q}(i) \tag{4.2.2}$$

ou encore lorsque la matrice de transition est homogène :

$$\mathbf{q}(i+1) = \mathbf{P}^{i+1}\mathbf{q}(0) \tag{4.2.3}$$

où $\mathbf{P}$ = matrice de transition pour l'élément considéré. Le paragraphe suivant décrit les deux modèles de dégradation Ma1 et Ma2, tous deux basés sur l'hypothèse d'un processus de type Markov homogène et qui permettent de déterminer la matrice de passage pour les différents éléments d'un ouvrage. Madanat et al. (1995) montrent plusieurs façons d'estimer ces matrices : en utilisant des modèles linéaires, de type orbit, poisson, etc. Les modèles avec une estimation linéaire sont rencontrés couramment dans la gestion des chaussées et des ouvrages d'art (Camahan et al. 1987, Scherer & Glagola 1994, Rens et al. 2007, Zayed et al. 2002, Hawk 1999, Golabi & Shepard 1997, DeStefano & Grivas 1998, Hontelez et al. 1996, Tao et al. 1995, Gurler & Kaya 2002, Ellis et al. 1995, Jiang et al. 2000). Il est par ailleurs noté que ce type de modèle rencontre certaines limites (Madanat & Mishalani 2002). D'autres types de modèles qui peuvent être mentionnés sont les modèles semi-markoviens (Netsbit et al. 1993,

Kleiner 2001, Luong & Nagarur 2001, Black et al. 2005). Thomas & Sobanjo (2012) ont montré un exemple comparatif sur les chaussées entre les modèles markoviens et semi-markoviens. Tandis que le modèle markovien sous-estime la dégradation, celui semi-markovien la sur-estime. Il est alors conclu que le modèle semi-markovien est meilleur si la base de données est suffisante. Pourtant, il existe d'autres types de modèles de dégradation tels que les modèles : "delay time" (Christer 1999), "renewal" (Çinlar et al. 1977, Van Noortijk 1998, 2003, Kong & Park 1997, Dieulle et al. 2003) qui ne sont cependant pas traités dans ce mémoire. Le paragraphe suivant décrit les deux modèles de dégradation Ma1 et Ma2, tous deux basés sur l'hypothèse d'un processus de type Markov homogène et qui permettent de déterminer la matrice de passage pour les différents éléments d'un ouvrage. Ce type de modèle peut être mis en relation avec la méthodologie utilisée dans le système de gestion d'ouvrages AASHTO-Ware Bridge Management software BrM (anciennement PONTIS), utilisé aux USA. Ce système considère notamment les différentes parties de l'ouvrage de manière indépendante et utilise des chaînes de Markov pour modéliser l'avancement de la dégradation des différentes parties d'ouvrages.

4.2.3 *Caractérisation des modèles de dégradation Ma1 et Ma2*

4.2.3.1 *Modèle Ma1 basé sur les temps de passage*

Le modèle de dégradation Ma1 se base sur la notion de temps de passage entre états et utilise les informations fournies dans le TABLEAU 3.3.3, dans le cadre du projet SBRI, sur les durées de vie moyennes et les fréquences de maintenance des différents éléments d'un ouvrage. En particulier, trois états sont introduits qui correspondent aux deux types d'action majeurs pour un élément d'ouvrage : la réparation et le remplacement. Le premier état, nommé E_1^k pour l'élément k, est celui pour lequel l'élément est neuf. Le deuxième état, E_2^k, est celui pour lequel une action de maintenance est nécessaire. Cet état est donc atteint lorsque l'action de maintenance est nécessaire (deuxième colonne du TABLEAU 3.3.3). Le troisième état, E_3^k, correspond à la durée de vie moyenne de l'élément (troisième colonne du TABLEAU 3.3.3). Les matrices de transition (supposées annuelles dans le sens où l'année est prise comme le pas de temps de référence pour l'élaboration des programmes de gestion) recherchées pour un élément k sont donc de la forme :

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} p_{11,k} & p_{12,k} & p_{13,k} \\ 0 & p_{22,k} & p_{23,k} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.2.4}$$

avec :

$$\begin{cases} p_{11,k} + p_{12,k} + p_{13,k} & = 1 \\ p_{22,k} + p_{23,k} & = 1 \end{cases} \tag{4.2.5}$$

Le modèle se base alors sur la relation entre les temps de passage et les termes de la matrice de transition (Cremona 2011) :

$$T_{j,k} = 1 + \sum_{i=1}^{m-1} T_{i,k} p_{i,j,k} \tag{4.2.6}$$

ce qui donne le système d'équation :

$$\begin{cases} T_{1,k} = 1 + T_{1,k} p_{11,k} + T_{2,k} p_{12,k} \\ T_{2,k} = 1 + T_{1,k} 0 + T_{2,k} p_{22,k} \end{cases} \tag{4.2.7}$$

avec $T_{1,k}$ et $T_{2,k}$ les temps de passage de $E_{1,k}$ à $E_{3,k}$ et de $E_{2,k}$ à $E_{3,k}$, respectivement. Dans le cas où le processus de dégradation est supposé toujours aller d'un état à l'état consécutif en un an (le terme $p_{13,k}$ est donc supposé nul), il est possible d'établir la relation suivante :

$$\begin{cases} T_{1,k} = 1 + T_{1,k} p_{11,k} + T_{2,k} p_{12,k} \\ T_{2,k} = 1 + T_{1,k} 0 + T_{2,k} p_{22,k} \\ p_{11,k} + p_{12,k} = 1 \end{cases} \tag{4.2.8}$$

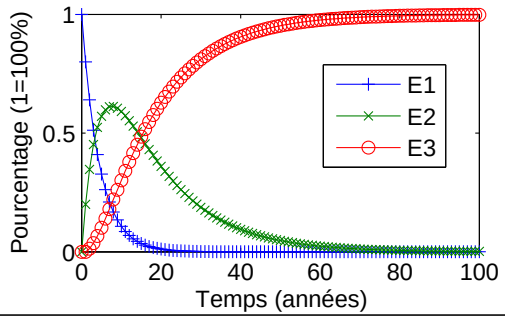
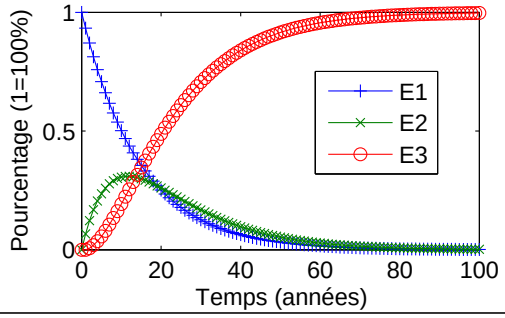
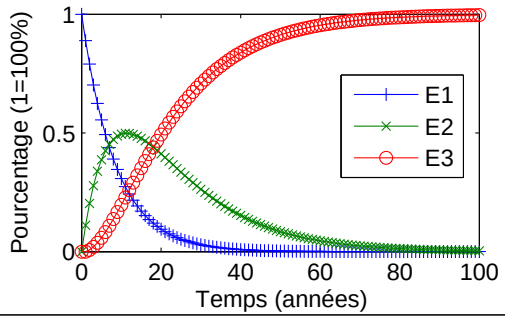
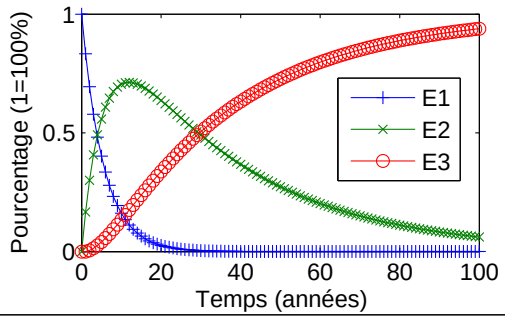
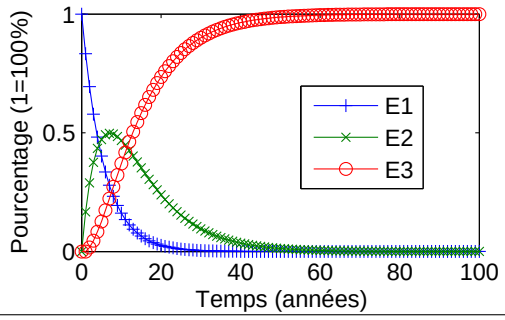
Le TABLEAU 4.2.4 illustre les matrices obtenues pour les éléments des ponts mixtes (cf. TABLEAU 4.2.3 pour des notations utilisées) lorsqu'aucune action de maintenance n'est appliquée durant 100 ans. Il est ainsi possible de visualiser l'évolution de la probabilité de se trouver dans chacun des trois états précédemment introduits.

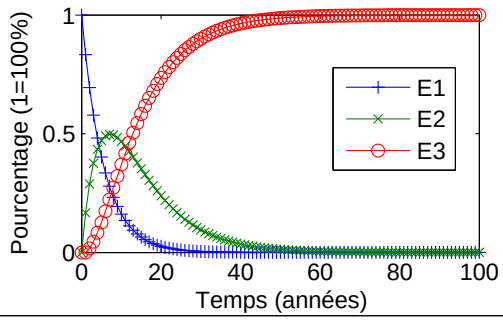
Eléments	T_1 (années)	T_2 (années)
b	20	15
cp	25	10
cd	34	25
wp	40	34
rs	16	10
ej	16	10

(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)

Tableau 4.2.3: Temps de passage T_1 et T_2 basés sur le scénario du projet SBRI (cf. TABLEAU 3.3.3).

Tableau 4.2.4: Matrices de transition par élément d'ouvrage et évolution de la probabilité d'appartenance aux états E1, E2, et E3.

b	$\begin{bmatrix} 0,80 & 0,20 & 0 \\ 0 & 0,93 & 0,07 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
cp	$\begin{bmatrix} 0,93 & 0,07 & 0 \\ 0 & 0,90 & 0,10 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
cd	$\begin{bmatrix} 0,89 & 0,11 & 0 \\ 0 & 0,94 & 0,06 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
wp	$\begin{bmatrix} 0,83 & 0,17 & 0,01 \\ 0 & 0,97 & 0,03 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
rs	$\begin{bmatrix} 0,83 & 0,17 & 0 \\ 0 & 0,90 & 0,10 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

ej	$\begin{bmatrix} 0,90 & 0,10 & 0 \\ 0 & 0,90 & 0,10 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

4.2.3.2 *Modèle Ma2 basé sur le système de notation IQOA*

Le modèle de dégradation Ma2 utilise le système de notations d'ouvrages IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) regroupant les notes individuelles des parties d'ouvrages sur plusieurs années. Comme pour le modèle Ma1, l'objectif est d'évaluer la probabilité avec laquelle les ouvrages vont passer d'un état à un autre au cours du temps, sans présupposer un modèle de dégradation a priori. Ce passage est modélisé de façon matricielle en utilisant un processus de dégradation de type Markov (Orcesi & Cremona 2009, 2010b).

Les campagnes IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) ont pour but de donner une "image" chaque année de l'état global du patrimoine des ponts à la charge de la Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) en regroupant les ouvrages dans cinq classes suivant leur état de dégradation. Ces campagnes concernent les ouvrages de franchissement national d'une longueur supérieure à 2 m qui peuvent être des ouvrages en maçonnerie, en béton armé, en béton précontraint, en métal ou mixte. Le principe d'IQOA est d'attribuer des notes aux ouvrages suivant l'état dans lequel ils se trouvent. Il existe 5 notes possibles : 1, 2, 2E, 3, 3U. Les états correspondants sont explicités dans le TABLEAU 4.2.5.

Les différents types d'ouvrages considérés dans la notation IQOA sont présentés dans le TABLEAU 4.2.6 issu des rapports d'enquêtes annuelles IQOA.

Pour déterminer la note d'une partie d'ouvrage, les agents chargés de l'inspection disposent d'un guide qui répertorie tous les types de défauts connus et les notes à donner dans chacun des cas, la note globale du pont étant alors la plus mauvaise note donnée aux différents éléments. Les défauts entraînant la note 2 ou 2E pour un ouvrage sont des défauts d'équipement, des défauts des éléments de protection ou des défauts de structure mineurs mais pouvant entraîner un passage en 3, voire 3U s'ils ne sont pas traités rapidement. Pour les équipements sur l'ouvrage, les défauts concernent la chaussée portée (défauts de surface, déformations vers le bas, apparitions de fissures). Les défauts peuvent concerner également les bordures de trottoirs (défauts d'alignement, dégradation du revêtement, affaissements du corps du trottoir), mais aussi les dispositifs d'évacuation des eaux sur ouvrage ou encore les joints de chaussées et de trottoirs avec le plus souvent des décalages relatifs transversaux ou verticaux entre les éléments constitutifs du joint.

Les défauts des éléments de protection pouvant entraîner une classification en 2 ou 2E concernent l'étanchéité du tablier (cheminements d'eau de ruissellement, suintements au droit des fissures, présence d'alcali-réaction). En ce qui concerne les défauts du tablier, une note 2 ou 2E est attribuée s'il y a apparition de fissures sur la dalle et les encorbellements dans le cas d'un pont dalle, ou sur les poutres, les hourdis et les entretoises dans le cas d'un pont à poutres sous chaussée en béton armé. La nota-

Classe	Signification
1	Ouvrage en bon état apparent.
2	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
2E	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé URGENT pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
3	Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
3U	Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation URGENTS liés à l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.
NE	Ouvrage non évalué.

Tableau 4.2.5: Définition des classes IQOA.

Famille	Type d'ouvrage	Code
MA	Pont voûté en maçonnerie	PVMA
MA	Autre structure en maçonnerie	DIVMA
BA	Cadre	CADRE
BA	Portique simple ou double	PORTIQ
BA	Pont dalle en béton armé	PDBA
BA	Poutres sous chaussées en béton armé	PPBA
BA	Bow-string en béton	BOWBA
BA	Pont voûté en béton	PVBA
BA	Autre structure en béton armé ou non armé	DIVBA
BP	Pont dalle ou dalle nervurée en béton précontraint	PDBP
BP	VIPP	VIPP
BP	PRAD	PRAD
BP	Poutres caissons en béton précontraint	PCBP
BP	Autres poutres sous chaussée ou nervures en béton précontraint	PPBP
BP	Autre structure en béton précontraint	DIVBP
MI	Poutrelles enrobées	PPE
MI	Poutres sous chaussée ou caisson en métal avec dalle participante	MIXTE
ME	Poutres sous chaussée/Caisson en métal avec dalle orthotrope	ORTHO
ME	Poutres sous chaussée/Caisson en métal avec dalle non participante	PPME
ME	Poutres latérales treillis en métal (+bow-string)	PLME
ME	Autre structure en métal	DIVME
BB	Buse béton	BB
BM	Buse métallique	BM
DIV	Pont en arc	ARC
DIV	Pont suspendu (dont suspendu et haubané)	SUSP
DIV	Pont à haubans	HB
DIV	Pont à béquilles	PBQ
DIV	Pont mobile	MOB
DIV	Pont provisoire(dont viaduc métallique démontable)	PROV
DIV	Autre structure non associée à une famille (matériau)	AU

Tableau 4.2.6: Types d'ouvrages.

tion 2E a pour but dans ces cas là de prévenir un passage en 3 ou 3U en intervenant rapidement et d'éviter ainsi une perte de performance structurelle de l'ouvrage. Les amorces d'éclatement de parement sont également prises en compte dans la notation 2 ou 2E. L'incidence sur la sécurité des usagers en cas de rupture de la fixation à brève échéance doit alors être examinée. Dans ce dernier cas, c'est plus la sécurité des usagers à court terme que la performance structurale de l'ouvrage qui est examinée.

Les défauts qui entraînent la note 3 ou 3U ne concernent que des défaillances structurelles de l'ouvrage. Deux défauts majeurs peuvent entraîner le passage en 3 et 3U : la fissuration et la dégradation du béton. La fissuration est en général due à une mauvaise conception de l'ouvrage ou à des sollicitations excessives. Il y a en général une insuffisance importante de la résistance à la flexion longitudinale. La dégradation du béton est liée à une mauvaise qualité du béton, à l'action du gel, à l'agressivité du milieu environnant ou bien à un effort mécanique excessif.

Les données issues de la base de données IQOA offrent l'opportunité d'appliquer une démarche statistique, ayant pour objectif d'estimer les probabilités de passage d'une classe à une autre sur un intervalle de temps donné.

Dans la suite de l'étude, la probabilité d'être dans chaque classe IQOA est exprimée chaque année et est regroupée dans le vecteur suivant :

$$\mathbf{q}(i) = (q_1^i \; q_2^i \; q_{2E}^i \; q_3^i \; q_{3U}^i) \tag{4.2.9}$$

où i est l'année considérée. Dans un soucis de clarté des notations, le sous-indice mentionnant que vecteurs de notations et matrices de transition sont considérés pour un élément d'ouvrage n'est pas indiqué ci-après. Le principe permettant de calculer la matrice de transition est le suivant : ayant à disposition l'ensemble des résultats d'enquête pour chaque ouvrage de 1996 à 2011 (seuls les résultats annuels sont conservés), la probabilité sur la période entre 1996 et 2011, de passer d'un état q_1 à un état q_2, est égale à l'unité fonctionnelle associée à l'élément considéré (cette unité pouvant être la surface, la longueur, la largeur, ou bien le nombre d'éléments concernés par ouvrage qui est noté q_1 à une année i et noté q_2 à l'année $i+1$ sur l'unité fonctionnelle de l'élément dans la classe q_1 à l'année i , pour i variant de 1996 à 2011. Ce concept est traduit mathématiquement dans l'EQUATION 4.2.10

$$P(q_1, q_2) = \frac{\sum_{i=a_0}^{a_f-1} (\sum_{k=1}^{n_{q_1,i\to q_2,i+1}} S^k_{q_1,i\to q_2,i+1})}{\sum_{i=a_0}^{a_f} (\sum_{k=1}^{n_{q_1,i}} S^k_{q_1,i})} \tag{4.2.10}$$

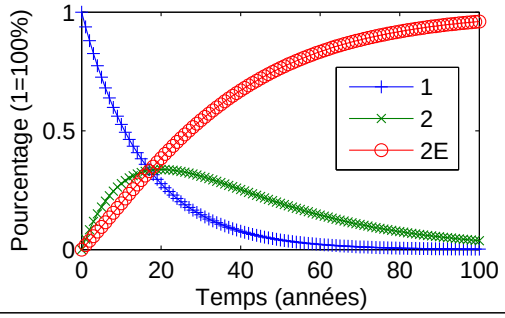
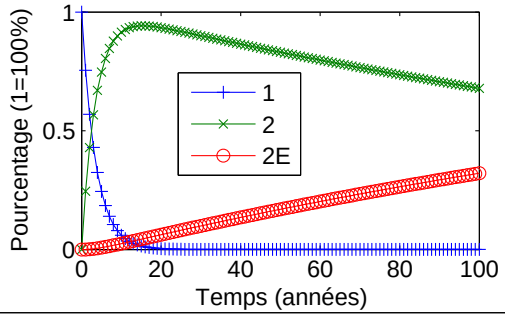
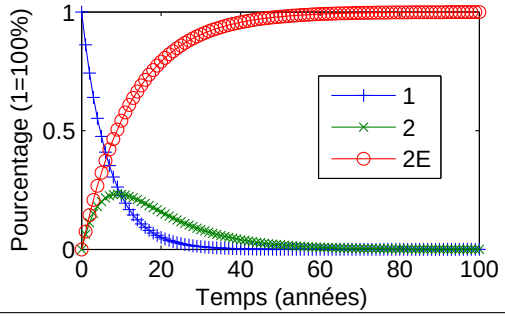
avec a_0 et a_f, les années initiales et finales considérées, $n_{q_1,i}$ = nombre d'éléments dans la classe q_1 à l'année i, $S^k_{q_1,i\to q_2,i+1}$ = unité fonctionnelle du $k^{ème}$ élément dans la classe q_1 à l'année i et dans la classe q_2 à l'année $i+1$ et $S^k_{q_1,i}$ = unité fonctionnelle du $k^{ème}$ élément dans la classe q_1 à l'année i.

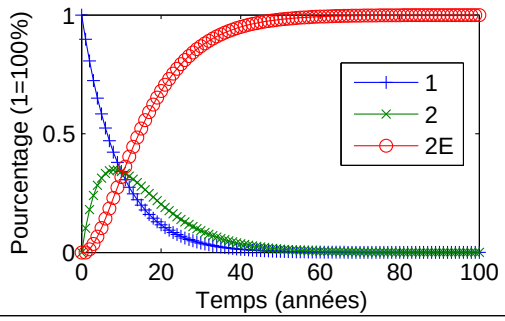
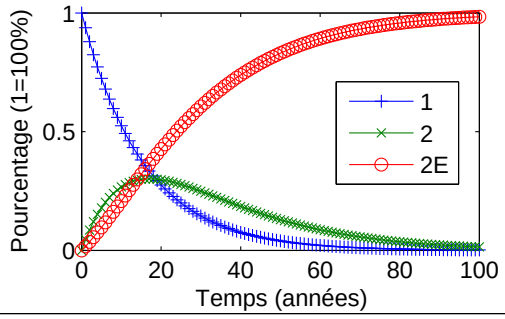
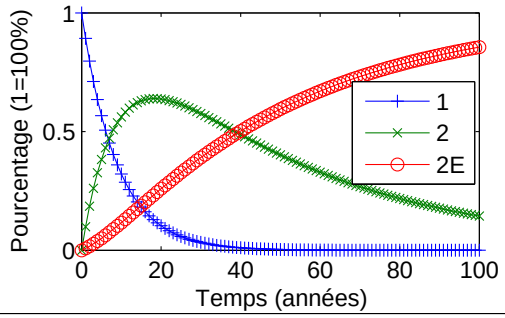
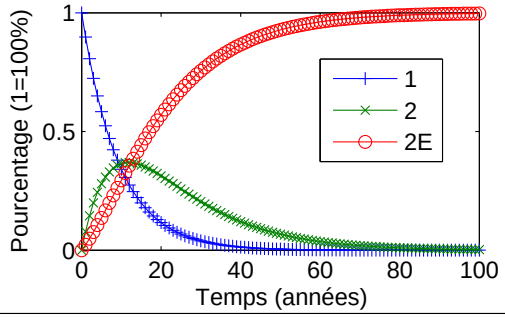
L'ensemble des ouvrages considérés dans cette étude concerne une base de données de 500 ouvrages évalués dans le cadre des campagnes d'inspection IQOA entre 1996 et 2010 (SETRA 2013). Le TABLEAU 4.2.7 fournit les matrices de transition et illustre l'évolution d'appartenir à chacune des classes pour un élément. Il est noté que l'unité fonctionnelle est le nombre d'éléments par ouvrage pour les appareils d'appuis, la largeur de l'ouvrage pour la protection anti-corrosion, et la surface de l'ouvrage pour tous les autres éléments du TABLEAU 4.2.7. Par ailleurs, seuls les états 1, 2 et 2E sont considérés dans le TABLEAU 4.2.7 puisqu'il n'est souhaité aucun défaut relatif à la structure durant les 100 ans de la vie de l'ouvrage (toutes les décisions doivent

être prises lorsque l'avancement de la dégradation concerne des problèmes mineurs structuraux ou bien des défauts d'équipements ou de protection).

Il est observé dans le TABLEAU 4.2.7 que certains éléments ne sont pas associés à un nombre suffisant d'occurrences de transition dans la base de données des 500 ouvrages considérés. Cela est notamment le cas pour le système de protection anti-corrosion ou encore la couche de roulement pour lesquels la probabilité de rester en classe 2 lorsque l'élément est en classe 2 est très élevée. Etant donnée la similitude des trois premiers états 1, 2 et 2E avec les états E1, E2 et E3 dans le paragraphe 4.2.3.1, il est supposé dans la suite de l'étude que le modèle Ma2 utilise les matrices de dégradation du système Ma1 pour les appareils d'appui et la couche de roulement (ce qui revient à supposer que les états E1, E2 et E3 peuvent être assimilés aux états 1, 2 et 2E).

Tableau 4.2.7: Matrices de transition par élément d'ouvrage et évolution de la probabilité d'appartenance aux classes 1, 2 et 2E (cf. TABLEAU 4.2.6 pour les notations).

b	$\begin{bmatrix} 0,94 & 0,04 & 0,02 \\ 0 & 0,96 & 0,04 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
cp	$\begin{bmatrix} 0,75 & 0,25 & 0 \\ 0 & 0,99 & 0,01 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
cd (PDBA)	$\begin{bmatrix} 0,86 & 0,06 & 0,08 \\ 0 & 0,92 & 0,08 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

cd (MIXTE)	$\begin{bmatrix} 0,90 & 0,10 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0,13 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
wp	$\begin{bmatrix} 0,94 & 0,05 & 0,01 \\ 0 & 0,95 & 0,05 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
rs	$\begin{bmatrix} 0,89 & 0,10 & 0,01 \\ 0 & 0,98 & 0,02 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
ej	$\begin{bmatrix} 0,90 & 0,08 & 0,02 \\ 0 & 0,94 & 0,06 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

Finalement, le TABLEAU 4.2.8 regroupe les valeurs associées au temps de passage pour passer de l'état 1 à l'état 2E (noté $T1$) et pour passer de l'état 2 à 2E (noté $T2$). Il est observé que le modèle Ma2 semble plus optimiste que Ma1 pour les appareils d'appui et les joints de chaussée mais qu'il est plus sévère en ce qui concerne l'état du tablier en béton et la chape d'étanchéité. Concernant la protection anti-corrosion (cp) et la chaussée (rs), les valeurs de $T1$ et $T2$ ne sont pas calculées avec le modèle Ma2. En effet dans le premier cas (cp), les ouvrages mixtes formant un patrimoine jeune, il y a peu d'évolution notable à ce jour pour fournir un calage pertinent, d'où l'exclusion. Dans le deuxième cas (rs), la base IQOA concerne des défauts de chaussée qui sont susceptibles d'entraîner une dégradation de l'ouvrage (étant donné que c'est bien l'ouvrage qui est au centre de l'étude dans IQOA et non la route qui a sa base propre de suivi avec l'IQRN). La note ne concerne pas l'état de la chaussée, susceptible d'engager des réparations, ce qui explique qu'aucun modèle n'ait été calé. Pour ces

deux éléments particuliers, c'est donc le modèle Ma1 qui a été conservé dans la suite du manuscrit pour déterminer les profils de performance.

Eléments	T_1 (années)	T_2 (années)
b	35	27
cp	-	-
cd (PDBA)	14	13
cd (MIXTE)	18	7
wp	30	19
rs	-	-
ej	22	16

Tableau 4.2.8: Temps de passage avec les matrices de transition estimées à partir du système de notation IQOA.

4.3 PROCESSUS D'OPTIMISATION MULTIOBJECTIF

4.3.1 *Introduction*

L'analyse performantielle de cycle de vie permet d'envisager différents scénarios de maintenance, tout en imposant des contraintes de niveau de service et de sécurité. Les coûts de cycle de vie, les impacts environnementaux, les impacts sociétaux représentent des critères directement liés à chaque variante de dimensionnement/stratégie de gestion. Pour chaque cas d'étude, l'objectif est évidemment de réduire le plus possible ces coûts et impacts tant que la performance des parties d'ouvrage reste au dessus d'un certain seuil défini comme "acceptable" (Ta et al. 2013). Une technique d'optimisation est alors proposée pour traiter cette analyse de cycle de vie avec différentes solutions et essayer de réduire simultanément un ou plusieurs impact(s).

Pour des problèmes d'optimisation fortement non-linéaires avec des variables d'optimisation discrètes, la méthodologie des Algorithmes Génétiques (AG) apparaît particulièrement efficace pour résoudre de nombreux problèmes techniques, et notamment déterminer l'optimum d'un problème mono-objectif sous contraintes, ou déterminer l'optimum d'un problème multiobjectif sous contraintes (optimisation multiobjectif) (cf. Annexe D). Les AG sont des techniques d'optimisation stochastiques qui tentent d'imiter le processus d'évolution naturelle des espèces et de la génétique (Darwin 1859). D'un point de vue historique, ces algorithmes ont été introduits par Holland (1975) mais leur popularisation est due au livre de Goldberg (1988). Les AG agissent sur une population d'individus assujettis à une sélection darwinienne : les individus (ou parents) les mieux adaptés à leur environnement survivent et peuvent se reproduire. Ils sont alors soumis à des mécanismes de recombinaisons analogues à ceux de la génétique. Des échanges de gènes entre parents résulte la création de nouveaux individus (ou enfants), qui permettent de tester d'autres configurations de l'espace de recherche. Lerman & Ngouenet (1995) distinguent quatre points essentiels entre les algorithmes génétiques et les autres types d'approches :

- les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes,
- ils travaillent sur un nuage de points au lieu d'un point unique,

– ils n'utilisent que des valeurs de la fonction étudiée et non sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire,
– ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

Dans le cas mono-objectif, l'identification des meilleures solutions se fait par une fonction objectif et des contraintes prédéfinies. L'optimisation consiste en trois étapes majeures : (i) le codage et décodage des variables de conception, (ii) l'évaluation de chaque solution, et (iii) l'application d'opérations génériques (sélection, croisement et mutation) pour effectuer la génération des solutions à l'itération suivante. L'évaluation des solutions se fait en effectuant une analyse de la fonction objectif. Si la solution ne respecte pas les contraintes, la valeur de la fonction d'objectif est alors pénalisée. Un avantage de cette technique d'optimisation est qu'elle ne nécessite pas une relation explicite entre la fonction objectif et les contraintes.

Dans le cas multiobjectif, l'algorithme Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)-II (Deb 1999, Deb 2001, Deb et al. 2002) permet de déterminer le front de Pareto d'un problème multiobjectif de manière efficace. De même que dans le cas de l'optimisation mono-objectif, NSGA-II considère une population d'individus (solutions du problème), chaque individu étant codé par une écriture binaire. La différence est qu'au cours des itérations, c'est le front de Pareto, ensemble de solutions "optimales" qui est cherché et non plus une seule solution comme c'était le cas lors de l'optimisation mono-objectif.

Les AG ont largement été utilisés dans l'optimisation des problèmes concernant la conception des systèmes structurels (Renner & Ekart 2003). Cette méthode a notamment été appliquée dans la littérature pour des structures en treillis (Jenkins 1991), une tour de transmission (Rajeev & Krishnamoorthy 1992), un pont à haubans (Simoes & Negrao 1994), l'optimisation de la topologie (Grierson & Park 1993, Yang 1997) et la configuration d'optimisation des structures (Yang & Soh 1997) et des bâtiments (Sahab et al. 2005).

Outre les problèmes de conception, la technique d'optimisation par algorithmes génétiques est largement utilisée pour traiter des projets de maintenance/réhabilitation (Orcesi & Cremona 2010a, 2011). Liu et al. (1997) ont présenté une application de l'optimisation mutliobjectif de réparation d'un pont pour minimiser à la fois le coût total et le degré moyen de détérioration pondéré par la surface du tablier du pont. De la même manière, Miyamoto et al. (2000) ont utilisé ce type d'algorithme afin de minimiser le coût de la réparation et maximiser l'indice de qualité. Dogaki et al. (2000) ont présenté une application pour planifier l'entretien pour un pont en béton armé. L'objectif étant de minimiser les coûts d'entretien et de maximiser les bénéfices de la maintenance concernant le coût de cycle de vie, le coût aux usagers et les impacts environnementaux. Furuta et al. (2006) ont proposé le concept de planification de l'entretien des ponts en considérant trois fonctions d'objectif : le coût du cycle de vie, la durée de vie et le niveau de sécurité. L'objectif étant de minimiser le coût de cycle de vie, tout en maximisant la durée de vie et le niveau de sécurité. Liu & Frangopol (2006) ont par ailleurs présenté une application prenant en compte la sécurité et le coût du cycle de vie des infrastructures. Ainsi, Neves et al. (2006) ont étudié différents types de maintenance des ponts.

Plus récemment, Rivallain et al. (2012) ont proposé une démarche d'application des algorithmes génétiques pour la détermination des stratégies optimales de réhabilitation de bâtiments vis-à-vis de critères environnementaux.

Afin de fixer les seuils de performance acceptables sur chaque type d'élément, les matrices de transition des modèles Ma1 et Ma2 ont été considérées en appliquant

strictement le scénario de maintenance du projet SBRI, introduit dans la FIGURE 3.3.4. Les évolutions des probabilités d'être dans les deux meilleurs états, c'est-à-dire dans l'état E1 ou E2 (pour le modèle Ma1) et dans la classe 1 ou 2 (pour le modèle Ma2) sont montrées dans la FIGURE 4.3.1 qui permet de déterminer les valeurs minimales durant les 100 ans de durée de vie. Ces valeurs sont regroupées dans le TABLEAU 4.3.1 et constituent des valeurs à ne pas atteindre durant la durée de vie en service de l'ouvrage. Dans tous les calculs considérés (sauf mention contraire), une contrainte porte également sur le nombre d'action de maintenance maximal entre deux remplacements successifs. Ce nombre est calé sur les politiques de gestion introduites dans le projet SBRI qui sont retranscrites dans la FIGURE 3.4.21.

Seuil de performance	b	cp	cd	wp	rs	ej
Ma1	0,382	**0,413**	0,186	0,378	**0,357**	0,357
Ma2	0,628	**0,413**	0,028	0,272	**0,357**	0,549

Tableau 4.3.1: Seuils de performance du projet SBRI.
(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées)

Dans la suite de ce chapitre, les calculs d'optimisation sont successivement détaillés pour les familles A, B et C dans les paragraphes 4.3.2, 4.3.3 et 4.3.4, respectivement. Chaque famille d'ouvrages donne l'occasion de considérer plusieurs types de problèmes d'optimisation, suivant que l'on considère une, deux ou trois fonction(s) objectif(s) tout en respectant les différentes contraintes mentionnées ci-dessus.

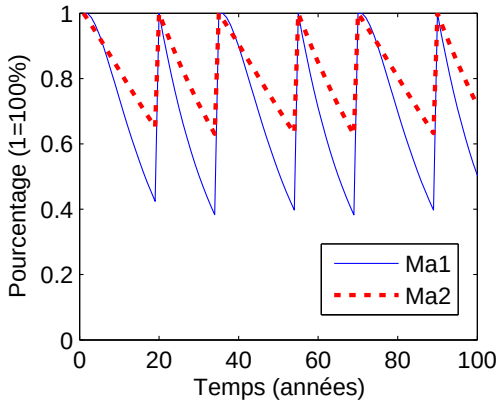
Les cas d'étude consistent alors à minimiser :

- dans le cas mono-objectif : le coût de cycle de vie total ($C_{gestionnaire}$) ou l'impact environnemental de cycle de vie total (I_{total}) ou le coût au usagers de cycle de vie (C_U) ;
- dans le cas bi-objectif : ($C_{gestionnaire}$ et I_{total}) ou ($C_{gestionnaire}$ et C_U) ou (I_{total} et C_U) ;
- dans le cas tri-objectif : ($C_{gestionnaire}$ et I_{total} et C_U).

