



ISSN : 1270-9840

SÉRIE BIMESTRIELLE N° 3/2011

(anciennement : Annales de l'I.T.B.T.P.,
Revue créée en 1948)

JUIN 2011

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
Serge KEBABTCHIEFF**RÉDACTION****Rédacteur en chef**François BUYLE-BODIN,
université de Lille**Représentant****l'Association Française
de Génie Civil AFGC**Jean-Marc TANIS (EGIS),
président du CA
Bruno GODART (LCPC), président du Comité
des Affaires Générales
Patrick GUIRAUD (Cimbéton),
vice-président du CAG
Thierry KRETZ (SETRA),
Président du Comité Scientifique et Technique**Représentant l'Association
Universitaire de Génie
Civil AUGC**Denys BREYSSE
(université de Bordeaux),
président du CA
Christophe PETIT, comité d'organisation
des rencontres de la Bourboule
Fabrice GATUINGT (ENS Cachan),
membre du CA, chargé du prix jeunes
chercheurs René Houpert
Ahmed LOUKILI,
membre du conseil scientifique**Représentant le LCPC**

Jean-Luc CLÉMENT, direction scientifique

Représentant la SMA-BTP et le GIS MRGenCi
(maîtrise des risques en génie civil)
Vincent MELACCA**Représentant l'Union des Ingénieurs et
Scientifiques Francophones UISF**

Élie ABSI, président

Gilbert GIACOMONI (École des Mines de Paris),
responsable des publications**ABONNEMENT :**

Editions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre - 75002 PARIS
Tél. : 01 42 86 55 65 - Fax : 01 42 60 45 35**FABRICATION : AGPA EDITIONS**4, rue Camélinat - 42000 Saint-Etienne
Tél. : 04 77 43 26 70 - Fax : 04 77 41 85 04
E-mail : agpaedit@wanadoo.fr**PUBLICITÉ** - À la rédaction**IMPRESSION**

sommaire

éditorial

Colloque GC'2011 organisé par l'AFGC

Innovation dans le génie civil au service de la conception

Guide d'aide au choix des classes d'exposition pour maîtriser la durabilité
des ouvrages en béton..... 7
*François TOUTLEMONDE, Henry THONIER, Patrick GUIRAUD,
Philippe FRANCISCO*

Approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art en béton :
présentation et exemples d'application sur le réseau de la DIR Centre Est 18
*Bruno GODART, Brigitte MAHUT, Didier BRAZILLIER,
Christophe AUBAGNAC, Bruno BOULET*

Analyse du cycle de vie d'un pont..... 27
*Christophe AUBAGNAC, Patrick GUIRAUD, Guillaume HABERT,
Amélie SEMAT-PONCHEL, Yannick TARDIVEL, Christian TRIDON*

Respect de l'environnement

L'A65, une conception environnementale évolutive même en phase chantier ... 38
Sandrine CHOTARD, Didier KOENIG

Diogen : base de données d'impacts environnementaux des matériaux pour
les ouvrages de génie civil..... 46
Guillaume HABERT, Yannick TARDIVEL, Christian TESSIER

Maintenance des ouvrages

Contrôle des efforts dans les haubans et suspentes : une nécessité pour la
gestion des ouvrages d'art 55
C. SAUVAGE, P. GILLES

abstracts — résumés	4
annonces de colloques.....	65
recommandations aux auteurs.....	68
bulletin d'abonnement.....	2



Photos de couverture : les auteurs
Crédits photos : les auteurs



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. 01 42 86 55 65 – Fax 01 42 60 45 35

Nom

Raison sociale.....

Adresse

Code postal Ville Pays

Je m'abonne pour l'année **2011** (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : 230 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : 277 € |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : 287 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : 331 € |

À partir du 2^e abonnement :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : 184 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : 221 € |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : 231 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : 265 € |

Surtaxe aérienne 2,90 € par volume (2,90 x 6) soit 17,40 €

- Je joins :
- ☐ Un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA
 - ☐ Un virement bancaire aux Editions ESKA -
BNP Paris - Champs Elysées - 30004-00804 - Compte 000101399.56

* 3/2011

LISTE DES ANNONCEURS

ÉDITIONS ESKA : 2^e - 3^e et 4^e de couverture

éditorial

Les 22 et 23 mars se sont tenues dans le grand amphithéâtre de l'ESTP à Cachan les journées techniques GC'2011 dont le thème portait sur **l'innovation dans le Génie Civil au service de la construction durable**. L'objectif de ces journées était de faire un bilan des innovations dans les domaines de la conception, de l'exécution et de la maintenance des structures de génie civil dans l'optique d'une construction durable respectueuse de l'environnement et de présenter les nouveaux développements en matière de ville durable et d'éco-quartiers. En effet, la conception, la construction et la gestion des ouvrages intègrent de plus en plus des critères de développement durable comme la santé, le respect de l'environnement, la réduction de l'énergie consommée, l'économie des ressources naturelles, la limitation des rejets, la maîtrise des risques, sans oublier la démarche d'intégration dans le site.

Ces journées ont été organisées en 5 sessions qui ont respectivement traité de l'innovation dans le génie civil au service de la conception, de la construction, puis de la réhabilitation, des villes durables et éco-quartiers, et enfin du respect de l'environnement et des énergies renouvelables. Le présent numéro des Annales du BTP reprend et publie certaines communications qui ont été présentées lors de ces journées et qui intéressent particulièrement le lectorat de cette revue. Compte tenu du nombre élevé de communications jugées intéressantes, il s'avère que deux numéros des Annales seront nécessaires, et nous allons donc commencer par présenter les articles relatifs aux thèmes de l'innovation au service de la conception et du respect de l'environnement.

Le premier article présente le guide d'aide au choix des classes d'exposition de la norme NF EN 206 relative au béton afin d'aider les divers représentants de la profession à mieux appréhender le choix des classes d'exposition qu'ils sont amenés à faire pour pouvoir maîtriser la durabilité de leurs constructions. Le second article décrit la nouvelle démarche initiée par l'IFSTTAR (ex-LCPC) afin de promouvoir une approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art en béton fondée sur la mesure et le suivi d'indicateurs de durabilité. Le troisième article présente les résultats d'une analyse très concrète du cycle de vie d'un pont-dalle en béton armé construit récemment, analyse réalisée de façon collective et publiée par CIMBETON. Le quatrième article décrit la conception environnementale de l'Autoroute de Gascogne construite par EIFFAGE TP qui est la première autoroute française construite après le Grenelle de l'Environnement et qui a intégré dans sa conception la préservation de la qualité de vie des habitants, la protection de l'environnement et la biodiversité. Le dernier article est une contribution à l'analyse du cycle de vie par la création d'une base de données librement accessible à la profession et pilotée par le groupe DIOGEN de l'AFGC ; cette base destinée à alimenter les outils d'évaluation des ouvrages, aura la particularité d'associer à chaque donnée un indice de confiance.

Pour conclure cet éditorial, je souhaiterais remercier l'éditeur des Annales du BTP pour l'occasion qu'il nous donne de diffuser à un public plus large certaines communications présentées lors des journées d'étude de l'AFGC.

Bruno GODART
Président du Comité des Affaires Générales de l'AFGC

Note du rédacteur en chef

Nous avons complété ce numéro 3 de 2011 avec un article proposé par des collègues belges en charge de la maintenance des ponts à haubans. Le lecteur pourra ainsi découvrir les nouvelles approches de diagnostic de ce genre d'ouvrage de Génie Civil de plus en plus répandu.

résumés — abstracts

GUIDE D'AIDE AU CHOIX DES CLASSES D'EXPOSITION POUR MAÎTRISER LA DURABILITÉ DES OUVRAGES EN BÉTON

François TOUTLEMONDE, Henry THONIER,
Patrick GUIRAUD, Philippe FRANCISCO

Les textes normatifs européens relatifs aux ouvrages en béton et produits préfabriqués structuraux prennent en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classe d'exposition. Ces classes traduisent les actions dues à l'environnement auxquelles le béton et les armatures de chaque partie d'ouvrage vont être exposés pendant la durée d'utilisation de la structure. Leur spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande. Les visées spécifiques des différentes normes et la multiplicité des praticiens concernés ont conduit à une nécessaire mise en commun des interprétations, de façon à aider à une spécification homogène des classes d'exposition, compte tenu des enjeux économiques liés à la durabilité des ouvrages. Un groupe de travail créé au sein de l'École Française du Béton a coordonné la préparation d'un guide pour aider les rédacteurs de cahiers des charges à choisir les classes d'exposition pour les catégories d'ouvrages ou de constructions concernées : ouvrages de bâtiment, ponts, ouvrages maritimes et fluviaux, tunnels et ouvrages souterrains, ouvrages divers de génie civil. Ce guide constitue une indication du consensus technique actuel cohérent avec les niveaux d'exigence prescriptifs et/ou performantiels associés, à ce jour, aux classes d'exposition, en lien avec les durées d'utilisation de projet de référence en vigueur. Il contribue à rendre possible une réponse optimisée et responsable aux objectifs de durabilité en termes de formulation des bétons et de conception des ouvrages.

GUIDE TO THE CHOICE OF EXPOSURE CLASSES FOR A BETTER CONTROLLED DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

European standards related to concrete structures and to structural precast products take durability into account using the concept of exposure classes. These classes express environmental effects which concrete and reinforcement of each part of the structure will be submitted to during the structure service life. It is the owner's responsibility to specify them, so that he is engaged in defining the risks and operation conditions associated to the structure he orders. The specific scopes of the different standards and the variety of concerned practitioners who will use them have led to share interpretations for favouring homogeneous specification of exposure classes, considering the economic stakes associated to structures durability. A task group was thus created within EFB (the French Foundation for Concrete Knowledge) in order to coordinate preparation of a guidance document intended to help specifications writers in selecting exposure classes for the structures concerned : building components and constructions, bridges, marine structures, tunnels and other civil works. This guide indicates the present technical consensus in consistence with prescriptive and/or performance-based up-to-date requirements associated to the exposure classes and to the reference design service lives presently in force. It contributes to make a responsible, consistent and optimized approach of durability possible, in terms of concrete proportioning and engineering and of structural design.

APPROCHE PERFORMANTIELLE DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES D'ART EN BÉTON : PRÉSENTATION ET EXEMPLES D'APPLICATION SUR LE RÉSEAU DE LA DIR CENTRE EST

Bruno GODART, Brigitte MAHUT, Didier BRAZILLIER,
Christophe AUBAGNAC, Bruno BOULET

L'article présente la nouvelle approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art en béton telles qu'elle est exposée dans le guide technique publié par le LCPC en mars 2010. Il décrit les 6 étapes de cette méthodologie : le choix de la durée d'utilisation de projet, la prise en compte des conditions d'environnement et les principaux risques de dégradation traités, la sélection des indicateurs de durabilité et les spécifications associées, la formulation du béton incorporant les épreuves d'étude, les épreuves de convenance et de contrôle, et la façon de constituer le point zéro de la durabilité sur ouvrage.

Pour étayer cette approche et prendre la mesure des éventuelles difficultés de mise en œuvre, la Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est a testé cette nouvelle méthode sur deux de ses chantiers :

- un viaduc en Saône et Loire à Volesvres avec la réalisation des essais induits par l'approche performantielle en parallèle d'un CCTP classique et des contrôles habituels. Cet ouvrage a également été équipé de capteurs de corrosion électrochimiques pour suivre en réel l'effet de la carbonatation et de la pénétration des chlorures ;
- un viaduc dans l'Allier sur la déviation de Montluçon avec la rédaction du CCTP selon une approche de durabilité spécifiée de 100 ans via une porosité à l'eau inférieure à 12% et une perméabilité accessible aux gaz inférieure à $150 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ sans autres prescriptions que le respect des normes pour les composants.

L'article conclut sur les premiers retours d'expérience sur les plans scientifique, pratique et organisationnel, ainsi que sur les retombées potentielles en matière de développement durable sur la conception des infrastructures.

PERFORMANCE BASED APPROACH OF THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES: INTRODUCTION AND EXAMPLES OF APPLICATION TO THE NETWORK OF THE CENTRE-EST DIR

The paper presents a new performance based approach to the durability of concrete structures as it is exposed in the technical guide published by LCPC in March 2010. It describes the six steps of this methodology: the choice of the design working life, the consideration of environmental conditions and main risks of damage dealt with, the selection of durability indicators and related specifications, the formulation of concrete incorporating the tests for study, convenience and control, and the way to establish the zero state of the durability of the structure on site.

To support this approach and take the measure of possible difficulties of implementation, the "Centre Est" Interdepartmental Directorate of Roads has tested this new method on two of its projects:

- a viaduct in Saône et Loire Department at Volesvres with the tests generated by the performance approach in parallel with a

conventional CCTP and normal controls. This structure has also been equipped with electrochemical corrosion sensors for monitoring the real effect of carbonation and chloride penetration;

- *a viaduct in Allier Department on the deviation of Montluçon by drafting the CCTP according to a durability approach specified over 100 years through a porosity to water below 12% and a permeability to gas below $150 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ without any other additional requirements than those conforming to the standards for components.*

The article concludes with the first feedback on the scientific, practical and organizational aspects, as well as with the potential benefits in developing sustainable infrastructure design.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UN PONT

Christophe AUBAGNAC, Patrick GUIRAUD,
Guillaume HABERT, Amélie SEMAT-PONCHEL,
Yannick TARDIVEL, Christian TRIDON

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est la méthode la plus complète pour réaliser l'inventaire des flux, quantifier et synthétiser les impacts environnementaux d'une structure, d'un ouvrage, d'un produit, d'un service ou d'un procédé durant l'ensemble de son cycle de vie. Cette démarche normalisée, quantitative, multiétapes et multicritères permet de quantifier les impacts environnementaux et d'apprécier la qualité environnementale d'un ouvrage sur la totalité de son cycle de vie.

Cette démarche a été appliquée au cas concret d'un pont courant en béton (Passage Supérieur en Dalle Précontrainte) représentatif du patrimoine des ouvrages d'art routiers et autoroutiers français. Nous avons d'abord collecté, les entrants (matières ou énergies consommés à chacune des étapes du cycle de vie), les sortants (émissions dans l'eau, dans l'air et dans le sol et les déchets produits à chaque étape), puis nous avons déterminé les impacts environnementaux générés par l'ouvrage au cours de l'ensemble de son cycle de vie.

Dans cet article nous présentons les principaux résultats en terme d'impacts environnementaux du cycle de vie d'un pont courant en béton. Une étude de sensibilité de ces impacts est ensuite effectuée afin de valider la robustesse des résultats.

Cet article permet ainsi de synthétiser les principaux acquis de cette étude et les connaissances et expertise à développer pour décliner l'utilisation de la démarche à l'ensemble des ouvrages de Génie Civil.

LIFE CYCLE ANALYSIS OF BRIDGE

Life Cycle Assessment (LCA) method is the most appropriate method to evaluate the environmental impact of a product or a process. The methodology follows standards and allows a quantification of different environmental impacts which is necessary to appreciate the environmental quality of a structure during all its life cycle.

In this study, this method has been applied to the specific case of a concrete bridge (Prestressed concrete bridge) which is common to the panel of French bridges. Input and output data have been collected for each step of the life cycle. Environmental impact calculation has then been determined following NF P 01-010 standards.

In this paper, the environmental impacts for the whole life cycle of the bridge are shown and a sensitivity analysis is performed to evaluate the robustness of the results. This paper allows then to gather the main knowledge that this study has highlighted in order to better apply this methodology for further building structure in the near future.

L'A65, UNE CONCEPTION ENVIRONNEMENTALE ÉVOLUTIVE MÊME EN PHASE CHANTIER

Sandrine CHOTARD, Didier KOENIG

L'A65, autoroute de Gascogne, première autoroute française construite après le Grenelle de l'Environnement, se devait d'être exemplaire du point de vue de la préservation de la qualité de vie des habitants, de la protection de l'environnement et de la biodiversité.

La conception multicritère développée par le groupement Concepteur – Constructeur, GIEA65 piloté par EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS, a permis de définir le tracé de moindre impact de l'A65 en intégrant l'ensemble des enjeux environnementaux et les usages répertoriés d'un secteur tout en respectant les engagements de l'État. La nouveauté sur l'A65 a été d'avoir dimensionné les ouvrages, non plus seulement sur des considérations hydrauliques, mais également sur des considérations écologiques.

La conception s'est poursuivie en phase chantier en interaction directe avec les aléas terrain (terrain instable, source,...). Elle a aussi été évolutive pour atteindre l'objectif de transparence écologique maximale de l'infrastructure. En effet, durant la phase travaux, des ingénieries spécialisées ont été missionnées pour auditer le travail de conception afin de valider les aménagements spécifiques à chaque contexte et de les adapter si besoin. Ce travail a permis d'identifier les ouvrages « déjà adoptés » par la faune, avant même l'achèvement des travaux.

Cette phase avait pour objectif de confronter le projet conçu à la réalité terrain avec la part d'inconnu lié au comportement de la faune vis-à-vis des perturbations et des aménagements.

La construction de l'A65 ne pouvait qu'impliquer des mesures de protection strictes en phase chantier pour s'assurer la protection de la ressource en eau, de la sauvegarde des espèces et des habitats en associant une formation et sensibilisation du personnel.

THE A65 MOTORWAY – A PROGRESSIVE ENVIRONMENTAL DESIGN CONCEPT EVEN AT THE CONSTRUCTION STAGE

The A65 motorway in south west France was the first French motorway to be built after the Grenelle Agreement's environmental legislation came into force. It was therefore duty bound to set an example in safeguarding local residents' quality of life, protecting the environment and enhancing biodiversity.

The design and construction consortium GIEA65 headed by EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS came up with a multi-requirement design enabling the definition of a motorway layout with limited impact on the environment and including impact-offset zones. A balance was maintained between consideration for environmental issues and local needs and activities on the one hand, and honouring administrative commitments on the other. Structural dimensions were no longer established according to hydraulic criteria alone, but also on the basis of environmental issues – a major innovation.

The concept progressed throughout the construction stage, interacting with building-site difficulties such as unstable land, or a spring. Environmental transparency targets set for the infrastructure were reached. While building was underway, specialized engineers were assigned to audit the design concept and approve developments specific to each particular context, adapting them if need be. They were thus able to identify structures "already adopted" by local fauna even before the completion of building work. The aim of this phase was to confront a project designed around practical site realities with

the hitherto unknown behaviour of fauna faced with disturbance and changes in habitat.

Building the A65 motorway necessarily involved strict protection measures at the construction stage to ensure the preservation of water resources, species and habitats, training the workforce and raising awareness.

DIOGEN : BASE DE DONNÉES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX POUR LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Guillaume HABERT, Yannick TARDIVEL,
Christian TESSIER

Les premières études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'ouvrages de génie civil ont permis de mettre en évidence que les impacts environnementaux liés à la production de matériaux et de l'énergie constituaient des données déterminantes. En raison de leur importance, ces données doivent donc être fiables, ce qui suppose l'identification des sources et la préservation de la traçabilité, exigences qui peuvent se heurter à des chaînes d'approvisionnement longues ou des systèmes qualité inadaptés.

Les données doivent en outre être représentatives, à la fois de l'objet étudié et des technologies de production des matériaux. Il est donc nécessaire de connaître la destination du matériau et les critères de certification autorisant son utilisation pour choisir des valeurs d'impacts adaptées, dans la mesure où elles sont disponibles.