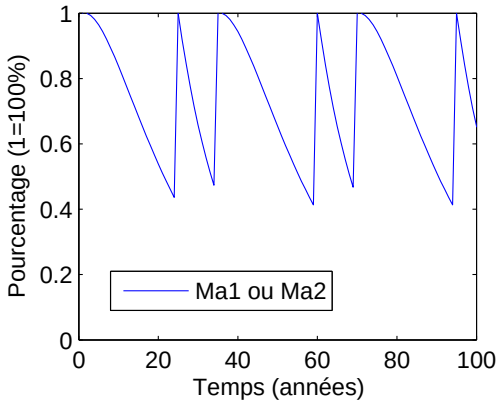
Cette procédure est à chaque fois menée en imposant que la probabilité d'être dans les deux premiers états de système de notation soit toujours supérieure à la valeur associée dans le TABLEAU 4.3.1. Il est noté que dans ce problème d'optimisation, les variables décisionnelles sont les instants et les actions de maintenance/remplacement pour les différentes parties de l'ouvrage. Tous les calculs économiques sont effectués en considérant un taux d'actualisation (FIGURE 2.1.3) fixé à 2%. Par ailleurs, les calculs d'optimisation sont arrêtés au bout de quelques milliers d'itération (le nombre élevé de variables liées aux instants et actions de maintenance/remplacement nécessite de considérer un nombre important d'itérations) lorsque soit la solution mono-objectif, soit le front de Pareto est jugé(e) suffisamment stable. Il est noté que les solutions intermédiaires ne sont jamais montrées dans ce chapitre, car seules les solutions obtenues à la dernière itération constituent les stratégies optimales.

4.3.2 *Résultats d'optimisation pour la famille A*

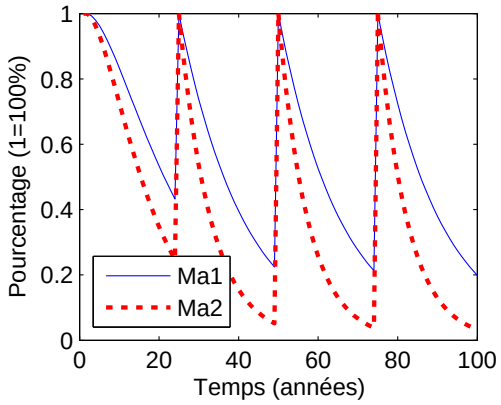
Les trois cas d'optimisation mono-objectif sont présentés dans le TABLEAU 4.3.2 et l'écart relatif avec le scénario SBRI est à chaque fois calculé pour chaque critère de l'analyse. Il est noté que le processus d'optimisation ne permet pas de trouver des scénarios meilleurs que le scénario standard du projet SBRI dans le cas où $C_{gestionnaire}$ est



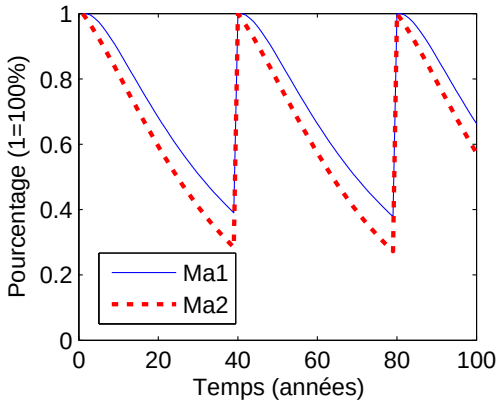
(a) Appareils d'appui (b)



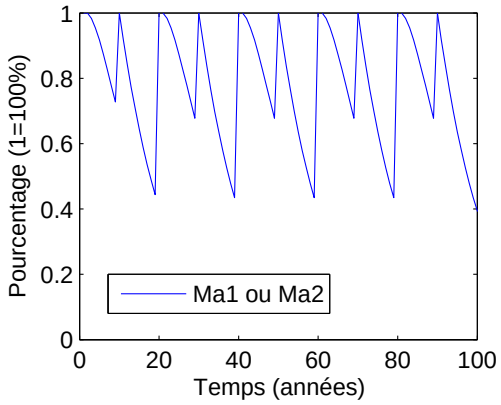
(b) Protection anticorrosion (cp)



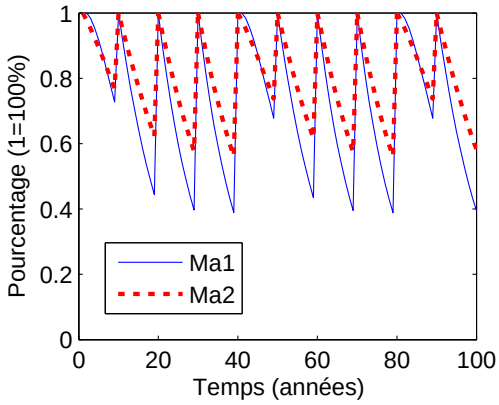
(c) Dalle du béton (cd)



(d) Etanchéité (wp)



(e) Couche de roulement (rs)

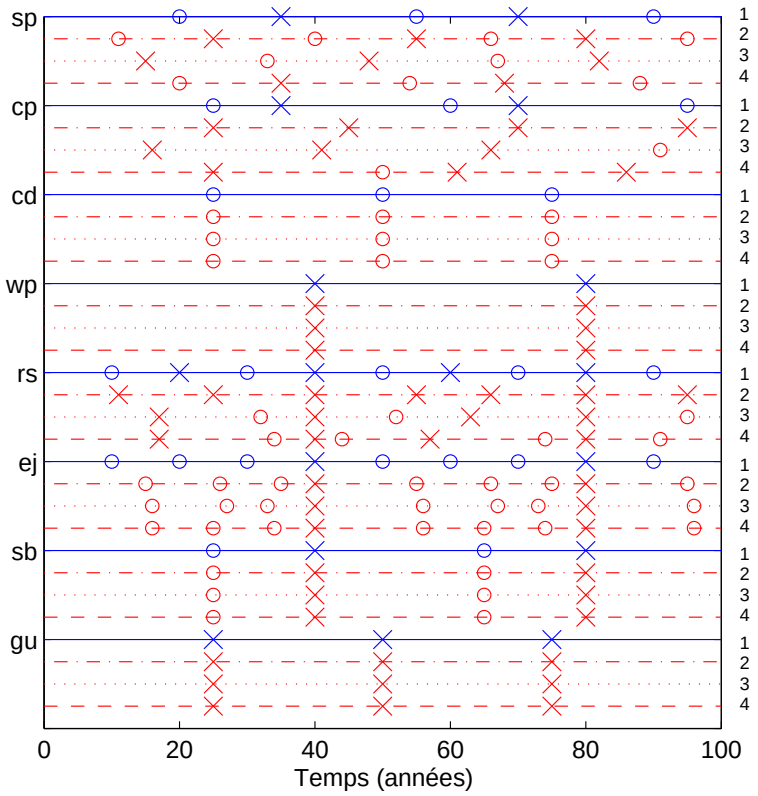


(f) Joints de chaussées (ej)

Figure 4.3.1: Evolution de la performance des éléments de l'ouvrage d'art.

minimisé. Ce constat peut être expliqué par le fait que dans le premier cas ($C_{gestionnaire}$), le taux d'actualisation conditionne fortement la valeur totale du coût au gestionnaire sur le cycle de vie. Comme précédemment mentionné dans le paragraphe 4.3, la détermination d'une solution meilleure que celle du projet SBRI est également dépendante du nombre maximal d'action d'entretien entre deux remplacements successifs qui est systématiquement celui appliqué dans le projet SBRI. Dans ces conditions, le fait d'avoir considéré le scénario standard du projet SBRI comme le seuil de performance force globalement le programme à faire des actions de maintenance/remplacement plus tôt et fait par conséquent augmenter la valeur nette actuelle des coûts.

Il est par ailleurs observé dans le TABLEAU 4.3.2 qu'à chaque fois qu'un critère autre que le coût $C_{gestionnaire}$ est minimisé, le critère en question est amélioré par rapport au scénario SBRI et ce pour le modèle de dégradation Ma1 comme pour le modèle Ma2. Seul le coût aux usagers a été considéré pour la prise en compte de la congestion de trafic mais l'impact environnemental dû à la congestion de trafic est également amélioré (toujours par rapport au scénario SBRI) lorsque c'est le coût C_U qui est minimisé. A titre d'illustration, la FIGURE 4.3.2 montre le planning de gestion des différents éléments pour le cas SBRI et les cas où $C_{gestionnaire}$, I_{total} et C_U sont minimisés de manière indépendante et successive.



(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau)
(o=réparation x=remplacement)

Figure 4.3.2: Calendriers de maintenance correspondant au calendrier standard SBRI (1) et aux problèmes d'optimisation mono-objectif $min(C_{gestionnaire})$ (2), $min(I_{total})$ (3) et $min(C_U)$ (4) pour la variante A0 - Ma1.

		SBRI	Ma1			Ma2		
			$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$	$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$
A0	$C_{gestionnaire}$ (€)	3033949	0%	+2,9%	+6,0%	0%	+2,5%	+6,1%
	I_{total}	203	0%	-2,2%	+11,6%	0%	-2,2%	+11,6%
	C_U (€)	2551076	0%	+8,3%	-29,4%	0%	+4,7%	-28,3%
	$I_{usagers}$	301	0%	+13,2%	-24,3%	0%	+14,7%	-24,8%
A1	$C_{gestionnaire}$ (€)	2940662	0%	+2,9%	+6,2%	0%	+3,4%	+12,1%
	I_{total}	192	0%	-2,3%	+12,2%	0%	-1,2%	+18,3%
	C_U (€)	2551076	0%	+5,1%	-29,4%	0%	+12,9%	-28,1%
	$I_{usagers}$	301	0%	+17,2%	-24,3%	0%	+17,8%	-23,8%
A2	$C_{gestionnaire}$ (€)	2880592	0%	-0,1%	+2,0%	0%	-0,1%	+1,1%
	I_{total}	212	0%	-2,1%	+16,5%	0%	-2,1%	+16,5%
	C_U (€)	2551076	0%	+2,9%	-31,2%	0%	+1,9%	-30,0%
	$I_{usagers}$	301	0%	+9,6%	-27,8%	0%	+7,6%	-21,7%
A3	$C_{gestionnaire}$ (€)	3078752	0%	+2,9%	+6,9%	0%	+3,4%	+7,9%
	I_{total}	206	0%	-2,2%	-2,1%	0%	-2,2%	-2,2%
	C_U (€)	1406467	0%	+9,0%	-11,8%	0%	+7,0%	-9,0%
	$I_{usagers}$	178	0%	+9,9%	-15,5%	0%	+8,4%	-13,4%
A4	$C_{gestionnaire}$ (€)	3041560	0%	+2,5%	+15,6%	0%	+2,5%	+9,8%
	I_{total}	203	0%	-2,2%	-2,1%	0%	-2,2%	-1,1%
	C_U (€)	1406467	0%	+5,9%	-15,1%	0%	+3,7%	-2,2%
	$I_{usagers}$	178	0%	+7,9%	-19,6%	0%	+5,3%	-1,9%

Tableau 4.3.2: Optimisation mono-objectif pour les variantes de la famille A.

Afin de tester l'influence du nombre maximal de réparations entre deux replacements successifs, le calcul de minimisation le $C_{gestionnaire}$ est reconsidéré (et noté $min(C_{gestionnaire})$-bis), mais en permettant maintenant une réparation supplémentaire entre deux remplacements successifs pour chaque élément. Les résultats (cf. TABLEAU 4.3.3) montrent qu'il est possible de trouver des solutions avec un coût $C_{gestionnaire}$ inférieur à celui trouvé avec le programme du projet SBRI. Tout en ayant anticipé les actions de maintenance par rapport au projet SBRI (même si le gain reste faible), il est possible de continuer à entretenir plus longtemps les différentes parties d'ouvrage, retarder les remplacements plus coûteux, et donc faire baisser le coût $C_{gestionnaire}$. Il n'est alors pas surprenant d'obtenir des augmentations des autres fonctionnelles si celles-ci sont conflictuelles avec $C_{gestionnaire}$, ce qui est le cas ici puisque le gestionnaire a tendance à faire plus d'actions de maintenance, moins coûteuses que des remplacements, mais qui peuvent globalement gêner plus les usagers sur la durée de vie en service.

		SBRI	Ma1	Ma2
			$min(C_{gestionnaire})$	$min(C_{gestionnaire})$
A0	$C_{gestionnaire}$ (€)	3033949	-0,5%	-0,4%
	I_{total}	203	+0,0%	-1,1%
	C_U (€)	2551076	+25,2%	+18,2%
	$I_{usagers}$	301	+30,6%	+21,2%

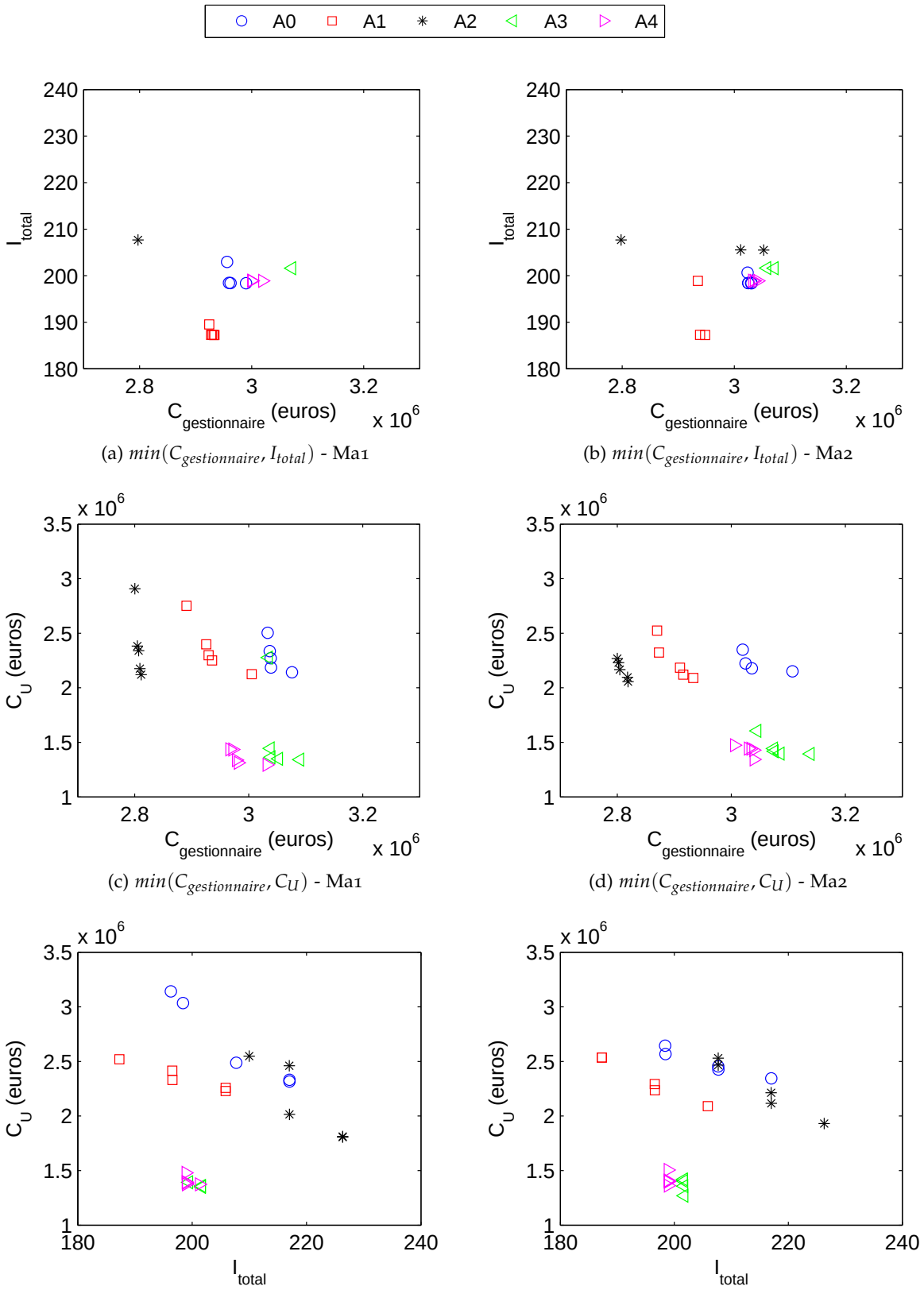
Tableau 4.3.3: Comparaison du scénario SBRI au résultat du calcul d'optimisation $min(C_{gestionnaire})$-bis.

Les résultats obtenus avec la procédure bi-objectif sont montrés dans la FIGURE 4.3.3, dans la colonne de gauche pour le modèle Ma1 et dans la colonne de droite pour le modèle Ma2. Il est noté que chaque point dans cette figure correspond à une solution particulière de conception et gestion sur le cycle de vie. Une interprétation de cette figure est proposée ci-après :

- pour le problème d'optimisation $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ (voir la première ligne de la FIGURE 4.3.3), les résultats sont cohérents avec l'analyse du paragraphe 3.4. En ce qui concerne le coût $C_{gestionnaire}$, la variante A2 (avec aciers autopatinables) est celle qui permet d'atteindre les solutions les plus économiques alors que les variantes A3 et A4 sont parmi les plus chères. Dans le cas où le modèle Ma2 est utilisé, certaines des solutions bouleversent le classement observé dans le chapitre 3, notamment avec une des solutions sur le front de Pareto pour A2 plus chère que les solutions de la variante A4 (FIGURE 4.3.3-b). Il est également noté une légère différence de coût entre les solutions obtenues avec Ma1 et celles obtenus avec Ma2, les seuils de contraintes ne conditionnant pas forcément de la même façon l'ensemble des actions de maintenance et de remplacement. En ce qui concerne l'impact I_{total}, les solutions pour la variante A1 sont les plus intéressantes et sont clairement séparées du nuage de points des autres variantes (FIGURES 4.3.3-a et 4.3.3-b). La variante A2, certainement défavorisée par le manque d'information sur la diminution des impacts liés à la suppression des chantiers de remplacement de la protection anticorrosion, est liée aux valeurs de I_{total} les plus élevées. Il n'y a finalement pas de distinction claire entre les autres variantes ;
- pour le problème d'optimisation $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ (voir la deuxième ligne de la FIGURE 4.3.3), les résultats sont là encore cohérents avec ceux du paragraphe

3.4 avec les solutions des variantes A3 et A4 qui sont nettement plus intéressantes vis-à-vis du coût aux usagers que les solutions A0, A1 et A2 qui sont toutes similaires par ailleurs (ce qui est cohérent vu qu'il n'y a pas de distinction entre ces variantes vis-à-vis de la gêne aux usagers). Concernant le coût $C_{gestionnaire}$, on retrouve le fait qu'il est possible d'avoir des solutions avec A3 et A4 moins chères que certaines de solutions de la variante A0 (certaines des solutions avec A4 étant même moins chères que des solutions avec A1) ;

– pour le problème d'optimisation $min(I_{total}, C_U)$ (voir la troisième ligne de la FIGURE 4.3.3), on retrouve l'intérêt manifeste des variantes A3 et A4 en ce qui concerne les coûts aux usagers. Pour l'impact I_{total}, la distinction de la variante A1 est nettement moins évidente que dans le cas du problème d'optimisation $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ (cf. FIGURES 4.3.3-a et 4.3.3-b). Certaines solutions de la variante A0 sont même plus intéressantes que celles de la variante A1. Cette différence montre l'impact que peut avoir la considération d'un critère sur un autre dans le processus d'optimisation.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

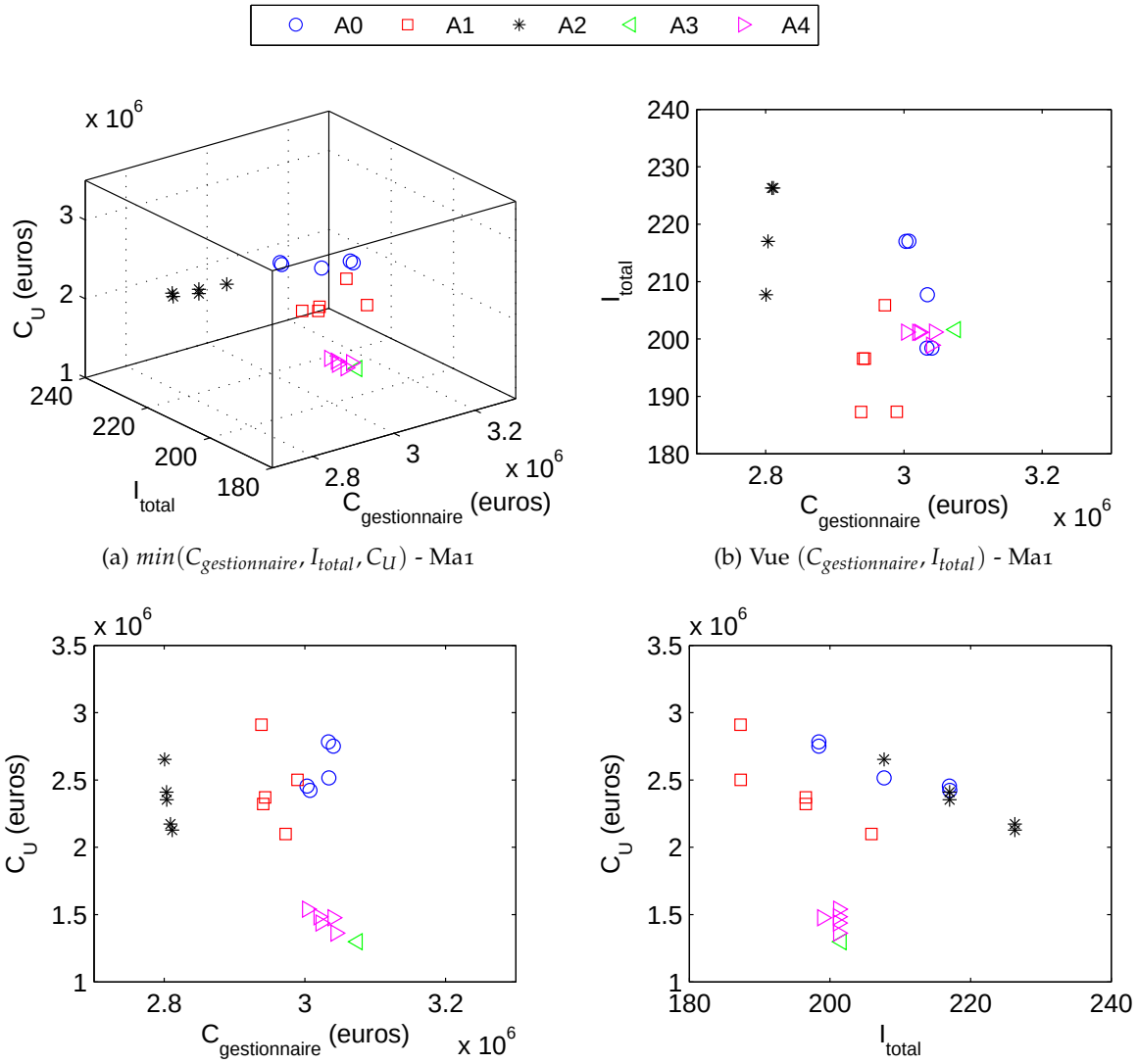
(d) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma1

(f) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.3.3: Optimisation bi-objectif pour les variantes de la famille A.

Les FIGURES 4.3.4 et 4.3.5 considèrent le cas de l'optimisation où les trois critères $C_{gestionnaire}$, I_{total} et C_U sont minimisés simultanément, avec le modèle Ma1 et avec le modèle Ma2, respectivement. Il est intéressant de comparer chaque projection de ce front de Pareto tri-objectif avec les fronts de Pareto issus d'une optimisation bi-objectif dans la FIGURE 4.3.3. Si les positions des différents fronts sont assez similaires entre les deux modèles Ma1 et Ma2 (en comparant les FIGURES 4.3.4 et 4.3.5), certaines observations peuvent être changées en passant de l'optimisation bi-objectif à tri-objectif, comme notamment les positions des solutions pour les variantes A0 et A4 dans les FIGURES 4.3.3-a et 4.3.4-b. Si les solutions pour A2 ont toutes un impact I_{total} relativement proche et décroissant avec le coût $C_{gestionnaire}$ dans la FIGURE 4.3.3-b, c'est le coût $C_{gestionnaire}$ qui est très proche et croissant avec l'impact I_{total} dans la FIGURE 4.3.4-b. Ces différents résultats confirment la dépendance des critères les uns par rapport aux autres dans le cadre d'une procédure d'optimisation multiobjectif.



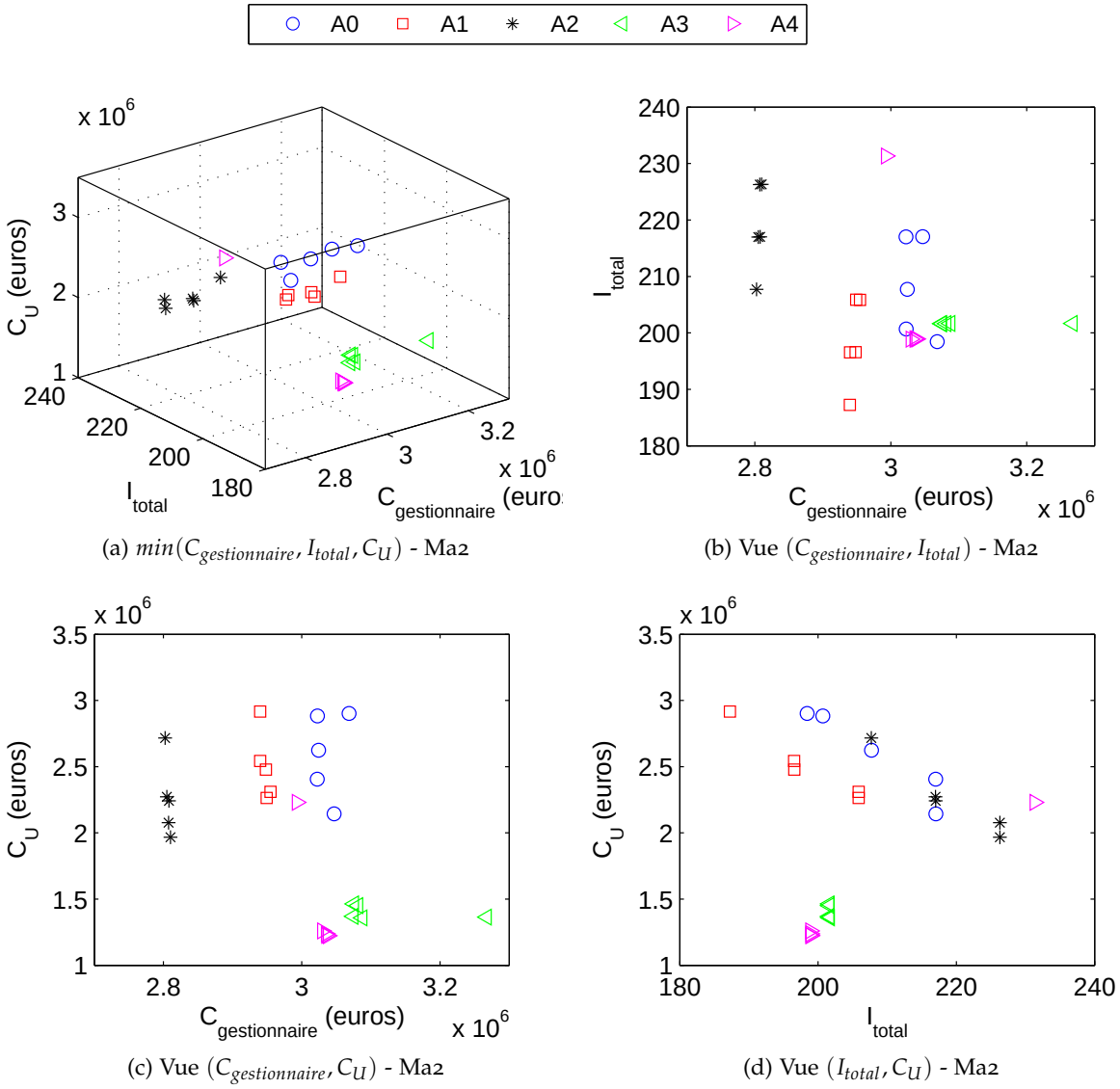
(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma1

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) Vue (I_{total}, C_U) - Ma1

Figure 4.3.4: Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille A - Modèle de dégradation Ma1.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma2

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

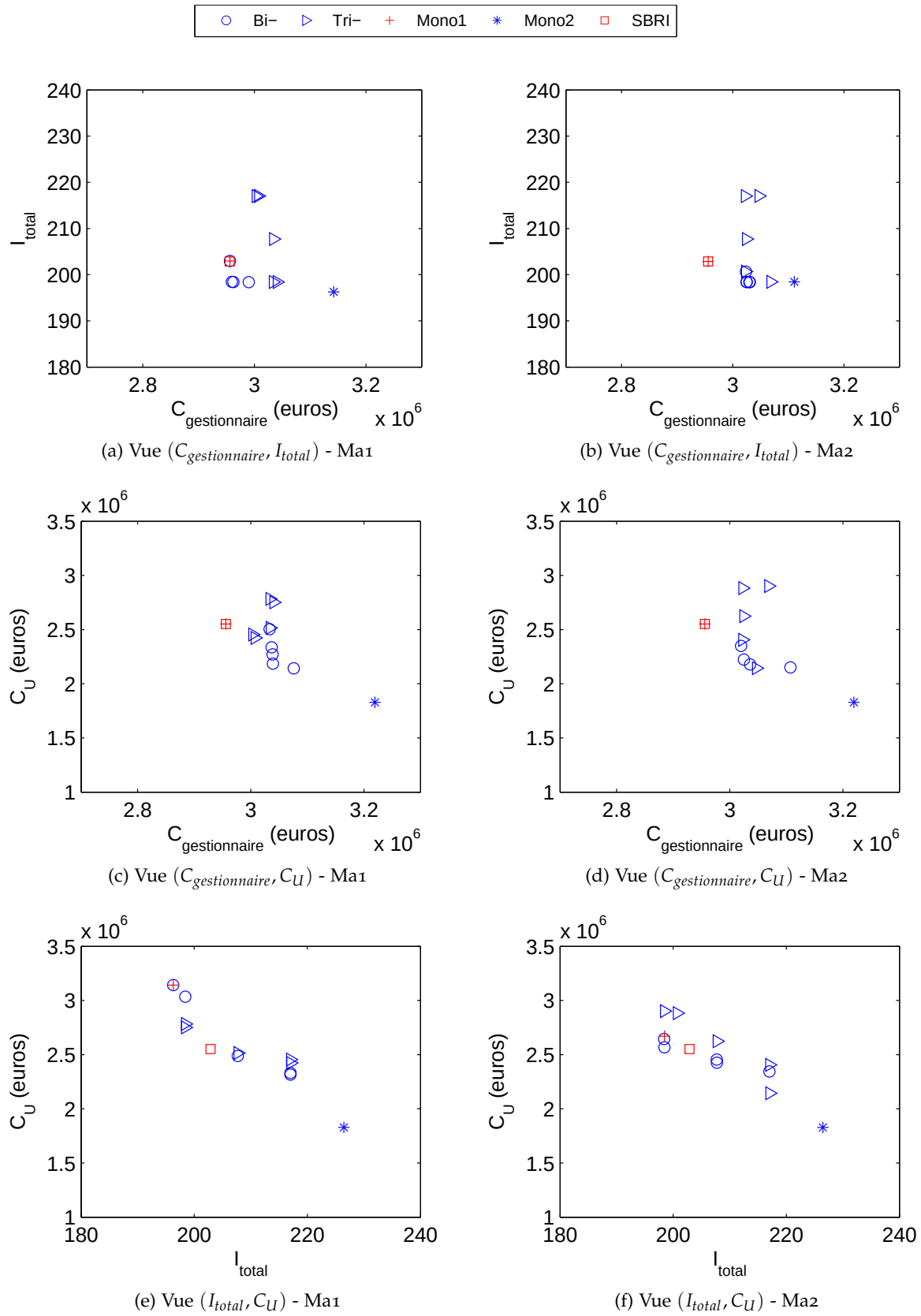
(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(d) Vue (I_{total}, C_U) - Ma2

Figure 4.3.5: Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille A - Modèle de dégradation Ma2.

Afin de compléter cette comparaison entre les différentes possibilités d'optimisation, la FIGURE 4.3.6 montre sur les plans $(C_{gestionnaire}, I_{total})$, $(C_{gestionnaire}, C_U)$ et (I_{total}, C_U) les fronts de Pareto obtenus pour la variante A0 avec l'optimisation bi-objectif correspondante, la projection du front de Pareto tri-objectif dans le plan considéré dans chaque figure, les points correspondant à l'optimisation mono-objectif suivant chacun des deux critères possibles (solutions notés Mono1 et Mono2 dans les FIGURES 4.3.6-a à 4.3.6-f), et enfin la position du point représentant le scénario SBRI. Il est noté en particulier que :

- les solutions bi-objectif sont manifestement celles qui sont les plus intéressantes (en termes de solutions non dominées), vu qu'elles correspondent réellement à la recherche des solutions optimales suivant les deux critères à chaque fois considérés ;
- les projections des solutions optimales issues du problème tri-objectif sont souvent dominées par les autres solutions, étant donné qu'elles prennent à chaque fois en compte un critère supplémentaire qui ne rend pas forcément optimal la décision dans un plan particulier ;
- les solutions mono-objectif sont parfois éloignées des solutions optimales bi-objectif (par exemple dans la FIGURE 4.3.6-a) mais peuvent coïncider dans d'autres cas (par exemple dans la FIGURE 4.3.6-f lorsque I_{total} est minimisé) ;
- le scénario SBRI est parfois dominé par les autres solutions (FIGURES 4.3.6-a à 4.3.6-d) mais est parfois superposé au résultat optimal mono-objectif (suivant un des critères) et/ou multiobjectif.



(a) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) Vue (I_{total}, C_U) - Ma1

(f) Vue (I_{total}, C_U) - Ma2

Figure 4.3.6: Visualisation des résultats obtenus avec les optimisation mono, bi et tri-objectif et du scénario SBRI pour la variante A0.