Au-delà du recensement des données disponibles, DIOGEN propose une méthodologie de qualification des données qui doit permettre d'évaluer la confiance que l'on peut accorder aux valeurs proposées par les producteurs de matériaux et par les bases de données. A l'issue de ce travail, une donnée environnementale se verra attribuer un indice de confiance qui reflètera notamment sa fiabilité et son adéquation avec son domaine d'application, à savoir le génie civil.

Le concepteur d'ouvrages de génie civil pourra donc s'appuyer sur DIOGEN pour construire une évaluation environnementale représentative et fiable à partir de données matériaux (domaine "cradle-to-gate"), puis y adjoindre les données relatives aux autres étapes du cycle de vie étudiées.

DIOGEN: ENVIRONMENTAL IMPACT DATABASE OF MATERIALS FOR CIVIL WORKS

Previous Life Cycle Assessment (LCA) studies on civil engineering works highlight that it is critical to have reliable data on the environmental impacts associated with the production of materials. This requires being able to identify sources and trace data through long supply chains.

Data must also be representative of both, the object of the study and the technologies used to produce the materials. It is therefore necessary to know the destination of the material and the criteria for certification allowing its use in order to choose suitable data.

Beyond data collection, DIOGEN provides a methodology for calculating how trustworthy data provided by industries and

environmental database is. Following this work, a trust index that reflects the reliability and the relevance for civil engineering applications of environmental data will be assigned for each environmental product declaration.

The designer of engineering works can therefore rely on DIOGEN database to build a representative and reliable LCA study, using data materials (field "cradle-to-gate"). Then further data for other stages of life cycle can be added.

CONTRÔLE DES EFFORTS DANS LES HAUBANS ET SUSPENTES : UNE NÉCESSITÉ POUR LA GESTION DES OUVRAGES D'ART

C. SAUVAGE, P. GILLES

La connaissance des efforts dans les haubans, suspentes ou câbles de post contrainte extérieure est une donnée importante tout au long de la vie d'un pont.

Lors de la construction, cette information va permettre de contrôler la bonne répartition des efforts dans la structure. En outre, pour les ponts haubanés, la valeur exacte de ces efforts intervient dans le réglage final nécessaire pour obtenir le profil en long souhaité.

Durant toute la vie de l'ouvrage, la vérification de ces valeurs va permettre de contrôler son bon fonctionnement et de mettre rapidement en évidence l'existence de désordres.

La mesure des fréquences propres permet aisément de déterminer ces efforts. C'est une technique rapide et précise (incertitude de 2 à 5 %).

L'article débute par un rappel de la méthode et se poursuit par l'exposé de quelques cas pratiques investigués par la Direction de l'Expertise des Ouvrages. Plusieurs types de campagnes de mesures sont évoqués : mesure durant la construction (viaduc de Millau), contrôle lors de l'essai de chargement et suivi des efforts durant la vie du pont.

FORCE MEASUREMENT IN STAY CABLES AND STRUTS: A NECESSITY FOR BRIDGE MANAGEMENT

Knowledge of forces in stay cables, struts or post-tensioning cables is very important all along the bridge life.

During the bridge erection, this information will allow to control the uniform stress repartition in the deck structure. Further more for stay bridges, the exact forces has to be known to adjust the longitudinal profile.

During bridge life, these forces must also be control to verify good structural behaviour.

Determining the forces by measuring own frequencies is a rapid and accurate (2 to 5%) method.

This paper explains the measurement method and afterwards, it presents some measurements cases performed by the Direction de l'Expertise des Ouvrages. Different kinds of campaigns are described: measurements during bridge erection (Millau viaduct) and forces control during load test or bridge life.

GUIDE D'AIDE AU CHOIX DES CLASSES D'EXPOSITION POUR MAÎTRISER LA DURABILITÉ DES OUVRAGES EN BÉTON

François TOUTLEMONDE¹, Henry THONIER², Patrick GUIRAUD³, Philippe FRANCISCO⁴

¹ LCPC – ² EGF BTP – ³ CIMbéton – ⁴ CERIB

1. ENJEUX

Les classes d'exposition constituent, en complément de la durée d'utilisation de projet (« design service life » [2]), la clé d'entrée de la durabilité des ouvrages en béton telle que prise en compte dans les normes en vigueur suivantes : Eurocode 2 [3-6], norme béton [1], norme d'exécution des structures en béton [8], normes de produits préfabriqués de structure [7]. Leur spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande. Qu'elle soit traitée de façon prescriptive ou au moins partiellement performantielle, la conception durable de l'ouvrage se trouve gouvernée par ces données d'entrée, afin de répondre à l'objectif consistant à s'assurer d'une durée probable de service contractualisée, sans réparation majeure, compte tenu des agressions et risques probables [15].

Si les classes d'exposition constituent depuis quelques années des concepts connus et mis en pratique parce que

participant à la désignation du béton commandé et à sa composition en application de la norme NF EN 206-1, il est important de noter qu'elles sont aussi à utiliser :

- dès le stade du projet pour la détermination des enrobages (NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 4)
- dès le stade du projet pour la maîtrise de la fissuration (NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 7)
- et lors de la construction, pour préciser les spécifications d'exécution dont par exemple les classes de cure (PR NF EN 13670).

Ainsi, le niveau de précision avec lequel les classes d'exposition sont déterminées influe directement sur le degré avec lequel la durabilité et le coût d'un ouvrage sont optimisés.

Cependant, les visées spécifiques des différentes normes qui font référence à ces classes et la multiplicité des praticiens concernés par leur utilisation ont conduit à une nécessaire mise en commun des interprétations, de façon à

aider à une spécification homogène et responsable des classes d'exposition, compte tenu des enjeux économiques liés à la durabilité des ouvrages concernés. Tel a été le travail fédéré par le groupe de l'Ecole Française du Béton animé par Henry Thonier, s'appuyant pour les différents types d'ouvrages sur le travail des experts concernés.

2. CONTEXTE D'ÉLABORATION DU GUIDE

L'École Française du Béton (EFB) est une Fondation regroupant les principaux acteurs de la construction des ouvrages en béton de bâtiment et de génie civil (cimentiers, fédérations professionnelles, associations, entreprises, laboratoires). C'est une école sans mur dont l'objectif est de promouvoir la connaissance du matériau béton et le calcul du béton armé, spécialement dans le domaine de l'enseignement secondaire et supérieur. Constatant que la notion de classes d'exposition des ouvrages en béton était insuffisamment connue des acteurs de la construction, et que son emploi restait difficile, le conseil scientifique de l'EFB a décidé de créer, dans le prolongement d'actions initiées par le CERIB d'une part, le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées d'autre part, un groupe de travail animé par Henry Thonier, ayant pour but la mise au point d'un guide à l'attention des maîtres d'ouvrage et de leurs maîtres d'œuvre pour la rédaction des cahiers des charges. En effet, qui mieux que le maître d'ouvrage connaît les caractéristiques, la destination et l'usage qu'il fera de ses ouvrages ? Ce groupe de travail a rassemblé des membres représentant l'Administration (LCPC, CETMEF, CETU), les bureaux de contrôle (SOCOTEC, APAVE), les fédérations professionnelles (FFB, FNTP, EGF-BTP, UMGO, SNBPE), les entreprises (Eiffage, Bouygues), les organismes techniques (CERIB, CIMbéton). La rédaction initiale a été principalement assurée par Laetitia d'Aloïa (CETU), Patrick Dantec (LRPC Clermont-Ferrand), Sébastien Dupray (CETMEF), Philippe Francisco (CERIB), Patrick Guiraud (CIMbéton), Michel Menguy (LRPC Saint-Brieuc), Wilfried Pillard (UMGO), Jean-Marc Potier (SNBPE), Patrick Rougeau (CERIB) et

François Toutlemonde (LCPC). Une trentaine de personnes ont ainsi été associées au déroulement et au suivi de la rédaction du guide et à sa validation.

Le guide est constitué de 7 fascicules couvrant l'ensemble des ouvrages de bâtiment et de génie civil (Tableau 1). Le guide complet est accessible en ligne sur le site www.efbeton.com. La partie du fascicule 1 dédiée aux produits industrialisés destinés aux bâtiments ou aux réservoirs, piscines, aux ouvrages de traitement des effluents ou de stockage agricole (relevant du groupe Planchers Ossatures de la FIB) a été publiée en décembre 2009 par le CERIB et la FIB [11]. Les fascicules 2, 3 et 5 ont fait l'objet d'une publication spéciale dans la collection technique de CIMbéton [12-14] sous forme de cahiers « Solutions Béton » (Figure 1), en plus d'une insertion comme cahier central de la revue « Construction Moderne » (CM OA 2010) pour le fascicule 2, également repris dans le guide LPC « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton : Application de l'approche performantielle » de mars 2010 [15]. Une feuille de calcul a de plus été élaborée afin de fournir les valeurs seuils (caractéristiques performantielles ou prescriptions) auxquelles doit satisfaire le béton d'un ouvrage ou d'un élément d'ouvrage donné pour une ou plusieurs classes d'exposition déterminées à partir des fascicules. Cette feuille donne également les résistances minimales du béton par application de la norme NF EN 206-1 et les enrobages minimaux $c_{min,dur}$ de l'Eurocode 2.

3. CLASSES D'EXPOSITION : CONTEXTE NORMATIF ET DÉFINITIONS

3.1. Normes et textes de référence

La norme NF EN 206-1 [1] définit dans son article 4.1 « Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement » 18 classes d'exposition regroupées par risque de corrosion (XC, XD, XS) et d'attaques (XF, XA) dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton est soumis. La norme fournit pour

Fascicule N°	Nature d'ouvrages
1	Ouvrages de bâtiment préfabriqués et coulés sur site
2	Ouvrages d'art
3	Ouvrages maritimes, fluviaux et de navigation intérieure
4	Ouvrages d'équipements de la route et chaussées
5	Tunnels creusés
6	Tranchées couvertes, galeries, casquettes et caissons immergés
7	Ouvrages divers de génie civil

Tableau 1 : Organisation du guide



Figure 1 : Pages de garde des fascicules 1 (CERIB/FIB : produits en béton relevant du groupe « Planchers Ossatures » de la FIB), 2 et 3 (collection technique de CIMbéton « Solutions Béton »)

chaque classe d'exposition une description normative de l'environnement et donne à titre informatif des exemples illustratifs. Ces éléments sont repris dans la norme NF EN 13369 [7] couvrant les produits préfabriqués structuraux. Cette description est par ailleurs reprise dans l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1 [3]) dans la section 4 « Durabilité et enrobage des armatures ». Cette section fait l'objet de nombreuses clauses complémentaires dans l'annexe nationale NF P 18-711-1/NA [5]. En particulier (clause 4.2(2)), les exemples illustratifs du tableau définissant les classes d'exposition sont rendus normatifs pour ce qui concerne l'enrobage, compte tenu de 8 notes explicatives. Quelques éléments complémentaires pour les ponts sont par ailleurs fournis par la norme NF EN 1992-2 [4] et son annexe nationale [6]. La mise au point des annexes nationales de ces normes a nécessité un important travail de calibrage croisé, retracé en particulier dans le document « Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2. Note technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France » publié par le LCPC en 2005 [17].

Le choix des classes XC1 à XC4 (corrosion induite par carbonatation, niveau de sévérité croissant de 1 à 4) et XS1 à XS3 (corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer, niveau de sévérité croissant de 1 à 3) se déduit assez directement des normes ci-dessus, moyennant la prise en considération de l'ensemble des clauses. Le choix des classes XD1 à XD3 (corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine, niveau de sévérité croissant de 1 à 3), XF1 à XF4 (attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage, niveau de sévérité croissant de 1 à 4) et XA1 à XA3 (attaque chimique, niveau de sévérité croissant de 1 à 3) nécessite en revanche la prise en compte d'informations nationales spécifiques (sévérité du gel, fréquence de salage, concentration en agents chimiquement agressifs...) fournies par des textes complémentaires : fascicules de documentation FD P 18-011 « Définition et classification des environnements chimiquement agressifs » [9] et FD P 18-326 « zones de gel en

France » [10], ou encore guide d'aide à l'élaboration des dossiers d'organisation de la viabilité hivernale (Sétra, 1994) repris dans les « recommandations gel » du LCPC [18].

Si ces textes constituent effectivement le référentiel, leur multiplicité et leurs visées diverses (formulation du matériau ou vérification de la protection des armatures), même s'il s'agit dans tous les cas de favoriser la durabilité de l'ouvrage, constituent un frein à une application cohérente, et l'élaboration du guide EFB d'aide au choix des classes d'exposition a nécessité d'en dégager après analyse des principes aussi cohérents que possible pour en faciliter l'application. Ces principes sont détaillés ci-après.

3.2. Risques de corrosion des armatures et attaques du béton

Corrosion induite par carbonatation

Les critères de choix des classes XC1 à XC4 issus de la norme européenne, fondés sur l'humidité, ont été précisés par l'annexe nationale de l'EN 1992-1-1 [5] où les exemples ont été rendus normatifs pour ce qui concerne leur application à la détermination de l'enrobage, en insistant sur les critères d'occurrence de condensations importantes (par leur fréquence et leur durée) et d'exposition aux intempéries. Le risque dont on vise à se prémunir provient en effet non seulement de la pénétration du dioxyde de carbone, favorisée par une humidité relative modérée, mais aussi de la disponibilité d'oxygène pour provoquer la corrosion des armatures. Le transport d'eau liquide contrôle ainsi le mécanisme dans une plage importante d'humidités relatives, et les brusques variations hydriques de surface avec apport d'eau liquide augmentent fortement le risque de corrosion induite par carbonatation, en particulier lorsque le béton d'enrobage est assez poreux suite à une cure insuffisante par exemple, ou à cause d'un rapport eau/liant excessivement élevé en surface compte tenu de la mise en œuvre.

Type de bâtiment	Local considéré ou partie d'ouvrage	Face exposée	Corrosion par carbonatation
Tout bâtiment superstructures	local clos et couvert sans phénomène de condensation persistante (plancher courant, cuisine, sanitaires, salle d'eau...)	plafond, plancher, mur	XC1
	local clos et couvert avec phénomène de condensation persistante (buanderie, papeterie, local de piscine...)	plafond, plancher, mur	XC3
	balcon, loggia	sous-face jusqu'à la goutte d'eau	XC3
		autres faces	XC4
	extérieur hors toiture terrasse (façades, passage entre bâtiments...)	plafond	XC3
		mur	XC4
	toiture terrasse avec étanchéité	plancher	XC1
		acrotère et émergences	XC4
Tout bâtiment infrastructures	vide sanitaire ventilé	plafond	XC3
		mur	XC4
	vide sanitaire moyennement ventilé	plafond	XC3
		mur	XC4
	vide non ventilé sous plancher bas	plafond	XC3
		mur	XC4
	sous-sol (cave ou garage)	plafond, plancher	XC1
		mur face intérieure	XC1
		mur face au contact de la terre	XC2
	longrine et fondation	totalement enterrée	XC2
		partiellement enterrée	XC4

**Tableau 2 : Indications extraites du guide
fascicule 1 - risque de corrosion induite par carbonatation (classes XC)**

De façon à clarifier la prise en compte détaillée de la prévention du risque de corrosion, en permettant le cas échéant une optimisation du béton et/ou de l'enrobage, le guide décline et détaille donc les parties d'ouvrage à considérer en fonction non seulement de l'humidité environnante moyenne, mais aussi de la fréquence de cycles d'imbibition / séchage (Tableau 2).

Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

Le risque de corrosion induite par les chlorures est lié à la fois à la pénétration de ces ions jusqu'aux armatures, et à la disponibilité d'oxygène pour provoquer la réaction. La situation la plus pénalisante (classe XS3) concerne donc les zones de marnage et soumises aux embruns, ces derniers provoquant des cycles d'immersion / séchage d'eau salée qui accélèrent le transport des ions chlore à cause de l'interaction avec les mouvements d'eau liquide, devant les zones immergées en permanence (XS2) car la diffusion d'oxygène dissous y est relativement lente. La distinction avec la classe XS1 est à comprendre de façon plus nuancée que par seule référence à la distance à la côte, en relation avec ce critère d'éventuels apports réguliers d'eau liquide salée en plus de l'apport de sels par voie aérienne seulement. La mise en application de ces principes est illustrée par le Tableau 3, issu du fascicule dédié aux ouvrages d'art.

Corrosion par les chlorures ayant une origine autre que marine - salage

En application de la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1 (notes 4 et 6) le choix de la classe XD1, XD2 ou XD3 se réfère non seulement à l'effet aggravant des cycles d'humidification / séchage, selon les indications du tableau 4.1 de la norme NF EN 1992-1-1, mais également à la fréquence de salage des chaussées et des ouvrages exposés [5]. Le cas échéant, le salage est considéré comme « peu fréquent » lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, « très fréquent » lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et « fréquent » entre ces deux cas. En application ou par analogie avec les dispositions issues de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-2 [6] les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée peuvent être considérées comme exposées ou très exposées aux projections de sels de déverglaçage, selon la fréquence du salage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes dans leur zone géographique, certaines parties d'ouvrages peuvent ne pas être exposées aux effets du salage, on considèrera alors pour ces parties d'ouvrages la colonne « salage peu fréquent ». La mise en application de ces principes est illustrée par le Tableau 4, issu du fascicule dédié aux ouvrages d'art.

Parties d'ouvrage	XS	
	Moins de 100 m de la côte et équiv.	100 à 1000 m de la côte et équiv.
Fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)		
Fondations de tous types entièrement immergées	XS2	XS2
Fondations de tous types en zone de marnage	XS3	XS3
Fondations profondes enterrées hors eau de mer	XS1	–
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XS3	XS1
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XS1	–
Appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes		
Parties immergées	XS2	XS2
Parties en zone de marnage	XS3	XS3
Parties enterrées	XS1	–
Parties à l'air libre	XS3	XS1
Faces intérieures des piles ou culées creuses	XS1	–
Dalles de transition	XS1	–
Tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)		
Face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	–	–
Faces extérieures	XS3	XS1
Faces intérieures des caissons	XS1	–
Équipements et superstructures		
Corniches	XS3	XS1
Solins de joints de dilatation	XS3	XS1
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XS3	XS1
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XS3	XS1
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XS3	XS1
Corniches-caniveaux	XS3	XS1

**Tableau 3 : Indications extraites du guide
fascicule 2 - risques de corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer (classes XS)**

Par ailleurs, indépendamment du salage induit par l'exploitation routière, le risque de corrosion provoquée par les chlorures autres que ceux provenant de l'eau de mer peut également être induit par la destination de certains ouvrages et leur exploitation : rétention de liquides chlorés, nettoyage avec javellisation, contact avec des sels chlorurés, etc.

Gel/dégel

Dans l'aide au choix des classes d'exposition vis-à-vis du gel (XF), qui se fonde en France notamment sur la carte des zones de gel, le guide tient compte des interprétations actualisées de la norme NF EN 206-1 en cours d'harmonisation avec les autres textes. Ainsi le caractère horizontal

ou vertical de la paroi concernée, critère mis en avant par le texte européen en lien avec l'état de saturation en eau du béton, intervient de façon secondaire par rapport aux conditions géographiques responsables du nombre de cycles de gel-dégel, et au salage qui augmente ce nombre et favorise les dégradations par écaillage en surface. On note que l'attaque gel-dégel est à prendre en compte sur l'ensemble de l'épaisseur de la partie d'ouvrage considérée, même quand une seule face est exposée.