4.3.3 *Résultats d'optimisation pour la famille B*

Pour la famille B, les calculs d'optimisation sont présentés d'une part pour la sous-famille constituée des variantes B0, B1, B2 et B3 (cf. TABLEAU 4.3.4, sous-famille notée $ss - B$) et d'autre part pour la sous-famille constituée de B4 et B5 (cf. TABLEAU 4.3.5, sous-famille notée $ss - \hat{B}$). Contrairement au paragraphe 3.4.2.2 qui ne montrait le gain sur l'impact environnemental que par le biais des impacts dus à la congestion de trafic, l'impact I_{total} considéré dans ce paragraphe prend en compte les impacts environnementaux dus à l'étape de la construction et des différentes actions en service, même si le manque d'information sur les impacts environnementaux dus à la mise en place et à la maintenance des joints de chaussées pénalise certainement la variante B3 avec culées intégrales. Comme pour la famille A dans le TABLEAU 4.3.2, il est observé dans les TABLEAUX 4.3.4 et 4.3.5 qu'à chaque fois qu'un critère autre que le coût $C_{gestionnaire}$ est minimisé, le critère en question est amélioré par rapport au scénario SBRI et ce pour le modèle de dégradation Ma1 comme pour le modèle Ma2. Le même constat que dans le TABLEAU 4.3.2 est fait à savoir qu'il n'est pas obtenu de meilleures solutions avec le calcul d'optimisation que la solution SBRI lorsque ce sont les profils mêmes du projet SBRI qui sont utilisés (du fait de la présence d'un taux d'actualisation et d'un nombre maximal limité de maintenance entre deux remplacements successifs d'un élément particulier de l'ouvrage). De même, seul le coût aux usagers a été considéré pour la prise en compte de la congestion de trafic mais l'impact environnemental dû à la congestion de trafic est également amélioré (toujours par rapport au scénario SBRI) lorsque c'est le coût C_U qui est minimisé. Dans le TABLEAU 4.3.4, il est observé que le gain sur les coûts aux usagers (et l'impact environnemental dû à la congestion) est beaucoup plus important pour les variantes mixtes B0 et B3 que pour les variantes béton B1 et B2. Ce constat peut être expliqué par le fait que la marge de manœuvre pour réduire les coûts aux usagers est plus importante dans le cas des variantes mixtes pour lesquelles la programmation du remplacement de la protection anti-corrosion peut fortement jouer sur la gêne totale aux usagers sur le cycle de vie. Une différence significative en ce qui concerne le critère du coût aux usagers est également observée dans le TABLEAU 4.3.5 dans lequel l'écart relatif peut atteindre presque 30% pour B4 contre 2,7% dans le cas de B5. Cette différence va dans le sens du constat effectué entre les variantes B0/B3 et B1/B2 puisque seule la variante B4 nécessite le remplacement de la protection anti-corrosion.

Variante		SBRI	Ma1			Ma2		
			$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$	$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$
B0	$C_{gestionnaire}$ (€)	544630	0%	+26,6%	+3,0%	0%	+12,1%	+3,1%
	I_{total}	65	0%	-2,0%	+2,5%	0%	-2,2%	+2,5%
	C_U (€)	303994	0%	+33,7%	-20,0%	0%	-13,2%	-19,3%
	$I_{usagers}$	40	0%	+44,1%	-19,3%	0%	-10,5%	-19,3%
B1	$C_{gestionnaire}$ (€)	548079	0%	+16,0%	+1,0%	0%	+9,4%	+0,7%
	I_{total}	62	0%	-2,0%	+3,0%	0%	-1,3%	+1,6%
	C_U (€)	303275	0%	+22,9%	-3,6%	0%	+11,1%	-5,3%
	$I_{usagers}$	38	0%	+28,5%	-4,7%	0%	+14,5%	-5,8%
B2	$C_{gestionnaire}$ (€)	633737	0%	+9,3%	+1,8%	0%	+11,7%	+1,7%
	I_{total}	52	0%	-2,5%	+4,0%	0%	-2,2%	+4,0%
	C_U (€)	439204	0%	+3,7%	-2,4%	0%	+11,4%	-3,0%
	$I_{usagers}$	57	0%	+3,7%	-2,9%	0%	+12,0%	-3,5%
B3	$C_{gestionnaire}$ (€)	462449	0%	+6,9%	+3,4%	0%	+2,5%	+4,7%
	I_{total}	56	0%	-1,5%	+1,5%	0%	-2,3%	+5,3%
	C_U (€)	274524	0%	-0,8%	-26,4%	0%	+6,0%	-26,7%
	$I_{usagers}$	36	0%	+11,6%	-27,3%	0%	+6,1%	-27,6%

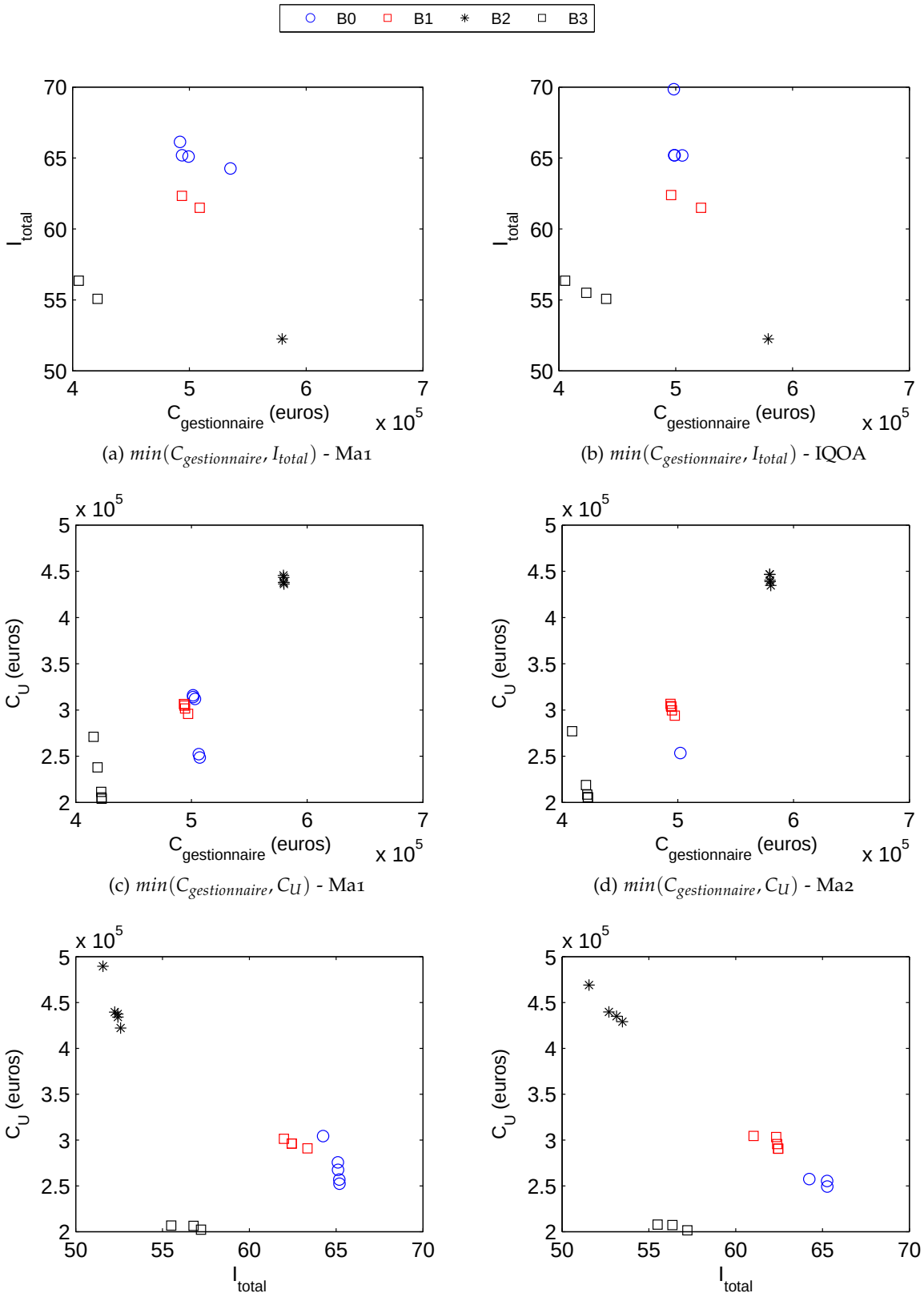
Tableau 4.3.4: Optimisation mono-objectif pour la sous-famille $ss - B$.

Variante		SBRI	Ma1			Ma2		
			$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$	$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$
B4	$C_{gestionnaire}$ (€)	935131	0%	+20,0%	+4,9%	0%	+20,0%	+4,9%
	I_{total}	92	0%	-1,6%	+1,1%	0%	-1,6%	+1,1%
	C_U (€)	582511	0%	-17,2%	-29,4%	0%	-17,2%	-29,4%
	$I_{usagers}$	76	0%	-13,8%	-29,5%	0%	-13,8%	-29,5%
B5	$C_{gestionnaire}$ (€)	874193	0%	+8,7%	+0,1%	0%	+8,7%	+0,1%
	I_{total}	96	0%	-1,5%	+1,6%	0%	-1,5%	+1,6%
	C_U (€)	405725	0%	+7,0%	-2,7%	0%	+7,0%	-2,7%
	$I_{usagers}$	51	0%	+7,9%	-1,8%	0%	+7,9%	-1,8%

Tableau 4.3.5: Optimisation mono-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$.

Les résultats obtenus pour la sous famille $ss - B$ avec la procédure bi-objectif sont montrés dans la FIGURE 4.3.7, dans la colonne de gauche pour le modèle Ma1 et dans la colonne de droite pour le modèle Ma2. Il est observé dans cette figure que :

- la variante B3 est la variante pratiquement toujours la mieux placée du point de vue de la domination par rapport aux autres solutions. Ce résultat est d'autant plus intéressant que le gain sur l'impact I_{total} vis-à-vis des actions de mise en place et maintenance des joints de chaussée n'est pas pris en compte. Seule la variante B0 présente quelques solutions non dominées, par rapport aux solutions de B1 avec les valeurs C_U les plus élevées, dans les FIGURES 4.3.7-c et 4.3.7-d ;
- la variante béton B2 avec des éléments préfabriqués est globalement la plus chère vis-à-vis du gestionnaire $C_{gestionnaire}$ et du coût C_U. On retrouve dans les FIGURES 4.3.7-c et 4.3.7-d que cette variante pénalise fortement les usagers, du fait de la maintenance des éléments de béton sous le tablier, et ce quelle que soit la stratégie adoptée sur le cycle de vie (le nuage de point est très resserré). Il est cependant noté que cette variante est celle avec l'impact I_{total} le plus faible (ce qui est visible dans les FIGURES 4.3.7-a, 4.3.7-b, 4.3.7-e et 4.3.7-f) ;
- dans les FIGURES 4.3.7-a et 4.3.7-b, il est observé que l'optimisation permet de dégager des solutions B0 plus intéressantes (respectivement moins intéressantes) que celles de B1 vis-à-vis de $C_{gestionnaire}$;
- dans le processus d'optimisation, il est observé que l'influence des critères sur la composition des solutions optimales n'est pas forcément la même. Ainsi le front de Pareto de la variante B3 est beaucoup plus étendu selon l'axe des ordonnées (C_U) lorsque mis en concurrence avec le coût $C_{gestionnaire}$ dans les FIGURES 4.3.7-c et 4.3.7-d, et beaucoup plus étendu selon l'axe des abscisses (I_{total}) lorsque mis en concurrence avec le coût C_U dans les FIGURES 4.3.7-e et 4.3.7-f.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - IQOA

(c) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

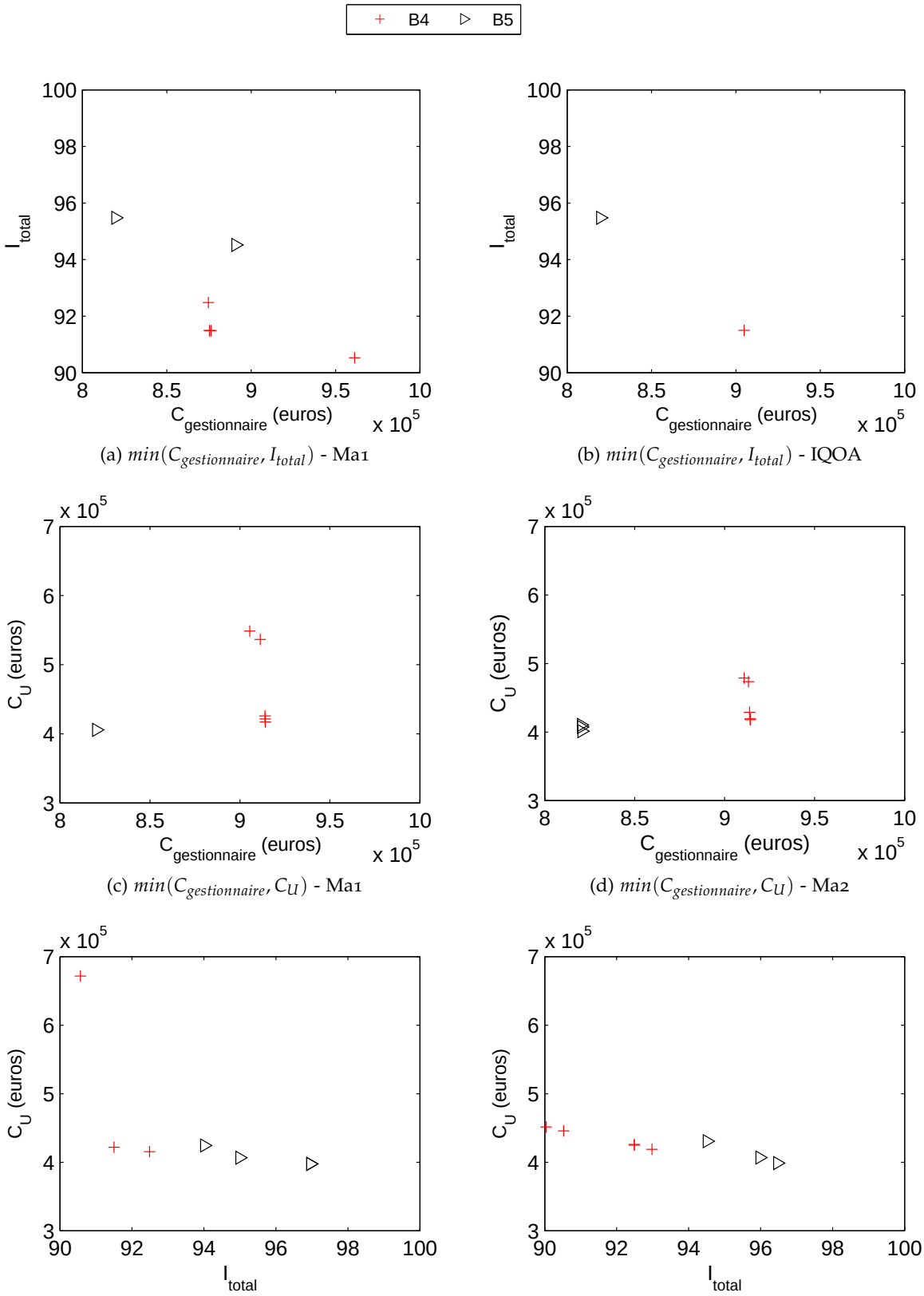
(e) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma1

(f) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.3.7: Optimisation bi-objectif pour la sous-famille $ss - B$.

Les résultats obtenus pour la sous famille $ss - \hat{B}$ avec la procédure bi-objectif sont montrés dans la FIGURE 4.3.8, dans la colonne de gauche pour le modèle Ma1 et dans la colonne de droite pour le modèle Ma2. Il est observé dans cette figure que :

- les solutions avec l'acier autopatinable permettent d'avoir un coût $C_{gestionnaire}$ plus faible dû au fait de l'économie sur les actions de remplacement de la protection anti-corrosion durant la vie en service. Il est cependant observé que certaines solutions de B4 sont moins coûteuses pour le gestionnaire qu'une des solutions avec B5 dans la FIGURE 4.3.8-a ;
- le gain sur le coût C_U est mis en évidence dans les FIGURES 4.3.8-c et 4.3.8-d, même s'il est observé que ce gain peut dans certains cas ne pas être significatif si conséquent au regard de la position de certaines solutions de B4 très proches suivant l'axe des ordonnées des solutions de B5 ;
- la surépaisseur des profils d'acier (face visible) du fait de l'utilisation d'aciers autopatinables engendre un impact I_{total} plus important pour B5. Comme noté dans le paragraphe 3.4, le manque d'information sur le gain de la suppression de chantiers de remplacement de la protection anticorrosion vis-à-vis des impacts environnementaux pénalise certainement la position de B5 par rapport à B4 sur ce critère.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - IQOA

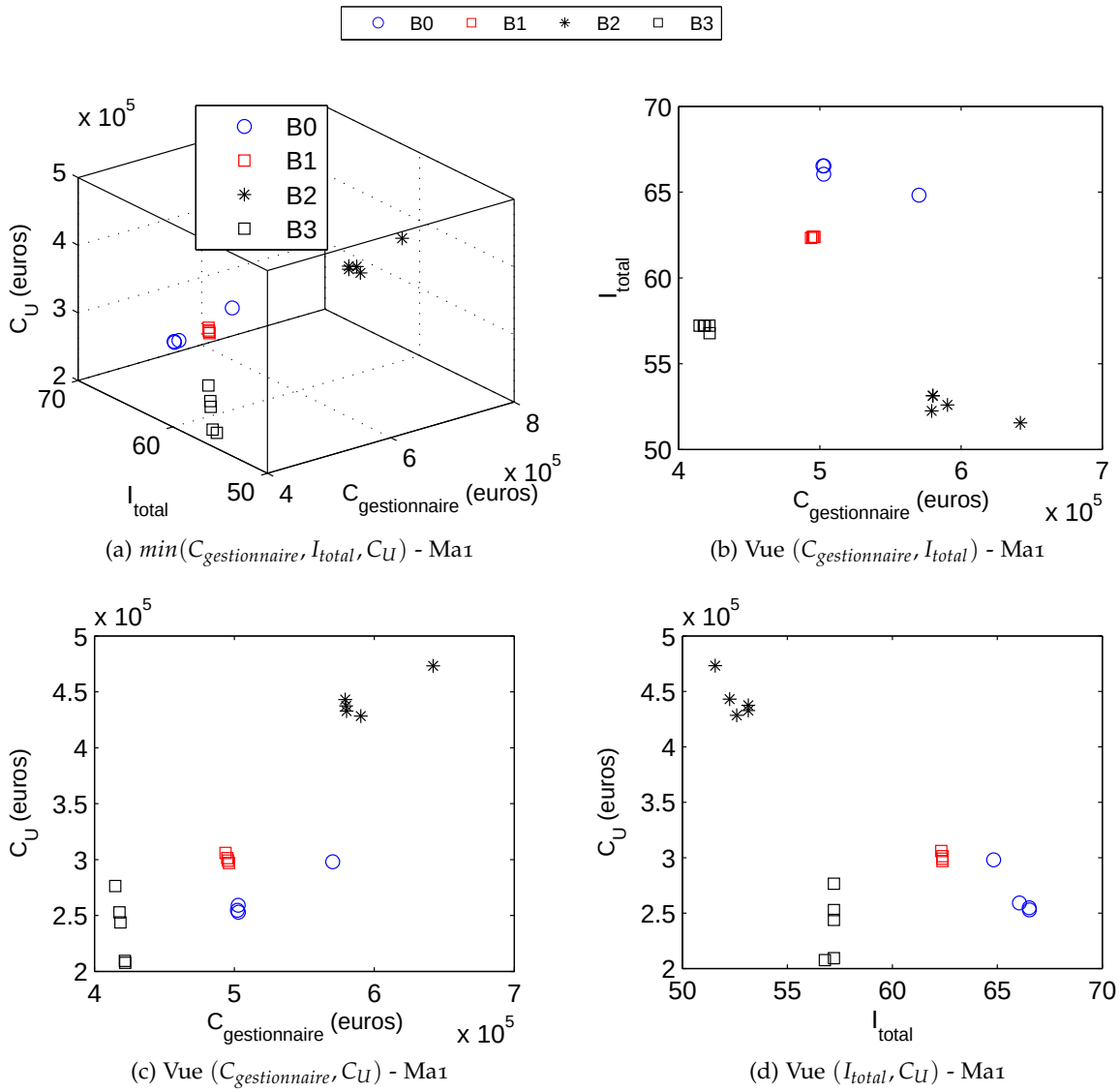
(c) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma1

(f) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.3.8: Optimisation bi-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma1

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

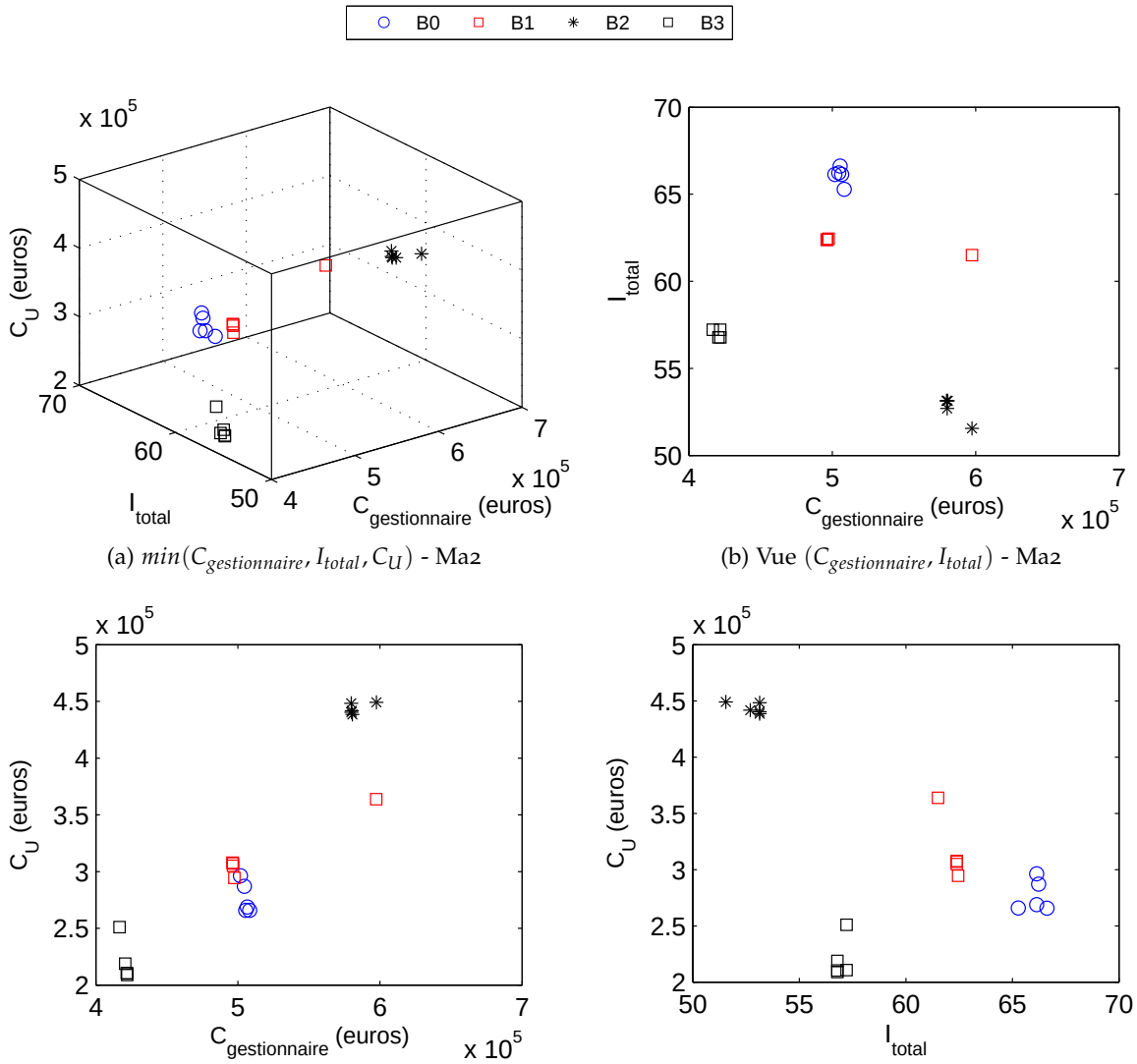
(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) Vue (I_{total}, C_U) - Ma1

Figure 4.3.9: Optimisation tri-objectif pour la sous-famille $ss - B$ - Modèle de dégradation Ma1.

En ce qui concerne la procédure tri-objectif, les résultats du calcul d'optimisation sont montrés pour la sous-famille $ss - B$ dans les FIGURES 4.3.9 et 4.3.10 lorsque les modèles Ma1 et Ma2 sont considérés, respectivement. Il est noté que la position des nuages de points pour chacune des variantes est assez proche dans le cas bi-objectif et dans le cas tri-objectif (en comparant les projections dans les FIGURES 4.3.9 et 4.3.10 d'une part, et les différents cas associés dans la FIGURE 4.3.7).

Les résultats de la procédure tri-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$ sont également montrés dans la FIGURE 4.3.11 pour les modèles Ma1 et Ma2. Les positions des solutions sont similaires pour les deux modèles de dégradation et permettent de montrer que c'est les coûts $C_{gestionnaire}$ et C_U qui permettent de différencier les deux variantes B4 et B5.



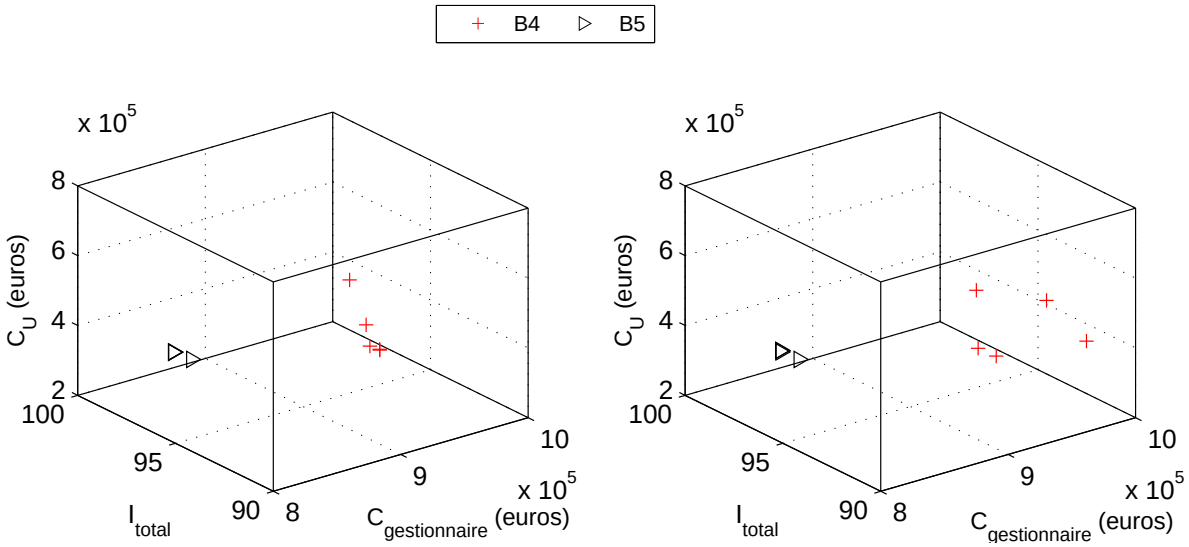
(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma2

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(d) Vue (I_{total}, C_U) - Ma2

Figure 4.3.10: Optimisation tri-objectif pour la sous-famille $ss - B$ - Modèle de dégradation Ma2.

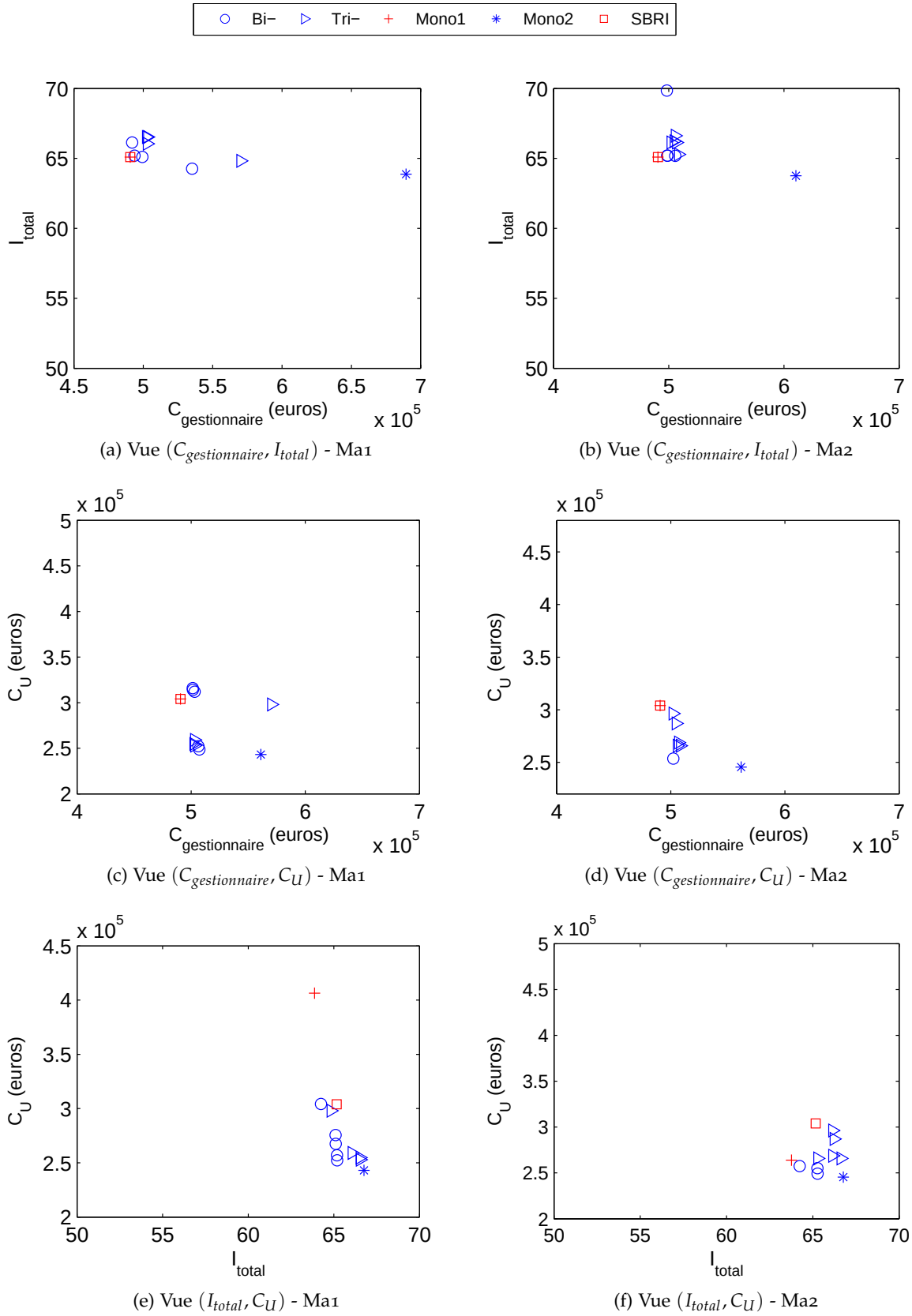


(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma1

(b) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.3.11: Optimisation tri-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$.

Finalement, afin d'illustrer l'influence de la prise en compte simultanée ou non des différents critères dans le calcul d'optimisation, une comparaison des solutions obtenues pour la variante Bo avec le calcul d'optimisation mono, bi et tri-objectif est proposée dans la FIGURE 4.3.12. La solution SBRI est également montrée dans chaque combinaison de plans parmi les trois critères $C_{gestionnaire}$, I_{total} et C_U. Comme dans le cas de la variante Ao dans la FIGURE 4.3.6, les solutions issues de l'optimisation bi-objectif sont parmi les meilleures étant donné qu'elles sont les mieux adaptées pour une représentation dans le plan formé par chaque paire de critères. Il est observé que les projections des solutions tri-objectif peuvent être très bien placées (FIGURE 4.3.12-c) ou bien plus dominées (FIGURE 4.3.12-f) suivant les paires de critères considérées. Finalement, la solution SBRI est souvent dominée par les autres solutions, et ce quels que soit le plan et le modèle de dégradation considérés.



(a) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) Vue (I_{total}, C_U) - Ma1

(f) Vue (I_{total}, C_U) - Ma2

Figure 4.3.12: Visualisation des résultats obtenus avec les optimisations mono, bi et tri-objectif, et du scénario SBRI pour la variante B0.

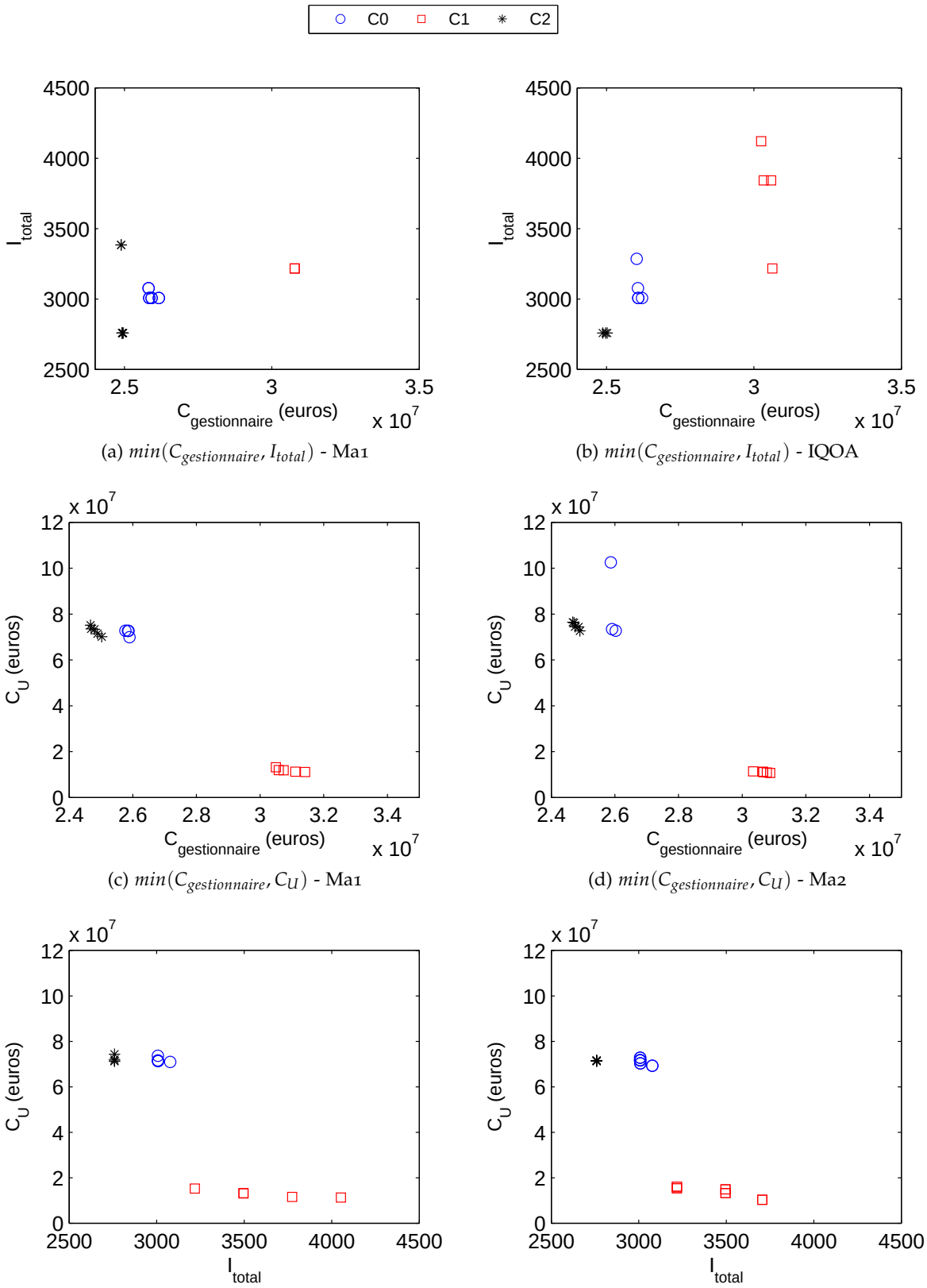
4.3.4 *Résultats d'optimisation pour la famille C*

Les trois cas d'optimisation mono-objectif sont présentés dans le TABLEAU 4.3.6 et l'écart relatif avec le scénario SBRI est à chaque fois calculé pour chacun des critères. Comme pour la famille A et B, seul le coût aux usagers a été considéré pour la prise en compte de la congestion de trafic mais l'impact environnemental dû à la congestion de trafic est également amélioré (toujours par rapport au scénario SBRI) lorsque c'est le coût C_U qui est minimisé. Il est observé dans ce tableau que le plus grand gain (-38%) lorsque le coût C_U est minimisé, est observé pour la variante C1. Logiquement, cette variante avec deux tabliers (qui permet d'avoir une voie de trafic supplémentaire en cas de maintenance lourde sur un des tabliers) a la plus grande marge de manœuvre pour réduire les coûts aux usagers, et également les impacts dus à la congestion du trafic.

Variante		SBRI	Ma1			Ma2		
			$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$	$min(C_{gestionnaire})$	$min(I_{total})$	$min(C_U)$
C0	$C_{gestionnaire}$ (€)	25464426	0%	+1,5%	+7,3%	0%	+3,6%	+7,0%
	I_{total}	3145	0%	-4,4%	-2,1%	0%	-4,4%	+0,0%
	C_U (€)	75750585	0%	-2,6%	-8,4%	0%	-5,3%	-0,8%
	$I_{usagers}$	8078	0%	-0,4%	-13,4%	0%	-4,9%	-5,8%
C1	$C_{gestionnaire}$ (€)	30068205	0%	+3,7%	+12,3%	0%	+3,2%	+7,9%
	I_{total}	3356	0%	-4,1%	+20,8%	0%	-2,0%	+10,4%
	C_U (€)	16649596	0%	-6,8%	-38,5%	0%	-3,1%	-38,7%
	$I_{usagers}$	2048	0%	+0,3%	-32,4%	0%	+3,3%	-38,3%
C2	$C_{gestionnaire}$ (€)	24344035	0%	+3,7%	+4,7%	0%	+3,4%	+5,5%
	I_{total}	2897	0%	-4,8%	-4,7%	0%	+0,0%	+0,0%
	C_U (€)	75750585	0%	-1,6%	-7,3%	0%	+5,5%	-2,8%
	$I_{usagers}$	8078	0%	+2,5%	-11,0%	0%	+9,7%	-8,1%

Tableau 4.3.6: Optimisation mono-objectif pour les variantes de la famille C.

Comme pour les familles d'ouvrages A et B, les résultats avec une optimisation de type bi-objectif sont maintenant proposés dans la FIGURE 4.3.13, en considérant à la fois les modèles Ma1 et Ma2. Le premier constat est que le choix du modèle de dégradation n'impacte pas dans cette figure les positions relatives des fronts de Pareto même si on observe quelques différences de valeurs entre les deux cas de modèles. En ce qui concerne les coûts aux usagers (FIGURES 4.3.13-c, 4.3.13-d, 4.3.13-e et 4.3.13-f), on retrouve le fait que les solutions avec C1 sont plus avantageuses que celles avec Co et C2, ce qui confirme l'intérêt d'une telle variante. Vis-à-vis des l'impact I_{total} et du coût $C_{gestionnaire}$ au gestionnaire, les solutions associées à la variante C2 avec les aciers HLE sont les plus avantageuses. Il est noté que vis-à-vis de l'impact I_{total}, certaines des solutions pour la variante C1 sont très proches des solutions pour la variante Co (une solution est même meilleure dans la FIGURE 4.3.13-b, ce qui confirme l'intérêt du recours à une procédure d'optimisation multiobjectif pour éventuellement faire évoluer le classement d'une solution de construction par rapport à une autre.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - IQOA

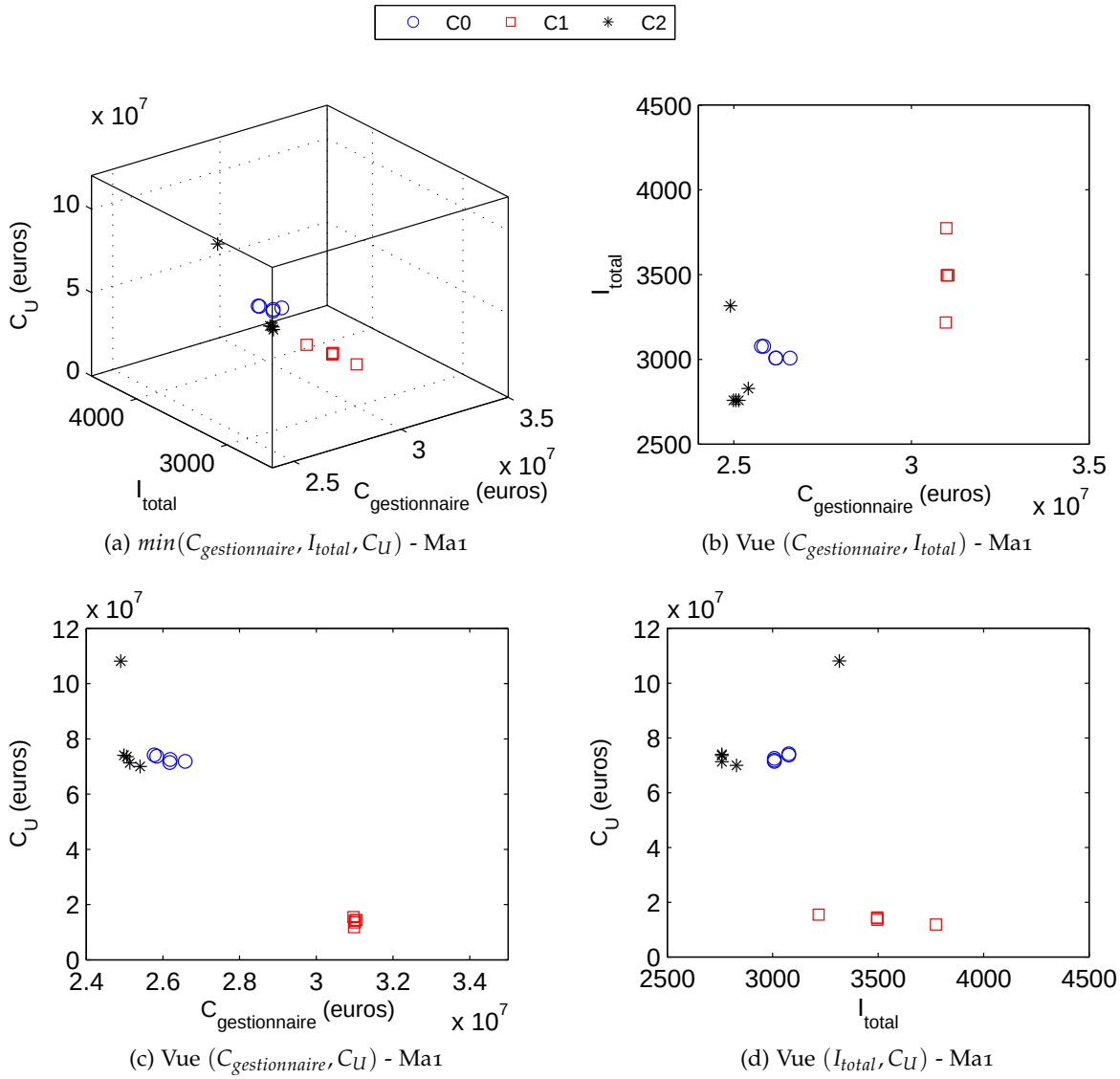
(c) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma1

(f) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.3.13: Optimisation bi-objectif pour les variantes de la famille C.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma1

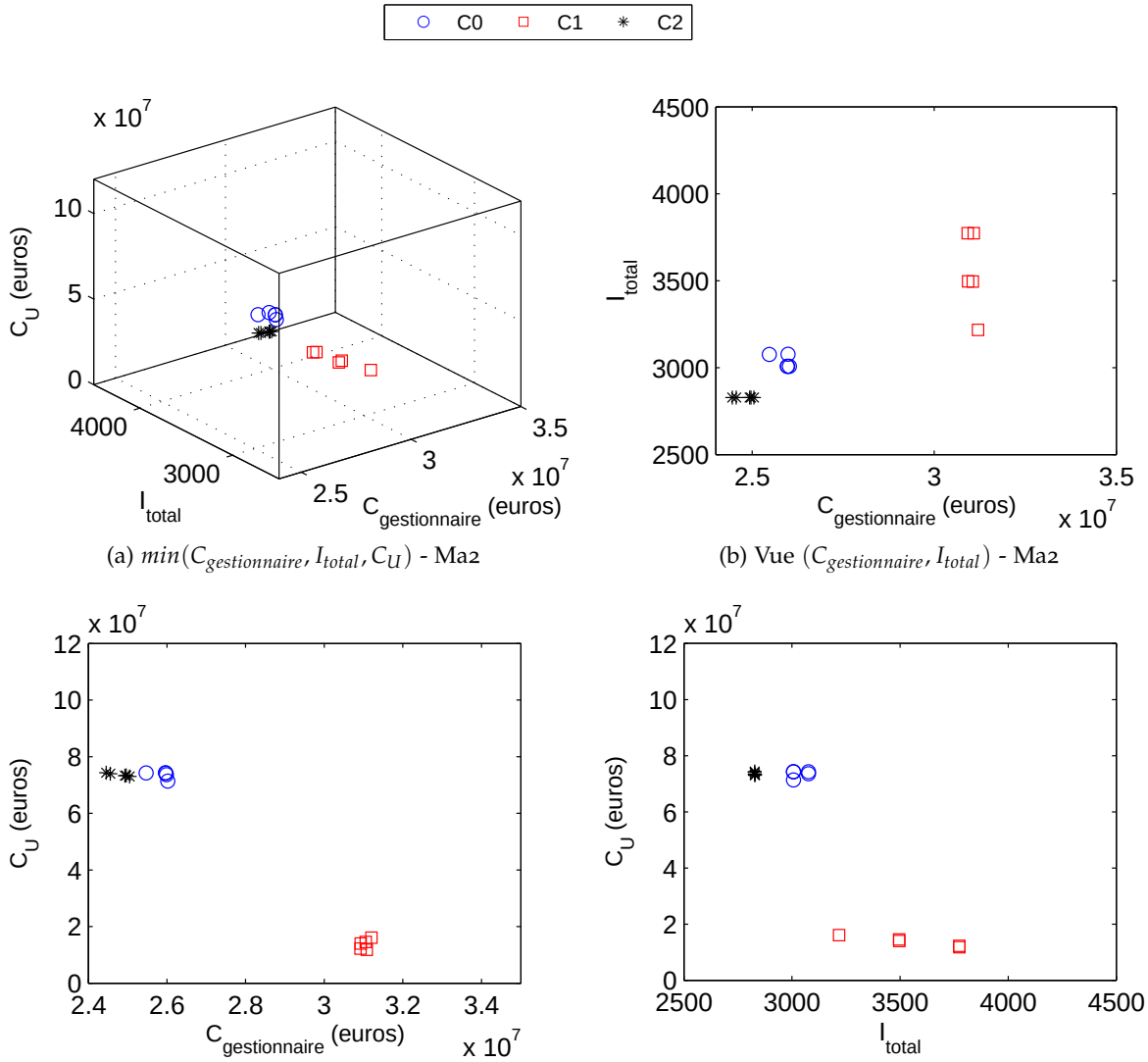
(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) Vue (I_{total}, C_U) - Ma1

Figure 4.3.14: Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille C - Modèle de dégradation Ma1.

En ce qui concerne la procédure tri-objectif, les résultats du calcul d'optimisation sont montrés pour la famille C dans les FIGURES 4.3.14 et 4.3.15 lorsque les modèles Ma1 et Ma2 sont considérés, respectivement. Globalement, les positions des projections des fronts de Pareto dans les espaces formés par les combinaisons de paires de critères sont assez proches des fronts de Pareto issus des calculs d'optimisation bi-objectif (en comparant les FIGURES 4.3.13, 4.3.14 et 4.3.15), même s'il est observé que les valeurs peuvent être légèrement différentes.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total}, C_U)$ - Ma2

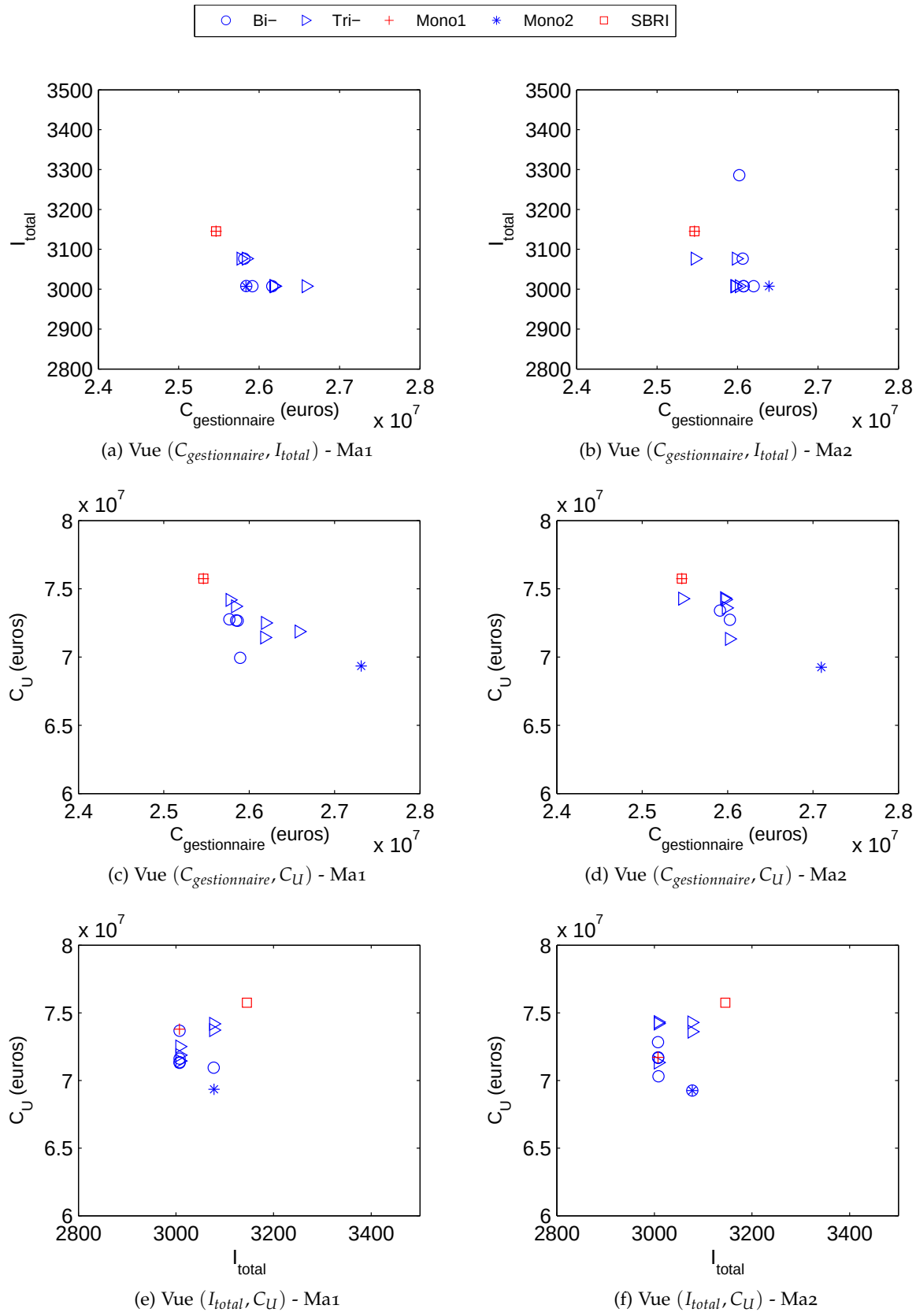
(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(d) Vue (I_{total}, C_U) - Ma2

Figure 4.3.15: Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille C - Modèle de dégradation Ma2.

Afin de visualiser les différences entre les calculs mono, bi et tri-objectif, une comparaison des solutions obtenues pour la variante Co avec le calcul d'optimisation mono, bi et tri-objectif est proposée dans la FIGURE 4.3.16. Les résultats entre procédures bi et tri-objectif apparaissent très proches dans les FIGURES 4.3.16-a et 4.3.16-d. Les résultats semblent même meilleurs pour la procédure tri-objectif dans la FIGURE 4.3.16-b vis-à-vis du coût $C_{gestionnaire}$. Dans les autres cas, c'est la procédure bi-objectif qui permet de déterminer les solutions non dominées. Enfin la solution SBRI est attractive vis-à-vis du coût $C_{gestionnaire}$ (FIGURES 4.3.16-a à 4.3.16-d) mais pas vis-à-vis du coût C_U ni de l'impact I_{total}.



(a) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) Vue $(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) Vue $(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) Vue (I_{total}, C_U) - Ma1

(f) Vue (I_{total}, C_U) - Ma2

Figure 4.3.16: Visualisation des résultats obtenus avec les optimisations mono, bi, et tri-objectif, et du scénario SBRI pour la variante Co.

4.4 ETUDE DE L'INFLUENCE DES SEUILS DE PERFORMANCE

Ce paragraphe propose d'appliquer différents seuils de contrainte sur le niveau de performance de certains éléments de l'ouvrage afin d'en analyser l'influence sur les résultats du calcul d'optimisation. En l'occurrence, des variantes se différencient des variantes de référence par un gain substantiel sur le cycle de vie en raison de la suppression de certaines actions de maintenance. Dans ce contexte, il est intéressant de voir comment le seuil de performance acceptable peut éventuellement jouer sur les différences entre ces différentes variantes.

4.4.1 *Etude des seuils sur la protection anticorrosion*

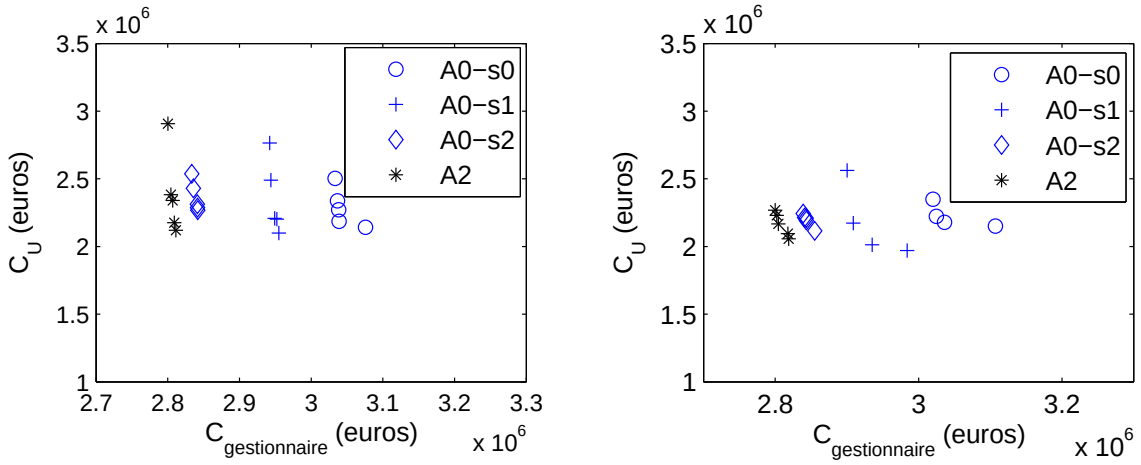
Le premier cas concerne la comparaison de la variante A0 de référence avec la variante A2 utilisant des aciers autopatinables pour la charpente métallique. La distinction entre A0 et A2 durant le cycle de vie concerne le remplacement de la protection anti-corrosion et c'est sur le seuil de performance de cet élément que porte l'étude proposée dans ce paragraphe. Comme précisé dans le paragraphe 3.4.1.2, le manque d'information sur l'impact environnemental généré par les chantiers de remplacement de la protection anticorrosion rend peu intéressante une comparaison des seuils sur la performance de cette protection vis-à-vis du critère I_{total}. Les résultats sont donc présentés dans ce paragraphe en ne considérant que la minimisation simultanée des deux critères $C_{gestionnaire}$ et C_U, à la fois pour les modèles Ma1 et Ma2.

Seuil de performance - cp	s0	s1	s2
Ma1/Ma2	**0,413**	0,210	0,007

Tableau 4.4.1: Seuils de performance considérés pour la protection anticorrosion.

En plus du seuil s0 considéré dans le TABLEAU 4.3.1 pour les modèles Ma1 et Ma2, deux autres niveaux s1 et s2 (identique pour Ma1 et Ma2) sont introduits dans ce paragraphe pour la variante A0. Ces seuils sont détaillés dans le TABLEAU 4.4.1. Il est noté que les seuils s1 et s2 correspondent à une diminution croissante des exigences vis-à-vis du niveau de performance pour la protection anti-corrosion. Cette diminution d'exigence n'a pas d'impact significatif sur les coûts aux usagers pour A0, ce qui est normal puisque le trafic n'est pas affecté par le changement de la protection anticorrosion pour la famille A d'ouvrages. Par ailleurs, le coût total diminue nettement lorsque l'on passe des contraintes s0, à s1 puis à s2 pour les modèles Ma1 et Ma2 en raison des économies des chantiers de remplacement associés pour le gestionnaire. Le coût $C_{gestionnaire}$ a alors tendance à se rapprocher du coût pour la variante A2.

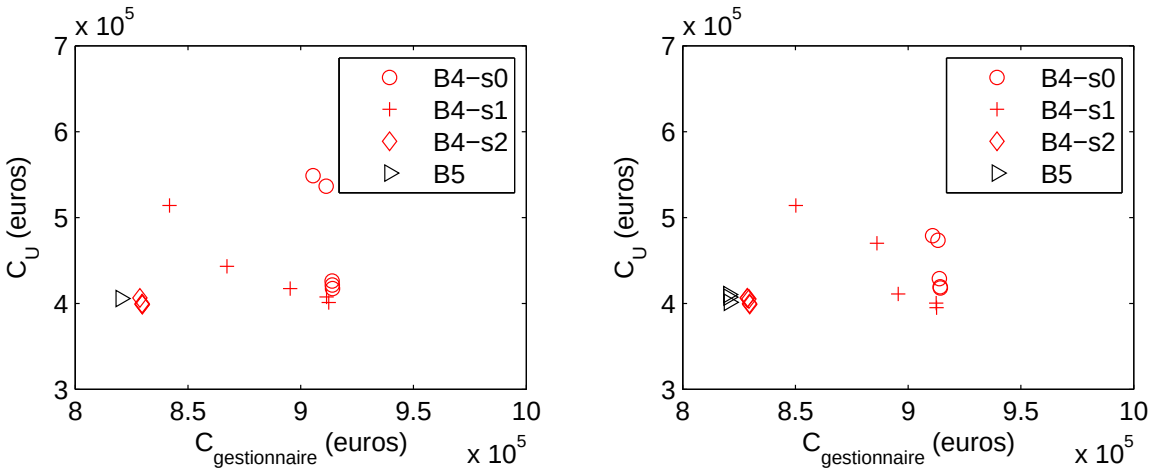
Le deuxième cas considéré porte sur les ouvrages de petite portée (famille B) et en particulier sur ouvrages B4 et B5. L'intérêt avec ces deux variantes est de voir comment le trafic autoroutier sous l'ouvrage est affecté par les changements sur les seuils de performance. Là encore, les seuils s0, s1 et s2 sont considérés pour les modèles Ma1 et Ma2. Comme dans la comparaison de la famille A dans la FIGURE 4.4.1, la FIGURE 4.4.2 montre les résultats lorsque $C_{gestionnaire}$ et C_U sont minimisés, à la fois pour les modèles Ma1 et Ma2. Il est observé cette fois-ci que les deux critères sont impactés lorsque l'on passe des seuils s0, à s1 puis à s2, et ce à la fois pour Ma1 et pour Ma2. La baisse du critère a alors tendance à rapprocher la variante B4 de la variante B5. Bien sûr, la baisse du niveau de performance sur la protection anticorrosion suppose



(a) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1 (b) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.4.1: Comparaison des variantes A0 et A2 en considérant trois cas de seuil de performance pour A0.

que l'on accepte de laisser cet élément de protection de la charpente métallique se dégrader plus que dans le cas de référence correspondant à une maintenance normale de cet élément. Ces résultats sont donc à prendre avec précaution mais permettent de montrer comment le modèle retranscrit une baisse des exigences du gestionnaire dans un cas de ressources financières limitées par exemple.



(a) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1 (b) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.4.2: Comparaison des variantes B4 et B5 en considérant trois cas de seuil de performance pour B4.

4.4.2 *Etude des seuils sur les joints des chaussées*

La comparaison effectuée dans ce paragraphe concerne les variantes B0 (variante de référence mixte) et B3 (variante avec culées intégrales). L'intérêt majeur d'une variante avec culées intégrales étant le non entretien et remplacement des joints de chaussée durant la vie en service, seul le niveau de performance vis-à-vis des joints de chaussée est modifié pour la variante B0, afin de voir comment cette variante se positionne par rapport à la variante B3. Comme dans le paragraphe précédent portant sur les variantes avec aciers autopatinables, il est remarqué que peu d'information sur l'impact environnemental est disponible sur l'entretien et le changement des joints de chaussée durant la vie en service. Il n'apparaît donc pas pertinent de considérer ce critère et seuls les critères $C_{gestionnaire}$ et C_U sont considérés dans la suite de ce paragraphe.

En plus des seuils s0-Ma1 et s0-Ma2 pour Ma1 et Ma2, respectivement, deux autres niveaux sont introduits dans ce paragraphe pour la variante B0. Les seuils s3-Ma1, s4-Ma1, s3-Ma2 et s4-Ma2 sont détaillés dans le TABLEAU 4.4.2.

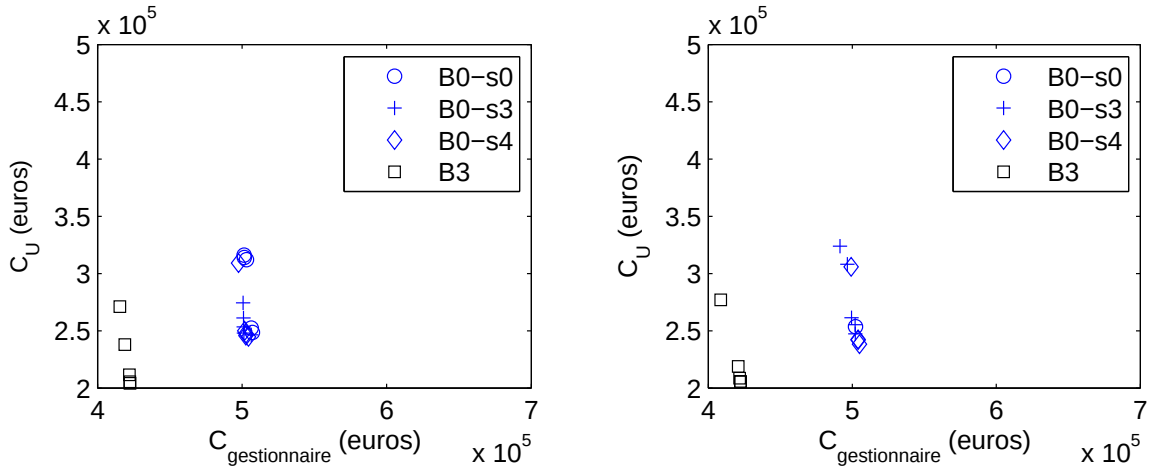
Seuil de performance - ej	s0	s3	s4
Ma1	**0,357**	0,181	0,005
Ma2	**0,549**	0,292	0,035

Tableau 4.4.2: Seuils de performance considérés pour des joints de chaussées.

Les résultats du calcul d'optimisation sont alors montrés dans la FIGURE 4.4.3 lorsque $C_{gestionnaire}$ et C_U sont minimisés, à la fois pour les modèles Ma1 et Ma2. Il est observé que le fait de diminuer le seuil d'exigence sur les joints de chaussée fait légèrement diminuer le coût $C_{gestionnaire}$ et le coût C_U. Il n'est cependant pas possible de ramener les coûts liés à la variante B0 au niveau de ceux pour la variante B3, les dispositions constructives de ces deux variantes introduisant une différence trop significative au moment de la construction pour être comblée durant la durée de vie en service. Ayant une nécessité de respecter des contraintes sur la chape d'étanchéité et de remplacer les joints de chaussée en même temps, la possibilité de réduire le nombre de remplacement des joints de chaussée sur le cycle de vie et donc les coûts de cycle de vie $C_{gestionnaire}$ et C_U est limitée.

4.4.3 *Influence sur les coûts aux usagers de deux tabliers au lieu d'un seul*

Cette dernière comparaison porte sur les ouvrages de grande dimension (famille d'ouvrages C) et considère en particulier la variante C0, avec un seul tablier, et la variante C1, avec deux tabliers. L'intérêt d'une variante avec deux tabliers étant de bénéficier d'une voie de trafic supplémentaire au moment des maintenances lourdes, plusieurs éléments sont considérés dans ce paragraphe pour faire varier les niveaux de performance associés. Sont considérés les niveaux de performance des joints de chaussée, de la couche de roulement et de la chape d'étanchéité. En plus du seuil considéré dans le TABLEAU 4.3.1 lorsque les modèles Ma1 et Ma2 sont utilisés (noté s0-Ma1 et s0-Ma2 pour Ma1 et Ma2, respectivement), un autre niveau s5 est introduit dans ce paragraphe pour les variantes C0 et C1 et est détaillé dans le TABLEAU 4.4.3. Ce seuil est noté s5-Ma1 et s5-Ma2 lorsque les modèles Ma1 et Ma2 sont utilisés, respectivement.



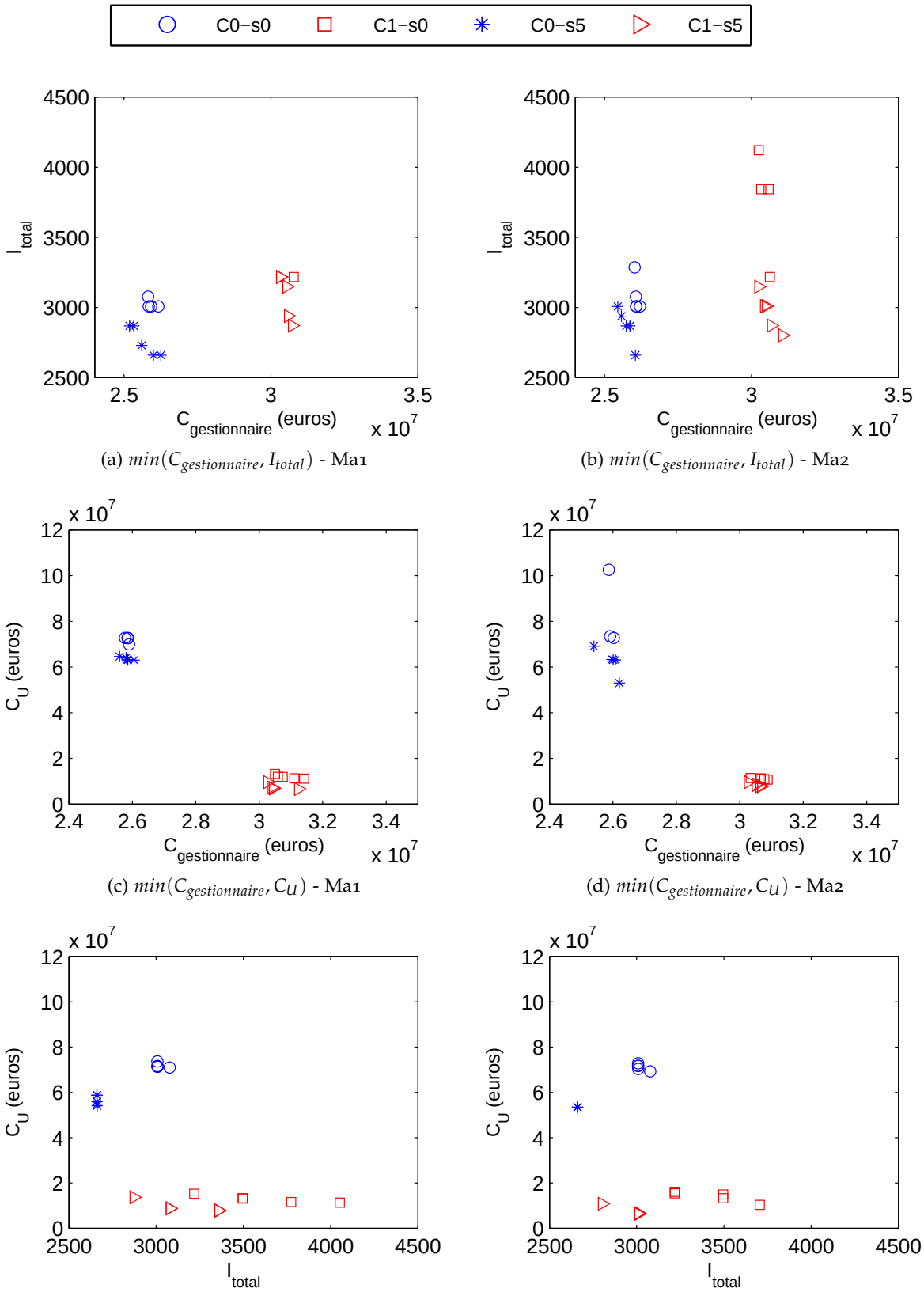
(a) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1 (b) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.4.3: Comparaison des variantes B0 et B3 en considérant trois cas de seuil de performance pour B0.

		wp	rs	ej
Ma1	s0	**0,378**	**0,357**	**0,357**
	s5	0,265	0,181	0,181
Ma2	s0	**0,272**	**0,357**	**0,549**
	s5	0,162	0,181	0,292

Tableau 4.4.3: Seuils de performance pour l'étude de la différence entre des variantes avec deux tabliers (variante C1) ou un seul (variante C0).