Attaque chimique par l'eau de mer

En France, pour éviter l'attaque chimique du matériau béton dans le cas particulier de l'exposition à l'eau de mer, il est admis par le fascicule FD P 18-011 [9], appelé par la

Parties d'ouvrage fondations	XD		
	Salage peu fréquent	Salage fréquent	Salage très fréquent
Fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)			
Fondations de tous types entièrement immergées	–	–	–
Fondations de tous types en zone de marnage	–	–	–
Fondations profondes enterrées hors eau de mer	–	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	–	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	–	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2
Appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes			
Parties immergées	–	–	–
Parties en zone de marnage	–	–	–
Parties enterrées	–	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2
Parties à l'air libre	–	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3
Faces intérieures des piles ou culées creuses	–	–	–
Dalles de transition	–	XD2	XD2
Tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)			
Face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	–	–	–
Faces extérieures	–	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie
Faces intérieures des caissons	–	–	–
Équipements et superstructures			
Corniches	–	XD3	XD3
Solins de joints de dilatation	–	XD3	XD3
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	–	XD3	XD3
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	–	XD3	XD3
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	–	XD3	XD3
Corniches-caniveaux	–	XD3	XD3

**Tableau 4 : Indications extraites du guide
fascicule 2 - risque de corrosion par les chlorures ayant une origine autre que marine (classes XD)**

norme NF EN 206-1, d'appliquer les prescriptions de composition de la classe XS1 (parties exposées à l'air véhiculant du sel marin et, par interprétation de la norme, à l'infiltration des chlorures marins pour les parties enterrées), XS2 (béton immergé en permanence) ou XS3 (béton en zone de marnage et d'exposition aux embruns) des tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 de la norme NF EN 206-1, que l'élément de béton soit armé ou non, et non les prescriptions de composition de la classe XA3 qui résulteraient de l'application du tableau 2 de la norme NF EN 206-1 [1]. Pour le cas d'ouvrages au contact d'eau de mer polluée ou mélangée à d'autres eaux de surface, par exemple, une analyse est à effectuer au cas par cas vis-à-vis des attaques chimiques possibles.

3.3. Classes associées à d'autres risques

Pour assurer la durabilité de certains ouvrages dans leurs conditions futures d'exploitation, il peut être nécessaire de considérer, outre les classes d'exposition associées aux risques de corrosion des armatures et d'attaque du béton, le risque d'abrasion. Le guide mentionne ce risque lorsqu'il est potentiellement à préciser dans les cahiers de charges, en cohérence avec les spécifications normalisées prévues. Ainsi, le risque d'abrasion est à apprécier par exemple pour les ouvrages maritimes, en fonction du niveau d'agressivité de la houle, des courants, des fluides circulant dans et autour de l'ouvrage, de la fréquence des tempêtes, des frottements d'amarres, des jets d'hélices, de la présence de sédiments, corps flottants ou matériaux abrasifs pouvant être mis en suspension, etc. De façon générale la prévention du phénomène pourra s'appuyer sur la résistance à l'abrasion du matériau béton (obtenue par exemple par un faible rapport eau/ciment, la qualité des granulats, l'incorporation de fibres...) caractérisée éventuellement par des performances obtenues par des essais d'abrasion spécifiques. Dans le cas du béton armé, ce risque sera exprimé par le choix de la classe d'abrasion XM1, XM2 ou XM3 (sévérité croissante de 1 à 3) et la prévention de l'abrasion pourra en outre s'appuyer sur une épaisseur sacrificielle d'enrobage comme prévu par la clause 4.4.1.2 (13) de la norme NF EN 1992-1-1 [3].

Le guide complète également, pour les fascicules 2, 3, 5, 6 et 7, l'aide au choix des classes d'exposition associées aux risques de corrosion des armatures et d'attaque du béton, par des indications associées à la prévention de la réaction sulfatique interne, en application du guide technique « Recommandations pour la prévention des désordres dus aux réactions sulfatiques internes » publié par le LCPC en août 2007 [16]. Ce guide précise en effet : « la norme NF EN 206-1 ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne, trois classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont introduites... et doivent être spécifiées au CCTP pour chaque partie d'ouvrage... Les spécifications définies (dans le guide en question pour la prévention de la RSI) devront être prises en compte en complément de celles imposées par la norme NF EN 206-1. » Par analogie avec la démarche de prévention de l'alcali-réaction, le niveau de prévention, et donc les précautions à mettre en œuvre, est associé non seulement à

la classe d'exposition XH1, XH2 ou XH3, mais également au choix d'une catégorie d'ouvrage ou d'élément d'ouvrage, I, II ou III, qui relève de la responsabilité du maître d'ouvrage et dépend « de la nature de l'ouvrage, de sa destination, des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur ». La catégorie II comprend « les éléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants) » et la catégorie III « les ponts et viaducs exceptionnels », tandis que la catégorie I comprend « les éléments aisément remplaçables ». Le choix de la classe XH1, XH2 ou XH3 correspond à un risque d'expansion et à une amplitude de gonflement d'autant plus élevés que l'élément est exposé à un environnement où l'humidité et les apports d'eau liquide sont importants. Les connaissances actuelles sur les mécanismes chimiques en jeu ne fournissent pas de seuils d'humidité universels et facilement utilisables, en particulier à cause du risque aggravant des apports d'eau liquide même s'ils ne sont pas permanents. Aussi le guide fournit-il des indications prudentes, notamment pour les parties d'ouvrages qui ont une probabilité élevée d'être critiques au sens des recommandations susvisées.

4. ORGANISATION DES FASCICULES, PRINCIPES ET CHOIX TECHNIQUES

4.1. Tableaux et parties d'ouvrages

Pour tous les fascicules hormis le fascicule 3 concernant les ouvrages maritimes, fluviaux et de navigation intérieure, l'aide au choix des classes d'exposition est décclinée, pour les classes d'exposition liées aux risques de corrosion par carbonatation ou induite par les chlorures, attaque gel-dégel et attaques chimiques, en quatre tableaux distincts. Ces tableaux portent en lignes les parties d'ouvrages, cohérentes du point de vue constructif et vis-à-vis de l'exposition des parois, et en colonnes les risques considérés, avec pour certains risques différents niveaux de sévérité correspondant à des sous-colonnes. L'utilisateur est donc guidé pour décomposer l'ouvrage considéré en parties cohérentes à la fois en termes constructifs et en termes d'exposition de la paroi aux agents extérieurs.

Chacun de ces quatre tableaux correspond à une zone géographique différente : l'intérieur des terres soumis à un gel faible ou modéré, l'intérieur des terres soumis à un gel sévère, le bord de mer et le front de mer. Ces quatre zones, liées principalement à la localisation géographique de l'ouvrage, sont exclusives pour la France métropolitaine et la plupart des D.O.M./T.O.M. Leur définition fait référence à la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1 [5], en termes de distance à la côte et de sévérité du gel. Pour les quelques territoires soumis à la fois à un environnement maritime et au gel sévère il convient d'utiliser les indications des tableaux 1 ou 2 liés à l'environnement maritime pour les classes d'exposition XC et XS, et celles du tableau 4 lié à l'environnement en zone de gel sévère pour les autres classes, notamment XD et XF.

Selon le type d'ouvrage et sa localisation géographique, le tableau adéquat recense par partie d'ouvrage la ou les classes d'exposition à considérer à l'intersection de la ligne et de la colonne appropriées. Les classes d'exposition conditionnent aussi bien la composition du béton que l'enrobage des armatures métalliques pour les parties en béton armé et des câbles de précontrainte ou des torons pour les parties en béton précontraint, ce qui permet de mieux comprendre la logique retenue pour le découpage en parties d'ouvrage proposé par le guide. Comme chaque partie d'ouvrage peut être soumise simultanément à plusieurs agressions et attaques, il convient, pour chaque partie d'ouvrage, de déterminer toutes les classes d'exposition à considérer, afin de prendre en compte avec précision l'ensemble des actions environnementales auxquelles est soumise la face de béton exposée. C'est pourquoi la présentation sous forme de tableau permet de visualiser d'un seul coup d'œil sur la ligne correspondant à la partie d'ouvrage l'ensemble des classes à considérer. Cette partie d'ouvrage doit alors respecter toutes les valeurs limites applicables pour la composition et les propriétés du béton pour chaque classe d'exposition. Il en est de même pour les épaisseurs d'enrobage et la valeur limite à retenir pour le calcul d'ouverture des fissures.

La description des ouvrages ou parties d'ouvrage utilisée dans les tableaux ne préjuge pas de leur mode de réalisation (coulé en place ou préfabriqué). Dans le cas des produits de structure, les normes de produit renvoient à la norme NF EN 206-1 et à l'Eurocode via la norme NF EN 13369 [7], et donc aux classes d'exposition telles que déclinées dans le guide. Dans le cas des produits en béton non structuraux disposant de normes autoportantes, les normes intègrent directement les spécificités des environnements auxquels les produits sont destinés. Les tableaux indiquent alors explicitement la référence de la norme de produit qui s'applique.

Le fascicule 3 comprend quant à lui 3 tableaux, portant de la même façon en lignes les parties d'ouvrages, et en colonnes les risques considérés, mais dont la distinction n'est pas directement géographique. Le premier tableau couvre les ouvrages maritimes comprenant les ouvrages portuaires et les digues. Le second concerne les ouvrages côtiers et en mer. Pour les bâtiments, dépendances, postes de contrôle, locaux techniques et ouvrages de génie civil (par exemple les phares à terre) construits en retrait de la côte, les classes d'exposition sont à déterminer à partir des tableaux couvrant, selon le cas, les bâtiments, les ouvrages d'art ou les ouvrages de génie civil. En général on se reportera au tableau concernant les constructions situées à moins de 100 m de la côte (parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière), à cause du risque d'exposition aux embruns. On considère enfin, dans le troisième tableau, les ouvrages fluviaux ou de navigation intérieure pour lesquels l'eau est réputée douce. A titre indicatif la salinité de l'eau de mer varie de 20 à 40 g/l de NaCl. Pour les ouvrages des ports atteints par la marée ou le mascaret, on se reportera donc au tableau 1 « ouvrages maritimes en béton - ouvrages portuaires ».

Dans tous les tableaux du guide, les classes d'exposition indiquées supposent une mise en œuvre correcte dans le

respect des règles de l'art. Par exemple, une étanchéité étant prévue en revêtement des tunnels, elle est supposée être mise en place correctement et être pleinement efficace. En aucun cas, un défaut de mise en œuvre n'est pris en compte à la conception, par exemple, en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement. Les classes d'exposition indiquées ne tiennent pas compte non plus des défauts d'entretien de l'ouvrage et de ses équipements, quelquefois constatés. Il est rappelé notamment que l'évacuation des eaux est un facteur capital et doit donc être bien conçue et entretenue durant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage, et que le défaut d'entretien ne doit pas être pris en compte à la conception, par exemple en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement.

4.2. Exemples et aspects spécifiques à certains fascicules

Les fascicules adoptent autant que possible une présentation similaire des tableaux. La description explicite des ouvrages et parties d'ouvrages s'efforce de respecter au mieux les usages professionnels. Pour chaque fascicule, des précisions associées à certains risques dont l'enjeu est plus important pour les catégories d'ouvrages visées font l'objet de textes et notes d'accompagnement spécifiques. Certains de ces aspects sont détaillés ci-après. Le tableau 5 illustre la présentation typique des tableaux du guide avec les colonnes correspondant aux différents risques, et des notes associées.

Pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, toutes les parties des ouvrages côtiers et des ouvrages à la mer sont à considérer en classe XH3. Le niveau de prévention associé est en général Cs, sauf pour les ouvrages considérés comme exceptionnels (de catégorie III) où il s'agira du niveau Ds.

Ouvrages d'art

Pour les ponts l'appréciation du salage se réfère à la voie franchie par l'ouvrage le cas échéant, sauf :

- pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité en béton, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée,
- pour les corniches et corniches caniveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie le cas échéant.

Tunnels

On considère en général pour un ouvrage enterré que l'influence de l'environnement extérieur (effet du gel sur les parties non enterrées, des sels marins, du salage s'il est appliqué sur l'itinéraire en dehors de l'ouvrage considéré, etc.) peut se faire sentir jusqu'à une distance de 200 mètres à partir des têtes, parfois moins, parfois plus selon la topographie particulière. Les parties enterrées (en contact avec le sol en profondeur) sont en général considérées comme protégées du risque de gel, sauf dans les zones de gel sévère à proximité des têtes où une analyse spécifique doit être conduite.

Type d'ouvrages	Partie considérée	Corrosion par carbonatation	Corrosion par les chlorures marins	Attaques chimiques ***	Risque d'abrasion
Ouvrages de défense contre la mer et protection du littoral	Epis	XC4	XS3	(5)	(8) et (9)
	Revêtement de talus (par dalles ou éléments préfabriqués)	XC4	XS3	(5)	(8) et (9)
	Mur chasse mer, poutre de tête, couronnement	XC4	XS3	(5)	(8)
	Escaliers et rampes d'accès	XC4	XS3	(5)	(7) et (8)
Ouvrages en mer : éoliennes, balises, tourelles, feux et phares en mer	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	(5)	(8), (8) et (9) en zone de marnage
	Partie immergée en permanence ** (10)	XC1	XS2	(5)	(8)
	Partie complètement enterrée	XC2	XS1	(5)	–
Structures flottantes, ouvrages off-shore	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	(6)	(8), (8) et (9) en zone de marnage
	Partie immergée en permanence ** (10)	XC1	XS2	(6)	(8)
Ouvrages de prise et rejet d'eau, émissaires	Partie complètement enterrée	XC2	XS1	(6)	(8)
	Parties aériennes ou en zone de marnage	XC4	XS3	(6)	(8)
	Partie immergée en permanence ** (10)	XC1	XS2	(6)	(8)

(5) Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée et/ou des eaux souterraines pouvant être en contact avec l'ouvrage.

(6) Classe d'exposition à choisir entre XA1, XA2 ou XA3 en fonction du niveau d'agressivité de l'eau de mer polluée, des eaux souterraines, et des marchandises, liquides ou produits pouvant être en contact avec l'ouvrage, en fonction de son utilisation prévue et du risque de pollution accidentelle.

(7) Classe d'abrasion à choisir entre XM1, XM2 ou XM3 en fonction du niveau d'agressivité du trafic d'engins (cf. norme NF EN 1992-1-1 clause 4.4.1.2 (13)).

(8) Risque d'abrasion à apprécier en fonction du niveau d'agressivité de la houle, des courants, des fluides circulant dans et autour de l'ouvrage, de la fréquence des tempêtes, des frottements d'amarres, des jets d'hélices, de la présence de sédiments, corps flottants ou matériaux abrasifs pouvant être mis en suspension, etc. La prévention du phénomène pourra s'appuyer sur la résistance à l'abrasion du matériau béton (obtenue par exemple par un faible rapport eau/ciment, la qualité des granulats, l'incorporation de fibres...) caractérisée éventuellement par des performances obtenues par des essais d'abrasion spécifiques. Dans le cas du béton armé, ce risque sera exprimé par le choix de la classe d'abrasion XM1, XM2 ou XM3 et la prévention de l'abrasion pourra en outre s'appuyer sur une épaisseur sacrificielle d'enrobage comme prévu par la clause 4.4.1.2 (13) de la norme NF EN 1992-1-1.

(9) Ouvrage particulièrement exposé à l'abrasion induite par les matériaux et sédiments environnants.

(10) Y compris éventuellement parties d'ouvrage (ou corps morts d'amarrage) posés au fond.

Tableau 5 : Indications extraites du guide - fascicule 3 : ouvrages côtiers

Ouvrages Maritimes

Pour les ouvrages maritimes métropolitains, l'attaque gel/dégel concerne les parties aériennes ou les zones de marnage et correspond à XF1 en zone de gel faible ou modéré, sans salage ou avec salage peu fréquent, ou à XF2 en zone de gel modéré avec salage fréquent (plus de 10 jours par an). Pour le cas particulier de St Pierre et Miquelon et des Terres Australes et Antarctiques Françaises, on retiendra la classe XF4 pour les parties d'ouvrages en zone de marnage ou d'embruns.

Pour les ouvrages maritimes (tableaux 1 et 2 du fascicule 3), on considère que les parties « immergées en permanence » des ouvrages sont celles dont on peut s'assurer qu'elles sont situées, pour toute la durée d'utilisation pré-

vue de l'ouvrage, en dessous du niveau de la basse mer de vive eau, sauf dans le cas des bassins à flot où cette limite est déterminée par le mode d'exploitation du plan d'eau.

5. CONCLUSION

Si ce « guide d'aide au choix des classes d'exposition » et ses différents fascicules n'ont pas de statut officiel d'un point de vue normatif, ils constituent cependant une indication du consensus technique présent, cohérent avec les niveaux d'exigence prescriptifs et/ou performantiels actuellement associés à ces classes en lien avec les durées d'utilisation de projet de référence en vigueur (50 ans pour

les bâtiments, 100 ans pour les ouvrages de génie civil et ouvrages d'art courants).

De façon plus fondamentale, ces tableaux traduisent effectivement un état des connaissances et un retour d'expérience qu'un maître d'ouvrage ne peut plus ignorer :

- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par carbonatation, qui concerne pratiquement toutes les structures à des degrés divers, la sévérité du risque étant associée à la fois à l'humidité environnante moyenne (pénétration du gaz carbonique maximale pour une humidité relative comprise entre 40 et 70 %), et à des apports d'eau liquide (intempéries, condensations), le retour d'expérience sur le patrimoine bâti confirmant les analyses et modèles issus de la recherche
- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par pénétration des ions chlore, d'origine marine ou non : la pénétration de ces ions est favorisée par les cycles d'humidification-séchage, ce qui explique le niveau maximal de prévention à adopter pour les zones de marnage, soumises aux projections d'embruns ou directement soumises aux projections contenant des sels de déverglaçage
- la prise en compte des risques d'attaque chimique du béton et d'attaque physique liée aux cycles de gel-dégel dont le nombre et l'effet sont amplifiés par la présence concomitante de sels
- le cas échéant, la prise en compte du risque d'abrasion.
- enfin, le risque accru induit par l'apport éventuel d'eau liquide (immersion, projections ou intempéries), ou d'humidité persistante, dans le cadre de la prévention des désordres dus aux réactions de gonflement du béton et notamment à la réaction sulfatique interne.