Les résultats du calcul d'optimisation sont fournis dans la FIGURE 4.3.13 lorsque les critères $C_{gestionnaire}$, I_{total} et C_U sont minimisés par paire. Il est observé dans cette figure que le changement de contrainte n'engendre pas de modification dans la position des solutions de C0 par rapport à celles de C1. L'impact de ce changement de contrainte est par ailleurs manifestement plus important pour C0 qu'il ne l'est pour C1. Dans les deux cas, un gain non négligeable est observé sur les coûts aux usagers, l'impact I_{total}, la variation sur le coût $C_{gestionnaire}$ étant elle non marquée.



(a) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma1

(b) $min(C_{gestionnaire}, I_{total})$ - Ma2

(c) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma1

(d) $min(C_{gestionnaire}, C_U)$ - Ma2

(e) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma1

(f) $min(I_{total}, C_U)$ - Ma2

Figure 4.4.4: Comparaison des variantes C0 et C1 en considérant deux cas de seuil de performance.

4.5 SYNTHÈSE

Ce chapitre, en introduisant des profils de dégradation des différentes parties d'ouvrages, permet de coupler les analyses économiques, environnementales et sociétales à une analyse technique sur le cycle de vie et d'envisager des procédures d'optimisation au sens mathématique du terme, c'est-à-dire dans le cas présent une minimisation de différents impacts, de telle sorte que les contraintes sur des critères définis au préalable soient prises en compte. En utilisant le cadre des algorithmes génétiques pour mener un calcul soit mono-objectif, soit multiobjectif, il est alors possible de déterminer des solutions de gestion optimales (ou non dominées) sur le cycle de vie. Ce dernier point constitue une avancée par rapport aux analyses menées dans le chapitre 3 dans lequel les stratégies de gestion avaient été définies à dires d'expert sans possibilité d'optimiser pleinement leur occurrence et combinaison tout au long du cycle de vie. Bien sûr, la fiabilité du modèle de dégradation est une donnée requise pour mener ce type de calcul sans risquer de sur estimer (ou sous estimer inutilement) les niveaux de performance des différents éléments constitutifs des ouvrages.

Dans ce contexte, il est apparu que certaines des solutions permettent de bouleverser le classement d'une solution de conception par rapport à une autre. A l'inverse, il est noté que certaines variantes se détachent nettement des autres dès la conception (du fait de l'utilisation de certains matériaux ou de techniques de construction innovantes) et qu'il n'est pas possible de rattraper cette différence initiale juste en modifiant les instants et types d'intervention.

Par ailleurs, il a été montré que les différents critères pris en compte dans le calcul d'optimisation peuvent fortement influencer les autres critères. Dans les calculs menés, il n'a pas été possible dans l'absolu de chercher à minimiser séparément et indépendamment les impacts économiques, environnementaux et sociétaux en espérant obtenir une solution optimale suivant tous ces impacts. Une telle conclusion est bien sûr liée au choix des indicateurs qui sont pris en compte dans l'étude.

La sensibilité du modèle vis-à-vis des contraintes sur les niveaux de performance de certains éléments a également été testée pour voir jusqu'à quel point des solutions innovantes à la conception restent pertinentes sur le cycle de vie, dès lors que le gestionnaire s'autorise à atteindre des niveaux de dégradation plus élevés pour les solutions classiques (comme dans le cas de la comparaison de variantes originales sur le choix des matériaux ou sur la conception avec des solutions plus classiques).

Finalement, la procédure d'optimisation permet d'affiner dans l'ensemble des cas les conclusions du chapitre 3 en élargissant les possibilités de détermination de solutions avantageuses vis-à-vis de plusieurs critères tout en assurant un respect de différentes contraintes sur des niveaux de performance minimaux à ne pas atteindre sur l'ensemble du cycle de vie.

5 CONCLUSIONS

A l'heure où la France entre dans un vaste débat sur les transitions énergétique et écologique, la problématique de l'efficacité des stratégies de construction et de gestion des grandes infrastructures de génie civil, et en particulier des ouvrages d'art, revêt une importance majeure. Comment optimiser les consommations de matières premières, utiliser au mieux l'énergie, et de manière globale minimiser les impacts économiques, environnementaux, et sociétaux sont des questions d'actualité avec un enjeu extrêmement important. A l'échelle de la durée de vie en service des infrastructures, prendre aujourd'hui les bonnes décisions pour agir à court terme et anticiper le long terme est un défi pour les gestionnaires d'infrastructures. Il est donc essentiel de disposer de référentiels et de solutions techniques appropriées pour développer les capacités d'adaptabilité des infrastructures nouvelles.

Dans ce contexte, l'objectif d'une analyse en cycle de vie des ouvrages est de proposer une réflexion sur la pertinence des stratégies de gestion des ouvrages et de faciliter le processus de décision qui y est associé. Associée au projet Européen SBRI (initié en juillet 2009 et achevé en juin 2012), la thèse a pu bénéficier (i) de l'expertise de gestionnaires d'ouvrages d'art dans le domaine de la construction des ponts mixtes aciers-béton et de leur entretien, (ii) d'une vision plus axée sur une problématique de recherche avec le développement de concepts méthodologiques pour mener des ACV et des ACCV, et (iii) de la connaissance de producteurs de matériaux, avec la participation de groupes sidérurgiques majeurs. La combinaison de ces trois apports constitue un aspect original de cette thèse. Fort de ces apports, l'objectif majeur a été d'introduire un cadre méthodologique permettant de discriminer plusieurs solutions constructives de ponts mixtes acier-béton et plusieurs scénarios de gestion de ces ouvrages sur leur cycle de vie.

Cette conclusion établit un bilan des travaux effectués et suggère des perspectives pour l'approfondissement des recherches. Le mémoire a été divisé en trois grandes parties :

- la première partie introduit les grands principes d'une analyse de cycle de vie des ouvrages d'art. Cette partie aborde naturellement les trois piliers du développement durable à savoir les aspects économiques, environnementaux et sociétaux. Des aspects méthodologiques de l'ACCV, de l'ACV, et de l'analyse sociétale ont été introduits afin d'une part de détailler les concepts de développement durable utilisés dans les chapitres 3 et 4 de ce mémoire, et d'autre part de décrire, de manière non exhaustive, certaines études récentes ayant eu pour objectif de faire des comparaisons de différents types de dimensionnement et de méthodes de gestion d'ouvrages. La performance des matériaux et des méthodes de construction et de gestion ayant fortement évolué durant ces trente dernières années, certaines des conclusions évoquées dans ce chapitre doivent être prises avec précaution, chaque étude étant de plus liée à un contexte particulier (localisation de l'ouvrage, évolution des prix du marché, implantation des filières locales de travaux publics,...) ;
- la deuxième partie propose une application de l'analyse globale sur le cycle de vie pour la conception de plusieurs familles de ponts mixtes acier-béton, en considérant un large ensemble de possibilités d'ouvrages (passages inférieurs ou su-

périeurs, configuration du trafic autoroutier) et couvrant des solutions de petite (famille B), moyenne (famille A) ou grande (famille C) portée. Les différents cas d'étude introduits ont été dimensionnés selon les Eurocodes par plusieurs des partenaires du projet SBRI (le SETRA et le CETE de l'Est en France et la société BRISA au Portugal), ce qui apporte une garantie sur le réalisme des études menées. Ce chapitre propose une AECV, une ACV et une analyse sociétale pour plusieurs variantes de dimensionnement en les comparant chaque fois à une variante de référence. Cette partie permet finalement d'effectuer une discrimination des variantes à l'étape de construction, en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie. Dans l'optique de discriminer les variantes pour chacune des trois familles A, B et C, une analyse multicritère est proposée en fin de chapitre en se basant sur deux méthodologies distinctes : TOPSIS et PROMETHEE. Si la première méthode compare les différentes variantes à des solutions dites idéale et anti-idéale, la deuxième méthode effectue des comparaisons par paires de solutions possibles en se basant sur des fonctions de préférence pour chaque type de critère considéré. Même si leur principe de fonctionnement est différent, il est observé que les deux méthodes aboutissent aux mêmes classifications, et ce que l'accent soit mis de manière exclusive sur les critères économiques, environnementaux, ou sociétaux, ou bien que l'ensemble des critères soit considéré de manière homogène dans l'analyse. De manière globale, ce chapitre fournit un cadre méthodologique permettant une comparaison globale de plusieurs variantes selon des critères économiques, environnementaux et sociétaux. En particulier, l'intérêt de solutions originales est analysé du point de vue de l'utilisation de matériaux (aciers HLE, autopatinables), de la conception (avec la prise en compte de l'accroissement du trafic, l'amélioration de détails de fatigue, l'utilisation de culées intégrales pour des ouvrages de petite portée, l'utilisation de variantes avec deux tabliers au lieu d'un seul) ou encore de la gestion de vie en service (en considérant des scénarios de maintenance standard, avec un manque de ressources financières, ou bien des scénarios pour lesquels l'ouvrage est maintenu en service au-delà des 100 ans règlementaires). Il est rappelé que cette étude n'a pas pour vocation d'extrapoler les résultats obtenus de manière générale, étant donné les hypothèses fortes considérées dans l'étude. L'objectif étant plutôt de montrer comment articuler chacune des étapes de l'étude pour fournir une comparaison selon plusieurs critères ;

– la troisième partie propose une prise en compte plus détaillée de l'analyse performantielle en introduisant des modèles de dégradation des différentes parties d'ouvrages. Cette analyse est menée en utilisant des modèles non paramétriques de type Markov basés, soit sur les durées de vie en service des différentes parties d'ouvrage, soit sur une base de données de notations utilisée par le ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et gérée par le SETRA. Cette analyse performantielle est considérée en lien avec une procédure d'optimisation multiobjectif qui permet de déterminer des stratégies de gestion optimales. Cette partie permet d'envisager plusieurs types d'optimisation en considérant une seule, deux ou trois fonction(s) objectif(s) qui peut (peuvent) porter sur des critères économiques, environnementaux et sociétaux. En particulier dans cette partie, les indicateurs environnementaux sont agrégés dans un seul "impact" pour avoir au maximum trois fonctions objectif dans le calcul d'optimisation quand l'ACV, l'ACCV et la congestion du trafic sont pris en compte. Du & Karoumi (2012) proposent des coefficients pour agréger les indicateurs $I6$, $I8$ et $I9$, ce qui explique ce choix. Il n'a pas de valeur intrinsèque mais a pour simple

objectif de montrer l'applicabilité de la démarche. A l'inverse de l'approche multicritère, l'approche multiobjectif ne compare pas plusieurs solutions déjà établies mais recherche plutôt un ensemble de stratégies qui permettent de minimiser des impacts pouvant représenter des intérêts conflictuels. Lorsque plusieurs critères sont envisagés, on n'obtient pas alors une solution unique mais un ensemble de solutions dites non dominées. Il a été observé qu'en fonction des scénarios d'optimisation et des niveaux de contrainte appliqués sur les indicateurs de performance, il est possible que le classement des variantes proposé dans le chapitre 3 soit légèrement modifié. Pour d'autres solutions en revanche, l'écart à la construction est tel sur certains indicateurs qu'il n'est pas possible d'inverser la tendance durant le cycle de vie. La dépendance des critères, les uns par rapport aux autres, a également été analysée, en considérant des calculs d'optimisation mono, bi, et tri-objectifs, et en comparant les différences suivant chaque critère. Dans un problème multiobjectif, l'enjeu est de déterminer les meilleures solutions possibles vis-à-vis d'un ensemble de critères souvent conflictuels. Il n'est alors pas possible d'avoir des solutions avec des indicateurs qui sont tous à la baisse simultanément, sauf si ces indicateurs ne sont pas conflictuels. Sur le front de Pareto des solutions optimales, dès que l'on gagne sur un critère, il y a au moins un autre critère qui se dégrade. Il n'est donc pas possible de dire qu'une solution est meilleure que les autres sur l'ensemble des critères. Il est notamment montré que les différents critères sont généralement liés et qu'il est difficilement envisageable de chercher à minimiser l'impact économique, environnemental et sociétal de manière totalement dissociée. De manière intuitive, on se doute bien que l'on ne va pas obtenir les mêmes résultats si l'on cherche à minimiser un des trois critères à la fois, les critères pris deux par deux, ou bien les trois critères pris simultanément. L'analyse permet de montrer ce résultat sur un cas particulier de choix d'indicateurs environnementaux. Les minimisations des impacts économiques, environnementaux et sociétaux ne font pas intervenir les mêmes problématiques. Pour les impacts économiques, le taux d'actualisation a tendance à repousser les opérations coûteuses dans le futur. Pour les impacts environnementaux, c'est plutôt la différence d'impact entre la maintenance et le remplacement d'un élément qui va jouer. Pour la partie sociétale, plus le gestionnaire intervient sur l'ouvrage, plus il va avoir tendance à gêner le trafic, et vice versa. Il n'est donc pas étonnant d'avoir des objectifs conflictuels sur la durée de vie en service, ce qui se retranscrit par l'obtention de fronts de Pareto avec plusieurs points et non un point unique (une telle solution unique permettrait de minimiser tous les critères de manière simultanée). Finalement, l'influence de différents seuils de performance a été considérée pour voir comment les variantes innovantes se situent par rapport à des variantes plus classiques de dimensionnement lorsque les exigences, vis-à-vis du niveau de performance des différents éléments de l'ouvrage, sont plus ou moins élevées.

Les réflexions sur l'analyse de cycle de vie appliquée aux ponts mixtes acier-béton et sur les analyses multicritère et multiobjectif constituent l'originalité de ce travail. A l'issue de cette thèse, tous les modèles et les outils pour ont été développés pour permettre d'aborder la question de la détermination de solutions optimales sur le cycle de vie.

Les différentes méthodes permettant d'effectuer l'AECV ont été implémentées sous excel© et Matlab©. Celles pour l'ACV ont été mises en œuvre à l'aide du logiciel Simapro©, excel© et Matlab©. Finalement, celles pour l'analyse sociétale ont été implémentées sous Excel© et Matlab©. Par ailleurs, les techniques permettant d'appli-

quer les analyses multicritère (TOPSIS et PROMETHEE) et multiobjectif (algorithmes génétiques) ont été développées sous environnement Matlab©.

L'approche développée dans cette thèse a permis de mettre en évidence l'intérêt de différentes pistes (au travers de cas types), particulièrement pertinentes pour améliorer le dimensionnement des ponts mixtes acier-béton sur leur cycle de vie. Comme précisé tout au long de ce mémoire, il reste de nombreuses interrogations et des voies à explorer afin d'améliorer la méthodologie proposée. Un aspect essentiel est la prise en compte des incertitudes de manière exhaustive sur chacun des paramètres d'entrée pour permettre de tirer des conclusions précises et robustes même en présence d'incertitudes sur les coûts et impacts unitaires.

Par ailleurs, dans le cadre de la conception initiale, des matériaux à hautes performances ont permis de diminuer le poids propre de la structure et d'optimiser les quantités mises en œuvre (comme dans le cas des aciers HLE). De manière similaire, il serait intéressant de considérer l'emploi de bétons à hautes performances (BHP) pour avoir un gain d'épaisseur de la dalle de béton et donc un gain de poids propre significatif influant sur le dimensionnement. Une autre solution très innovante, utilisant du béton fibré à ultra-haute performances (BFUP) par dalle gaufrée, pourrait également être envisagée.

En termes de gains vis-à-vis des opérations d'entretien, l'emploi de matériaux spécifiques a également permis de diminuer la vulnérabilité de la structure aux agressions du milieu extérieur (les aciers autopatinables permettant notamment de se dispenser de la réalisation et des remplacements successifs d'un système anticorrosion). Dans la même optique, il serait pertinent d'envisager l'emploi d'armatures passives d'aciers inox dans la dalle de béton armé pour 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 à la maintenance.

De manière générale, l'application de l'analyse de cycle de vie à différentes familles d'ouvrages dans différents contextes d'utilisation, représente un enjeu très fort pour permettre de dégager des solutions optimales de dimensionnement et de gestion. Une application de la méthodologie à des ouvrages existants, pour chercher à optimiser les stratégies de surveillance et de maintenance à titre préventif, représente également un champ d'investigation à fort potentiel. Au terme de cette étude, la démarche proposée permet d'appréhender la gestion des ouvrages de leur construction jusqu'à leur démolition et valorisation des déchets, en passant par leur maintenance, réparation, réhabilitation rénovation, voire leur extension de durée d'usage. En particulier, comment appliquer la démarche à un réseau voire un patrimoine d'ouvrages, représente une question cruciale pour des gestionnaires qui gèrent à la fois un patrimoine d'ouvrages existants et des projets neufs de construction.

BIBLIOGRAPHIE

Abrams, C. M. et Wang, J. (1981). *Planning and scheduling work zone traffic control*. US Government Printing Office. (cité à la page 22.)

Adey, B. (2002). *A supply and demande system approach to the development of bridge management strategies*. Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne. (cité à la page 21.)

Adey, B., Hajdin, R. et Brühwiler, E. (2003). Supply and demand system approach to development of bridge management strategies. *Journal of infrastructure systems*, 9(3):117–131. (cité à la page 21.)

AFNOR (2004). NF P01-010. (cité aux pages 4, 13, 26, 40 et 61.)

AFNOR (2005). NF EN 10025-5 Produits laminés à chaud en aciers de construction. Partie 5 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique. (cité aux pages 33 et 75.)

AFNOR (2012). NF EN 15978 Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la performance environnementale des batiments - Méthode de calcul. (cité à la page 21.)

Arditi, D. et Messiha, H. (1999). Life cycle cost analysis (lcca) in municipal organizations. *Journal of infrastructure systems*, 5(1):1–10. (cité à la page 11.)

Benekohal, R., Ramezani, H. et Avrenli, K. (2010). Queue and user's costs in highway work zones. *Urbana*, 51:61801. (cité à la page 24.)

Berbain, A., Corfdir, P. et Kretz, T. (1996). Etude des montants des cadres d'entretoisement des bipoutres a entretoises. *Bulletin Ponts Metalliques*, (18). (cité à la page 214.)

BERTHOLD (2012). Construction costs of steel girders. SBRI-Document No : SBRI-IFSTTAR-004-UnitCostSteel. Paris. France. (cité aux pages 47 et 75.)

Biondini, F. et Frangopol, D. (2012). *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability : Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8-12 July*. CRC Press. (cité à la page 13.)

Black, M., Brint, A. et Brailsford, J. (2005). A semi-markov approach for modelling asset deterioration. *Journal of the Operational Research Society*, 56(11):1241–1249. (cité à la page 140.)

Boudrand, P. (2011). Indices - index - comment actualiser ou réviser les prix d'un marché. *Le Moniteur*. (cité à la page 46.)

Bouhaya, L., Le Roy, R. et Feraille-Fresnet, A. (2009). Simplified environmental study on innovative bridge structure. *Environmental science & technology*, 43(6):2066–71. (cité à la page 17.)

Brans, J. et Vincke, P. (1985). Note - a preference ranking organisation method (the promethee method for multiple criteria decision-making). *Management science*, 31(6): 647–656. (cité à la page 116.)

BRISA (2012a). Bridge inspection strategies. SBRI-Document No : SBRI-BRISA-001-BridgeInspectionStrategies. Portugal. (cité à la page 40.)

BRISA (2012b). Bridge maintenance strategies. SBRI-Document No : SBRI-BRISA-001-BridgeMaintenanceStrategies. Portugal. (cité à la page 41.)

BRISA (2012c). Design of case b0.2. SBRI-Document No : SBRI-BRISA-003-CaseB0.2. Portugal. (cité aux pages 33 et 249.)

BRISA (2012d). Design of case b0.3. SBRI-Document No : SBRI-BRISA-004-CaseB0.3. Portugal. (cité aux pages 34 et 249.)

Brundtland, G. (1987). *Report of the World Commission on environment and development :"hour common future"*. United Nations. (cité à la page 2.)

Burley, E. et Rigden, S. (1997). The use of life cycle costing in assessing alternative bridge design. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal engineer*, volume 121, pages 22–27. Institution of Civil Engineers. (cité à la page 9.)

Calgaro, J. (2000). Projet et contruction des ponts : Généralités, fondations, appuis, ouvrages courants. (cité aux pages 214 et 215.)

Camahan, J., Davis, W., Shahin, M., Keane, P. et Wu, M. (1987). Optimal maintenance decisions for pavement management. *Journal of Transportation Engineering*, 113(5):554–572. (cité à la page 139.)

Champenoy, D. (2010). Conception générale et détaillée des ponts mixtes. *In Journée technique des Ouvrages d'Art 24 Avril*. (cité à la page 210.)

Chandana Wirasinghe, S. (1978). Determination of traffic delays from shock-wave analysis. *Transportation Research*, 12(5):343–348. (cité à la page 22.)

Chevalier, J. et Peuportier, B. (2012). Life cycle assessment methodologies in the construction sector : From research to current application. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 21.)

Christer, A. (1999). Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, pages 1120–1137. (cité à la page 140.)

Chung, H., Manuel, L. et Frank, K. (2003). Optimal inspection scheduling with alternative fatigue reliability formulations for steel bridges. *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering : proceedings of ICASP2003, San Francisco*. (cité à la page 139.)

Chung, H., Manuel, L. et Frank, K. (2006). Optimal inspection scheduling of steel bridges using nondestructive testing techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 11(3): 305–319. (cité à la page 139.)

Cinlar, E., Osman, E. et Bazant, Z. (1977). Stochastic process for extrapolating concrete creep. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103(6):1069–1088. (cité à la page 140.)

Circulaire (1985). Circulaire du 26 septembre 1985 relative à l'utilisation d'aciers dits autopatinables. (cité à la page 75.)

Cole, R. (1998). Emerging trends in building environmental assessment methods. *Building Research & Information*, 26(1):3–16. (cité à la page 21.)

Collings, D. (2006). An environmental comparison of bridge forms. *Proceedings of the ICE-Bridge Engineering*, 159(4):163–168. (cité à la page 17.)

Collura, J., Heaslip, K., Moriarty, K., Wu, F., Khanta, R. et Berthaume, A. (2010). Using simulation models to assess the impacts of highway work zone strategies : Case studies along interstate highways and state routes in new england. *Transportation Research Record : The Journal of the Transportation Research Board*, 2169:62. (cité à la page 24.)

Consoli, F. (1993). *Guidelines for life-cycle assessment : a code of practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. (cité à la page 12.)

Copeland, L. (1998). *User's Manual for QUEWZ-98*. Texas Transportation Institute, the Texas A & M University System. (cité à la page 24.)

Cremona, C. (2003). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées. (cité à la page 138.)

Cremona, C. (2005). Sécurité structurale des ouvrages, module maintenance, pathologie et réparation des constructions. (cité à la page 138.)

Cremona, C. (2011). *Performance-Based Assessment*. Wiley Online Library. (cité aux pages 10 et 136.)

Czarnecki, A. et Nowak, A. (2008). Time-variant reliability profiles for steel girder bridges. *Structural Safety*, 30(1):49–64. (cité à la page 139.)

Darwin, C. (1859). On the origin of the species by natural selection. (cité aux pages 149 et 243.)

de Normalisation, C. E. (2002). Eurocode 1990 : Bases de calcul des structures. *EN*, 1. (cité à la page 38.)

Deb, K. (1999). Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization in engineering design. *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*, 2:135–161. (cité aux pages 150 et 245.)

Deb, K. (2001). Multi-objective optimization. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, pages 13–46. (cité à la page 150.)

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. et Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : Nsga-ii. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2):182–197. (cité aux pages 150 et 245.)

DeStefano, P. et Grivas, D. (1998). Method for estimating transition probability in bridge deterioration models. *Journal of Infrastructure Systems*, 4(2):56–62. (cité à la page 139.)

Dieulle, L., Bérenguer, C., Grall, A. et Roussignol, M. (2003). Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system. *European Journal of operational research*, 150(2):451–461. (cité à la page 140.)

d'information sur le ciment et ses applications, C. (2010). *Analyse du cycle de vie d'un pont en béton : exemple d'application pour un pont courant*. Collection technique CIMBÉTON. CIMBéton. (cité aux pages 17 et 38.)

Dogaki, M., Furuta, H., Tsukiyama, I. et Frangopol, D. (2000). Optimal maintenance planning of reinforced concrete decks on highway network. *In Conference Proceedings, US-Japan Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, ASCE, Honolulu, Hawaii*. (cité à la page 150.)

Doumpos, M., Kosmidou, K., Baourakis, G. et Zopounidis, C. (2002). Credit risk assessment using a multicriteria hierarchical discrimination approach : A comparative analysis. *European Journal of Operational Research*, 138(2):392–412. (cité à la page 115.)

Dréo, J., Péreowski, A., Siarry, P. et Taillard, E. (2003). Métaheuristiques pour l'optimisation difficile : Recuit simulé, recherche avec tabou, algorithmes évolutionnaires et génétiques, colonies de fourmis. *Editions Eyrolles*. (cité à la page 243.)

Du, G. et Karoumi, R. (2012). Life cycle assessment framework for railway bridges : literature survey and critical issues. *Structure and Infrastructure Engineering*, (ahead-of-print):1–18. (cité aux pages 20, 123 et 190.)

Dudek, C. et Richards, S. (1982). Traffic capacity through urban freeway work zones in texas. *Transportation Research Record*, (869). (cité à la page 22.)

Ellis, H., Jiang, M. et Corotis, R. (1995). Inspection, maintenance, and repair with partial observability. *Journal of Infrastructure Systems*, 1(2):92–99. (cité à la page 139.)

Erickson, M., Mayer, A. et Horn, J. (2001). The niched pareto genetic algorithm 2 applied to the design of groundwater remediation systems. *In Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pages 681–695. Springer. (cité à la page 245.)

Eriksen, J. (2009). Bro utan lager vinnare när miljöanalys görs. (cité à la page 20.)

Estes, A. et Frangopol, D. (1999). Repair optimization of highway bridges using system reliability approach. *Journal of Structural Engineering*, 125:766–775. (cité à la page 11.)

Européennes, C. (2011). *Livre blanc sur les transports : feuille de route pour un espace européen unique des transports, vers un système de transport compétitif et économe en ressources*. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes. (cité à la page 1.)

Eurostat (2010). Eurostat. (cité à la page 1.)

FCTUC (2012). Lifecycle environmental analysis - results of case study b2. SBRI-Document No : SBRI-FCTUC-008-LCAResultsCaseB2. Coimbra. Portugal. (cité aux pages 54, 61, 62, 64, 242 et 250.)

Ferry, D. et Flanagan, R. (1991). *Life cycle costing : A radical approach*. Construction Industry Research and Information Association, London, UK. (cité à la page 11.)

Frangopol, D., Kong, J. et Gharaibeh, E. (2001). Reliability-based life-cycle management of highway bridges. *Journal of computing in civil engineering*, 15(1):27–34. (cité à la page 9.)

Frangopol, D., Lin, K. et Estes, A. (1997). Life-cycle cost design of deteriorating structures. *Journal of Structural Engineering*, 123(10):1390–1401. (cité à la page 139.)

Frischknecht, R., Bollens, U., Bosshart, S., Ciot, M., Ciseri, L., Doka, G., Hischier, R., Martin, A., Dones, R. et Ganter, U. (1996). Ökoinventare von energiesystemen (lcis of energy systems). *Swiss Federal Office of Energy, Bern,*. (cité aux pages 237 et 238.)

Frischknecht, R. et Jungbluth, N. (2007). Simapro 7 database manual : The eth-esu 96 libraries. *Pre Consultants & ESU Services. http ://www. pre. nl/download/manuals/DatabaseManualETH-ESU96. pdf*, 25. (cité à la page 15.)

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H., Doka, G., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M. *et al.* (2007). Overview and methodology. *Ecoinvent Rep*, 1. (cité à la page 237.)

Furuta, H. et Kameda, Tand Frangopol, D. (2006). Life-cycle cost design using improved multi-objective genetic algorithm. *In Structures Congress 2006@ s17th Analysis and Computation Specialty Conference*, pages 1–14. ASCE. (cité à la page 150.)

García San Martín, L. (2011). *Life Cycle Assessment of Railway Bridges : Developing a LCA tool for evaluating Railway Bridges*. Thèse de doctorat, KTH. (cité à la page 17.)

Gervásio, H. et da Silva, L. (2008). Comparative life-cycle analysis of steel-concrete composite bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 4(4):251–269. (cité aux pages 11 et 18.)

Gervasio, H., da Silva, L., Perdigao, V., Barros, P., Orcesi, A. et Nielsen, K. (2012). Lifecycle analysis of highway composite bridges. *In Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, July 8-12*. (cité à la page 13.)

Golabi, K. et Shepard, R. (1997). Pontis : A system for maintenance optimization and improvement of us bridge networks. *Interfaces*, 27(1):71–88. (cité à la page 139.)

Goldberg, D. et Holland, J. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99. (cité à la page 149.)

Gomes, F., Feraille, A., Habert, G. et Tessier, C. (2012). Environmental evaluation of steel plates and steel sections sold on the french market. *In Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems : Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Hofburg Palace, Vienna, Austria, October 3-6*, page 367. CRC Press. (cité aux pages 54, 55, 56 et 253.)

Grierson, D. et Pak, W. (1993). Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithm. *Structural Optimization*, 6(3):151–159. (cité à la page 150.)

Guinée, J. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the iso standards. *The international journal of life cycle assessment*, 7(5):311–313. (cité aux pages 25, 239 et 241.)

Guinee, J. (2012). Life Cycle Assessment : Past, Present, and Future. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 16.)

Guinée, J. et Heijungs, R. (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. *Environmental toxicology and chemistry*, 14(5):917–925. (cité à la page 237.)

Guinee, J., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T. et Rydberg, T. (2010). Life cycle assessment : Past, present, and future. *Environmental science & technology*, 45(1):90–96. (cité aux pages 12 et 16.)

Gürler, Ü. et Kaya, A. (2002). A maintenance policy for a system with multi-state components : an approximate solution. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(2): 117–127. (cité à la page 139.)

Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L. et Le Roy, R. (2012). Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete : quantification of the improvement to concrete bridges. *Journal of Cleaner Production*, 35:250–262. (cité à la page 19.)

Habert, G., Tardivel, Y. et Tessier, C. (2011). Diogen : Base de données d'impacts environnementaux des matériaux pour les ouvrages de génie civil. *In Journées techniques GC'11, Cachan, France, Mars 22-23*. (cité à la page 15.)

Haensel, J. (1998). Composite Bridge Design : The Reanimation of Steel Bridge Construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 46(44):54–55. (cité à la page 11.)

Hammami, A. (2003). *Modélisation technicoéconomique d'une chaine logistique dans une entreprise réseau*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. (cité à la page 117.)

Hammervold, J., Reenaas, M. et Brattebø, H. (2011). Environmental Life Cycle Assessment of Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, page 225. (cité à la page 19.)

Hawk, H. (1999). Bridgit : user-friendly approach to bridge management. *Transportation Research Circular*, 498(1). (cité à la page 139.)

Henriksen, C., Ladefoged, L. et Thaulow, N. (1996). Concrete specifications for new bridges. *In Bridge management 3. inspection, maintenance and repair. papers presented at the Third International Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guildford, UK, 14-17 April 1996*. (cité à la page 11.)

Hirt, M., Bez, R. et Nussbaumer, A. (2006). *Construction métallique : notions fondamentales et méthodes de dimensionnement*, volume 10. PPUR presses polytechniques. (cité à la page 214.)

Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.* U Michigan Press. (cité à la page 149.)

Hontelez, J., Burger, H. et Wijnmalen, J. (1996). Optimum condition-based maintenance policies for deteriorating systems with partial information. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3):267–274. (cité à la page 139.)

HORN, J., NAFPLIOTIS, N. et GOLDBERG, D. (1994). A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *In Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on*, pages 82–87. Ieee. (cité à la page 245.)

HORVATH, A. et HENDRICKSON, C. (1998). Steel versus steel-reinforced concrete bridges : Environmental assessment. *Journal of Infrastructure Systems*, (September):111–117. (cité à la page 17.)

HYVÖNEN, T. (2003). Management accounting and information systems : Rep versus bob. *European Accounting Review*, 12(1):155–173. (cité à la page 11.)

IFSTTAR (2012). Lifecycle cost analysis - results of cases studies a. SBRI-Document No : SBRI-IFSTTAR-001-LCCResultsCaseA. Paris. France. (cité à la page 66.)

ISO (2006a). 14040 environmental management-life cycle assessment-principles and framework. *International Organization for Standardization*. (cité aux pages 13, 26 et 249.)

ISO (2006b). 14044 environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. *International Organization for Standardization*. (cité à la page 26.)

ISO (2007). 21930 : Environmental declaration of building products. *International Organization for Standardization*. (cité à la page 13.)

ISO (2008a). 15392, sustainability in building construction–general principles. *International Organization for Standardization*. (cité à la page 13.)

ISO (2008b). Standardized method of life cycle costing for construction (iso 15686-5). (cité aux pages 7, 8, 9, 10 et 249.)

ISO (2010). 21931 - framework for methods for assessment of environmental performance of construction works–part 1–buildings. *International Organization for Standardization*. (cité à la page 13.)

ITOH, Y. et KITAGAWA, T. (2003). Using CO2 emission quantities in bridge lifecycle analysis. *Engineering Structures*, 25(5):565–577. (cité aux pages 11 et 18.)

ITSEOA (2010). Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. (cité à la page 40.)

JACQUET-LAGRÈZE, E. (1995). An application of the uta discriminant model for the evaluation of r & d projects. pages 203–211. (cité à la page 115.)

JACQUET-LAGRÈZE, E. et SISKOS, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the uta method. *European journal of operational research*, 10(2):151–164. (cité à la page 115.)

JANSON, B., ANDERSON, R. et STERNE, R. (1989). Managing transportation during highway reconstruction : A recommended process. *Transportation*, 16(1):47–79. (cité à la page 25.)

JENKINS, W. (1991). Towards structural optimization via the genetic algorithm. *Computers & Structures*, 40(5):1321–1327. (cité à la page 150.)

Jiang, M., Corotis, R. et Ellis, J. (2000). Optimal life-cycle costing with partial observability. *Journal of infrastructure systems*, 6(2):56–66. (cité à la page 139.)

Jutila, A. et Sundquist, H. (2007). Etsi project (stage 1) : Bridge life cycle optimization. (cité à la page 11.)

Keeney, R. (1993). *Decisions with multiple objectives : preferences and value trade-offs*. Cambridge University Press. (cité à la page 115.)

Kendall, A., Keoleian, G. et Helfand, G. (2008). Integrated life-cycle assessment and life-cycle cost analysis model for concrete bridge deck applications. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(3):214–222. (cité à la page 19.)

Kleiner, Y. (2001). Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets. *Journal of Infrastructure Systems*, 7(4):136–143. (cité à la page 140.)

Kohler, N. (2012). Life Cycle Assessment of Buildings. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 21.)

Kong, M. et Park, K. (1997). Optimal replacement of an item subject to cumulative damage under periodic inspections. *Microelectronics Reliability*, 37(3):467–472. (cité à la page 140.)