Si un effort reste actuellement nécessaire pour chacun avant d'atteindre l'aisance parfaite dans l'emploi de ces classes, on peut néanmoins affirmer que la cohérence maintenant réelle entre l'ensemble des normes françaises et européennes sur le sujet constitue un atout pour exprimer de façon plus rationnelle l'ambition de durabilité d'un ouvrage et ses contraintes, et pour y répondre en mobilisant le meilleur des pratiques et possibilités en jouant tant sur le matériau béton que sur les dispositions d'enrobage et de ferrailage, la conception d'ensemble et de détail, les dispositifs de protection et la qualité de réalisation. On peut d'ailleurs noter que des démarches similaires sont en cours dans le contexte de la normalisation américaine et internationale [19-20]. Dans tous les cas l'enjeu est de favoriser de façon ouverte l'assurance de la qualité associée aux dispositions classiques liées à la durabilité, et aussi, en particulier dans les environnements sévères, l'émergence de variantes appropriées pour atteindre l'objectif de durabilité. Le groupe de travail de l'EFB espère ainsi avoir, par ce guide, facilité la réalisation de l'objectif partagé de constructions durables.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs ont plaisir à remercier ici non seulement les principaux rédacteurs des fascicules mais également André

Coin (EGF-BTP), Jacques Cortade (Consultant, président de la commission EC2), Mokhtar Daoudi (CETEN-Apave), Benjamin Daubilly (FNTP), François Gaudin (EGF-BTP), Aldéric Hauchecorne (CETMEF), Evelyne Osmani (Eiffage), Jean-Marie Paillé (Socotec), Benoît Thauvin (LRPC Saint-Brieuc), pour leur participation active au groupe de travail et à l'amélioration de ce guide. Ils remercient également Jean-Michel Torrenti (LCPC) pour son soutien lors de la création de ce groupe de l'EFB.

7. RÉFÉRENCES

Normes

- [1] NF EN 206-1 Béton. Partie 1 : spécification, performances, production et conformité, AFNOR, avril 2004.
- [2] NF EN 1990 / NA Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures. Annexe nationale à l'EN 1990 : 2002, AFNOR, juin 2004 (en cours de révision, classement NF P 06-100-2).
- [3] NF EN 1992-1-1 Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments, AFNOR, octobre 2005.
- [4] NF EN 1992-2 Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 2 : ponts en béton - calcul et dispositions constructives, AFNOR, mai 2006.
- [5] NF EN 1992-1-1 / NA Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. Annexe nationale à la NF EN 1992-1-1 :2005, AFNOR, mars 2007.
- [6] NF EN 1992-2 / NA Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 2 : ponts en béton - calcul et dispositions constructives. Annexe nationale à la NF EN 1992-2, AFNOR, avril 2007.
- [7] NF EN 13 369 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, AFNOR, juillet 2006.
- [8] PR NF EN 13 670 et PR NF EN 13 670/NA, Exécution des structures en béton, projet de norme, juin 2009 - projet d'annexe nationale mai 2010.

Fascicules de documentation de l'AFNOR

- [9] FD P 18-011 Béton. Définition et classification des environnements chimiquement agressifs. Recommandations pour la formulation des bétons, AFNOR, décembre 2009.
- [10] FD P 18-326 Béton. Zones de gel en France. AFNOR, novembre 2004.

Guides

- [11] Publication CERIB FIB, Les classes d'exposition. Aide à la prescription - Recommandations professionnelles, édition décembre 2009, 12 pages.
- [12] Collection technique CIMbéton, cahier « Solutions Béton », fascicule SB OA 2010-1 Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton, octobre 2010, 8 pages.
- [13] Collection technique CIMbéton, cahier « Solutions Béton », fascicule SB OA 2010-2 Guide pour le choix

des classes d'exposition des ouvrages maritimes et fluviaux en béton, décembre 2010, 8 pages.

- [14] Collection technique CIMbéton, cahier « Solutions Béton », fascicule SB OA 2010-3 Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés, février 2011, 8 pages.
- [15] techniques et méthodes des LPC, Recommandations provisoires : « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle », collectif, LCPC, mars 2010.
- [16] techniques et méthodes des LPC, Guide technique : « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne », collectif, LCPC, août 2007.
- [17] techniques et méthodes des LPC, Guide technique : « Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2.

Note technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France », F. Toutlemonde, A. Coin. LCPC, novembre 2005.

- [18] techniques et méthodes des LPC, Guide technique : « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel », collectif, LCPC, décembre 2003.

Autres références

- [19] *fib* Model Code 2010. First complete draft, vol. 1-2, *fib* Bulletin 55-56, fédération internationale du béton, Lausanne, Mars 2010.
- [20] D. S. Lane, R. J. Detwiler, R. D. Hooton, « Testing transport properties in concrete. Assessing key indicators of durability », *Concrete International*, vol. 32 n° 11, special issue « Durability », novembre 2010, pp. 33-38.

APPROCHE PERFORMANTIELLE DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES D'ART EN BÉTON : PRÉSENTATION ET EXEMPLES D'APPLICATION SUR LE RÉSEAU DE LA DIR CENTRE EST

**Bruno GODART¹, Brigitte MAHUT¹, Didier BRAZILLIER²,
Christophe AUBAGNAC³, Bruno BOULET³**

¹ IFSTTAR (LCPC) – ² DIR Centre Est – ³ CETE de Lyon

1. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Maîtriser la durée de vie d'un ouvrage représente un enjeu économique majeur pour les investisseurs, les gestionnaires et les usagers. La durabilité des ouvrages d'art en béton s'obtient par une conception soignée prenant en compte non seulement les aspects liés à l'évacuation des eaux, la maîtrise de la fissuration, les enrobages des aciers, mais aussi un choix approprié des matériaux, une bonne qualité d'exécution, des contrôles adaptés, une maintenance régulière et une utilisation conforme aux hypothèses du projet.

Le guide technique publié par le LCPC en mars 2010 [1] (Figure 1) présente les recommandations provisoires pour mettre en œuvre une approche performantielle innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé. Celle-ci est basée sur la notion d'indicateurs de durabilité qui permet d'aborder rationnellement et efficacement les exigences liées au matériau béton vis-à-vis de cet objectif de durabilité. Ce document a été élaboré par un

groupe de travail formé de représentants du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées et a été soumis à un groupe de relecteurs issus de la Profession.

Ce guide technique qui s'inscrit dans le cadre défini par la norme européenne EN 206-1 (article 5.3.3 et son annexe J), l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1/NA, tableau 4.3NF) et le fascicule 65 du CCTG (article 8.1.2.2), et qui s'inspire fortement du guide publié par l'AFGC en juillet 2004 [2], décrit une démarche comportant 6 étapes que nous allons à présent examiner. Cette démarche qui s'applique aux ouvrages d'art, est normalement de l'initiative du maître d'œuvre en accord avec le maître d'ouvrage.

1.1. Étape 1 : Choix de la durée d'utilisation du projet

Le maître d'ouvrage est responsable de la définition de la durée d'utilisation de projet de son ouvrage, durée pendant laquelle l'ouvrage doit présenter les performances attendues, sous réserve d'un entretien normal. Pour les ponts et

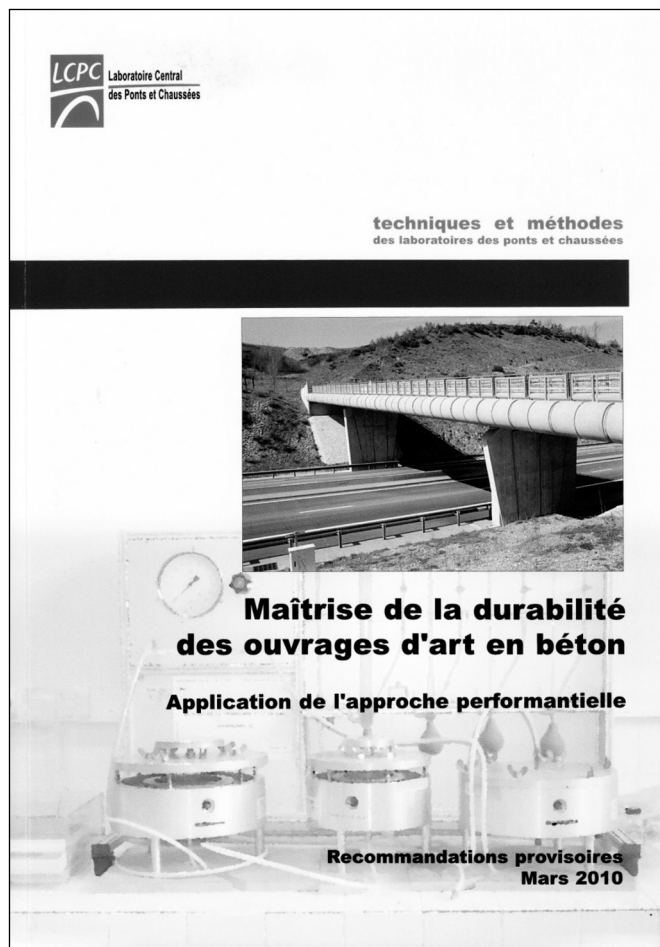


Figure 1 : Le guide technique du LCPC sur l'approche performantielle

autres ouvrages de génie civil, l'annexe nationale de la norme NF EN 1990 (Tableau 2.1 NF) préconise une durée indicative de 100 ans. Pour des ouvrages exceptionnels, une durée supérieure à 100 ans peut être souhaitée ; dans ce cas, l'ensemble de la démarche décrite par le présent guide s'applique, sous réserve d'adapter les seuils et les niveaux de prévention en application du guide AFGC [2] et des recommandations correspondantes.

1.2. Étape 2 : Conditions environnementales et principales dégradations

C'est de nouveau le maître d'ouvrage qui définit pour chaque partie d'ouvrage les classes d'exposition à prendre en compte, en fonction de l'environnement auquel seront exposées ces différentes parties. L'annexe 3 du guide fournit des indications pour l'aide au choix des classes d'exposition appropriées.

Trois risques principaux de dégradations potentielles sont actuellement pris en compte dans le guide :

1. la corrosion des armatures (due à la carbonatation et à la pénétration des chlorures),
2. les effets du gel (écaillage, gel interne),
3. les réactions de gonflement interne (alcali-réaction, réaction sulfatique interne).

1.3. Étape 3 : Choix des indicateurs de durabilité et spécifications associées

Pour chaque partie d'ouvrage et pour chaque risque de dégradations identifié à l'étape précédente, le maître d'œuvre définit les indicateurs de durabilité pertinents ainsi que les valeurs de seuil à respecter et est aidé pour cela par un certain nombre de tableaux figurant dans le guide. A titre d'exemple, nous ne présenterons par la suite que la démarche relative aux risques de corrosion.

Les indicateurs de durabilité retenus pour le risque de corrosion des armatures sont :

- la porosité accessible à l'eau (P_{eau}), par absorption sous vide exprimée en % (Figure 2) ;
- la perméabilité au gaz (K_{gaz}), exprimée en 10^{-18} m^2 (Figure 3) ;
- le coefficient de diffusion apparent des chlorures (D_{app}), exprimé en $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Figure 4).

auxquels s'ajoute, en complément, dans la perspective des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle, la mesure de la résistivité électrique (ρ) exprimée en ohm.m (Figure 5).



Figure 2 : Cloche à vide pour la mesure de la porosité à l'eau



Figure 3 : Appareillage pour la mesure de la perméabilité au gaz

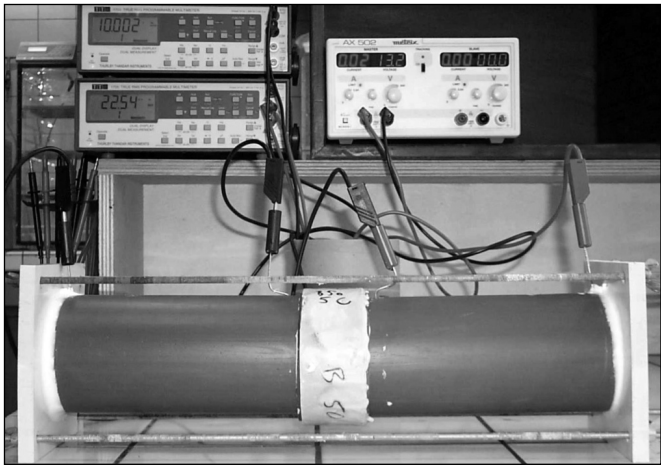


Figure 4 : Dispositif de mesure du coefficient de diffusion apparent des chlorures

Les seuils des indicateurs figurant au tableau 1 s’appliquent à des valeurs moyennes mesurées sur un béton âgé de 90 jours, pour des ouvrages dont la durée d’utilisation de projet est de 100 ans, et pour des enrobages de 30 mm vis-à-vis de la carbonatation (XC) et de 50 mm vis-à-vis de la pénétration des chlorures (XD, XS). Pour des enrobages différents, il convient d’adapter les seuils en se référant au guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie des ouvrages » [2].

Il est à noter que pour les classes XD3 et XS3, dans le cas des BAP et des bétons à base de CEM III, compte tenu de l’état actuel des connaissances, il est admis de substituer



Figure 5 : Dispositif de mesure de la résistivité

aux exigences mentionnées dans le tableau 1, les exigences suivantes : $P_{eau\ 90j} \leq 13$ et $K_{gaz\ 90j} \leq 100$ et $D_{app\ 90j} \leq 3$. Pour les autres pathologies (alcali-réaction, RSI, gel-dégel), des indicateurs de durabilité spécifiques ainsi que leurs seuils associés sont également définis (voir [1]). Enfin, les modes opératoires simplifiés des essais de résistivité électrique, de migration des chlorures sous champ électrique, de porosité à l’eau et de perméabilité au gaz CEMBUREAU sont décrits en annexe 1 du guide.

Durée d’utilisation de projet 100 ans Classes d’exposition	Seuil des indicateurs à 90 jours	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d’exposition*
XC1 Sec ou humide en permanence XC2 Humide, rarement sec	$P_{eau\ 90j} \leq 15$	Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis
XC3 Humidité modérée XC4 Alternance d’humidité et de séchage	$P_{eau\ 90j} \leq 13$ et $K_{gaz\ 90j} \leq 150$	Bétons protégés par une étanchéité Bétons exposés à l’air
XS1, Exposé à l’air véhiculant du sel marin XS2 Immergé en permanence dans l’eau de mer XD1 Exposé à des chlorures non marins trans- portés par voie aérienne XD2 Humide rarement sec, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures	$P_{eau\ 90j} \leq 13$ et $D_{app\ 90j} \leq 7$	Ouvrages à proximité d’une côte Partie d’ouvrage immergée en permanence dans l’eau de mer Zones d’un ouvrage faiblement exposées aux sels de déver- glaçage (semelles ou radiers non profonds à proximité de ou sous voies fréquemment salées)
XD3 Alternance d’humidité et de séchage, béton exposé à des projections contenant des chlorures XS3 Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	$P_{eau\ 90j} \leq 11$ et $K_{gaz\ 90j} \leq 150$ et $D_{app\ 90j} \leq 3$ **	Piles d’un ouvrage très exposées aux sels de déverglaçage Ouvrage soumis aux embruns (à moins de 100 m de la côte dans le cas général) Zones de marnage

Tableau 1 : Seuils des indicateurs à 90 jours en fonction des classes d’exposition

1.4. Étape 4 : Formulation du béton et épreuves d'étude

Les épreuves d'étude de béton sont conduites par l'entrepreneur dans le respect des exigences de l'article 85.1 du fascicule 65 du CCTG. Les constituants du béton doivent être conformes aux normes en vigueur, notamment à l'EN 206-1.

La durée de mûrissement (90 jours) du béton préalable à la mesure des indicateurs de durabilité peut être difficilement compatible avec le planning de construction. Il est donc intéressant pour les utilisateurs de disposer de catalogues de formules locales « pré-qualifiées », établis par les producteurs de béton et permettant de les dispenser d'épreuves d'études.

Une formule de béton est dite pré-qualifiée si elle respecte les trois conditions suivantes :

- le béton a été antérieurement fabriqué et mis en œuvre dans des conditions équivalentes à celles du chantier considéré : dosage et provenance des matériaux, qualité et performances du matériel de fabrication, durée de transport et d'attente du béton ;
- il a répondu à des spécifications sur les indicateurs au moins équivalentes à celles prescrites ce qui suppose que pour chaque indicateur de durabilité, les résultats d'essais lors des épreuves d'études ou de contrôle de production par exemple vérifient les conditions suivantes : le nombre de prélèvement est supérieur ou égal à 3, et les résultats de chaque prélèvement satisfont strictement les seuils prescrits ;
- les résultats datent de moins de deux ans.

Lorsque le béton ne dispose pas de références probantes, des épreuves d'étude sont alors nécessaires. Les épreuves d'étude de béton sont validées par le maître d'œuvre sur la base d'un dossier remis par l'entreprise comprenant notamment les résultats des mesures de chaque indicateur

de durabilité retenu dans le CCTP. Ces indicateurs de durabilité sont mesurés à 90 jours. En complément, et dans la perspective des épreuves de convenance, sont également réalisées :

- des mesures de porosité à l'eau à 28 jours
- des mesures de résistivité électrique à 28 jours et 90 jours.

1.5. Étape 5 : Épreuves de convenance et de contrôle

Une fois les études de béton validées par le maître d'œuvre (c'est un point d'arrêt), l'entreprise, avec l'appui du producteur de béton, organise les épreuves de convenance. Le maître d'œuvre s'assure de leur conformité (outil de fabrication, respect des dosages, etc.), et fait réaliser de façon contradictoire, par son laboratoire de contrôle extérieur, des prélèvements de béton pour valider la mesure des indicateurs de durabilité.

Vis-à-vis de la corrosion, l'épreuve de convenance se limite à des mesures à 28 jours de la porosité accessible à l'eau (P_{eau}) et de la résistivité du béton (ρ). Les résultats de ces mesures sont comparés aux valeurs de l'épreuve d'étude à 28 jours. Elle est reconnue probante si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- la porosité accessible à l'eau (P_{eau}) est conforme à celle mesurée lors des études de bétons, soit :

$$P_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} \leq 1,1.P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$$

- la résistivité électrique (ρ) est conforme à celle mesurée lors des études de bétons, soit :

$$\rho(\text{convenance})_{28j} \geq 0,8.\rho(\text{étude})_{28j}$$

Concernant les épreuves de contrôle, en cours de chantier, les contrôles de conformité sur les indicateurs de durabilité sont réalisés selon la fréquence définie dans le tableau 2 ci-après :

Nature des indicateurs	Échéance des essais	Fréquence minimale des contrôles par formule
ρ	28 jours	Une mesure jusqu'à 100 m ³ + une mesure par tranche de 100 m ³ supplémentaire ou fraction restante
P_{eau}	28 jours	Une mesure jusqu'à 100 m ³ + une mesure par tranche de 100 m ³ supplémentaire ou fraction restante
	90 jours	Une mesure jusqu'à 500 m ³ + une mesure par tranche de 500 m ³ supplémentaire ou fraction restante
K_{gaz} et D_{app}	90 jours	Une mesure jusqu'à 500 m ³ + une mesure par tranche de 500 m ³ supplémentaire ou fraction restante

Tableau 2 : Fréquence des essais

Le béton est déclaré conforme si les conditions figurant au tableau 3 sont vérifiées aux différentes échéances :

Épreuves de contrôle à 28 jours	Épreuves de contrôle à 90 jours
<ul style="list-style-type: none"> – $\rho(\text{contrôle})_{28j} \geq 0,8.\rho(\text{étude})_{28j}$ – $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} \leq 1,1.P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$ 	<ul style="list-style-type: none"> – $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{90j} \leq P_{\text{eau}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ – $K_{\text{gaz}}(\text{contrôle})_{90j} \leq K_{\text{gaz}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ – $D_{\text{app}}(\text{contrôle})_{90j} \leq D_{\text{app}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$

Tableau 3 : Conditions à respecter lors des épreuves de contrôle

1.6. Étape 6 : Point Zéro durabilité et suivi de l’ouvrage

A l’issue du chantier, le maître d’ouvrage réceptionne l’ouvrage. Il s’agit alors d’initier son suivi dans le temps. En fonction des épreuves d’étude, de convenance et des contrôles de conformité, le maître d’ouvrage avec l’appui de son maître d’œuvre établit, pour chaque partie d’ouvrage, une synthèse « durabilité » rappelant les spécifications du CCTP, les indicateurs de durabilité retenus et les valeurs correspondantes visées et mesurées, les enrobages prévus et contrôlés, etc. En complément, il est possible d’évaluer les propriétés de durabilité du béton in situ par des mesures non destructives de type mesure de résistivité et de perméabilité de surface du béton. Le suivi de durabilité du béton consiste à évaluer les « témoins de durée de vie » de chaque partie d’ouvrage. Ces témoins de durée de vie sont évalués à partir d’essais réalisés in situ ou sur prélèvements. A titre d’exemple, nous présentons ci-après les témoins de durée de vie retenus vis-à-vis de la corrosion.