Krammes, R., Ullman, G., Memmott, J. et Dudek, C. (1993). *User's Manual for QUEWZ-92*. (cité à la page 24.)

Kretz, T. (2012). Les ponts intégraux et semi-intégraux. *In Club des ouvrages d'art - Innovation et ouvrage d'art. 24 Janvier*. (cité à la page 34.)

Kuhlmann, U., Braun, B., Detzel, A., Feldmann, M., Naumes, J., Oppe, M., Galéa, Y., Martin, P., Raoul, J., Davaine, L. *et al.* (2007). Competitive steel and composite bridges by improved steel plated structures (combri). final report. Rapport technique, RFS-CR-03018, European Commission-Research Fund for Coal and Steel. (cité à la page 19.)

Lai, Y., Liu, T. et Hwang, C. (1994). Topsis for modm. *European Journal of Operational Research*, 76(3):486–500. (cité à la page 116.)

Landolfo, R. (2012). Sustainable design of structures : The outcomes of the cost action c25-wg3. *In Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems : Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Hofburg Palace, Vienna, Austria, October 3-6, 2012*, page 67. CRC Press. (cité aux pages 1 et 17.)

Lasvaux, S., Schiopu, N., Peuportier, B. et Chevalier, J. (2012). Relevance of a French simplified life cycle inventory database using building products industry data. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 15.)

Leeming, M. (1993). The application of life cycle costing to bridges. *In Bridge management 2 : inspection, maintenance assessment and repair. papers presented at the Second International Conference on Bridge Management held 18-21 April 1993, University of Surrey, Guildford*. (cité à la page 11.)

Lemoine, B. (1991). Fer et beton en france (1850–1920). *History and Technology, an International Journal*, 7(3-4):267–278. (cité à la page 211.)

Lemoine, B. et Landowski, M. (2012). *Concevoir et construire en acier*. Editions Eyrolles. (cité aux pages 211 et 214.)

Lerman, I. et Ngouenet, R. (1995). Algorithmes génétiques séquentiels et parallèles pour une représentation affine des proximités. (cité à la page 149.)

Lescouarc'h (2006). Construction métallique - conception des structures de batiments. *Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*. (cité aux pages 211 et 215.)

Liffraud, M., Mazars, A., Crauzzo, G., Hauchard, G. et Lascroux, L. (2011). Projet sudoe-tracc techniques innovantes de mélanges bitumineux à froid à empreinte environnementale réduite. *RGRA-Revue Generale des Routes et des Aerodromes*, (896):64. (cité à la page 15.)

Lindholm, A. et Suomala, P. (2007). Learning by costing : sharpening cost image through life cycle costing ? *International journal of productivity and performance management*, 56(8):651–672. (cité à la page 11.)

Liu, C., Hammad, A. et Itoh, Y. (1997). Multiobjective optimization of bridge deck rehabilitation using a genetic algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 12(6):431–443. (cité à la page 150.)

Liu, M. et Frangopol, D. (2006). Optimizing bridge network maintenance management under uncertainty with conflicting criteria : Life-cycle maintenance, failure, and user costs. *Journal of Structural Engineering*, 132(11):1835–1845. (cité à la page 150.)

Lounis, Z. et Daigle, L. (2010). Towards sustainable design of highway bridges. *National Research Council of Canada*, ""(July):1–7. (cité à la page 18.)

Luong, H. et Nagarur, N. (2001). Optimal replacement policy for single pipes in water distribution networks. *Water resources research*, 37(12):3285–3293. (cité à la page 140.)

Madanat, S., Mishalani, R. et Ibrahim, W. (1995). Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data. *Journal of infrastructure systems*, 1(2):120–125. (cité à la page 139.)

Maier, P., Kuhlmann, U., Popa, N. et Willms, R. (2012). Optimizing bridge design by improved deterioration models through fatigue tests. *In Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, July 8-12*. (cité aux pages 13 et 93.)

Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E. et Díaz, S. (2011). Life cycle assessment in buildings : The enslic simplified method and guidelines. *Energy*, 36(4):1900–1907. (cité à la page 21.)

Manual, H. C. (1994). Trb special report 209. *National Research Council, Washington, DC*. (cité aux pages 22 et 23.)

Marceau, M., Nisbet, M. et Van Geem, M. (2007). *Life cycle inventory of portland cement concrete*. Portland Cement Association. (cité aux pages 55, 56, 58 et 253.)

Markov, A. (1907). Investigation of a noteworthy case of dependent trials. *Izv Akad Nauk Ser Biol*, 1. (cité à la page 139.)

Markow, M., Madanat, S. et Gurenich, D. (1993). Optimal rehabilitation times for concrete bridge decks. *Transportation Research Record*, (1392). (cité à la page 11.)

Martin, A. (2004). Concrete bridges in sustainable development. *Proceedings of the ICE-Engineering Sustainability*, 157(4):219–230. (cité à la page 18.)

McCasland, W. (1983). Impact of using freeway shoulders as travel lanes on fuel consumption. Rapport technique. (cité à la page 25.)

Memmott, J. et Dudek, C. (1982). *A model to calculate the road user costs at work zones*, volume 292. Texas Transportation Institute, Texas A&M University. (cité à la page 24.)

Mieras, H. (1986). Traffic impacts of bridge resurfacing on northbound interstate 5 through seattle. *ITE Journal*, 56(3):29–31. (cité à la page 25.)

Mishalani, R. et Madanat, S. (2002). Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models. *Journal of Infrastructure Systems*, 8(4):139–148. (cité à la page 139.)

Miyamoto, A., Kawamura, K. et Nakamura, H. (2000). Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(1):45–55. (cité à la page 150.)

Molzer, C., Litzka, J., Breyer, G. et Felsenstein, K. (1998). Implementation of pms for the austrian federal road network. *In Proceedings of the 4th Int. Conference on Managing Pavements, Durban, SA*. (cité à la page 138.)

Morales, J. (1987). Analytical procedures for estimating freeway traffic congestion. *ITE J.;(United States)*, 57(1). (cité à la page 22.)

Morel, J. (2012). L'état de l'art de l'acier autopatinable. *In Forum Interoutes et Villes, 15 Mars*. (cité à la page 33.)

Nesbit, D., Sparks, G. et Neudorf, R. (1993). A semi-markov formulation of the pavement maintenance optimization problem. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3):436–447. (cité à la page 139.)

Neves, L., Frangopol, D. et Petcherdchoo, A. (2006). Probabilistic lifetime-oriented multiobjective optimization of bridge maintenance : Combination of maintenance types. *Journal of Structural Engineering*, 132(11):1821–1834. (cité à la page 150.)

Nowak, A., Park, C. et Szerszen, M. (1998). Lifetime reliability profiles for steel girder bridges. *In Optimal performance of civil infrastructure systems*, pages 139–154. ASCE. (cité à la page 139.)

Orcesi, A. (2008). *Etude de la performance des réseaux d'ouvrages d'art et détermination des stratégies de gestion optimales*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. (cité à la page 245.)

Orcesi, A. et Cremona, C. (2009). Optimization of management strategies applied to the national reinforced concrete bridge stock in france. *Structure and Infrastructure Engineering*, 5(5):355–366. (cité à la page 143.)

Orcesi, A. et Cremona, C. (2010a). A bridge network maintenance framework for pareto optimization of stakeholders/users costs. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11):1230–1243. (cité à la page 150.)

Orcesi, A. et Cremona, C. (2010b). Optimization of maintenance strategies for the management of the national bridge stock in france. *Journal of Bridge Engineering*, 16(1):44–52. (cité à la page 143.)

Orcesi, A. et Cremona, C. (2011). Optimal maintenance strategies for bridge networks using the supply and demand approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(10):765–781. (cité à la page 150.)

Orcesi, A., Ta, N., Tardivel, Y., Henry, N., Cremona, C. et Champenoy, D. (2013). Etude de la conception des ponts mixtes acier-béton dans le cadre d'une analyse de cycle de vie - synthèse du projet sbri. *In Proceedings of GC'2013, Cachan, France*. (cité à la page 35.)

Ozbay, K., Jawad, D., Parker, N. et Hussain, S. (2004). Life-cycle cost analysis : State of the practice versus state of the art. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1864(1):62–70. (cité à la page 9.)

Pachauri, R. et Reisinger, A. (2008). Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse. rapport giec, genève, suisse, 103 p. (cité aux pages 1 et 239.)

Peuportier, B. (2008). *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. Presses des Mines. (cité à la page 238.)

Peuportier, B., Herfray, G., Malmqvist, T., Zabalza, I., Staller, H., Tritthart, W., Wetzel, C. et Szalay, Z. (2011). Life cycle assessment methodologies in the construction sector : the contribution of the european lore-lca project. *In Sustainable Building Conference, Helsinki*. (cité à la page 21.)

Peuportier, B., Kohler, N. et Boonstra, C. (1997). Regener. *European methodology for evaluation of environmental impact of buildings. Life cycle assessment. REGENER project, summary report, European.Commission directorate general XII for science, research and development,Program APAS*. (cité à la page 21.)

Peuportier, B., Putzeys, K., Anink, D., Hildegund, M., Anderson, J., Vares, S. *et al.* (2005). Inter-comparison and benchmarking of lca-based environmental assessment and design tools–final report. *Published by : The European Thematic Network on Practical Recommendations for Sustainable Construction (PRESCO)*. (cité à la page 21.)

Peuportier, B., Vorger, E. et Harfray, G. (2012). LCA application in urban design. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 21.)

PIARC (2012). Gestion des ponts en service. Rapport technique, World Road Association. (cité à la page 1.)

Polster, B. (1995). *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines. (cité à la page 238.)

Rajeev, S. et Krishnamoorthy, C. (1992). Discrete optimization of structures using genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, 118(5):1233–1250. (cité à la page 150.)

Ren, L., Zhang, Y., Wang, Y. et Sun, Z. (2007). Comparative analysis of a novel m-topsis method and topsis. *Applied Mathematics Research eXpress*. (cité aux pages 116 et 139.)

Renner, G. et Ekárt, A. (2003). Genetic algorithms in computer aided design. *Computer-Aided Design*, 35(8):709–726. (cité à la page 150.)

Richards, P. (1956). Shock waves on the highway. *Operations research*, 4(1):42–51. (cité à la page 22.)

Rivallain, M. (2013). *Etude de l'aide à la décision par optimisation multicrit ère des programmes de réhabilitation énergétique sequentielle des batiments existants*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. (cité aux pages 237, 238, 239, 240, 241 et 243.)

Rivallain, M., Leger, P., Baverel, O. et Peuportier, B. (2012). Decision aiding & multi criteria optimization for existing buildings holistic retrofit. *In Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems : Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Hofburg Palace, Vienna, Austria, October 3-6, 2012*, page 239. CRC Press. (cité à la page 150.)

Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, 2(V1):57–75. (cité à la page 115.)

Roy, B. (1987). *Des critères multiples en recherche operationnelle : pourquoi ?* Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision, Université Paris-Dauphine. (cité à la page 115.)

Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and decision*, 31(1):49–73. (cité à la page 115.)

Roy, B. et et Bouyssou D (1993). Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas. *Economica, Paris*. (cité à la page 115.)

Sahab, M., Ashour, A. et Toropov, V. (2005). A hybrid genetic algorithm for reinforced concrete flat slab buildings. *Computers & structures*, 83(8):551–559. (cité à la page 150.)

SBRI (2013a). Final report. SBRI-Document No : SBRI-ALL-007-FinalReport. (cité aux pages 24, 29, 34, 46, 61, 62, 64, 109, 249 et 250.)

SBRI (2013b). Handbook. SBRI-Document No : SBRI-ALL-005-Handbook. (cité aux pages 33, 34 et 249.)

Schaffer, J. (1985). Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms. Rapport technique, Vanderbilt Univ., Nashville, TN (USA). (cité à la page 245.)

Scherer, W. et Glagola, D. (1994). Markovian models for bridge maintenance management. *Journal of Transportation Engineering*, 120(1):37–51. (cité à la page 139.)

Schonfeld, P. et Chien, S. (1999). Optimal work zone lengths for two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering*, 125(1):21–29. (cité à la page 22.)

SETRA (2009). Design of case a0. SBRI-Document No : SBRI-SETRA-001-CaseA0. France. (cité à la page 33.)

SETRA (2010a). Design of case a1. SBRI-Document No : SBRI-SETRA-002-CaseA1. France. (cité à la page 33.)

SETRA (2010b). Indice tp en france jusqu'à 2011. SBRI-Document No : SBRI-SETRA-012-IndiceTP. France. (cité à la page 46.)

SETRA (2011). Doublement du pont sur le cher. Rapport technique. (cité aux pages 54, 56, 59 et 253.)

SETRA (2012). Design of case a2. SBRI-Document No : SBRI-SETRA-003-CaseA2. France. (cité à la page 33.)

SETRA (2013). Valorisation du patrimoine routier national - Coût de remise en état des ouvrages d'art. Rapport technique. (cité à la page 1.)

Siemes, A., van den Beukel, A. et Vrouwenvelder, A. (1985). *Durability of Buildings : Reliability Analysis*. Inst. TNO for Building Materials and Buildings Structures. (cité à la page 9.)

Simoes, L. et Negrao, J. (1994). Sizing and geometry optimization of cable-stayed bridges. *Computers & structures*, 52(2):309–321. (cité à la page 150.)

Sommer, A., Nowak, A. et Thoft-Christensen, P. (1993). Probability-based bridge inspection strategy. *Journal of Structural Engineering*, 119(12):3520–3536. (cité à la page 139.)

Steele, K., Cole, G., Parke, G., Clarke, B. et Harding, J. (2002). The application of life cycle assessment technique in the investigation of brick arch highway bridges. *In Proc., Conf. for the Engineering Doctorate in Environmental Technology*. (cité à la page 16.)

Sterner, E. (2000). Life-cycle costing and its use in the swedish building sector. *Building Research & Information*, 28(5-6):387–393. (cité à la page 11.)

Stewart, M. (2001). Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses. *Reliability Engineering & System Safety*, 74(3):263–273. (cité à la page 138.)

Strauss, A., Frangopol, D. et Bergmeister, K. (2012). *Life-cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems : Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Hofburg Palace, Vienna, Austria, October 3-6*. CRC Press. (cité à la page 13.)

Ta, N., Orcesi, A. et Cremona, C. (2012). A comparative life-cycle cost analysis of steel-concrete composite bridges. *In Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems : Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Hofburg Palace, Vienna, Austria, October 3-6,*, page 169. CRC Press. (cité à la page 66.)

Ta, N., Orcesi, A. et Cremona, C. (2013). A holistic approach for analyzing bridges crossing a highway. *In Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety & Reliability, Columbia University, New York, USA, June 16-20,*. CRC Press. (cité à la page 149.)

Ta, N., Orcesi, A., Tardivel, Y., Robert, N. et Cremona, C. (2011). Projet européen sbri - sustainable steel-composite bridges in built environment. *In Proceedings of GC'2011, Cachan, France*. (cité à la page 35.)

Tao, Z., Corotis, R. et Ellis, J. (1995). Reliability-based structural design with markov decision processes. *Journal of Structural Engineering*, 121(6):971–980. (cité à la page 139.)

Tardivel, Y. (2012). Présentation du groupe de travail DIOGEN (AFGC). *In Demi-journée technique DIOGEN, Paris, 27 Septembre*. (cité à la page 15.)

Tessier, C. (2010). Typelogie des structures métalliques - evolution des matériaux et des techniques. *Formation continue de l'Écoles des Ponts Paris Tech*. (cité aux pages 212 et 214.)

Thiebault, V. (2010). *Design of railway bridges considering LCA*. Thèse de doctorat, KTH. (cité à la page 20.)

Thomas, O. et Sobanjo, J. (2012). Comparison of markov chain and semi-markov models for crack deterioration on flexible pavements. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(2):186–195. (cité à la page 140.)

Thompson, P., Najafi, F., Soares, R. et Kerr, R. (1999). Development of pontis user cost models for florida. *In Eighth International Bridge Management Conference, Transportation Research Board, Denver, Colorado*. (cité à la page 22.)

Tremblay, M., Thébeau, D. et Collette, R. (2012). Integrating LCA in the decision-making process for the choice of flexible or rigid pavement : the MTQ experience. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 20.)

Troive, S. (1999). Optimisation of lcc of concrete bridges. *Nordic concrete research publications*, 22:117–128. (cité à la page 9.)

Van Noortwijk, J. (1998). Optimal replacement decisions for structures under stochastic deterioration. *In Proceedings of the Eighth IFIP WG*, volume 7, pages 273–280. Citeseer. (cité à la page 140.)

VanNoortwijk, J. (2003). Explicit formulas for the variance of discounted life-cycle cost. *Reliability Engineering & System Safety*, 80(2):185–195. (cité à la page 140.)

Ventura, A. (2012). Introduction to the symposium : Life Cycle Assessment , in-between Research , standards , regulations and application. *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 13.)

Ventura, A., Idir, R., Marceau, S., Van Schoors, L. et Van der Werf, H. (2012). How to use lca to assess materials as eco-design parameters in construction projects ? *In International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction July 10-12, Nantes, France*, pages 7–8. (cité à la page 13.)

Veshosky, D. et Beidleman, C. (1992). Life-cycle cost analysis does not work for bridges. *Civil Engineering ASCE*, 62(7). (cité à la page 9.)

Vorster, M., Bafna, T. et Weyers, R. (1991). Model for determining the optimum rehabilitation cycle for concrete bridge decks. *Transportation Research Record*, (1319). (cité à la page 11.)

White, G. et Ostwald, P. (1976). Life cycle costing. *Management accounting*, 57(7):39–42. (cité à la page 10.)

Widman, J. (1998). Environmental impact assessment of steel bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 46(1):291–293. (cité à la page 18.)

Woodward, D. (1997). Life cycle costing : theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6):335–344. (cité aux pages 7, 10 et 11.)

Yang, J. et Soh, C. (1997). Structural optimization by genetic algorithms with tournament selection. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11(3):195–200. (cité à la page 150.)

Yang, R. (1997). Multidiscipline topology optimization. *Computers & Structures*, 63(6): 1205–1212. (cité à la page 150.)

Yunovich, M. et Thompson, N. (2003). Corrosion of highway bridges : Economic impact and control methodologies. *Concrete International Detroit*, 25(1):52–58. (cité à la page 11.)

Zayed, T., Chang, L. et Fricker, J. (2002). Statewide performance function for steel bridge protection systems. *Journal of performance of constructed facilities*, 16(2):46–54. (cité à la page 139.)

Zhang, C., Lin, W., Abududdin, M. et Canning, L. (2012). Environmental evaluation of frp in uk highway bridge deck replacement applications based on a comparative lca study. *Advanced Materials Research*, 374:43–48. (cité à la page 18.)

Zhao, Z., Haldar, A. et Breen Jr, F. (1994). Fatigue-reliability evaluation of steel bridges. *Journal of Structural Engineering*, 120(5):1608–1623. (cité à la page 139.)

Zopounidis, C. et Doumpos, M. (2000). Building additive utilities for multi-group hierarchical discrimination : the mhdis method. *Optimization Methods and Software*, 14(3):219–240. (cité à la page 115.)

A

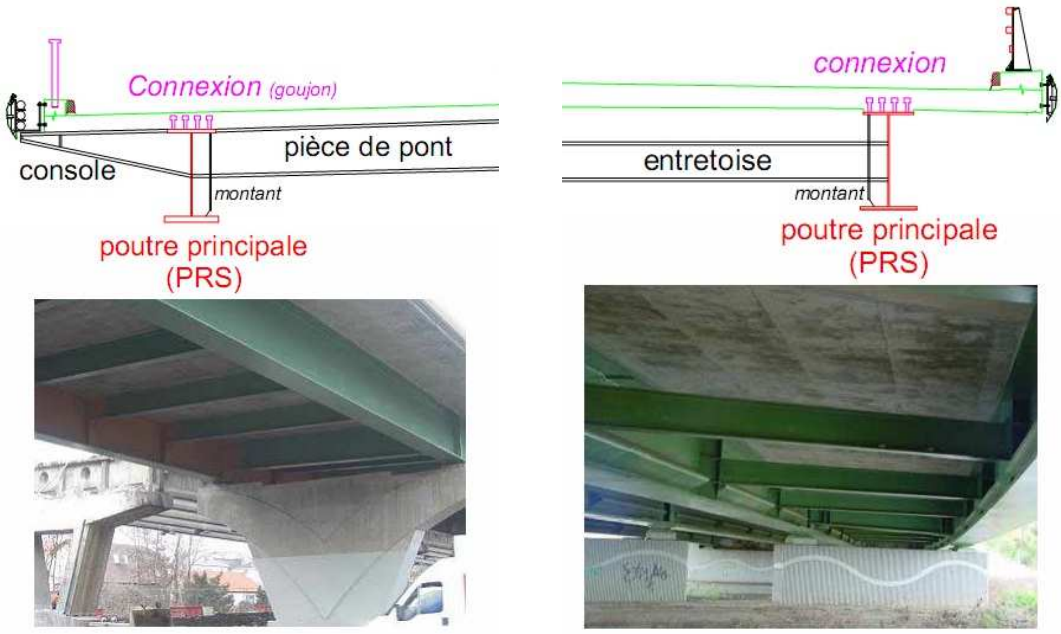
PONTS MIXTES : TYPOLOGIE ET HISTORIQUE

A.1 TYPES DE PONTS MIXTES

Un pont mixte acier/béton comporte des éléments structurels en acier et en béton armé ou précontraint. La particularité de ces ouvrages est de faire fonctionner ces matériaux selon leurs aptitudes optimales, notamment en compression pour le béton et en traction pour l'acier. Depuis les années 1980, les ponts mixtes acier/béton sont en constante progression. Selon le type de franchissement et la portée de l'ouvrage requise, plusieurs solutions de dimensionnement de ponts mixtes existent. Les grandes familles de ponts mixtes sont présentées ci-après.

A.1.1 *Ponts mixtes de type bi-poutres*

La FIGURE A.1.1a montre un pont mixte bi-poutres avec une pièce de pont et une console qui se trouvent sous la surface inférieure de la dalle du béton. Une variante sensiblement différente est présentée dans la FIGURE A.1.1b pour laquelle le pont mixte est également de type bi-poutres mais avec des entretoises pour assurer la stabilité vis-à-vis du déversement des poutres.



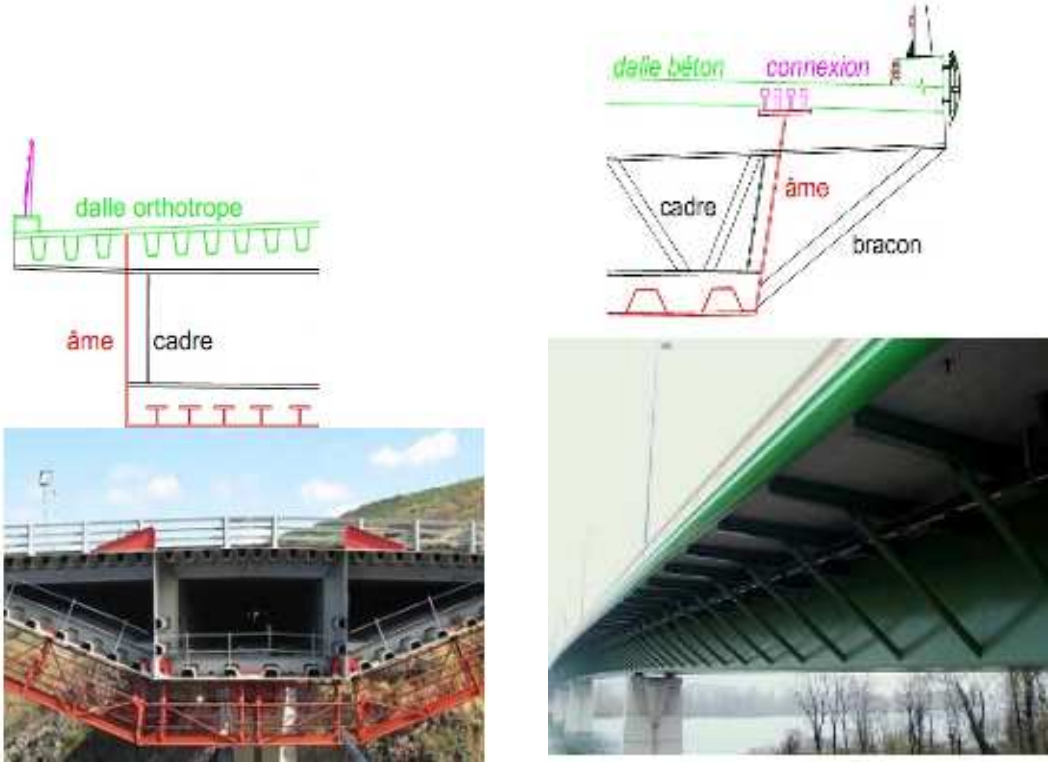
(a) avec pièces de ponts

(b) avec entretoises

Figure A.1.1: Pont mixte de type bi-poutres.

A.1.2 *Ponts mixtes en caisson*

Le pont mixte en caisson présente de nombreux avantages par rapport au pont mixte bi-poutres, notamment en termes de résistance à la torsion, de résistance à la corrosion et d'aspect esthétique. L'inconvénient majeur de ce type de pont est son coût puisqu'il nécessite des quantités importantes d'acier pour sa construction (Champenoy 2010). Deux variantes existent pour le pont mixte en caisson. La première est un pont avec dalle orthotrope (FIGURE A.1.2a). La dalle en acier est particulièrement intéressante dans des zones sismiques mais également relativement coûteuse. La deuxième variante utilise une dalle en béton reliée au caisson par des connecteurs (FIGURE A.1.2b).



(a) avec dalle orthotrope (b) avec dalle en béton et connexion

Figure A.1.2: Pont mixte en caisson.

A.1.3 *Pont mixte de type poutrelles enrobées*

Le pont mixte illustré à la FIGURE A.1.3 est de type poutrelles enrobées. Le tablier de ce pont est constitué de poutres en acier laminées partiellement ou totalement enrobées.

L'avantage de ce dimensionnement est de ne pas faire appel à un étaiement provisoire durant sa mise en œuvre, ce qui est très intéressant lorsqu'il est difficile d'interrompre les voies de circulation comme les voies ferrées. Un autre avantage est la robustesse élevée de ce type de structures. Les grandes quantités d'acier et de béton, nécessaires pour sa construction, n'en font pas une solution optimisée sur le plan économique et environnemental.

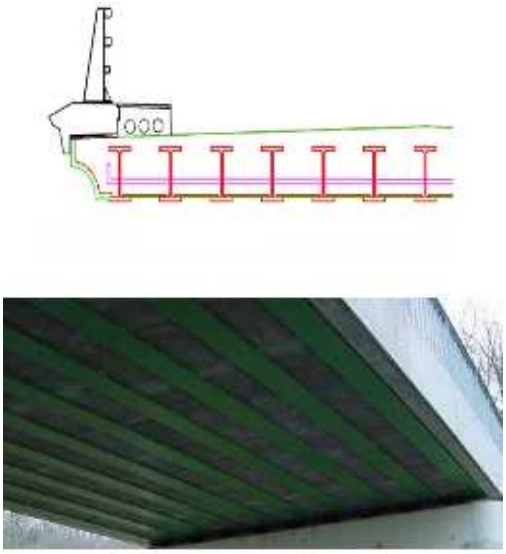


Figure A.1.3: Pont mixte de type poutrelles enrobées.

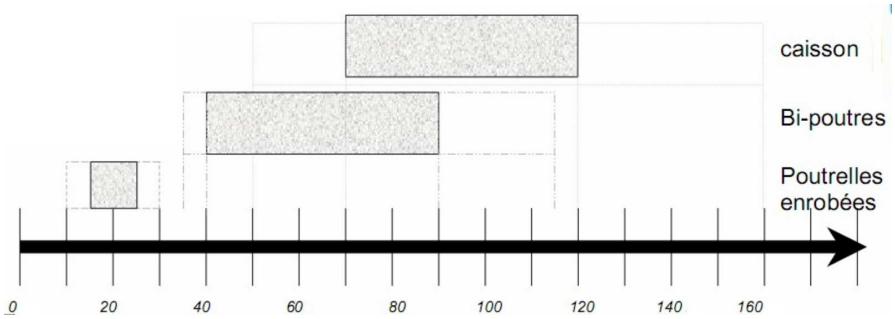


Figure A.1.4: Choix de type de pont mixte selon la portée.

La FIGURE A.1.4 illustre le choix de pont mixte à privilégier en fonction de la portée de l'ouvrage. Il apparaît clairement que les ponts à poutrelles enrobées sont utilisés uniquement pour des ouvrages de petite portée (entre 10 m et 30 m). Les bi-poutres correspondent aux ouvrages de moyenne portée (cas le plus souvent rencontré dans la pratique) avec des franchissements compris entre 35 m et 110 m au maximum. Finalement, les ponts avec caisson permettent d'envisager des portées de longueur significative pouvant aller jusqu'à 120 m.

A.2 HISTOIRE DE LA CONSTRUCTION DES PONTS MIXTES

Du fait de l'évolution des matériaux et des techniques de construction, la typologie et le dimensionnement des ouvrages métalliques ont fortement évolué en France, depuis le XIXème siècle (Lescouarc'h 2006). L'évolution des ouvrages métalliques est liée non seulement à celle des matériaux employés (acier, béton) mais aussi à celle des techniques d'assemblage et de construction qui n'ont cessé de développer (Lemoine 1991; 2012). L'objectif de ce paragraphe est de présenter un bref historique de l'évolution des matériaux et des techniques de construction pour situer la problématique actuelle de l'étude dans le contexte historique auquel elle est liée.

Figure A.2.1: Pont Coalbrook.

A.2.1 *Evolution des matériaux*

Au XIXème siècle, entre 1800 et 1850, la fonte est largement utilisée pour sa bonne résistance à la compression. Sa faible résistance à la traction est alors compensée en privilégiant la forme d'arche (Tessier 2010). La fonte disparaît progressivement dans la construction des ouvrages d'art du fait de sa fragilité (inconvénient majeur dans le cas de structures complexes) et de sa faible résistance aux chocs. La FIGURE A.2.1 montre l'exemple du pont de Coalbrookdale (Iron Bridge), construit en 1779 en Grande Bretagne et traversant la rivière Severn dans la vallée d'Ironbridge, Shropshire. Ce pont, encore en service aujourd'hui, est un symbole fort de l'industrie minière et métallurgique de la première révolution industrielle et est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO [1].

Au XIXème siècle, le fer puddlé (structure feuilletée) remplace progressivement la fonte. Le puddlage est un procédé d'affinage de la fonte consistant à la décarburer en la brassant dans un four pour obtenir du fer puddlé, plus souple que la fonte. Ce procédé est mis au point par l'Anglais Henry Cort en 1784. L'acier puddlé se produit dans les fours à réverbère, en y chauffant, au moyen de la houille, les fontes aciéreuses, déposées sur un lit de scories, jusqu'à ce qu'elles entrent en fusion et commencent à s'affiner. Cette fonte en fusion est alors brassée à l'aide d'un long crochet (ringard). Le matériau obtenu peut ensuite être martelé, laminé, ou forgé. En France, les arches de la gare de l'Est, la tour Eiffel ou encore le viaduc de Garabit (tablier métallique long de 564, 85m reposant sur sept piles en fer puddlé de hauteur variable), illustré à la FIGURE A.2.2, sont des exemples de l'excellente longévité des ouvrages utilisant le fer puddlé. Il est cependant important de noter que le fer puddlé présente des caractéristiques (limite d'élasticité, contrainte à la rupture) très hétérogènes et qu'il est fortement fragilisé par la soudure (et par conséquent est non soudable dans la plupart des cas).

1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Figure A.2.2: Viaduc de Garabit.

C'est dans la deuxième moitié du XIXème siècle qu'apparaissent les innovations les plus marquantes avec l'invention des procédés Bessemer (1856), Martin-Siemens (1864) et Thomas-Gillchrist (1877). Toutes sont liées à la mise au point du procédé indirect : le couple constitué par le haut fourneau et le convertisseur fonde la sidérurgie moderne. L'invention de ces trois procédés a une origine commune à savoir le besoin crucial des compagnies de chemins de fer européennes à trouver pour leur rails un métal qui résiste à l'usure provoquée par le passage des trains et, par conséquent, la nécessité de recycler avantageusement les quantités importantes de rails de fontes. Il est intéressant de voir comment des problématiques de recyclage des matériaux ont permis à l'époque le développement de techniques innovantes. Par ailleurs, l'industrialisation de la sidérurgie est indissociable du développement de la machine à vapeur. En effet, les machines nécessitaient de l'acier pour leur construction, et la machine à vapeur participait à l'industrialisation en facilitant l'extraction du minerai (pompage de l'eau des mines, ascenseurs...), la soufflerie et le martelage. Cette synergie a alors rendu possible la révolution industrielle.

L'acier produit à l'aide des techniques précédemment citées présentait une qualité nettement meilleure grâce à un contrôle ajusté des impuretés. L'augmentation du taux de carbone dans les aciers permet d'augmenter la résistance mais diminue par conséquent la ductilité et la soudabilité. L'utilisation d'autres composants tels que le manganèse, le silicium et l'élimination du phosphore, du soufre et de l'azote ont permis d'obtenir des aciers avec différentes caractéristiques.

L'aciérie électrique mise au point en 1930 est un procédé original dans la fabrication de l'acier. Elle est conçue pour un régime entièrement basé sur le recyclage, ce qui constitue une "rupture" importante dans les processus d'élaboration. Par ailleurs, le remplacement de l'air par l'oxygène pur au début des années 1950 permet d'aboutir aux convertisseurs que nous connaissons aujourd'hui.

A.2.2 *Evolution des assemblages*

Les techniques de fabrication de l'acier évoluent rapidement de même que les modes d'assemblages. Au XIXème siècle, les éléments métalliques sont assemblés par rivetage et plaques couvre-joint (Lemoine 2012, Tessier 2010). Ce mode d'assemblage s'avère long et cher. Une autre méthode apparaît alors à la fin des années 1930 : l'assemblage par soudure. Ce procédé est actuellement le procédé le plus utilisé même si des assemblages par boulons (vis et écrou) sont effectués pour certains éléments.

A.2.3 *Evolution des aspects structurels dans les règlements*

Le dimensionnement des structures est aujourd'hui réalisé par calculs informatiques et application de critères règlementaires définissant les efforts et déformations admissibles (Calgaro 2000). Du fait de l'évolution des techniques d'assemblages, de la durabilité des matériaux utilisés et des contraintes de sécurité, les règles de calcul ont naturellement évolué depuis le XIXème siècle (Berbain 1996, Hirt 2006). L'évolution des règles de calcul concernant les ponts métalliques, puis les ponts mixtes peut être résumée succinctement de la façon suivante (Tessier 2010) :

Le 29 août 1891, les calculs suivants sont considérés :
- vérification du non-flambement des pièces comprimées,
- prise en compte des charges de vent (270 km/m2),
- calcul des flèches.

Le 19 août 1961, le fascicule 61 titre V "conception et calcul des ponts et ouvrages métalliques" ajoute les éléments de vérification suivants :
- combinaison de calcul pour les ponts métalliques,
- vérification du voilement et flambement à partir des contraintes critiques.

Le 25 mars 1966, les calculs de dimensionnement évoluent avec la prise en compte :
- de la dalle participante,
- du calcul élastique des contraintes avec des coefficients d'équivalence acier/béton à court et long terme,
- du béton comprimé sous charges permanentes (recours aux dénivellations d'appui).

Le 4 Février 1970, puis le 4 Juillet 1972, le fascicule 61 Titre V incluent les éléments de vérification suivants :
- vérification à l'ELU (en 1972),
- prise en compte de coefficients de sécurité au voilement et flambement,
- établissement de règles de calcul pour les boulons HR et les dalles orthotropes.

Le 21 Juillet 1981, l'instruction pour le calcul des ponts mixtes acier/béton autorise :
- un niveau de traction dans la dalle avec ferraillage,
- une plastification des sections en travées à l'ELU (réduction des épaisseurs des semelles de 15%).

En 1995, de nouvelles recommandations permettent de maîtriser la fissuration des dalles de ponts mixtes. Finalement, la résistance à la fatigue est véritablement prise en compte dans les guides de conception et de justification en 1996. Il est intéressant de constater que l'acceptation de la plastification des sections en travées à l'ELU en 1981 n'a pas été synchronisée avec les recommandations vis-à-vis de la fatigue. Un certain nombre de ponts mixtes construits entre 1981 et 1996 présentent donc un certain nombre de défauts liés au phénomène de fatigue. Il apparaît donc crucial de prendre

en compte les différents modes de défaillance, pouvant intervenir durant toute la vie de l'ouvrage, lors de propositions de nouvelles techniques de dimensionnement.

De manière générale, il est important de noter que la conception des structures de génie civil s'inscrit généralement dans un processus de décision complexe, car aux préoccupations mécaniques, règlementaires, et économiques se superposent bien souvent des considérations esthétiques, de faisabilité, de sécurité, et de délais (Calgaro 2000, Lescouarc'h 2006).

B

DÉTAIL DES RÉSULTATS DES ANALYSES DE CYCLE DE VIE

Cette annexe fournit les résultats en valeur absolue des calculs qui ont été menés dans le chapitre 3 et en particulier dans le paragraphe 3.4. Les résultats pour les trois familles d'ouvrages sont détaillés (TABLEAUX B.1.1 à B.1.6 pour la famille A, B.2.1 à B.2.6 pour la famille B, B.3.1 à B.3.6 pour la famille C), en montrant à chaque fois les coûts de construction, de vie en service, et de fin de vie, et finalement les coûts/impacts externes à 100 ans dus à la congestion du trafic pour un scénario de maintenance de "jour" et un scénario de maintenance.

B.1 FAMILLE A

		A0	A1	A2	A3	A4
cons	b	6000	6000	6000	6000	6000
	ss	1270000	1176000	1318000	1315000	1278000
	cd	572000	572000	572000	572000	572000
	e	248000	248000	248000	248000	248000
	cons	2096000	2002000	2144000	2141000	2103000
	ges	916000	916000	715000	916000	916000
	fin	24000	25000	24000	24000	24000
	total	3036000	2943000	2883000	3081000	3043000

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)

(cons = construction, ges = vie en service : inspection, maintenance, fin = fin de vie)

Tableau B.1.1: Détail des coûts (en euros 2008) de la famille A.

		A0	A1	A2	A3	A4
I1	MJ	14151424,84	13099327,03	15047061,88	14457489,45	14199235,12
I2	kg Sb eq.	7103,70	6503,16	7615,75	7278,40	7130,99
I3	kg	111017,61	100865,71	119667,71	113970,89	111479,00
I4	kg	20,91	19,59	22,02	21,29	20,96
I5	l	9107,54	8506,88	9619,50	9282,28	9134,84
I6	kg CO_2 eq.	913361,81	843195,52	973195,12	933773,81	916550,66
I7	kg SO_2 eq.	2912,03	2658,01	3128,04	2985,93	2923,58
I8	kg $CFC-11$ eq.	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
I9	kg C_2H_2	384,18	341,68	420,49	396,54	386,11
I10	kg PO_4^{-3}	698,64	655,59	734,97	711,17	700,60
I11	kg $1,4-DB$ eq.	2324815,90	2125536,93	2495087,65	2382787,95	2333872,96
I12	kg $1,4-DB$ eq.	286308,46	260991,19	307909,66	293673,49	287459,06

Tableau B.1.2: Détail des impacts environnementaux pour la construction de la famille A.

		A0	A1	A2	A3	A4
I1	MJ	13939572,80	13939504,14	13898097,41	13939592,73	13939572,80
I2	kg Sb eq.	5827,47	5827,44	5809,61	5827,48	5827,47
I3	kg	10471,15	10470,85	10354,43	10471,24	10471,15
I4	kg	8,97	8,97	8,95	8,97	8,97
I5	l	3445,27	3445,25	3436,91	3445,28	3445,27
I6	kg CO_2 eq.	405801,54	405798,63	404815,86	405802,38	405801,54
I7	kg SO_2 eq.	1227,74	1227,73	1222,15	1227,74	1227,74
I8	kg $CFC-11$ eq.	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
I9	kg C_2H_2	77,99	77,99	77,64	77,99	77,99
I10	kg PO_4^{-3}	263,72	263,72	262,01	263,73	263,72
I11	kg $1,4-DB$ eq.	185783,92	185777,95	184649,65	185785,65	185783,92
I12	kg $1,4-DB$ eq.	67193,19	67192,16	66916,38	67193,49	67193,19

Tableau B.1.3: Détail des impacts environnementaux pour la vie en service de la famille A.

		A0	A1	A2	A3	A4
I1	MJ	303800,64	293760,26	312397,82	306721,48	304257,00
I2	kg Sb eq.	130,07	125,77	133,75	131,32	130,27
I3	kg	2392,42	2313,35	2460,12	2415,42	2396,01
I4	kg	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22
I5	l	78,17	75,59	80,38	78,92	78,29
I6	kg CO_2 eq.	17537,19	16957,60	18033,47	17705,80	17563,53
I7	kg SO_2 eq.	69,66	67,36	71,64	70,33	69,77
I8	kg $CFC-11$ eq.	2,88E-03	2,79E-03	2,97E-03	2,91E-03	2,89E-03
I9	kg C_2H_2	2,32	2,24	2,38	2,34	2,32
I10	kg PO_4^{-3}	18,72	18,10	19,25	18,90	18,75
I11	kg $1,4-DB$ eq.	9140,21	8838,13	9398,86	9228,08	9153,94
I12	kg $1,4-DB$ eq.	3134,31	3030,72	3223,00	3164,44	3139,02

Tableau B.1.4: Détail des impacts environnementaux pour la fin de vie de la famille A.

		A0, A1, A2	A3, A4
C_U	€	2552000	1407000
Iu1	MJ	81894424,77	53167990,18
Iu2	kg Sb eq.	35875,07	23289,47
Iu3	kg	19542,95	12690,05
Iu4	kg	15,20	9,87
Iu5	l	6599,43	4284,02
Iu6	kg CO_2 eq.	1041053,24	645127,52
Iu7	kg SO_2 eq.	8161,03	5184,25
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	0,84	0,54
Iu9	kg C_2H_2	2885,32	1577,10
Iu10	kg PO_4^{-3}	1364,33	838,41
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	810327,07	535326,48
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	251179,02	163339,20

Tableau B.1.5: Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille A. Scénario de “jour”.

		A0, A1, A2	A3, A4
C_U	€	1367000	1223000
Iu1	MJ	52779611,37	52023463,12
Iu2	kg Sb eq.	23119,89	22788,07
Iu3	kg	12596,57	12416,95
Iu4	kg	9,79	9,65
Iu5	l	4252,90	4191,79
Iu6	kg CO_2 eq.	618230,10	631829,94
Iu7	kg SO_2 eq.	4989,80	5075,74
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	0,53	0,52
Iu9	kg C_2H_2	1183,52	1557,79
Iu10	kg PO_4^{-3}	797,73	820,61
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	528201,59	524096,45
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	161582,04	159847,67

Tableau B.1.6: Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille A. Scénario de "nuit".

		B0	B1	B2	B3	B4	B5
cons	fond	84000	84000	84000	82000	89000	89000
	b	5000	4000	9000	0	6000	6000
	ss	88000	0	0	79000	201000	227000
	cd	48000	128000	150000	42000	92000	92000
	e	49000	53000	65000	34000	87000	87000
	cons	272000	267000	306000	236000	473000	499000
	ges	264000	270000	306000	219000	447000	361000
	fin	10000	12000	13000	9000	15000	15000
	total	546000	549000	625000	464000	935000	875000

(fond = fondations, b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)

(cons = construction, ges = vie en service : inspection, maintenance, fin = fin de vie)

Tableau B.2.1: Détail des coûts (en euros 2008) de la famille B.

		B0	B1	B2	B3	B4	B5
I1	MJ	4357007,94	3649370,37	3003012,69	3892400,35	6967126,14	7349685,65
I2	kg Sb eq.	1975,75	1483,40	1219,51	1771,85	3306,56	3525,55
I3	kg	35439,88	27025,05	21267,45	32236,80	61624,51	65322,98
I4	kg	8,94	8,78	6,98	7,94	13,59	14,06
I5	l	4336,33	4565,82	3715,16	3584,71	6056,16	6275,44
I6	kg CO_2 eq.	361418,65	353529,52	281997,59	312190,38	522826,36	548402,23
I7	kg SO_2 eq.	943,88	783,40	628,57	835,03	1518,96	1611,26
I8	kg $CFC-11$ eq.	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
I9	kg C_2H_2	86,76	43,31	34,52	78,20	165,65	181,22
I10	kg PO_4^{-3}	426,65	283,70	223,28	386,56	764,11	821,46
I11	kg $1,4-DB$ eq.	748436,50	568967,19	433594,78	707247,67	1343335,30	1416369,23
I12	kg $1,4-DB$ eq.	89473,65	68649,75	53887,57	81910,11	155168,92	164421,85

Tableau B.2.2: Détail des impacts environnementaux pour la construction de la famille B.

		B0	B1	B2	B3	B4	B5
I1	MJ	2492465,24	2481420,15	2489139,97	2211496,57	2902545,02	2883881,18
I2	kg Sb eq.	1046,10	1042,43	1048,16	926,66	1221,14	1213,10
I3	kg	2235,24	2311,28	2431,23	1920,41	2940,42	2889,82
I4	kg	1,59	1,58	1,58	1,41	1,82	1,81
I5	l	625,91	631,73	630,78	557,64	756,07	752,39
I6	kg CO_2 eq.	71856,19	70760,81	70892,53	63743,90	81322,98	80887,80
I7	kg SO_2 eq.	223,91	222,92	225,31	197,66	262,52	260,06
I8	kg $CFC-11$ eq.	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
I9	kg C_2H_2	14,79	14,93	15,44	12,84	17,92	17,76
I10	kg PO_4^{-3}	50,38	50,47	52,45	43,58	60,26	59,51
I11	kg $1,4-DB$ eq.	36577,60	36712,15	39200,90	30959,52	43779,32	43282,64
I12	kg $1,4-DB$ eq.	12715,82	12851,44	13193,79	11102,01	15458,51	15336,67

Tableau B.2.3: Détail des impacts environnementaux pour la vie en service de la famille B.

		B0	B1	B2	B3	B4	B5
I1	MJ	311134,71	353134,71	308885,96	232461,68	326953,41	330644,02
I2	kg Sb eq.	133,21	151,20	132,25	99,53	139,99	141,57
I3	kg	2450,17	2780,92	2432,46	1830,63	2574,74	2603,81
I4	kg	0,23	0,26	0,23	0,17	0,24	0,24
I5	l	80,06	90,86	79,48	59,81	84,13	85,08
I6	kg CO_2 eq.	17960,56	20385,05	17830,74	13419,08	18873,71	19086,75
I7	kg SO_2 eq.	71,35	80,98	70,83	53,31	74,97	75,82
I8	kg $CFC-11$ eq.	2,95E-03	3,35E-03	2,93E-03	2,21E-03	3,10E-03	3,14E-03
I9	kg C_2H_2	2,37	2,69	2,36	1,77	2,49	2,52
I10	kg PO_4^{-3}	19,17	21,76	19,03	14,32	20,14	20,37
I11	kg $1,4-DB$ eq.	9360,86	10624,48	9293,20	6993,89	9836,78	9947,82
I12	kg $1,4-DB$ eq.	3209,97	3643,29	3186,77	2398,30	3373,17	3411,25

Tableau B.2.4: Détail des impacts environnementaux pour la fin de vie de la famille B.

		B0	B1	B2	B3	B4	B5
C_U	€	304000	304000	440000	275000	583000	406000
Iu1	MJ	12374531,14	11769693,08	17272010,57	11323540,19	23989996,78	15746869,41
Iu2	kg Sb eq.	5420,46	5155,53	7565,70	4960,12	10508,53	6897,68
Iu3	kg	2953,56	2809,19	4122,53	2702,67	5725,81	3758,44
Iu4	kg	2,30	2,18	3,21	2,10	4,45	2,92
Iu5	l	997,07	948,34	1391,68	912,40	1933,02	1268,81
Iu6	kg CO_2 eq.	148636,67	141439,55	207723,46	135380,40	285952,92	188966,67
Iu7	kg SO_2 eq.	1198,49	1141,38	1674,81	1093,29	2313,37	1525,94
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	0,12	0,12	0,17	0,11	0,24	0,16
Iu9	kg C_2H_2	349,14	331,44	493,05	307,21	632,19	437,18
Iu10	kg PO_4^{-3}	192,79	183,81	269,38	175,83	372,22	245,82
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	124715,40	118590,83	174196,18	113970,73	241215,66	158564,83
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	38003,85	36148,15	53056,60	34759,02	73619,22	48354,66

Tableau B.2.5: Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille B. Scénario de “jour”.

		B0	B1	B2	B3	B4	B5
C_U	€	296000	302000	438000	264000	576000	404000
Iu1	MJ	11981426,22	11689001,16	17191318,65	10836708,37	23570973,99	15666177,50
Iu2	kg Sb eq.	5248,24	5120,18	7530,35	4746,83	10324,95	6862,33
Iu3	kg	2859,78	2789,94	4103,27	2586,53	5625,84	3739,19
Iu4	kg	2,22	2,17	3,19	2,01	4,37	2,91
Iu5	l	965,39	941,84	1385,18	873,16	1899,25	1262,30
Iu6	kg CO_2 eq.	144299,68	140519,03	206802,94	130060,08	281324,03	188046,15
Iu7	kg SO_2 eq.	1162,27	1133,76	1667,19	1048,68	2274,73	1518,32
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	0,12	0,12	0,17	0,11	0,24	0,16
Iu9	kg C_2H_2	346,82	330,38	491,99	305,32	629,56	436,12
Iu10	kg PO_4^{-3}	186,84	182,56	268,13	168,49	365,88	244,57
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	120914,63	117800,66	173406,01	109279,30	237159,74	157774,66
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	36810,45	35902,16	52810,61	33282,57	72346,78	48108,67

Tableau B.2.6: Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille B. Scénario de “nuit”.

B.3 FAMILLE C

		C0	C1	C2
cons	b	70000	76000	66000
	ss	16685000	19727000	15579000
	cd	2562000	3353000	2562000
	e	1117000	1118000	1117000
	cons	20433000	24272000	19323000
	ges	4797000	5472000	4772000
	fin	109000	98000	123000
	total	25339000	29842000	24218000

(b = appareils d'appui, ss = charpente métallique, cd = dalle du béton, e = équipements)
(cons = construction, ges = vie en service : inspection, maintenance, fin = fin de vie)

Tableau B.3.1: Détails des coûts (en euros 2008) de la famille C.

		C0	C1	C2
I1	MJ	1,37E+08	1,56E+08	1,13E+08
I2	kg Sb eq.	2,19E+06	2,54E+06	1,95E+06
I3	kg	1,17E+06	1,37E+06	9,39E+05
I4	kg	1,68E+04	1,96E+04	1,50E+04
I5	l	8,21E+04	9,58E+04	6,87E+04
I6	kg CO_2 eq.	8,81E+06	1,02E+07	7,25E+06
I7	kg SO_2 eq.	1,52E+05	1,77E+05	1,33E+05
I8	kg $CFC-11$ eq.	4,85E+02	5,65E+02	4,33E+02
I9	kg C_2H_2	4,55E+03	5,22E+03	3,60E+03
I10	kg PO_4^{-3}	1,74E+04	2,02E+04	1,39E+04
I11	kg $1,4-DB$ eq.	2,38E+07	2,84E+07	1,93E+07
I12	kg $1,4-DB$ eq.	3,05E+06	3,57E+06	2,47E+06

Tableau B.3.2: Détail des impacts environnementaux pour la construction de la famille C.

		C0	C1	C2
I1	MJ	3,90E+08	3,90E+08	3,90E+08
I2	kg Sb eq.	1,62E+05	1,63E+05	1,62E+05
I3	kg	2,28E+05	2,28E+05	2,28E+05
I4	kg	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02
I5	l	9,41E+04	9,41E+04	9,41E+04
I6	kg CO_2 eq.	1,15E+07	1,15E+07	1,15E+07
I7	kg SO_2 eq.	3,36E+04	3,36E+04	3,36E+04
I8	kg $CFC-11$ eq.	4,50E+00	4,50E+00	4,49E+00
I9	kg C_2H_2	2,07E+03	2,07E+03	2,07E+03
I10	kg PO_4^{-3}	6,94E+03	6,94E+03	6,94E+03
I11	kg $1,4-DB$ eq.	4,83E+06	4,83E+06	4,83E+06
I12	kg $1,4-DB$ eq.	1,77E+06	1,77E+06	1,77E+06

Tableau B.3.3: Détail des impacts environnementaux pour la vie en service de la famille C.

		C0	C1	C2
I1	MJ	2144272,26	2485539,89	1918622,74
I2	kg Sb eq.	918,08	1064,19	821,47
I3	kg	16886,05	19573,52	15109,07
I4	kg	1,57	1,83	1,41
I5	l	551,73	639,53	493,67
I6	kg CO_2 eq.	123780,22	143480,22	110754,38
I7	kg SO_2 eq.	491,71	569,96	439,96
I8	kg $CFC-11$ eq.	0,02	0,02	0,02
I9	kg C_2H_2	16,35	18,95	14,63
I10	kg PO_4^{-3}	132,11	153,13	118,21
I11	kg $1,4-DB$ eq.	64512,99	74780,44	57724,06
I12	kg $1,4-DB$ eq.	22122,43	25643,29	19794,41

Tableau B.3.4: Détail des impacts environnementaux pour la fin de vie de la famille C.

		C0, C2	C1
C_U	€	75751000	16650000
Iu1	MJ	1052180242,84	432923891,08
Iu2	kg Sb eq.	460958,46	189648,66
Iu3	kg	251036,97	103311,30
Iu4	kg	195,20	80,33
Iu5	l	84800,76	34886,97
Iu6	kg CO_2 eq.	18851315,77	6080779,85
Iu7	kg SO_2 eq.	134243,05	46551,56
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	10,93	4,42
Iu9	kg C_2H_2	114051,43	23678,48
Iu10	kg PO_4^{-3}	25568,76	8097,73
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	10202819,59	4284232,75
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	3285491,49	1336038,71

Tableau B.3.5: Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille C. Scénario de “jour”.

		C0, C2	C1
C_U	€	65954000	6853000
Iu1	MJ	8,74E+08	2,55E+08
Iu2	kg Sb eq.	3,83E+05	1,12E+05
Iu3	kg	2,09E+05	6,09E+04
Iu4	kg	1,62E+02	4,73E+01
Iu5	l	7,05E+04	2,05E+04
Iu6	kg CO_2 eq.	1,59E+07	3,09E+06
Iu7	kg SO_2 eq.	1,13E+05	2,49E+04
Iu8	kg $CFC-11$ eq.	9,08E+00	2,57E+00
Iu9	kg C_2H_2	9,78E+04	7,40E+03
Iu10	kg PO_4^{-3}	2,15E+04	4,04E+03
Iu11	kg $1,4-DB$ eq.	8,48E+06	2,56E+06
Iu12	kg $1,4-DB$ eq.	2,73E+06	7,83E+05

Tableau B.3.6: Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille C. Scénario de "nuit".

C

CATÉGORIES D'IMPACT

L'objectif de ce paragraphe est de décrire brièvement les différentes catégories d'impact I1 à I12 introduites dans la TABLEAU 2.2.1.

C.1 CONSOMMATION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES

L'énergie primaire est définie comme l'énergie contenue dans les ressources naturelles (charbon, pétrole, gaz naturel, bois, uranium) n'ayant subi aucune transformation anthropogénique (Frischknecht et al. 1996).

Dans une perspective d'analyse de cycle de vie, la demande cumulée d'énergie primaire ou Cumulative Energy Demand (CED) (Frischknecht et al. 2007) représente la consommation d'énergie primaire sur le cycle de vie du système étudié. Elle prend en compte tant les usages directs de l'énergie, que les usages indirects ou énergie grise, liés par exemple à la production de matériaux de construction :

$$CED_{tot} = \sum_i CED_i \times q_i \tag{C.1.1}$$

où q_i = quantité de source d'énergie i consommée (kg, m^3 ou MJ), et CED_i = valeur énergétique de la source d'énergie i ($MJ/unité$).

C.2 POTENTIEL D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES (ADP)

Cet indicateur vise à évaluer le problème environnemental lié à la diminution de la quantité des ressources naturelles qui sont définies par les minéraux et les matériaux trouvés dans la terre, la mer ou l'atmosphère et qui n'ont pas encore été transformés industriellement (Guinée & Heijungs 1995). Le développement de nos sociétés modernes a en effet accéléré les rythmes de consommation de ces matières, dont certaines tendent à devenir rares : pétrole, mercure, cadmium, étain, nickel, plomb, zinc, cuivre, etc. (Rivallain 2013). Ce potentiel d'épuisement s'exprime de la façon suivante :

$$ADP_{tot} = \sum_i ADP_i \times m_i \tag{C.2.1}$$

où m_i = masse de substance i consommée ou émise dans le processus étudié (kg), ADP_i = facteur de caractérisation pour le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques de la substance i (kg équivalent Antimoine (Sb)/kg).

Le modèle de Guinée & Heijungs (1995) est un modèle global basé sur les réserves ultimes dans le monde associé à une déplétion annuelle au niveau mondial. Par conséquent, le potentiel d'appauvrissement abiotique de la ressource i (ADP_i) est donné par le rapport entre la quantité de ressources extraites et les réserves récupérables de cette ressource, exprimée en kg d'une ressource de référence (Antimoine - Sb), telle que donnée par l'expression :

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \frac{(R_{ref})}{DR_{ref}} \tag{C.2.2}$$

où DR_i = taux d'extraction de la ressource i (en kg/an), R_i = réserves ultimes de la ressource i (en kg), R_{ref} = réserve ultime de la ressource de référence (en kg), et DR_{ref} = taux d'extraction de R_{ref} (en kg/an).

C.3 DÉCHETS NON RADIOACTIFS

L'indicateur vis-à-vis des déchets inertes se base directement sur la masse de déchets générée W (kg). Cet indicateur n'introduit aucune différenciation entre les types de déchets générés. En dehors des déchets dangereux (explosifs, inflammables, corrosifs ou toxiques), certains produits sont inertes, d'autres sont à même de polluer les sols ou les eaux par lixiviation, par exemple. Dans le cas où des données spécifiques sont disponibles, un indicateur plus élaboré peut être construit à partir de facteurs de caractérisation (Rivallain 2013). Ainsi, en France, la législation distingue trois types de déchets (déchets ménagers, déchets industriels normaux et spéciaux), qui requièrent différents types de traitements (en termes de sécurité, d'étanchéité ou de coûts par exemple) (Peuportier 2008).

C.4 DÉCHETS RADIOACTIFS

Cette catégorie d'impact concerne aussi bien l'émission de substances radioactives que l'exposition directe à des radiations, qui ont un impact sur la santé humaine et celle des animaux. L'activité radioactive, mesurée en Becquerels, représente le nombre de désintégrations par seconde des corps radioactifs. L'activité radioactive décline naturellement au cours du temps. La demi-vie d'une substance correspond à une baisse de cette activité de moitié.

Polster (1995) propose un indicateur qui se base sur l'approche de Ecoinvent (Frischknecht et al. 1996), qui évalue l'impact des déchets radioactifs par leur volume, permettant de visualiser les capacités de stockage qu'ils vont mobiliser. Un tel indicateur constitue une modélisation simpliste face à la complexité de la problématique des déchets radioactifs mais constitue néanmoins un premier pas en l'absence de véritable indicateur concernant l'exposition à des radiations.

C.5 CONSOMMATION D'EAU TOTALE

L'indicateur sur la consommation d'eau est un indicateur "simple" issu de l'analyse des quelques flux élémentaires concernant la quantité d'eau consommée (eau de rivière, nappes phréatiques, eau de mer, etc.). Sur le cycle de vie du système étudié, cet indicateur représente la somme des volumes d'eau consommés (m^3).

C.6 POTENTIEL DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Une fraction importante du rayonnement solaire reçu est réfléchie par l'atmosphère ou la surface de la Terre, ou réémise sous la forme d'un rayonnement infrarouge par la surface terrestre. Cependant, certains gaz, aérosols et particules, présents dans l'atmosphère, les GES, plus transparents au rayonnement solaire qu'à l'infrarouge, absorbent une partie de cette réémission (Rivallain 2013). Lorsque leur concentration augmente, ils participent alors à l'accroissement de la température moyenne globale de la planète. Ces concentrations croissantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère

sont sources de nombreuses préoccupations : modification du climat local et global, risque croissant d'événements climatiques extrêmes, fonte des glaciers continentaux et polaires et élévation du niveau des mers, développement de maladies et perte de biodiversité.

L'impact d'une activité sur le changement climatique peut être évalué à partir de l'indicateur de potentiel Global Warming Popential (GWP), issu des travaux du GIEC. Sur une base pluriannuelle, le GIEC met à jour une liste d'indicateurs, sur plusieurs échelles de temps (20, 100 et 500 ans) :

$$GWP_T = \sum_i GWP_{T,i} \times m_i \tag{C.6.1}$$

où : T = durée sur laquelle le GWP est évalué (100 ans dans cette thèse), m_i = masse de substance i émise dans le processus étudié (kg), $GWP_{T,i}$ = facteur de caractérisation sur une durée T (kg équivalent CO_2/kg).

Le potentiel de réchauffement de la substance i (GWP_i) donné par le rapport entre l'absorption accrue infrarouge due à l'émission instantanée de 1 kg de la substance et celle due à une émission équivalente de dioxyde de carbone (CO_2), à la fois intégré sur temps, donné par (GIEC 2008) :

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i \times c_i(t)dt}{\int_0^T a_{CO_2} \times c_{CO_2}(t)dt} \tag{C.6.2}$$

où a_i = forçage radiatif par unité de hausse de la concentration dans l'atmosphère du gaz à effet i ($W/(m^2.kg)$, $c_i(t)$ = concentration de gaz à effet de serre i au temps t (kg/m^3).

C.7 POTENTIEL D'ACIDIFICATION ATMOSPHÉRIQUE (AP)

L'acidification atmosphérique est un impact environnemental d'échelle régionale. En effet, les substances qui en sont responsables sont des produits caractérisés par une durée de vie de quelques jours, ce qui n'autorise pas leur transport à l'échelle planétaire (Rivallain 2013). Des facteurs de caractérisation pour les 44 régions en Europe et sur les coefficients européennes ont été développés par une sommation pondérée des facteurs régionaux pour chacune des émissions acidifiantes, telle que donnée par l'expression suivante (Guinée 2002) :

$$AP = \sum_i AP_i \times m_i \tag{C.7.1}$$

où : AP_i = facteur de caractérisation pour le potentiel d'acidification de la substance i (kg équivalent SO_2/kg), m_i = masse de substance i intervenant dans le processus étudié (kg).

$$AP_i = \frac{\eta_i}{\eta_{SO_2}} \tag{C.7.2}$$

où : η_i = quantité d'ions $H+$ potentiellement produits par unité de masse de substance i ($moles/kg$).

C.8 DESTRUCTION DE LA COUCHE D'OZONE STRATOSPHÉRIQUE (ODP)

L'indicateur de destruction de l'ozone se base sur plusieurs propriétés d'un gaz, et notamment sur leur stabilité dans la stratosphère et sur la quantité de brome ou de chlore véhiculée dans le gaz. Ces propriétés sont ensuite comparées aux $CFC-11$ (bien que le $CFC-11$ est maintenant interdit par le Protocole de Montréal dans les pays industrialisés, il est encore fabriqué dans de nombreux pays). Les propriétés de chaque gaz sont ensuite comparées aux propriétés du $CFC-11$ et convertis en $CFC-11$ équivalents. Les équivalences individuelles sont additionnées pour établir une valeur d'appauvrissement de l'ozone dans son ensemble, ce qui représente la quantité totale de gaz nuisant à la couche d'ozone. Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone de la substance i (ODP_i) est donné par :

$$ODP_i = \frac{\delta[O_3]_i}{\delta[O_3]_{CFC-11}} \tag{C.8.1}$$

où $\delta[O_3]_i$ = variation dans la colonne d'ozone stratosphérique i à l'état d'équilibre due aux émissions annuelles de la substance i (en $kg/année$), et $\delta[O_3]_{CFC-11}$ = variation de cette colonne à l'état d'équilibre due aux émissions annuelles de $CFC-11$.

C.9 POTENTIEL DE FORMATION DE L'OZONE TROPOSPHÉRIQUE (PCOP)

La formation d'ozone photochimique affecte la qualité de l'air et présente des risques sanitaires avérés (Rivallain 2013). Le smog d'été ou formation d'ozone photochimique désigne la réaction chimique de dégradation de certains polluants primaires, sous l'effet des rayons ultra-violets. Les photo-oxydants formés (dont ozone et peroxyacétylnitrate (PAN)) sont potentiellement nocifs pour l'homme, les écosystèmes et les cultures. Ces photo-oxydants se forment dans la troposphère par oxydation des composés organiques volatils (COVs) ou de monoxyde de carbone (CO), en présence de composants oxygénés (radicaux OH principalement), d'oxydes azotés (NO_x) et de lumière. On désigne en général ce phénomène par "smog d'été", par opposition au smog d'hiver, riche en composés inorganiques, particules, monoxyde de carbone ou composés soufrés. Il concerne les COV contenant de l'hydrogène ou des doubles liaisons, en général classés comme hydrocarbures ou comme COV. L'indicateur environnemental est le potentiel de contribution à la production d'ozone troposphérique (Guinée et al. 2001), modélisé comme suit :

$$SMOG = \sum_i POCP_i \times m_i \tag{C.9.1}$$

où m_i = masse de substance i intervenant dans le processus étudié (kg), $POCP_i$ = facteur de caractérisation pour le potentiel de formation d'ozone photochimique de la substance i (kg équivalent C_2H_4/kg).

Le POCP est évalué à partir de modèles qui simulent à la fois les conditions physiques de l'air dans lequel est produit l'ozone et les réactions chimiques de formation. Il est obtenu par différence, en simulant la formation d'ozone pour deux quantités de gaz i différentes, dans les mêmes conditions. Le même calcul est effectué dans le cas de l'éthylène, gaz de référence. La différence de quantité d'ozone produite dans les deux cas permet de calculer le POCP :

$$POCP_i = \frac{\Delta F_i}{M_i} \frac{M_{C_2H_4}}{\Delta F_{C_2H_4}} \tag{C.9.2}$$

où M_i = quantité totale de gaz i considérée (*moles*), ΔF_i = différence des quantités d'ozone produite pour les deux quantités de gaz i considérées (*moles*).

C.10 POTENTIEL D'EUTROPHISATION (EP)

L'eutrophisation est un phénomène d'enrichissement des milieux aquatiques en macronutriments, sels minéraux (azote et phosphore notamment), à l'échelle régionale. Cet enrichissement peut être lié à l'activité agricole (engrais azotés ou phosphatés), à certains procédés industriels, à l'usage de lessives ou de détergents aux phosphates, par exemple (Rivallain 2013). L'indicateur d'impact utilisé a été défini par Guinée (2002) :

$$EP_{tot} = \sum_i EP_i \times m_i \tag{C.10.1}$$

où m_i = masse de substance i intervenant dans le processus étudié (kg), EP_i = facteur de caractérisation pour le potentiel d'eutrophisation de la substance i (kg équivalent PO_4^{3-}/kg).

Pour une substance donnée, le facteur de caractérisation est donné par le modèle suivant :

$$EP_i = \frac{\nu_i}{M_i} \frac{M_{PO_4^{3-}}}{\nu_{PO_4^{3-}}} \tag{C.10.2}$$

où M_i = masse de substance i intervenant dans le processus étudié (kg), ν_i = contribution potentielle d'une mole de substance i au phénomène d'eutrophisation.

C.11 POTENTIEL DE TOXICITÉ HUMAINE (HTP)

Le potentiel de toxicité humaine couvre les impacts sur la santé humaine occasionnés par les substances toxiques dans l'environnement. Le calcul de ce potentiel est basé sur le modèle USES-LCA qui imbrique cinq échelles spatiales : régionale, continentale et mondiale. Ce dernier niveau inclue les zones arctique, tempérée et tropicale présentes dans l'hémisphère Nord) (Guinée 2002).

Pour calculer un facteur de caractérisation unique pour chaque type d'émission, les quatre facteurs calculés à l'échelle mondiale et continentale sont agrégés sur le niveau d'exposition d'une population : plus la population est exposée, plus le poids du facteur associé est important.

C.12 POTENTIEL D'ÉCOTOXICITÉ (ECP)

Cette catégorie d'impact est liée aux impacts des substances toxiques sur les écosystèmes aquatiques, terrestres et les sédiments. Le modèle adopté pour le calcul de l'écotoxicité est le même modèle que celui utilisé pour les potentiels de toxicité humaine, décrit dans le paragraphe C.11. Par ailleurs, ce modèle a été utilisé pour calculer les cinq sous-catégories de potentiels d'écotoxicité aquatique d'eau douce, aquatique marin, les sédiments d'eau douce, les sédiments marins et terrestres. Cependant, dans ce

travail, seule l'écotoxicité terrestre est prise en compte, afin d'éviter de donner trop de poids au critère d'écotoxicité (Gervasio 2012).

D

ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

Les algorithmes génétiques sont fondés sur les principes de la sélection naturelle et de la génétique (Darwin 1859). Ils présentent l'intérêt de proposer une méthodologie simple et robuste pour approcher le problème complexe de la minimisation d'une fonction à grande nombre de variables et de contraintes.