En environnement sans chlorure, la durée de vie en terme de corrosion des armatures est le temps mis pour que la profondeur de carbonatation atteigne les armatures. Dans ce cas, le témoin de durée de vie est :

- l’évolution de la profondeur de carbonatation (zone où $\text{pH} < 9$),
- ou l’évolution du profil de teneur en CaCO_3 (ou en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ résiduelle), en fonction du temps.

En présence de chlorures, la durée de vie en terme de corrosion des armatures est le temps mis pour que les chlorures atteignent une valeur donnée (concentration critique $[\text{Cl}^-]_{\text{crit.}}$) au niveau du premier lit d’armatures. Dans ce cas le témoin de durée de vie est :

- l’évolution de la profondeur de pénétration des chlorures (zone où $[\text{Cl}^-] > [\text{Cl}^-]_{\text{crit.}}$),
- ou l’évolution du profil de teneur en chlorures, en fonction du temps.

Le tableau 4 définit la concentration critique en Cl^- par rapport à la masse de ciment.

2. EXEMPLES D’APPLICATION

Pour étayer cette démarche et prendre la mesure des éventuelles difficultés de mise en œuvre de cette nouvelle

approche (calage des seuils de durabilité, impact sur les productions industrielles, faisabilité pratiques et dispersion des nouveaux essais (porosité, perméabilité aux gaz), impact sur les délais de chantier,...), mais aussi pour en évaluer les conséquences en matière d’organisation et d’adaptation des hommes, la DIR CE a souhaité, en liaison avec le réseau des LRPC, participer à ce programme en proposant l’utilisation de la méthode sur deux de ses chantiers : un viaduc en Saône et Loire à Volesvres (RCEA entre Digoin et Mâcon) avec la réalisation des essais induits par l’approche performantielle en parallèle d’un CCTP classique et des contrôles habituels ; un viaduc dans l’Allier sur la déviation de Montluçon (RCEA) avec la rédaction du CCTP en application du guide technique comme exposé ci dessus pour une durabilité spécifiée de 100 ans.

Il se trouve que pour des raisons de programmation budgétaire, l’ouvrage de Montluçon a finalement été réalisé en premier et sera très prochainement en service, alors que le chantier de l’ouvrage de Volesvres est toujours en cours...

2.1. Pont sur le Cher à Montluçon

2.1.1. Présentation de l’ouvrage

Dès 2008, le réseau des LPC recherchait un chantier pilote pour mettre en œuvre une démarche d’approche performantielle pour la prescription des bétons d’un chantier de construction d’ouvrage d’art. Le laboratoire des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand étant très impliqué dans la rédaction du futur guide, le choix s’est porté avec le concours de la DIR Centre-Est sur le chantier de mise à 2x2 voies de la RN145 sur le contournement de Montluçon (Allier).

L’ouvrage qui a été choisi sur ce chantier, est un ouvrage de 80 mètres de longueur, à deux travées, fondé sur pieux, avec un tablier à ossature mixte. Il permet le doublement du franchissement du Cher. La Maîtrise d’ouvrage est assurée par la DREAL Auvergne et la Maîtrise d’œuvre par le SIR de Moulins de la DIR Centre-Est.

2.1.2. Les exigences contractuelles du CCTP sur les bétons

Sur l’ensemble de l’ouvrage, il était nécessaire de prescrire 3 types d’expositions différentes pour les bétons (tableau 5).

	Béton précontraint	Béton armé	Béton armé CEM III
pourcentage de Cl^-	0,15 % en pré-tension et 0,20 % en post-tension	0,40 %	0,65 %

Tableau 4 : Concentration critique en chlorures libres au droit des aciers, selon le type de béton

Parties d’ouvrages	Classes d’expositions	Type de prescriptions
Fondations profondes, semelles de fondation, dalle de transition	XA1, XC2	Classique – Fascicule 65
Pile, Dalle d’ouvrage mixte	XC4, XF1	Conception performantielle
Culées, Superstructures	XF4 G+S, XC4	Classique – Fascicule 65 et Recommandations LCPC pour les bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage

Tableau 5

Parties d'ouvrages	Classe d'exposition	Indicateurs principaux de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures (seuils à 90 jours)		Indicateur secondaire de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures
		P _{eau}	K _{gaz}	Résistivité
Pile et dalle d'ouvrage mixte	XC4, XF1	< 12(*)	< 150	> 100

(*) La version définitive du guide LCPC 2010 a remonté à 13% le seuil de porosité accessible à l'eau pour une classe d'exposition XC4.

Tableau 6

Les expositions aux attaques chimiques (XA) ne sont pas couvertes par le guide mais la classe d'exposition XF4 GS contient déjà une forme de conception performantielle de part l'exigence des essais d'écaillage et de facteur d'espacement. Les classes vis à vis de la RSI ont volontairement été écartées du tableau par souci de clarté. Ci-après, les prescriptions retenues pour la conception performantielle de la formule de la pile et du tablier (tableau 6).

2.1.2. Accompagnement : l'information préalable des fournisseurs de béton prêt à l'emploi (BPE)

Ne disposant évidemment pas de formules régionales pré-qualifiées, il était important de prévenir suffisamment en amont les fournisseurs BPE. Environ 5 mois avant le lancement de l'appel d'offre, le LRPC de Clermont en liaison avec le Syndicat Régional du BPE a réuni les fournisseurs susceptibles de livrer le chantier, afin de leur présenter l'approche performantielle d'une manière générale, ainsi que les prescriptions retenues pour le Pont sur le Cher. Deux d'entre eux ont lancé immédiatement des études de béton afin de pouvoir présenter un dossier d'étude complet en début de chantier. Ils ont trouvé peu de laboratoires capables de faire les essais nécessaires...

2.1.3. Les principaux résultats (tableau 7)

On constate une certaine difficulté à valider le seuil prescrit pour la porosité accessible à l'eau (12%). Ce seuil a été relevé à 13% dans le guide 2010. En revanche les perméabilités au gaz sont toutes conformes aux exigences prescrites (<150). Les écarts obtenus entre les laboratoires sont cohérents avec l'incertitude de l'essai (30%). Les mesures de résistivité électriques sont à utiliser en relatif, car nous avons constaté depuis qu'il était très difficile d'atteindre le seuil de 100 Ohm.m avec un béton à base de ciment CEM I. A contrario, ce seuil s'obtient très facile-

ment avec des bétons de CEMIII (voir Viaduc de Volesvres).

2.2. Viaduc de Volesvres

2.2.1. Présentation de l'ouvrage de doublement du viaduc de Volesvres

Les travaux en cours concernent la construction du doublement du viaduc de Volesvres dans le cadre de la mise à deux fois deux voies de la RN 79 (RCEA). Cet ouvrage est situé dans le département de Saône et Loire et permettra le franchissement de la rivière « Bourbince », de la Route Départementale n° 974 et du Canal du Centre (Figure 6).



Figure 6 : Doublement du pont actuel de Volesvres

L'ouvrage comporte 5 travées continues de 32 à 50 mètres de portée, pour une longueur totale de 206 m. Le tablier est un caisson mixte de hauteur constante, la charpente métallique du tablier est constituée d'un caisson ouvert, dont les âmes sont inclinées (Figure 7).

		Formule Pile/Dalle C35/45 XC4, XF1 400 kg CEMI 52,5 PMES			
		Porosité accessible à l'eau (%)		Résistivité (Ohm.m)	Perméabilité au gaz (10 ⁻¹⁸ m²)
Labo	Type d'épreuve	28 jours	90 jours	28 jours	90 jours
LERM	Etude	–	11,8	–	143
LRPC	Convenance	14,4	13,9	27	108
LERM	Convenance	–	12,3	50	83
LRPC	Contrôle	13,5	13,2	47	136

Tableau 7

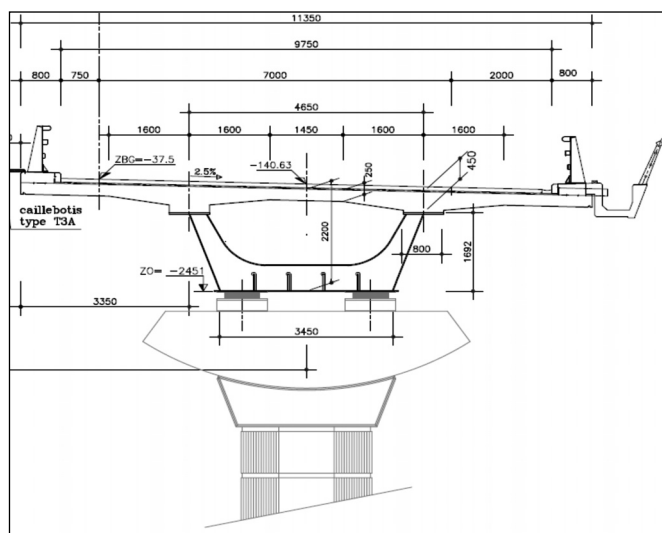


Figure 7 : Coupe du caisson sur appui

Le hourdis supérieur est constitué par une dalle en béton armé d'environ 0,30 m d'épaisseur moyenne.

Le hourdis en béton sera coulé en place par plots d'environ 40 m³, avec un phasage prévoyant de couler en dernier les plots des zones sur piles, pour éviter la fissuration de la dalle (principe du pianotage).

Le Marché a été attribué par la DREAL Bourgogne, maître d'ouvrage, au groupement d'entreprises CBR-TP (mandataire), SNCTP et IOA Construction pour le lot « charpente métallique », pour un montant d'opération de 4,013 M€ HT et un délai de réalisation de 24 mois.

La charpente métallique sera fabriquée par le charpentier métallique Suisse ZM, qui réalisera également les travaux d'anticorrosion sur site. Le montage de la charpente sera réalisé par IOA Construction (a priori à partir de mai 2011).

2.2.2. Les exigences contractuelles du CCTP sur les bétons

La durée d'utilisation du projet est de 100 ans.

L'ouvrage est situé en environnement de gel modéré. Le niveau de salage sur la voie portée RN79 sera très fréquent. Les bétons ont été prescrits suivant l'approche prescriptive classique, conforme à la norme NF EN206-1 complétée par le fascicule 65 du CCTG de décembre 2008.

Les 4 formulations principales de béton correspondent ainsi à :

- fondations profondes : C30/37 - XC2/XA1 (F) - Dmax20 - S4 - Cl0,40 avec teneur minimale en liant équivalent de 385 kg/m³, ciment de type PM et Eeff/Liant eq maxi = 0,5
- semelles, murs de front des culées, fûts des piles, dalles de transition : C30/37 - XC4/XF1 (F) - Dmax20 - Cl0,40 avec teneur minimale en liant équivalent de 330 kg/m³ et Eeff/Liant eq maxi = 0,5
- hourdis : C40/50 - XC4/XF1 (F) - Dmax20 - Cl0,40 avec teneur minimale en liant équivalent de 330 kg/m³ et Eeff/Liant eq maxi = 0,5
- longrine d'ancrage des BN4, corbeaux des murs garde-garde et solins d'ancrage des joints de chaussée : C35/45 - XC4/XF4/XD3 (F) - Dmax20 - Cl0,40 avec teneur

minimale en liant équivalent de 385 kg/m³, ciment de type CEMI ou CEMII/A (S ou D) 42,5 ou 52,5 PM ou ES et Eeff/Liant eq maxi = 0,45.

De manière générale, les justifications des parties en béton armé ont été menées conformément aux règles du BAEL 91 révisé 99, la fissuration étant considérée comme préjudiciable. Les enrobages des autres éléments sont ceux précisés à l'article A.7.1. du BAEL 91 révisé 99, pour les ouvrages soumis aux intempéries, aux condensations ou aux actions agressives (valeur minimale fixée à 3 cm).

Le niveau de prévention C vis-à-vis de la Réaction Alcali Granulats a été retenu.

Vis-à-vis des risques liés à la Réaction Sulfatique Interne, il a été retenu :

- une catégorie d'ouvrage de III (conséquence inacceptable),
- un niveau de prévention Ds pour les pieux de fondation et semelles, en contact durable avec l'eau (classe d'exposition XH3),
- un niveau de prévention Cs pour les autres parties d'ouvrage (classe d'exposition XH2).

2.2.3. Contexte de l'approche performantielle des bétons

Comme indiqué dans l'introduction, il a été décidé de tester sur cet ouvrage, de façon non contractuelle, l'application des Recommandations provisoires du LCPC de mars 2010 présentées précédemment.

Cette démarche est soutenue par le LCPC, qui a accepté la proposition du Département Laboratoire d'Autun du CETE de Lyon de réaliser, tout au long du chantier, les essais de l'approche performantielle sur deux formulations de bétons : le béton des appuis et le béton du hourdis du tablier en ossature mixte.

Les acteurs du chantier (entreprises, fournisseur de bétons : société Béton Contrôlé Montceau le Creusot) ont été sensibilisés à cette démarche. Il a également été décidé d'utiliser cette opportunité de chantier pour en faire un observatoire partagé avec la profession: l'ATILH, le SNBPE et CIMBéton ont été associés dès le démarrage des travaux.

Le programme de contrôle se conforme aux préconisations des Recommandations provisoires du LCPC de mars 2010, pour les bétons des appuis et du hourdis (classes d'exposition XC4/XF1).

Les formules de béton étudiées par la société BCMC ont été optimisées vis à vis du risque de RSI.

Ainsi, la formule « béton d'appui » (Figure 8) est dosée à 330 kg/m³ de ciment de type **CEMIII/A** 52,5 L PM-ES CP1 et comporte un dosage de 50 kg/m³ de filler calcaire. La formulation du béton du hourdis a fait l'objet d'essais d'information avec confection d'éléments témoins instrumentés par thermocouples pour le suivi d'évolution des températures du béton et essais de compression aux jeunes âges (recherche de résistances de 12 à 15 MPa).

Au final la formule « hourdis » est dosée à 350 kg/m³ de ciment de type CEMI 52,5 N CE CP2 et comporte un dosage de 55 kg/m³ de filler calcaire.

Un plan de contrôle « de principe », basé sur le planning général prévisionnel des travaux hors intempéries de l'entreprise CBR-TP, et faisant intervenir les départements laboratoires d'Autun et de Clermont-Ferrand du CETE de



Figure 8 : Pile du viaduc de Volesvres

Lyon, ainsi que les laboratoires centraux des cimentiers Lafarge et Calcia, a été établi sur les principes suivants :

- caractérisation par l'essai de porosité accessible à l'eau et l'essai de perméabilité aux gaz ;
- modes opératoires d'essais conformes à l'annexe 1 du guide LCPC : « Modes opératoires simplifiés : Résistivité électrique et migration des ions chlorure sous champ électrique. Porosité à l'eau. Perméabilité au gaz CEMBUREAU » ;
- prélèvements, par formule de béton et échéance d'essai (28 ou 90 jours) de 3 éprouvettes cylindriques 11 x 22 pour la mesure de la porosité accessible à l'eau et de la résistivité ;
- prélèvements, par formule de béton, de 3 éprouvettes cylindriques 15 x 30 pour la mesure de la perméabilité au gaz (90 jours) ;
- prélèvements pour essais « d'information » à 28 jours : une mesure jusqu'à 100 m³ + une mesure par tranche de 100 m³ supplémentaire ou fraction restante ;
- prélèvements pour essais « de contrôle » à 90 jours : une mesure jusqu'à 500 m³ + une mesure par tranche de 500 m³ supplémentaire ou fraction restante.

Il est prévu que les prélèvements destinés aux différents laboratoires soient réalisés :

- sur les mêmes fournitures de béton, pour pouvoir comparer les résultats d'essais et estimer la reproductibilité des essais ;
- sur des fournitures différentes de béton, pour pouvoir avoir un plus grand nombre de résultats d'essais et donc une meilleure connaissance de la dispersion inhérente à la production du béton ;

- à la livraison sur le chantier ou sur le site des centrales BPE.

2.2.4. Les premiers résultats

Après quelques difficultés pour la mise au point de l'application des modes opératoires d'essais, essentiellement en ce qui concerne le conditionnement préalable des échantillons, les premiers résultats de mesure de porosité accessible à l'eau obtenus par les laboratoires d'Autun et de Clermont-Ferrand sont proches.

Ils excèdent cependant les seuils fixés par les recommandations provisoires du LCPC de mars 2010 d'environ :

- + 1% maxi pour les bétons formulés à partir de ciment CEMI,
- + 3,5% maxi pour le béton d'appuis formulé à partir de ciment CEMIII.

Les premières mesures de perméabilité au gaz se conforment aux seuils des recommandations provisoires.

2.2.5. Démarche complémentaire de mise en œuvre de capteurs de corrosion

Le LCPC a souhaité que soient testés des capteurs de corrosion dans certaines parties en béton armé de l'ouvrage.

Les « kits capteurs de corrosion » retenus, de type électrochimiques et qui sont fabriqués par le Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) du Portugal, partenaire du LCPC, comprennent :

- 2 capteurs de courant galvanique (mesures à 2 profondeurs dans l'épaisseur d'enrobage) ;
- 1 électrode de référence « longue durée de vie » MnO₂ ;
- 2 capteurs de résistance électrique CER pour mesure de la résistivité du béton ;
- 1 sonde de température Pt100.



Figure 9 : Vue du capteur de corrosion du LNEC et de la sonde de température Pt100

Une analyse de risques a permis d'identifier 4 (+1) zones à instrumenter :

- le parement du fût d'une pile (risque de corrosion = carbonatation + projections d'eau chargée de sels de déverglaçage) et parement opposé de la même pile (risque de corrosion = carbonatation) pour comparaison (figure 6) ;
- la face avant du mur garde-grève d'une culée (point bas du profil en long) (risque de corrosion = carbonatation + ruissellements avec sels de déverglaçage) ;



Figure 10 : Installation d'un capteur de corrosion au sein du ferrailage d'une pile

- la sous-face de l'encorbellement du hourdis béton côté TPC au droit d'une pile et d'une culée (risque de corrosion = carbonatation + ruissellements avec sels de déverglaçage), Des réservations (tubes PVC) sont prévues à l'intérieur des éléments concernés pour le passage des câblages. Un relevé précis des enrobages est réalisé dans les zones d'emplacement des kits capteurs avant la mise en œuvre du béton. Il est prévu la mise en place en fin de chantier d'un système d'acquisition de données, constitué de 2 centrales (1 sur la pile P3 et 1 sur la culée C0), avec modems et alimentation électrique par panneaux solaires, qui seront disposés en partie supérieure de l'ouvrage au droit du Terre Plein Central. Affaire à suivre sur 2011 et 2012

3. PREMIÈRES CONCLUSIONS

La réceptivité des entreprises et des BPE est bonne pourvu que l'on assure une information suffisante en amont des appels d'offres pour anticiper ce type d'approche loin d'être naturelle... mais :

- Le nombre restreint de laboratoires capable de réaliser les essais de durabilité et de prodiguer des conseils pour l'optimisation des formules est faible ; il en résulte des coûts élevés et des difficultés pour les acteurs de terrain à trouver les bons appuis.
- Le producteur de béton doit être considéré comme un partenaire à part entière et non comme un simple fournisseur que l'on prévient au dernier moment en lui donnant qu'un extrait du CCTP !
- Les entreprises doivent intégrer le fait que la maîtrise de la formulation du béton et sa conformité au cahier des charges lui revient entièrement ; elles doivent muscler et structurer leur contrôle intérieur en ce sens et ne pas s'en remettre au contrôle extérieur (ceci n'est pas spécifique de l'approche performantielle mais prends ici un relief particulièrement important...).
- Il est nécessaire de d'intensifier la communication et la diffusion des expériences, la pénétration des ces innova-

tions dans le quotidien des acteurs de terrain étant toujours très difficile... (cf BHP, BAP, etc).

La mise en œuvre de l'approche performantielle nécessite une forte anticipation de tous les acteurs : la qualification de la formule, en l'absence de référence, nécessite au moins 120 jours (fabrication, prélèvements, préparation des échantillons, durée des essais) il faut en tenir compte dans la période de préparation des chantiers et viser l'association du BPE dès la remise des offres, ce qui n'est pas (loin s'en faut !) la pratique courante. A terme, on peut espérer avoir un catalogue de formules régionales permettant de gagner un temps précieux. Une réflexion est à mener, également, pour développer des indicateurs secondaires plus rapides pour dégrossir les formules ou les pré-réceptionner...

Le but visé par l'approche performantielle, dans une logique de développement durable, est bien sur la durabilité, mais également la recherche d'une économie potentielle des ressources en adaptant la formulation aux performances spécifiées et non à des dosages minimums imposés. Or, le coût des essais et leur durée conduit les entreprises et BPE à proposer des formulations « haut de gamme » pour être sûres de qualifier leur béton sans avoir à recommencer les études... il nous faut réfléchir à de nouvelles formes de rémunération de l'optimisation des formules (prix pour plusieurs épreuves d'études à mener de front, prix unitaire du m³ de béton avec un intéressement sur l'économie des fournitures énergivores,...) encore faut-il que le BPE soit informé par l'entreprise de ces dispositions !

La détermination des seuils repose, pour le moment sur l'analyse des bétons de référence utilisés dans le cadre du vieillissement de corps d'épreuves pour BHP 2000, une phase d'optimisation économique des seuils indiqués dans le guide, sans pour autant dégrader la durabilité sera nécessaire, dès que l'on disposera d'un nombre d'applications suffisant pour construire un bon retour d'expérience, en particulier sur le seuil de porosité. Par ailleurs, les seuils des essais performantiels du guide ont été établis essentiellement à partir de bétons formulés avec un ciment de type CEM I ; il conviendra d'apprécier l'influence d'autres types de ciment.

Enfin, le surcoût observé sur ces deux premières applications est très raisonnable et pourrait sans doute être annulé avec une bonne optimisation des formules. Ceci est de nature à encourager maintenant, une diffusion plus large sur nos chantiers de cette méthode.

4. RÉFÉRENCES

- [1] LCPC - Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle – Recommandations provisoires, Techniques et méthodes des LPC, 56 pages, Mars 2010.
- [2] AFGC - Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – Etat de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité – Juillet 2004.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UN PONT

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

¹ CETE de Lyon

² CIMbéton

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

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

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

⁶ STRRES

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

1.1. Présentation

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

Dans cette méthode, on peut distinguer 4 étapes principales :

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

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

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

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

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

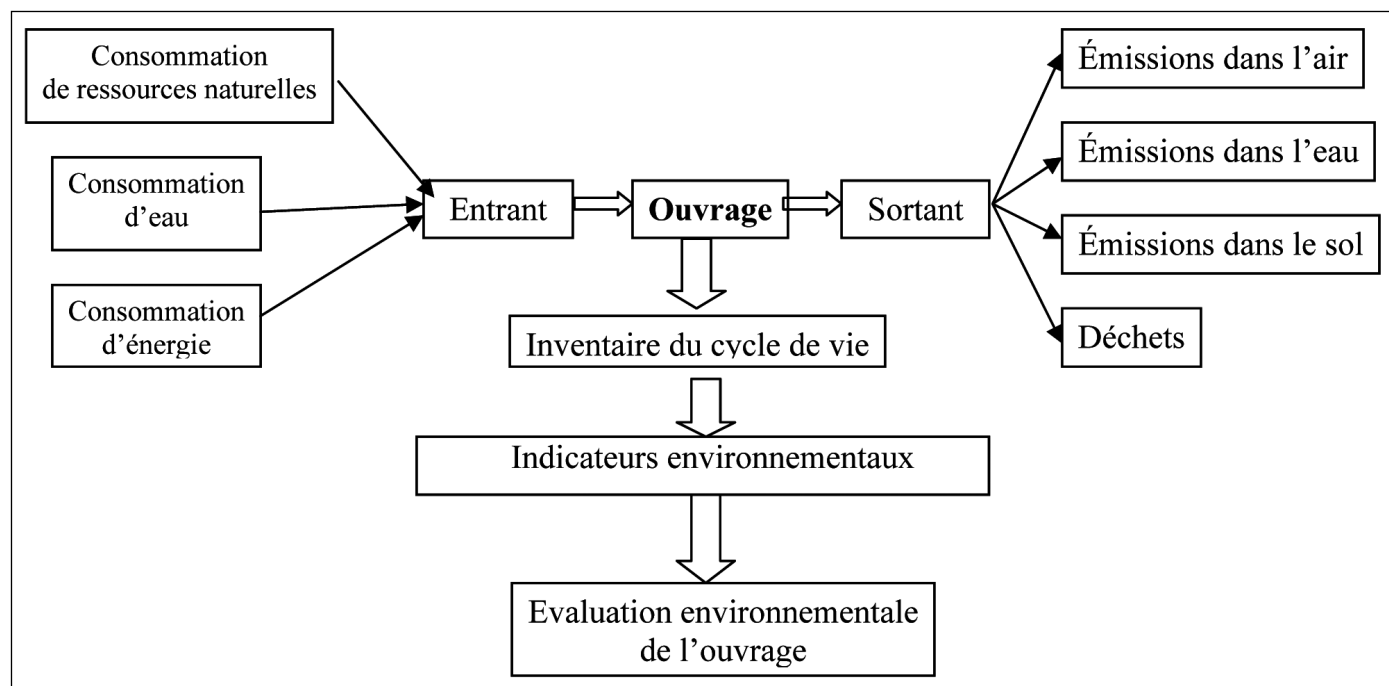


Figure 1 : Synoptique de l'évaluation environnementale d'un ouvrage (d'après Chen et al., 2008)

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

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

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

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

Nous avons distingué :

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

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

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

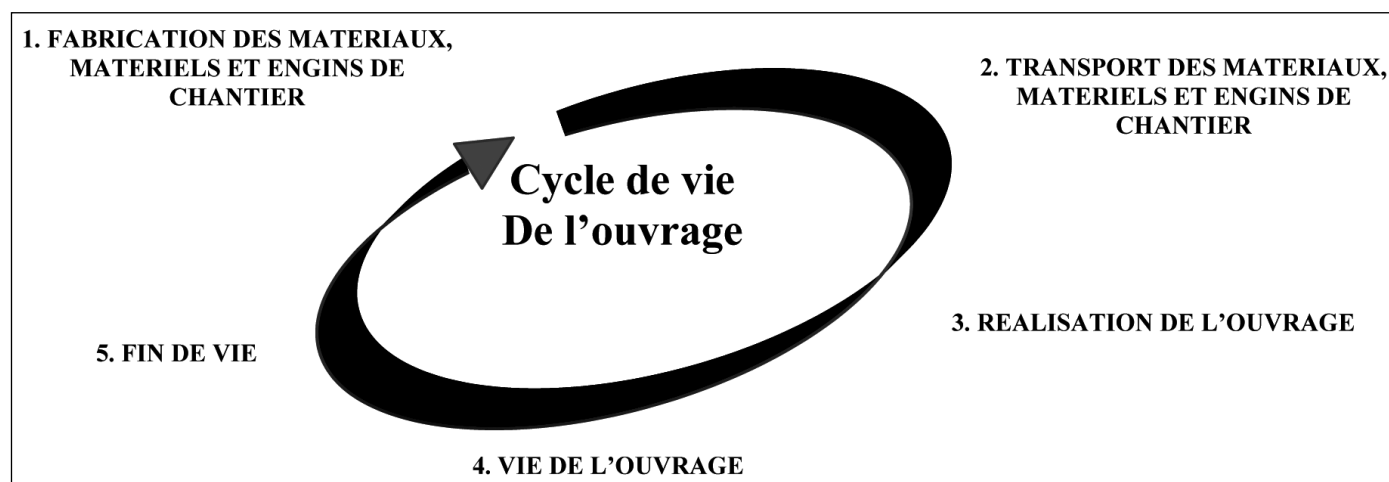


Figure 2 : Les 5 étapes du cycle de vie d'un ouvrage

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

1.2.3. Étape 3 : réalisation de l'ouvrage

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

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

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

1.2.4. Étape 4 : Vie de l'ouvrage

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

1.2.5. Étape 5 : Fin de vie

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

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

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

Les données environnementales utilisées sont issues en particulier :

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

- de bases de données internationales accessibles via internet.

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

1.4. Impacts environnementaux

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

1.4.1. Description

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

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

1.4.2. Calcul des impacts environnementaux

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

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

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

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

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

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

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

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

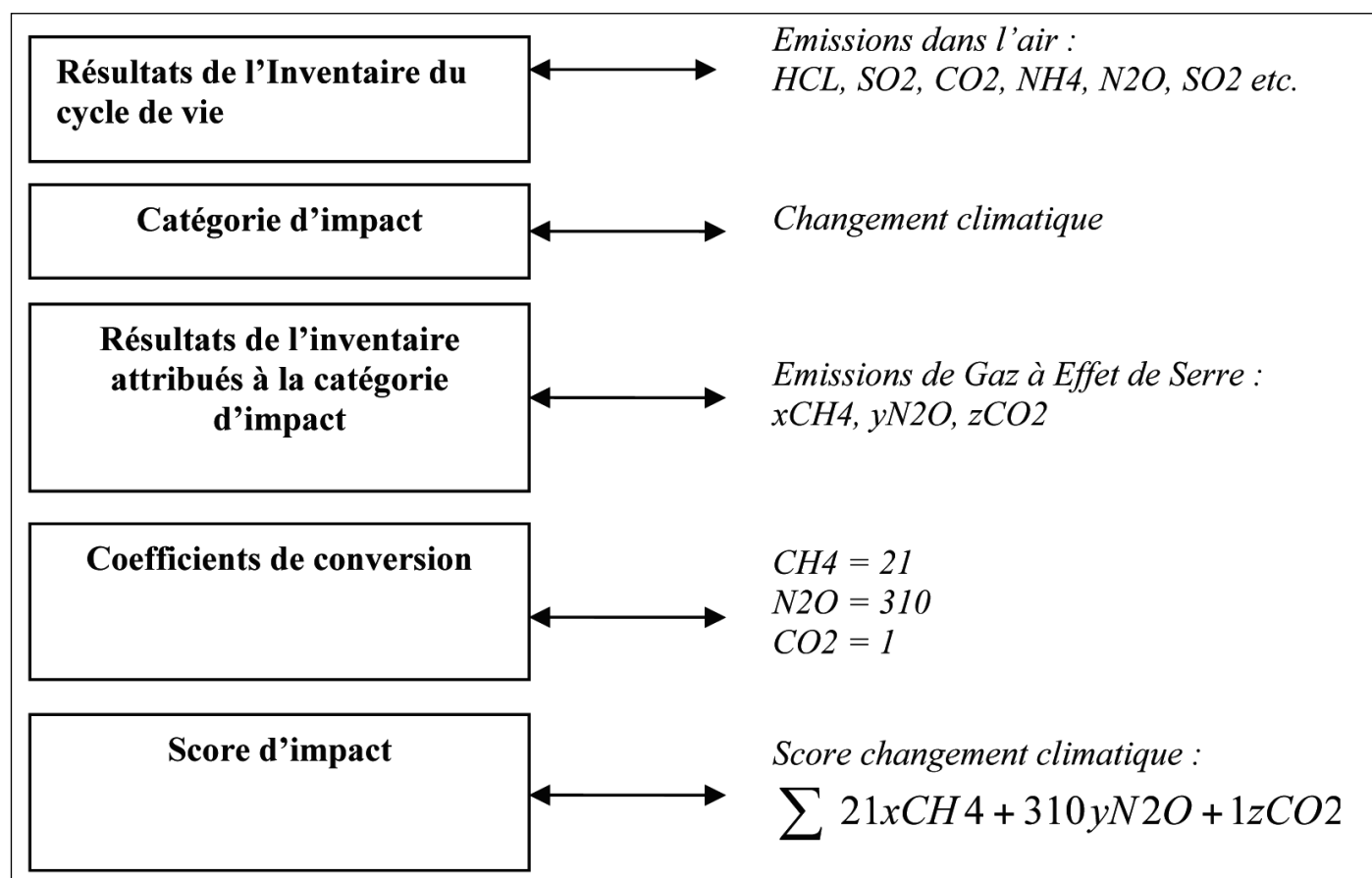


Figure 3 : Méthodologie de détermination de l'indicateur changement climatique

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

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE ÉTUDIÉ

2.1. Identification de l'ouvrage

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

2.2. Caractéristiques générales de l'ouvrage

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3. Conception générale de l'ouvrage

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

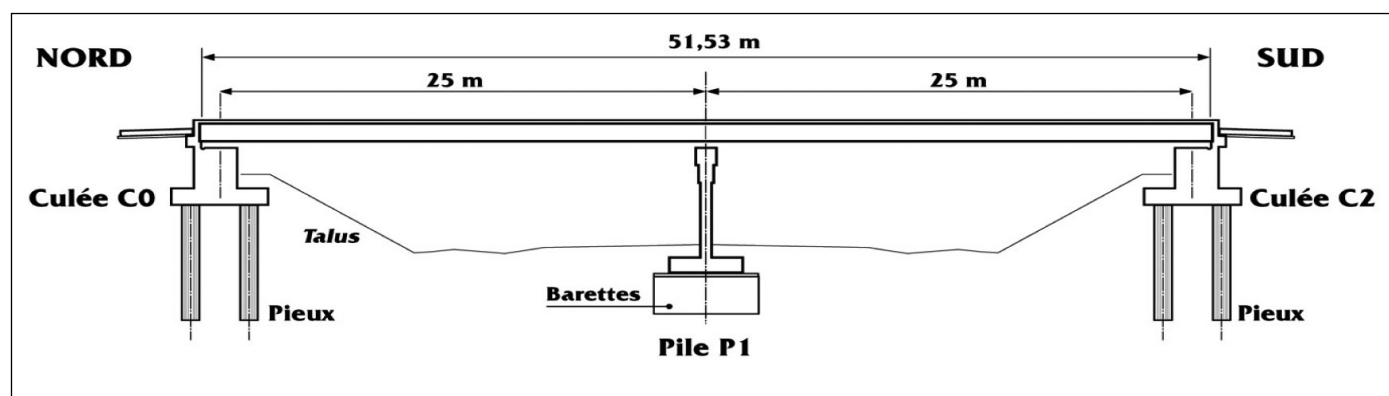


Figure 4 : Coupe longitudinale de l'ouvrage

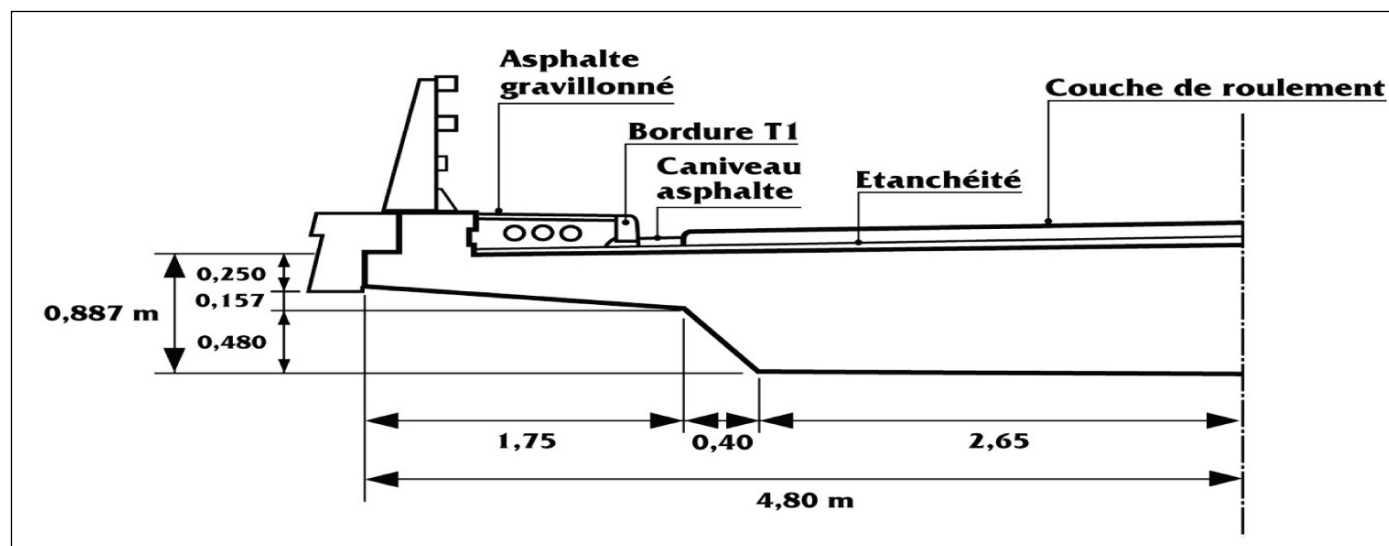


Figure 5 : Coupe transversale de l'ouvrage

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

Bétons structuraux: 686 m³

Bois de coffrage: 315 m²

Aciers de précontrainte: 14 t

Aciers passifs: 60 t

Chape d'étanchéité feuille préfabriquée: 487 m²

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

Béton bitumineux: 60 t

Appareils d'appui en caoutchouc fretté: 109 dm³

Joints de dilatation: 20 ml

BN4: 136 ml

Corniches préfabriquées en BA C35/45: 97 ml

Remblais contigus: 533 m³

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

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

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

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

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

La surveillance de l'ouvrage comprend :

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

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

L'entretien courant couvre :

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

L'entretien spécialisé et les petites réparations concernent :