Ces algorithmes sont particulièrement adaptés pour les problèmes avec des fonctions objectifs complexes pour lesquelles il n'y a pas d'expression explicite de la dérivée. Ils sont définis en général par (i) **un individu/chromosome/séquence** = solution potentielle du problème, (ii) **une population** = ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche, (iii) **un environnement** = espace de recherche, (iv) **une fonction d'ajustement** (ou d'adaptation) = fonction objectif qui doit être minimisée ou maximisée.

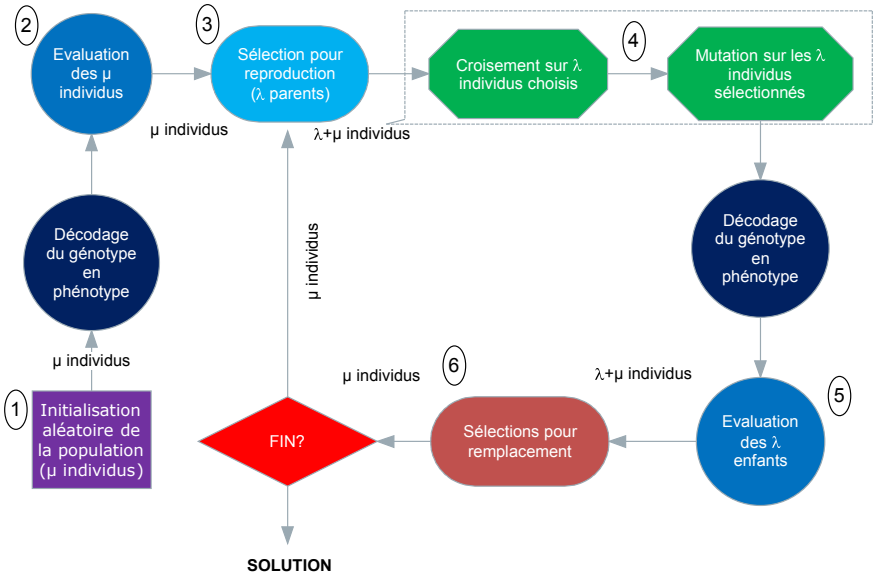


Figure D.0.1: Principe d'un algorithme génétique.

La structure d'un algorithme génétique peut être décomposée en quatre étapes (FIGURE D.0.1) (Dréo et al 2003, Rivallain 2013) :

- l'**initialisation** (1) consiste à générer la population initiale contenant μ individus. Cette procédure est en général aléatoire. Il est possible de générer une population avec des individus plus "intéressants" en utilisant certaines informations comme le domaine de variation des variables ;
- l'**évaluation** (2) des μ individus est effectuée avec la(les) fonction(s) objectif(s) du problème ;
- la **sélection** (3) des λ parents parmi μ individus pour la reproduction est basée sur les principes de Darwin : "les meilleurs individus ont la probabilité la plus grande d'être sélectionnés" (Darwin 1859). En d'autres termes, lors de cette phase de sélection, les individus les plus forts sont généralement dupliqués et forment les parents de la génération en cours, alors que les plus faibles disparaissent sans avoir la possibilité de se reproduire ;

- la **reproduction** (4) consiste à reproduire les individus sélectionnés qui doivent combiner leurs gènes pour créer la prochaine génération. Différents opérateurs sont utilisés pour effectuer cette opération (croisements et mutations, cf. FIGURE D.0.1).
- l'**évaluation** (5) des λ enfants engendrés avec la(les) fonction(s) objectif(s) du problème ;
- la **sélection** (6) pour maintenir une population courante de taille donnée (μ individus) à partir des $\lambda + \mu$ individus.

Finalement, l'algorithme est interrompu à l'aide d'un critère d'arrêt qui est généralement un nombre de générations considérées ou les gains relatifs de performances des individus de la population courante sur un certain nombre de générations.

D.1 OPTIMISATION MONO-OBJECTIF

D.1.1 *Méthode de sélection*

Plusieurs méthodes sont disponibles dont deux sont présentées ici :

- la sélection proportionnelle où la probabilité d'un individu d'être choisi est proportionnelle à son évaluation relative vis-à-vis de la fonction objectif. Si la fonction objectif est notée f et la population à l'étape t est regroupée dans le vecteur $P_t = (a_1^t, a_2^t, ..., a_N^t)$, la probabilité de l'individu a_k^t d'être sélectionné est donné par l'EQUATION D.1.1. En pratique, on utilise une roue de loterie divisée en N secteurs (représentant les individus à sélectionner) dont la surface est proportionnelle à la probabilité de sélection correspondante. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est uniquement basée sur la performance, ce qui favorise l'augmentation des "super-individus" et provoque la disparition de nombreux génotypes dans la population ;
$$p_s(a_k^t) = \frac{f(a_k^t)}{\sum_{j=1}^{N} f(a_j^t)} \tag{D.1.1}$$
- la deuxième méthode est la méthode dite de tournoi qui permet d'éviter la convergence prématurée dans la plupart des cas. Dans cette méthode, les individus sont choisis suivant la règle suivante :
  - deux individus sont choisis aléatoirement,
  - le meilleur des deux est sélectionné pour la reproduction (père),
  - deux autres individus sont choisis aléatoirement,
  - le meilleur parmi ces deux derniers est sélectionné pour la reproduction (mère).

D.1.2 *Choix des paramètres*

Les opérateurs des algorithmes génétiques sont guidés par des paramètres fixés à l'avance par les utilisateurs. Ces paramètres conditionnent fortement la réussite de l'algorithme dans la recherche de la solution pour des temps de calculs raisonnables. Les différents paramètres sont les suivants :

- la taille de la population N : plus N est grand, plus la diversité au sein de la population est importante et plus la probabilité d'avoir un minimum local est faible. En revanche, les temps de calcul augmentent considérablement. La valeur généralement conseillée dans la littérature est de fixer N entre 10 et 100 ;

- la probabilité de recombinaison P_r : des valeurs très importantes de P_r peuvent détruire de bons individus. A contrario, des valeurs trop basses ralentissent la convergence de l'algorithme. P_r est généralement prise en 0,5 et 0,95 ;
- la probabilité de recombinaison P_m : la probabilité de l'algorithme de s'arrêter en un minimum local diminue lorsque P_m augmente. Il est cependant nécessaire de ne pas prendre une valeur de P_m trop élevée pour ne pas rendre la recherche purement aléatoire. Cette valeur est généralement prise entre 0,001 et 0,1.

D.2 PRINCIPE DE L'OPTIMISATION MULTIOBJECTIF

Dans la pratique, il existe de nombreux cas où plusieurs fonctions objectif sont considérées. Pourtant, les solutions optimales pour un objectif donné ne correspondent généralement pas à celles des autres objectifs pris indépendamment. De ce fait, il n'existe, la plupart du temps, aucun point de l'espace des paramètres où toutes les fonctions objectifs sont optimales simultanément. Une solution du problème vectoriel représente un compromis entre les différents critères. Le meilleur compromis est défini de telle manière qu'il ne soit plus possible d'améliorer une composante du vecteur critère sans détériorer les autres. Dans ce cas, la solution est dite Pareto-optimale (FIGURE D.2.1 dans le cas particulier où deux fonctions objectifs sont considérées) (Orcesi 2008).

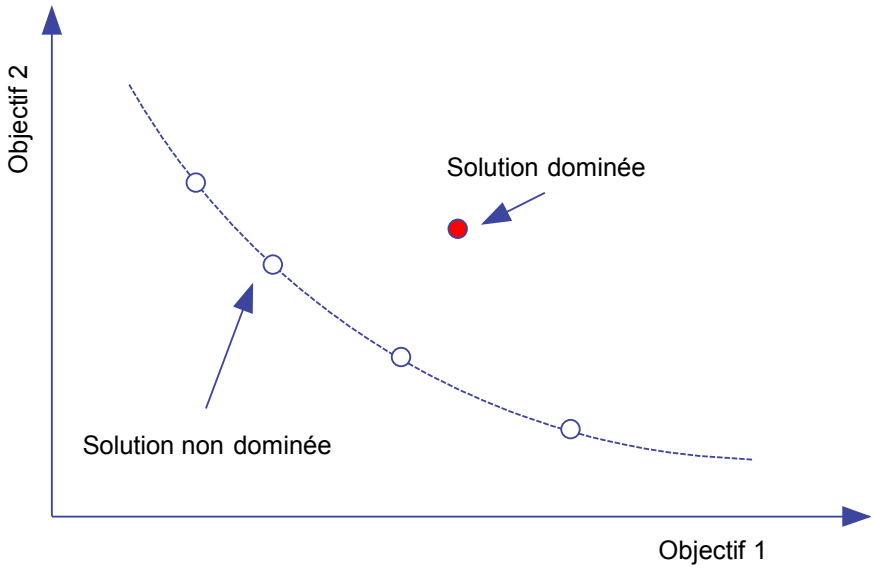


Figure D.2.1: Exemple d'un front de Pareto.

L'algorithme NSGA-II a été proposé par Deb et al. (2002) pour déterminer les fronts de Pareto d'un problème multiobjectif de manière efficace. Cette algorithme est en fait l'actualisation de l'algorithme NSGA qui avait été proposé par Deb (1999). Par ailleurs, il existe de nombreux autres algorithmes tels que Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA) présenté par Schaffer (1985), Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA) proposé par Horn et al. (1994) et NPGA 2 proposé par Erickson et al. (2001) permettant également d'aborder des problèmes multiobjectif, mais qui ne sont pas considérés dans le cadre de ce mémoire de thèse. Seule la méthode NSGA-II, qui a été utilisée pour déterminer les stratégies optimales de maintenance des ouvrages, est détaillée ci-après.

De même que dans le cas de l'optimisation mono-objectif, l'algorithme NSGA-II considère une population d'individus (solutions du problème). Par contre, c'est le front de Pareto - ensemble de solutions "optimales" - qui est cherché au cours des itérations et non plus une seule solution. Pour ce faire, NSGA-II utilise deux concepts qu'il convient de définir. Ces deux concepts sont la **procédure de tri basée sur la non-dominance** des solutions et la **procédure de tri basée sur la distance de crowding**.

D.2.1 *Procédure de tri basée sur la non-dominance*

Définition : *Dans un problème de minimisation d'un vecteur de fonctions $f = (f_1, f_2, ..., f_M)$, une solution A domine une solution B si et seulement si : $\forall i = 1, 2, ..., M : f_i(A) \leq f_i(B)$ et $\exists j = 1, 2, ..., M : f_j(A) < f_j(B)$.*

Dans une population de N individus avec M fonctions objectifs, il est alors possible d'identifier plusieurs fronts de solutions non dominées :

1. deux entités sont calculées pour chaque solution, un compteur dit de domination n_p, qui correspond au nombre de solutions dominant la solution p, et un ensemble S_p, qui est l'ensemble des solutions que la solution p domine.
2. toutes les solutions dans le premier front de solutions non dominées ont leur compteur initialisé à 0. Pour chaque solution p avec $n_p = 0$, chaque individu q de l'ensemble S_p est considéré et le compteur n_q est diminué de 1. Au travers de cette procédure, si un individu q voit son compteur n_q devenir nul, cet individu est alors affecté à un ensemble Q, qui forme le deuxième front de solutions non-dominées.
3. la démarche qui était faite précédemment avec le premier front est maintenant effectuée avec le deuxième front Q et permet d'identifier le troisième front. La procédure est répétée par la suite jusqu'à ce que tous les fronts soient identifiés.

D.2.2 *Procédure de tri basée sur la distance de crowding*

Un deuxième tri est effectué sur la population à chaque itération. Ce deuxième tri a pour objectif majeur de maintenir une diversité dans le choix des individus et d'éviter ainsi de favoriser injustement des optima locaux.

Pour chaque solution d'un front donné, on estime donc la densité "spatiale" de probabilité de trouver une autre solution dans ce même front, appelée distance de crowding. Pour calculer cette densité, les solutions d'un même front sont classées dans l'ordre croissant par rapport à la première fonction objectif f_1.

L'écart moyen $f_1(i+1) - f_1(i-1)$ entre les deux solutions $i-1$ et $i+1$ de part et d'autre de la solution i est alors calculé et incrémenté au terme $I(i)$ initalement fixé à 0.

Après avoir fait ce calcul pour toutes les solutions du front, cette procédure est répétée pour toutes les autres fonctions objectifs du problème. Le terme $I(i)$ finalement obtenu correspond alors à la différence des valeurs des fonctions objectifs de deux solutions adjacentes de la solution i (cette distance est illustrée dans la FIGURE D.2.2 pour la $i^{ème}$ solution du front et correspond au périmètre du rectangle en pointillé).

La distance ajoutée au compteur $I(i)$ est normalisée en divisant toujours $f_k(i+1) - f_k(i-1)$ par $f_k^{max} - f_k^{min}$ et en faisant en sorte que la première et la dernière solution se voient toujours affectées la valeur infinie lors du classement.

Finalement ce deuxième tri permet de classer les différentes solutions d'un même front et de favoriser celles qui ont le moins possible de solutions à leur voisinage afin

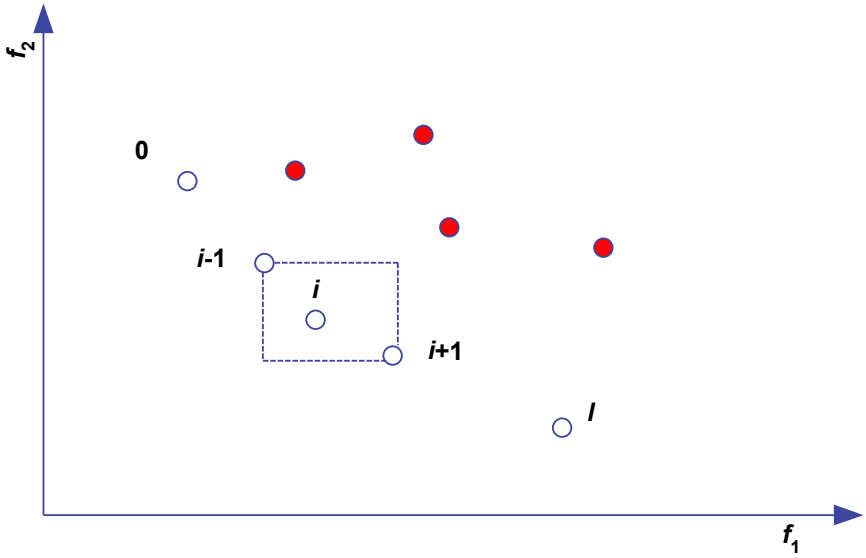


Figure D.2.2: Distance de crowding.

de maintenir la diversité nécessaire à la convergence de l'algorithme vers l'optimum global.

TABLE DES FIGURES

Figure 1.0.1 Partenaires européens du projet SBRI. 3
Figure 2.1.1 Périmètres du "Coût Global Etendu" et du "Coût Global" (ISO 15686-5 :2008). 8
Figure 2.1.2 Possibilité d'amélioration du coût global en fonction de l'avancement du projet (ISO 15686-5 :2008b). 8
Figure 2.1.3 Evolution de la valeur nette actuelle pour différentes valeurs du taux d'actualisation r. 10
Figure 2.2.1 Etapes incluses dans une analyse environnementale (ISO 14040 : 2006a). 13
Figure 2.3.1 Méthode déterministe pour étudier la file d'attente. 23
Figure 3.2.1 Familles A, B, C d'ouvrages considérés. 30
Figure 3.2.2 Cas de référence pour les familles d'ouvrages de moyenne (A0), petite (B0) et longue (C0) portées (vues en profil et coupes transversale). 31
Figure 3.2.3 Pont en béton coulé sur place - famille d'ouvrages de petite portée (B1) (SBRI 2013b, BRISA 2012c). 33
Figure 3.2.4 Pont en béton préfabriqué - famille d'ouvrages de petite portée (B2) (SBRI 2013b, BRISA 2012d). 34
Figure 3.2.5 Coupe transversale - cas d'étude avec la prise en compte de l'évolution du trafic (A3 et A4) (SBRI 2013a). 34
Figure 3.2.6 Pont mixte acier-béton avec des culées intégrales - famille d'ouvrage de petite portée (B3). 35
Figure 3.2.7 Pont mixte acier-béton à trois travées - famille d'ouvrages de petite portée (B4 et B5). 36
Figure 3.3.1 Frontières spatiales de l'étude pour les familles d'ouvrages A, B et C. 37
Figure 3.3.2 Illustration du cycle de vie d'un ouvrage. 38
Figure 3.3.3 Frontière de l'étude des analyses. 38
Figure 3.3.4 Calendrier standard de réparation et de remplacement. 42
Figure 3.3.5 Détail des coûts de la charpente métallique - famille A. 48
Figure 3.3.6 Détail des coûts de fabrication de la charpente métallique - famille A (cf. FIGURE 3.3.5). 48
Figure 3.3.7 Détail des coûts de la charpente métallique - famille B. 49
Figure 3.3.8 Coûts détaillés de la charpente métallique - famille C. 50
Figure 3.3.9 Schéma-clé des processus pris en compte pour la production de l'acier structurant. 55
Figure 3.3.10 Schéma-clé des processus pris en compte pour la production du béton. 56

Figure 3.3.11 Schéma-clé des processus pris en compte pour la production des aciers de renforcement. 57
Figure 3.3.12 Schéma-clé des processus pris en compte pour une inspection. 58
Figure 3.3.13 Schéma-clé des processus pris en compte pour une action de maintenance/réhabilitation. 59
Figure 3.3.14 Distribution journalière du trafic de référence (FCTUC 2012, SBRI 2013a). 61
Figure 3.3.15 Distribution journalière du trafic pour la famille A (FCTUC 2012, SBRI 2013a). 62
Figure 3.3.16 Distribution journalière du trafic pour la famille B (FCTUC 2012, SBRI 2013a). 62
Figure 3.3.17 Evolution du trafic passant sur l'ouvrage pour les familles A et C. 63
Figure 3.3.18 Evolution du trafic (a) sur et (b) sous l'ouvrage pour les ponts de la famille B. 63
Figure 3.4.1 Comparaison des coûts de cycle de vie - A1 par rapport à A0. . 67
Figure 3.4.2 Comparaison des impacts environnementaux - A1 par rapport à A0. 69
Figure 3.4.3 Comparaison des coûts de cycle de vie - C2 par rapport à C0. . 72
Figure 3.4.4 Comparaison des impacts environnementaux - C2 par rapport à C0. 73
Figure 3.4.5 Comparaison des coûts de cycle de vie - A2 par rapport à A0. . 76
Figure 3.4.6 Comparaison des impacts environnementaux - A2 par rapport à A0. 78
Figure 3.4.7 Comparaison des coûts de cycle de vie - B5 par rapport à B4. . 81
Figure 3.4.8 Comparaison des impacts environnementaux - B5 par rapport à B4. 82
Figure 3.4.9 Comparaison des coût aux usagers - B5 par rapport à B4. 84
Figure 3.4.10 Comparaison des coûts - B1, B2 par rapport à B0. 88
Figure 3.4.11 Comparaison des impacts environnementaux - B1, B2 par rapport à B0. 89
Figure 3.4.12 Comparaison des coûts aux usagers - B1, B2 par rapport à B0. . 91
Figure 3.4.13 Comparaison des coûts de cycle de vie - A3, A4 par rapport à A0. 94
Figure 3.4.14 Comparaison des impacts environnementaux - A3, A4 par rapport à A0. 95
Figure 3.4.15 Comparaison des coûts aux usagers - A3, A4 par rapport à A0. 97
Figure 3.4.16 Comparaison des coûts de cycle de vie - B3 par rapport à B0. . 100
Figure 3.4.17 Comparaison des coût aux usagers - B3 par rapport à B0. 101
Figure 3.4.18 Comparaison des coûts de cycle de vie - C1 par rapport à C0. . 104
Figure 3.4.19 Comparaison des impacts environnementaux - C1 par rapport à C0. 105
Figure 3.4.20 Comparaison des coût aux usagers - C1 par rapport à C0. . . . 107
Figure 3.4.21 Scénarios de maintenance standard avec "manque de ressources financières" (en pointillé). 109
Figure 3.4.22 Coût de cycle de vie de la variante A0 avec deux scénarios de maintenance : "standard" et "avec un manque de ressources financières". 109

Figure 3.4.23 Scénarios de maintenance standard avec “prolongation de durée de vie en service” (en pointillé). 110
Figure 3.4.24 Coût de cycle de vie de la variante Co avec deux scénarios de maintenance : “standard” et “prolongation de durée de vie en service”. 110
Figure 3.4.25 Synthèse des études comparatives de la famille A. 112
Figure 3.4.26 Synthèse des études comparatives de la famille B. 113
Figure 3.4.27 Synthèse des études comparatives de la famille C. 114
Figure 3.5.1 Mise en évidence des valeurs $max(D_i^-)$, $min(D_i^-)$, $min(D_i^+)$ et $max(D_i^+)$ dans le plan D^-/D^+. 119
Figure 3.5.2 Exemple d’une fonction de préférence. 119
Figure 3.5.3 Visualisation des distances D_i^+ et D_i^- pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4. 125
Figure 3.5.4 Résultats de l’analyse multicritère par PROMETHEE pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4. 126
Figure 3.5.5 Visualisation des distances D_i^+ et D_i^- pour les variantes Bi avec i = 0, 1, 2, 3, 4 et 5. 128
Figure 3.5.6 Résultats de l’analyse multicritère par PROMETHEE pour les variantes Bi avec i = 0, 1, 2, 3, 4 et 5. 128
Figure 3.5.7 Visualisation des distances D_i^+ et D_i^- pour les variantes Ci avec i = 0, 1 et 2. 130
Figure 3.5.8 Résultats de l’analyse multicritère par PROMETHEE pour les variantes Ci avec i = 0, 1 et 2. 131
Figure 4.2.1 Profils de dégradation dans le temps. 136
Figure 4.2.2 Calendriers de maintenance sc_1 et sc_2 pour la variante A0. . . . 137
Figure 4.3.1 Evolution de la performance des éléments de l’ouvrage d’art. . 152
Figure 4.3.2 Calendriers de maintenance correspondant au calendrier standard SBRI (1) et aux problèmes d’optimisation mono-objectif $min(C_{gestionnaire})$ (2), $min(I_{total})$ (3) et $min(C_U)$ (4) pour la variante A0 - Ma1. 154
Figure 4.3.3 Optimisation bi-objectif pour les variantes de la famille A. . . . 158
Figure 4.3.4 Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille A - Modèle de dégradation Ma1. 159
Figure 4.3.5 Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille A - Modèle de dégradation Ma2. 160
Figure 4.3.6 Visualisation des résultats obtenus avec les optimisation mono, bi et tri-objectif et du scénario SBRI pour la variante A0. 162
Figure 4.3.7 Optimisation bi-objectif pour la sous-famille $ss - B$. 167
Figure 4.3.8 Optimisation bi-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$. 169
Figure 4.3.9 Optimisation tri-objectif pour la sous-famille $ss - B$ - Modèle de dégradation Ma1. 170

Figure 4.3.10 Optimisation tri-objectif pour la sous-famille $ss - B$ - Modèle de dégradation Ma2. 171
Figure 4.3.11 Optimisation tri-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$. 172
Figure 4.3.12 Visualisation des résultats obtenus avec les optimisations mono, bi et tri-objectif, et du scénario SBRI pour la variante B0. 174
Figure 4.3.13 Optimisation bi-objectif pour les variantes de la famille C. . . . 178
Figure 4.3.14 Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille C - Modèle de dégradation Ma1. 179
Figure 4.3.15 Optimisation tri-objectif pour les variantes de la famille C - Modèle de dégradation Ma2. 180
Figure 4.3.16 Visualisation des résultats obtenus avec les optimisations mono, bi, et tri-objectif, et du scénario SBRI pour la variante C0. 182
Figure 4.4.1 Comparaison des variantes A0 et A2 en considérant trois cas de seuil de performance pour A0. 184
Figure 4.4.2 Comparaison des variantes B4 et B5 en considérant trois cas de seuil de performance pour B4. 184
Figure 4.4.3 Comparaison des variantes B0 et B3 en considérant trois cas de seuil de performance pour B0. 186
Figure 4.4.4 Comparaison des variantes C0 et C1 en considérant deux cas de seuil de performance. 187
Figure A.1.1 Pont mixte de type bi-poutres. 209
Figure A.1.2 Pont mixte en caisson. 210
Figure A.1.3 Pont mixte de type poutrelles enrobées. 211
Figure A.1.4 Choix de type de pont mixte selon la portée. 211
Figure A.2.1 Pont Coalbrook. 212
Figure A.2.2 Viaduc de Garabit. 213
Figure D.0.1 Principe d'un algorithme génétique. 243
Figure D.2.1 Exemple d'un front de Pareto. 245
Figure D.2.2 Distance de crowding. 247

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.2.1 Catégories d'impact considérées dans l'analyse environnementale de cycle de vie. 16
Tableau 3.2.1 Cas d'étude considérés pour les familles d'ouvrages A, B et C. . 32

Tableau 3.3.1 Spécification des frontières pour l'ACCV, l'ACV et l'analyse sociétale (AS).
(o = prise en compte, n = non prise en compte)
(o* = restreint à la gène aux usagers durant l'inspection)
(o** = restreint à la gène aux usagers durant l'action de maintenance) . . . 39
Tableau 3.3.2 Type et fréquence des inspections. . . . 41
Tableau 3.3.3 Durées de vie moyennes et fréquences de maintenance des éléments constructifs d'un pont mixte acier-béton. . . . 42
Tableau 3.3.4 Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille A. . . . 43
Tableau 3.3.5 Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille B - partie 1. . . . 44
Tableau 3.3.6 Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille B - partie 2. . . . 45
Tableau 3.3.7 Détail des quantités de matériaux nécessaires pour la construction des ouvrages de la famille C. . . . 46
Tableau 3.3.8 Indices utilisés pour ajuster les prix dans les activités de construction. . . . 47
Tableau 3.3.9 Coûts unitaires concernant la dalle de béton pour les familles A et C. . . . 51
Tableau 3.3.10 Coûts unitaires concernant la dalle de béton pour la famille d'ouvrages B. . . . 51
Tableau 3.3.11 Coûts unitaires considérés pour les appareils d'appui, les équipements et les éléments de protection. . . . 52
Tableau 3.3.12 Coûts unitaires concernant les fondations et les piles pour la famille
d'ouvrages B. . . . 52
Tableau 3.3.13 Coûts unitaires concernant les différents types d'inspections. . 53
Tableau 3.3.14 Coûts unitaires concernant aux actions de maintenance (réparation/remplacement).
(b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau) . 53
Tableau 3.3.15 Coûts unitaires concernant la fin de vie. . . . 54
Tableau 3.3.16 Ensemble des processus pour l'acier structurant dans SimaPro (Gomes et al. 2012). . . . 55
Tableau 3.3.17 Données utilisées pour calculer la quantité de peinture pour la protection anticorrosion (SETRA 2011).
(ESV = Extrait sec en volume exprimé en pourcentage) . . . 56
Tableau 3.3.18 Matériaux constitutifs pour 1 m^3 de béton (Marceau et al. 2007). 56
Tableau 3.3.19 Ensemble des processus pour les aciers de renforcement dans SimaPro (Gomes et al. 2012). . . . 56
Tableau 3.3.20 Matériaux constitutifs pour 1 m^3 de béton (Marceau et al. 2007). 58
Tableau 3.3.21 Déchets générés lors des actions de maintenance concernant la protection anticorrosion (SETRA 2011). . . . 59

Tableau 3.3.22 Processus pris en compte pour les actions de maintenance. (o = prise en compte, n = non prise en compte) (inclus = matériaux transportés avec l'équipe de travail) (b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau) . 60
Tableau 3.3.23 Coûts unitaires pour les coûts aux usagers. 64
Tableau 3.3.24 Coûts unitaires pour les accidents. 64
Tableau 3.3.25 Taux de travail et restrictions concernant le trafic au dessus et en dessous de l'ouvrage pendant les actions de maintenance (réparation/remplacement). (b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau) . 65
Tableau 3.4.1 Comparaison des coûts - A1 par rapport à A0. 68
Tableau 3.4.2 Comparaison des impacts environnementaux - A1 par rapport à A0. 70
Tableau 3.4.3 Comparaison des coûts - C2 par rapport à C0. 71
Tableau 3.4.4 Comparaison des impacts environnementaux - C2 par rapport à C0. 74
Tableau 3.4.5 Comparaison des coûts - A2 par rapport à A0. 77
Tableau 3.4.6 Comparaison des impacts environnementaux - A2 par rapport à A0. 79
Tableau 3.4.7 Comparaison des coûts - B5 par rapport à B4. 80
Tableau 3.4.8 Comparaison des impacts environnementaux - B5 par rapport à B4. 83
Tableau 3.4.9 Comparaison des coûts aux usagers - B5 par rapport à B4. . . . 85
Tableau 3.4.10 Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - B5 par rapport à B4. 85
Tableau 3.4.11 Comparaison des coûts - B1, B2 par rapport à B0. 87
Tableau 3.4.12 Comparaison des impacts environnementaux - B1 et B2 par rapport à B0. 90
Tableau 3.4.13 Comparaison des coûts aux usagers à 100 ans - B1, B2 par rapport à B0. 91
Tableau 3.4.14 Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - B1 et B2 par rapport à B0. 92
Tableau 3.4.15 Comparaison des coûts - A3, A4 par rapport à A0. 93
Tableau 3.4.16 Comparaison des impacts environnementaux - A3, A4 par rapport à A0. 96
Tableau 3.4.17 Comparaison des coûts aux usagers - A3, A4 par rapport à A0. 98
Tableau 3.4.18 Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - A3, A4 par rapport à A0. 98
Tableau 3.4.19 Comparaison des coûts - B3 par rapport à B0. 99
Tableau 3.4.20 Comparaison des coût aux usagers - B3 par rapport à B0. 101
Tableau 3.4.21 Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - B3 par rapport à B0. 102
Tableau 3.4.22 Comparaison des coûts - C1 par rapport à C0. 103
Tableau 3.4.23 Comparaison des impacts environnementaux - C1 par rapport à C0. 106

Tableau 3.4.24 Comparaison à 100 ans des coût aux usagers - C1 par rapport à Co. 107
Tableau 3.4.25 Comparaison à 100 ans des impacts environnementaux dus à la congestion du trafic - C1 par rapport à Co. 108
Tableau 3.5.1 Matrice de performance pour m critères associés à n variantes. 116
Tableau 3.5.2 Matrice de performance pour 3 critères associés à 4 variantes. . 117
Tableau 3.5.3 Fonctions de préférence de PROMETHEE. 120
Tableau 3.5.4 Comparaison par paire de variantes (fonction de préférence "Vrai-critère"). 121
Tableau 3.5.5 Matrice de flux de surclassement (fonction de préférence "Vrai-critère"). 122
Tableau 3.5.6 Comparaison par paire de variantes (fonction de préférence "Critère gaussien"). 122
Tableau 3.5.7 Matrice de flux de surclassement (fonction de préférence "Critère gaussien"). 122
Tableau 3.5.8 Détail des critères et des systèmes de poids considérés. 124
Tableau 3.5.9 Ratios R_i obtenus pour les variantes Ai avec i = 0, 1, 2, 3 et 4. . 124
Tableau 3.5.10 Ratios R_i obtenus pour les variantes Bi avec i = 0, 1, 2, 3, 4 et 5. 127
Tableau 3.5.11 Ratios R_i obtenus pour les variantes Ci avec i = 0, 1 et 2. 129
Tableau 3.6.1 Synthèse des avantages (+) et inconvénients (-) des différentes variantes par rapport aux variantes de référence associées. 134
Tableau 4.2.1 Coûts et impacts pour les deux scénarios de maintenance sc_1 et sc_2. 137
Tableau 4.2.2 Coefficients de normalisation et de pondération (Stranddorf et al. 2003, Du & Karoumi 2012). 138
Tableau 4.2.3 Temps de passage T_1 et T_2 basés sur le scénario du projet SBRI (cf. TABLEAU 3.3.3). 141
Tableau 4.2.4 Matrices de transition par élément d'ouvrage et évolution de la probabilité d'appartenance aux états E1, E2, et E3. 142
Tableau 4.2.5 Définition des classes IQOA. 144
Tableau 4.2.6 Types d'ouvrages. 145
Tableau 4.2.7 Matrices de transition par élément d'ouvrage et évolution de la probabilité d'appartenance aux classes 1, 2 et 2E (cf. TABLEAU 4.2.6 pour les notations). 147
Tableau 4.2.8 Temps de passage avec les matrices de transition estimées à partir du système de notation IQOA. 149
Tableau 4.3.1 Seuils de performance du projet SBRI. (b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle du béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussées) 151
Tableau 4.3.2 Optimisation mono-objectif pour les variantes de la famille A. . 155
Tableau 4.3.3 Comparaison du scénario SBRI au résultat du calcul d'optimisation $min(C_{gestionnaire})$-bis. 156
Tableau 4.3.4 Optimisation mono-objectif pour la sous-famille $ss - B$. 164
Tableau 4.3.5 Optimisation mono-objectif pour la sous-famille $ss - \hat{B}$. 165

Tableau 4.3.6 Optimisation mono-objectif pour les variantes de la famille C. . 176
Tableau 4.4.1 Seuils de performance considérés pour la protection anticorrosion. 183
Tableau 4.4.2 Seuils de performance considérés pour des joints de chaussées. 185
Tableau 4.4.3 Seuils de performance pour l'étude de la différence entre des variantes avec deux tabliers (variante C1) ou un seul (variante C0). 186
Tableau B.1.1 Détail des coûts (en euros 2008) de la famille A. 218
Tableau B.1.2 Détail des impacts environnementaux pour la construction de la famille A. 219
Tableau B.1.3 Détail des impacts environnementaux pour la vie en service de la famille A. 220
Tableau B.1.4 Détail des impacts environnementaux pour la fin de vie de la famille A. 221
Tableau B.1.5 Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille A.
Scénario de "jour". 222
Tableau B.1.6 Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille A.
Scénario de "nuit". 223
Tableau B.2.1 Détail des coûts (en euros 2008) de la famille B. 224
Tableau B.2.2 Détail des impacts environnementaux pour la construction de la famille B. 225
Tableau B.2.3 Détail des impacts environnementaux pour la vie en service de la famille B. 226
Tableau B.2.4 Détail des impacts environnementaux pour la fin de vie de la famille B. 227
Tableau B.2.5 Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille B.
Scénario de "jour". 228
Tableau B.2.6 Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille B.
Scénario de "nuit". 229
Tableau B.3.1 Détails des coûts (en euros 2008) de la famille C. 230
Tableau B.3.2 Détail des impacts environnementaux pour la construction de la famille C. 231
Tableau B.3.3 Détail des impacts environnementaux pour la vie en service de la famille C. 232
Tableau B.3.4 Détail des impacts environnementaux pour la fin de vie de la famille C. 233
Tableau B.3.5 Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille C.
Scénario de "jour". 234
Tableau B.3.6 Détail des impacts externes dus à la congestion du trafic pour la famille C.
Scénario de "nuit". 235