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

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

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

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

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

4. SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

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

4.1. Constats

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

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

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

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

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

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

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

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

4.2. Interprétation

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

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

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

4.3. Conclusion

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

5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

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

5.1. Incertitudes et méthodes étudiées

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

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

5.2. Étude de la sensibilité du résultat

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

5.3. Conclusion

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

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

6. PERSPECTIVES

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

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

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

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

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

Tableau 3 : Synthèse des différents paramètres étudiés

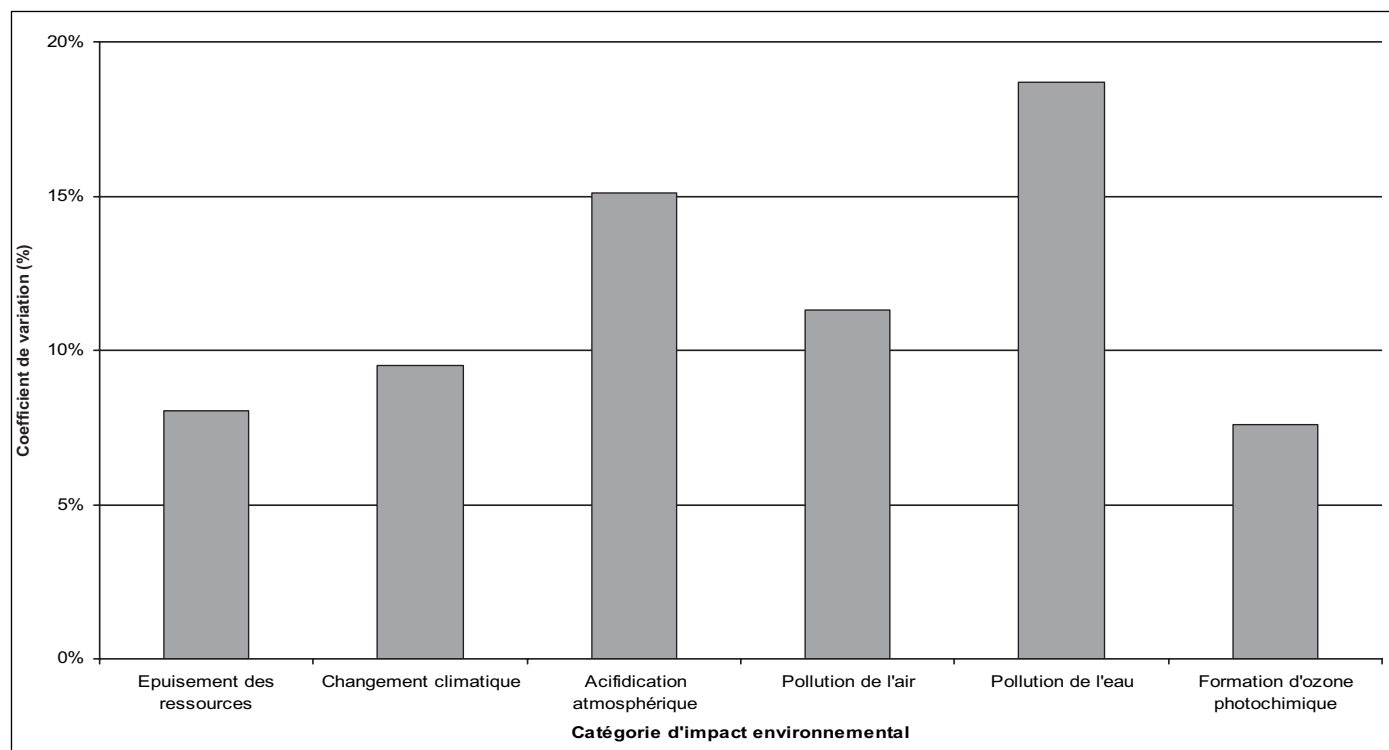


Figure 6 : Coefficients de variations issus de l'ensemble des incertitudes pour différentes catégories d'impact

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

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

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

REMERCIEMENTS

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

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

RÉFÉRENCES

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

respect de l'environnement

L'A65, UNE CONCEPTION ENVIRONNEMENTALE ÉVOLUTIVE MÊME EN PHASE CHANTIER

Sandrine CHOTARD, Didier KOENIG
Eiffage TP Grands Travaux

1. L'OPÉRATION

L'A65, autoroute de Gascogne, infrastructure au service de l'aménagement du territoire a pour objectif le désenclavement et l'amélioration des communications dans la région Aquitaine en reliant au Nord l'autoroute A62 Bordeaux – Toulouse à l'autoroute A64 Bayonne – Toulouse au Sud. S'étalant sur 150 kms et traversant 52 communes, ce nouvel axe de communication traverse trois départements dotés d'une forte identité culturelle et agrémentés d'un patrimoine naturel riche :

- la Gironde - 33,
- les Landes - 40,
- les Pyrénées-Atlantiques - 64.

Depuis le 16 décembre 2010, il relie Pau, deuxième métropole régionale, à Bordeaux, la capitale de l'Aquitaine, en moins de deux heures tout en améliorant la sécurité routière, et en favorisant le développement économique de la région.

Première autoroute française construite après le Grenelle de l'Environnement, elle se devait d'être exemplaire du point de vue de la préservation de la qualité de vie des habitants, de la protection de l'environnement et de la biodiversité.

Dès que le concessionnaire A'Liénor fut pressenti, en juin 2006, le GIE A65, Groupement d'Intérêt Economique piloté par Eiffage Travaux Publics et s'appuyant sur l'ensemble des compétences et du savoir-faire d'Eiffage, a été chargé d'assurer le pilotage de la conception et de la construction de l'autoroute A65.

Ainsi, sous la responsabilité du Directeur Technique du GIE A65, une cellule de conception intégrée se met en

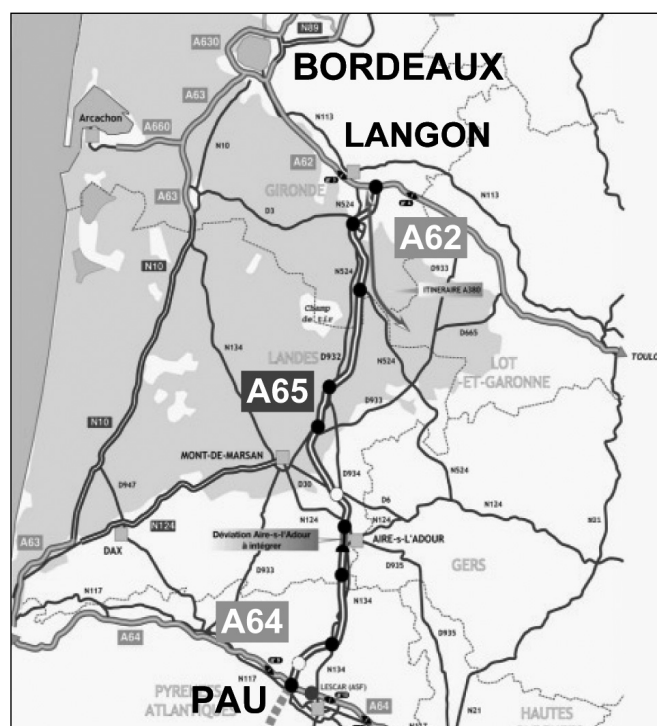


Figure 1 : Localisation au niveau régional du projet A65

place en s'appuyant sur quatre ingénieries (Egis, Ingérop, Coteba, Arcadis) ayant chacune la charge d'un tronçon de l'A65. Elle intègre l'environnement comme un facteur déterminant du tracé autoroutier avec une large place à l'évitement et à l'adaptation des ouvrages en fonction des enjeux au niveau de la biodiversité des milieux traversés.

Pour ce faire, elle s'est dotée des compétences nécessaires dans les différents thèmes d'études (hydraulique, géotechnique, environnement), en associant l'expérience des équipes travaux, pour intégrer au plus tôt les choix de construction les mieux adaptés.

Le GIE A65 a pris en compte les différentes données environnementales et techniques du contrat de concession. De plus, il a géré les dossiers de procédures à instruire, orienté les choix de conception, en assurant la cohérence générale dans un souci de maîtrise du planning, de la qualité, des coûts et des risques.

La conception est fondée en premier lieu sur les éléments environnementaux recensés dans les études de l'Etat (étude d'impact préalable à la Déclaration d'Utilité Publique – pré-étude Loi sur l'Eau sur le plateau landais) et en fonction du tracé de l'Avant Projet Sommaire Modifié (APSM).

Sur tous les cortèges faunistiques existants et sur la flore, avec une attention particulière portant sur les zones humides, des études écologiques de détails sont lancées par le GIE A65 dès mi-2006 jusqu'à fin 2007. Elles ont permis d'affiner les connaissances sur la biodiversité dans la bande de 300 m et au-delà, et ainsi d'élaborer une conception fine du tracé de moindre impact sur le milieu naturel.

La réalisation de cette nouvelle infrastructure autoroutière s'inscrit dans une démarche de développement durable, au-delà des engagements de l'Etat en faveur de l'environnement¹, et intégrant le haut niveau d'exigence environnemental désormais requis par le Grenelle de l'Environnement. Ainsi, suite à une réévaluation du projet par l'administration en regard des objectifs du Grenelle I (fin 2007), le projet est confirmé par le Ministère de l'écologie, J.-L. Borloo (communiqué de presse du 4 juin 2008).

2. CONCEPTION ENVIRONNEMENTALE DE L'A65

2.1. Méthodologie

L'objectif de la conception multicritère est de **définir le tracé de moindre impact en intégrant l'ensemble des enjeux environnementaux² et les usages répertoriés d'un secteur (pêche, irrigation, loisirs,...) tout en respectant les engagements de l'Etat**. Son calage fin s'est accompagné d'une intense période de concertation et d'une recherche de dialogue permanent avec les élus, les riverains, les associations et les différentes fédérations présentes sur le terrain.

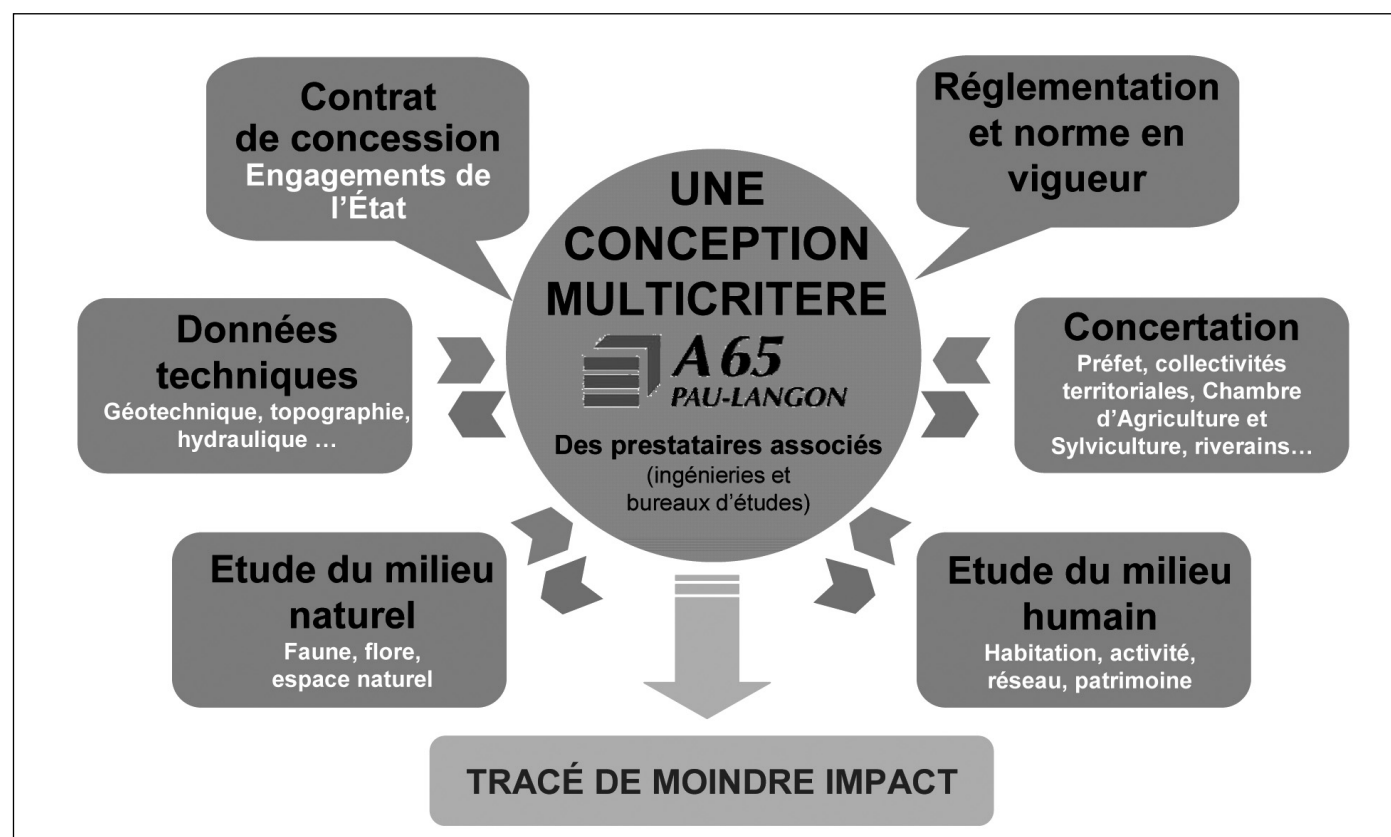


Figure 2 : Schéma de la conception multicritère

¹ Pris après la Déclaration d'Utilité Publique de l'A65 par arrêté ministériel du 19 décembre 2006 et mis en annexe du contrat de Concession signé entre l'Etat et le concessionnaire A'Liéonor.

² Environnement : 4 composantes sont considérées avec le milieu physique (topographique, hydraulique, hydrogéologie, pédologie), le milieu naturel (faune, flore, espaces naturels protégés), le milieu humain (habitats, activités) et le paysage -patrimoine (archéologie, monument historique).

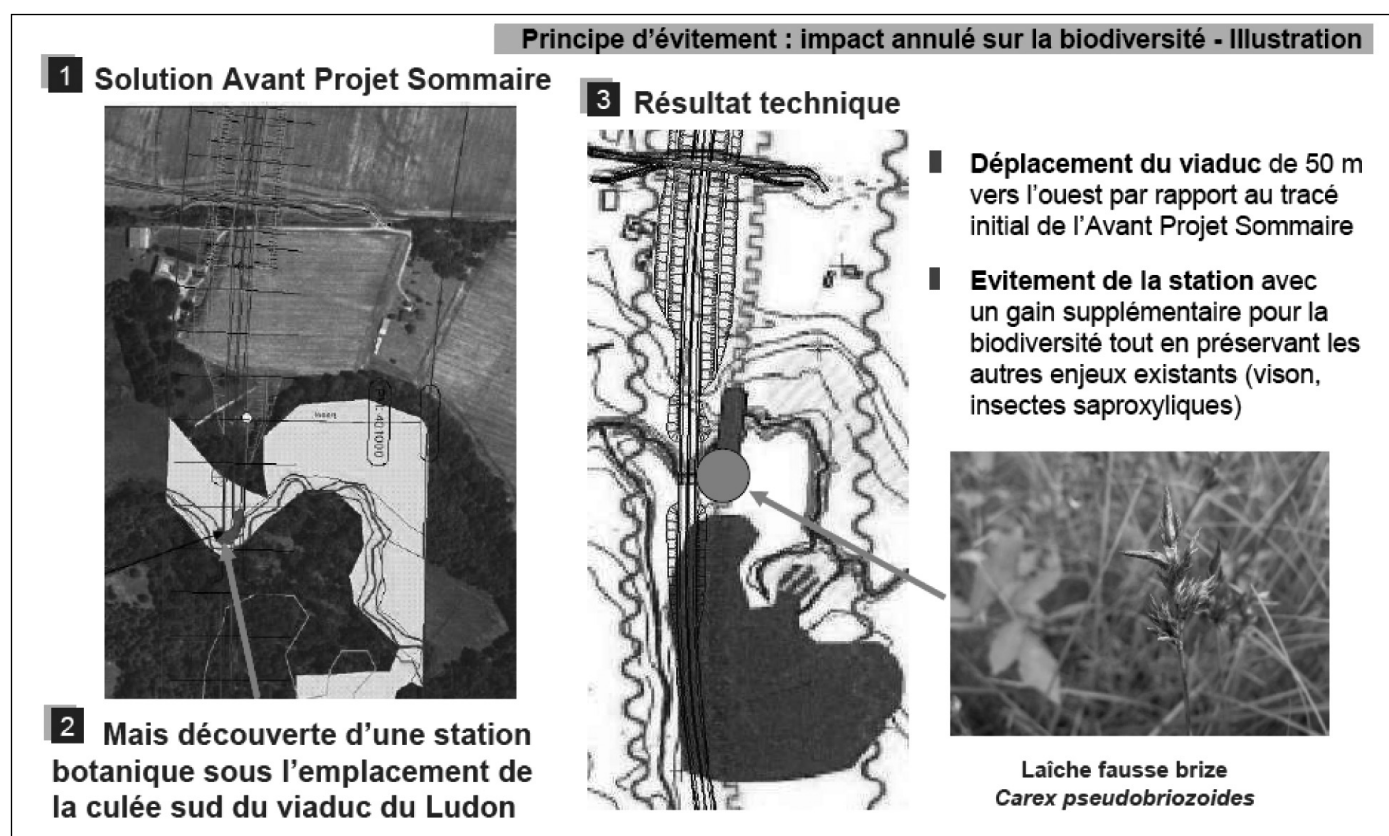


Figure 3 : Illustration d'un cas d'évitement – Conception A65

2.2. Diagnostic environnemental approfondi

La première phase de la conception a constitué en l'acquisition d'une connaissance parfaite et à un niveau très précis (plan au millième) de l'ensemble des enjeux du milieu naturel (prestation réalisée par des bureaux d'études écologiques spécialisés³). Ainsi, l'ensemble des contraintes connues à la phase de l'APS a été complété par un diagnostic environnemental lancé, dès le concessionnaire pressenti, sur une année minimale. Les données ont alimenté le Système Informatique Géographique – SIG – du projet.

Au total, cette phase de diagnostic environnemental approfondi a permis d'inventorier 306 espèces (faune, flore) dont 161 espèces protégées.

La conception environnementale de l'A65 a permis d'éviter les destructions, notamment pour plusieurs stations botaniques et gîtes à chauve-souris, par un tracé pertinent (principe d'évitement) ou ayant réduit l'impact en adaptant l'ouvrage de franchissement.

2.3. Les différents principes de la conception

Principe d'évitement

Le premier principe de la conception est d'annuler l'impact en évitant les zones présentant un enjeu majeur ou principe d'évitement (état de conservation de l'habitat, enjeu patrimonial de l'espèce recensée⁴), en calant le tracé au niveau de la « vue en plan ».

En raison du planning serré de l'opération, la phase de conception s'est déroulée en parallèle du diagnostic environnemental, ainsi le tracé a été repris de nombreuses fois dès qu'un nouvel enjeu apparaissait via un système de note d'alerte mis en place avec les prestataires écologiques (conception évolutive⁵).

Principe d'adaptation

Après avoir procédé, autant que possible, à l'évitement, la seconde démarche de la conception a consisté à réduire l'impact résiduel de l'infrastructure :

³ GREGE petits mammifères semi-aquatiques (vison / loutre) – mammologie – grand mammifère / BIOTOPE : flore – autre cortège faune avec prestation chauves-souris en partenariat avec le Groupe Chiroptère d'Aquitaine.

⁴ Exemple A65 : Station botanique à fort enjeu patrimoniale comme le *Carex pseudobrizoides* (Laïches fausse brize) au droit du viaduc du Ludon et la station d'*Epipactis palustris* (Epipactis des Marais) sur la commune de Pouydessaux (40) au droit d'un rétablissement routier / Habitat en très bon état de conservation d'une espèce protégée comme un gîte à chauves-souris au droit du viaduc du Gabas (64).

⁵ Chaque modification entraîne des conséquences sur plusieurs centaines de mètres à cause des contraintes géométriques imposées aux constructeurs d'autoroute (rayon de giration, pente).

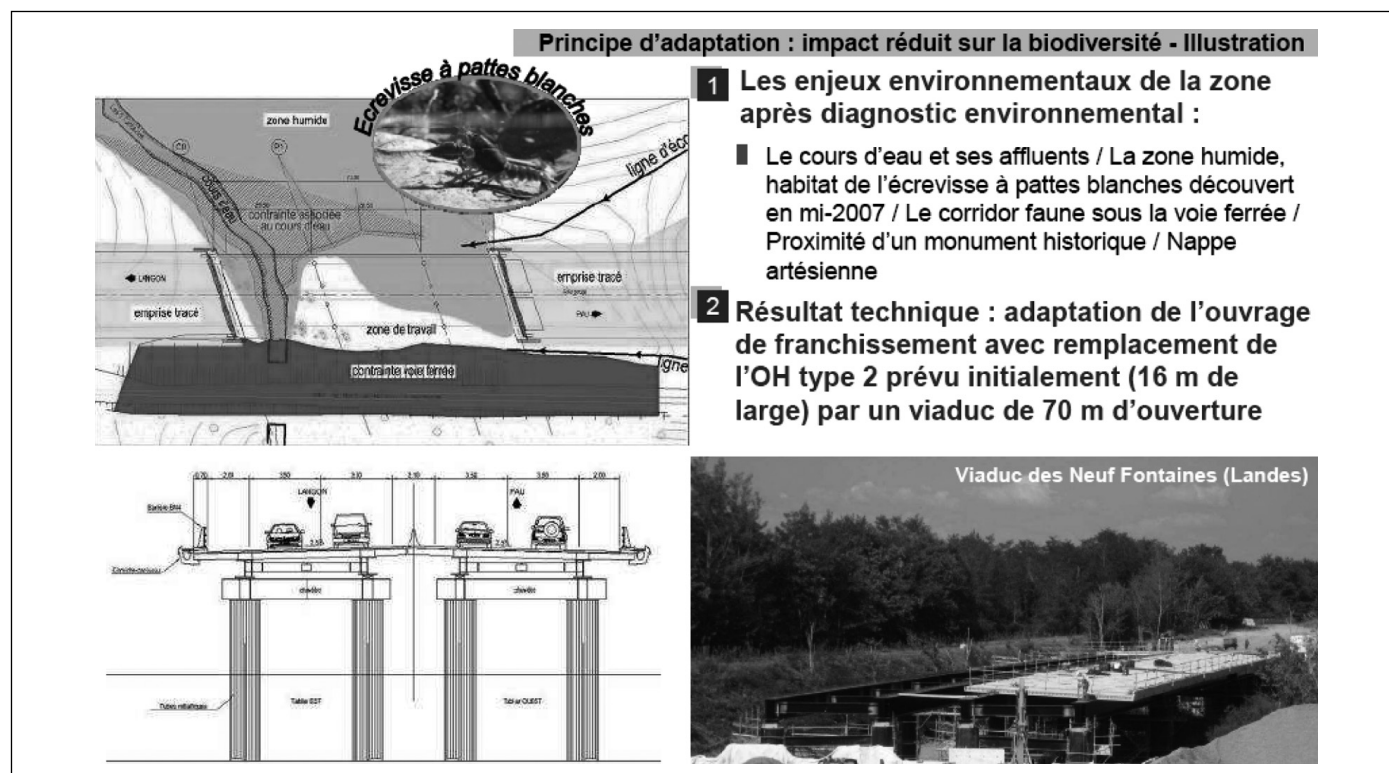


Figure 4 : Illustration d'un cas d'adaptation – Conception A65

– En optimisant le profil en long de l'autoroute (travaux d'optimisation du mouvement de terre),

En mettant en place des franchissements adaptés assurant la transparence hydraulique et écologique de la zone. L'adaptation de l'ouvrage a pris en compte l'espèce faunistique la plus exigeante écologiquement parlant, soit pour l'A65, le vison et la loutre, espèces semi-aquatiques en voie d'extinction en France.

Le dimensionnement hydraulique des ouvrages de l'A65 au droit du franchissement des cours d'eau et des zones humides permet d'assurer le transit d'une crue centennale ou exceptionnelle sans provoquer une aggravation des niveaux d'eau au droit des habitations les plus proches. **La nouveauté sur l'A65 est un dimensionnement des ouvrages, plus uniquement sur des considérations**

hydrauliques, mais également sur des considérations écologiques.

Le maintien des corridors de déplacement de la faune, souvent associés aux écoulements de surface, passe par la mise en place, en fonction des enjeux, des 5 types d'ouvrage décrits ci-après :

- Le viaduc (OH type 1 – 15 viaducs avec tous une fonction de passage pour la grande faune pour A65) garantit le maximum de transparence écologique en préservant le lit mineur du cours d'eau et en assurant une conservation de la ripisylve⁶ sous l'ouvrage. Le choix du type de viaduc (mono-tablier, mixte, nombre de pile) et de sa méthode constructive permettent de réduire l'emprise au sol (impact habitat potentiel, zone inondable,...).



Viaduc du Gabas (444 m d'ouverture)



Ouvrage portique enjambant le lit mineur du Lep avec mise en place de souches aux abords

⁶ Ripisylve : Ensemble des formations boisées présentes sur les rives d'un cours d'eau.



Aménagements internes (banquette avec piège à trace, enrochement, lit en forme de V, barette)

- L'ouvrage portique enjambant les berges du cours d'eau (OH type 2 - 21 ouvrages rétablissant des cours d'eau : A65, rétablissements routiers, voies de désenclavement) assure la conservation de l'intégrité du cours d'eau tout en préservant la ripisylve et les berges du cours d'eau. La transparence écologique est assurée en fixant la largeur de berge à protéger en fonction du corridor faunistique présent et des caractéristiques biologiques de l'espèce. Pour améliorer la fonctionnalité de l'ouvrage, des souches ou andains sont mis en place aux abords et dans l'ouvrage pour créer des caches pour les animaux et favoriser les échanges.
- L'ouvrage cadre classique (OH type 3 – 33 ouvrages rétablissant des cours d'eau : A65, rétablissement routiers,



Aménagements externes d'un ouvrage de rétablissement hydraulique de type cadre (banquettes pour le maintien du corridor faune, enrochement au niveau du rescindement).



Buse circulaire.



Dans la traversée du massif landais, des buses sèches⁸ associées à un OH de type 4 ont été positionnées en moyenne tous les 300 m.

voies de désenclavement) permet la transparence écologique avec des banquettes assurant le transit des animaux lors d'une crue décennale.

Les ouvrages créés sont construits avec rescindement⁷ provisoire ou définitif du cours d'eau et dimensionnés pour le transit d'une crue centennale.

Sa fonctionnalité écologique s'accompagne :

- d'aménagements internes (lit naturel reconstitué et en forme de V pour concentrer l'écoulement, barrettes pour permettre la circulation piscicole en maintenant un fil d'eau minimum,...),
- d'aménagements externes (raccordement des banquettes au terrain naturel, ébrèchements, seuils, génie écologique...).
- La buse circulaire ou le dalot (OH type 4 - 2 ouvrages pour des écoulements dits cours d'eau dans le cadre de voie de désenclavement + 368 ouvrages pour les autres écoulements : A65, rétablissement et voie de désenclavement) rétablit des petits écoulements hydrauliques et constitue un passage pour la petite faune.

Dans les zones à enjeu pour les amphibiens, des crapauducs (buses avec 30 cm de terre) sont mis en place et associés à des mares d'attractivité de part et d'autre de l'infrastructure (19 crapauducs à usage unique dont 4 équipés de plaque de guidage / 10 ouvrages mixtes hydraulique / crapauduc).

⁷ Création d'un nouveau lit pour le cours d'eau

⁸ Positionnement des buses au dessus de la ligne d'eau décennale pour assurer le passage à sec de la petite faune

- Le passage supérieur Grande Faune se positionne sur les axes majeurs de déplacement de la grande faune. Au total, 36 aménagements pour le passage de la grande faune présentant parfois une mixité des fonctions (hydraulique, rétablissement,...) dont 3 passages supérieurs spécifiques GF dans le secteur landais et un passage inférieur. Leur conception et les aménagements annexes (modelage, plantations, piège à trace...) sont définis en concertation avec les fédérations départementales de la chasse, futur gestionnaire (suivi, entretien).



Passage Grande Faune

Destinées à favoriser la biodiversité, les mesures suivantes ont également été mises en œuvre :

- Mesures d'accompagnement au droit des ouvrages faunistiques avec :
 - l'ensemencement des talus associé à des plantations d'essences locales (massifs d'arbustes appétant permet d'attirer la faune par la mise à disposition de baies et de fruits lui servant d'alimentation / bosquets de plantes répulsives pour le guidage de l'animal vers un passage spécifique / massifs denses sur les talus permet de créer les conditions de tranquillité favorable à l'approche de la faune - diminution du bruit, des éclairages, occultation des véhicules sur la bande roulante),
 - la mise en place de souches, d'andains constitués de branchages et de terre ou de tas de rochers (pour créer des zones de gîtes favorables à certaines espèces ou des caches pour la faune qui se déplace en se protégeant de la vue d'éventuels prédateurs),
 - la constitution de haies de guidage et l'étêtage de la canopée⁹ sous les viaducs pour les chiroptères,
 - la création de mares ou de zones humides (habitats favorables à divers cortèges faunistiques et points d'eau attractifs pour l'alimentation de la faune aux abords des passages faunes),
 - la reconstitution de ripisylve dégradée...

- Intégration paysagère de l'infrastructure avec des modèles en pentes douces et des plantations spécifiques en cohérence avec les unités paysagères interceptées ainsi qu'un tracé et des aménagements spécifiques au droit des monuments historiques pour éviter la co-visibilité.
- Mise en œuvre de clôtures adaptées aux espèces pour assurer la sécurité des automobilistes et de la faune (clôture de 2,8 m de haut dans les zones avec grande faune, clôture enterrée pour les sangliers, clôture à petites mailles généralisée sur les 150 km pour les petits mammifères, clôture spécifique à amphibiens).

Principe de la compensation

Le dernier principe de la conception est **la compensation en cas d'impact résiduel ou d'impossibilité de prendre en compte l'enjeu biodiversité de la zone.**

La conception d'une infrastructure linéaire implique obligatoirement une consommation d'espace. Sur les 1 600 ha d'espace nécessaire à la construction de l'A65, **590 ha sont des espaces naturels d'intérêt¹⁰.**

Enfin pour maintenir l'état de conservation des espèces affectées par le projet, les impacts résiduels de l'A65 seront compensés par l'acquisition ou le conventionnement de **1 372 hectares de biotope**, soit à peu près l'équivalent de la totalité des emprises nécessaires à la construction de cette nouvelle autoroute. Ces zones de compensation seront gérées pendant toute la durée de la concession.

Cette démarche actuellement en cours est assurée par CDC Biodiversité, opérateur désigné par le concessionnaire A'Liéonor. La compensation s'accompagne aussi d'une participation financière du concessionnaire à différents plans de réintroduction d'espèces en accord avec la DREAL Aquitaine.

3. CONSTRUCTION DE L'A65

La phase travaux perturbe les équilibres biologiques en coupant temporairement les corridors de déplacement de la faune, en modifiant les écoulements et en fragmentant les habitats par le déboisement nécessaire à la construction de l'autoroute et aux installations de chantier.

3.2. Contrôle de l'efficacité des ouvrages en phase chantier

Avec les perturbations induites par les travaux sur la faune, il est important de vérifier si les animaux gardent l'habitude d'emprunter le corridor initial et si les principes de la conception ont été correctement mis en œuvre sur le chantier.

Ainsi, durant la phase de réalisation des travaux, des ingénieries spécialisées¹¹ ont été **missionnées pour auditer le**

⁹ Canopée : Etage supérieur de la forêt en contact direct avec l'atmosphère libre.

¹⁰ Forêt alluviale, zone humide,...

¹¹ GREGE pour la fréquentation des 68 ouvrages majeurs à vocation faune de l'A65, ainsi qu'un échantillon de passages spécifiques pour petite faune, BIOTOPE pour la fréquentation des mares de substitution, GEODIAG hydro géomorphologue pour expertiser l'ensemble des ouvrages cadre et s'assurer du rétablissement de la fonction piscicole des cours d'eau.

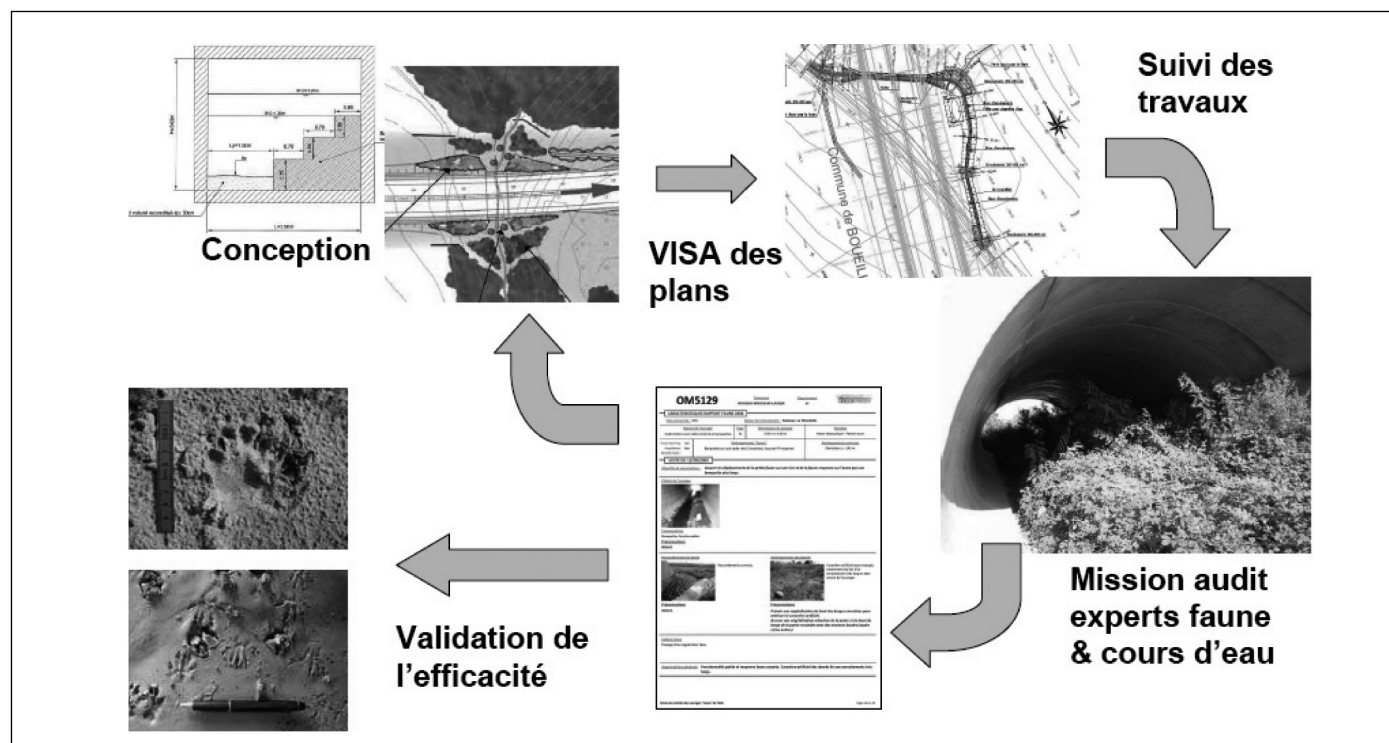


Figure 5 : Contrôle de l'efficacité écologique de la Conception A65 en phase chantier

travail réalisé ou en cours afin de définir les aménagements complémentaires les plus adaptés à chaque dysfonctionnement mis en évidence (érosion, absence de fréquentation d'un ouvrage, mauvais calage d'une buse sèche,...).

Ce travail a permis d'identifier les ouvrages déjà « adoptés » par la faune, avant même l'achèvement des travaux (mai 2010).

Ce travail réalisé par des bureaux d'études spécialisés a été complété par des visites sur site avec les Fédérations Départementales de la Chasse au droit des différents ouvrages faune ainsi que par des visites avec les Directions Départementales du Territoire et de la Mer et l'Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques au niveau des ouvrages hydrauliques.

A partir de ces constats, un travail de synthèse, via des procédures de remise en état aux abords des ouvrages (via-duc, portique, cadre) a ensuite été entrepris par le GIE A65 listant l'ensemble des actions à entreprendre dans le cadre de la remise en état de la zone (modelage, plantations, création de mares, apport de souches,...) afin de garantir leur intégration dans l'environnement et leur utilisation optimale par la faune.

3.2. Mesures de protection en phase chantier

Plusieurs mesures en phase chantier sont prises pour que les enjeux environnementaux détectés et préservés lors des études de conception le restent au terme des travaux par le respect et le maintien des sites remarquables et des corridors faunistiques.

- Concernant les mesures prises durant le chantier, la préservation de l'eau en terme de qualité et de quantité est une priorité avec
 - la mise en place d'un assainissement provisoire du chantier (fossés de collecte des eaux, bassins de décantation dimensionnés selon l'enjeu du secteur avec prise en compte d'une pluie biennale ou décennale, présence de filtre adapté à la sensibilité du milieu, entretien régulier),
 - la préservation des cours d'eau (franchissement provisoire, création de zone tampon à préserver aux abords du cours d'eau),
 - la gestion anti gaspillage de l'eau pour l'arrosage du chantier (utilisation des eaux des bassins de décantation),
 - dans les zones à enjeu très fort (habitats à écrevisses à pattes blanches, périmètre de protection de captage pour l'alimentation en eau potable), le niveau d'assainissement provisoire mis en place a été identique à un assainissement définitif.
- Pour assurer la préservation de la faune et de la flore, l'identification des zones à protéger (balisage), la limitation de l'emprise travaux pour minimiser les impacts sur le milieu (travaux restreint par rapport à l'emprise foncière disponible), la mise en œuvre de protection anti-intrusion aux abords du chantier pour les amphibiens et les reptiles ont été réalisés avant le démarrage des travaux.
- La préservation du cadre de vie des riverains du chantier induit des actions pour limiter les nuisances sonores (horaires de travail et itinéraires des engins définis en concertation avec les élus, engins de chantier conformes aux normes réglementaires, mise en place de merlon



Figure 6 : Illustration des travaux de remise en état définis sous le viaduc de la Douze après expertise faune

acoustique), pour réduire les émissions de poussières (arrosage réguliers des pistes par temps sec, respect des limitations de vitesse sur les pistes du chantier), pour maintenir les réseaux existants (rétablissement des réseaux aériens ou enterrés interceptés par les travaux, rétablissement des voiries).

- La sensibilisation du personnel du chantier a été réalisée par les chargés environnement des entreprises pour une prise de conscience des enjeux. Cette action a été pérennisée tout au long du chantier. La gestion des déchets de chantier est assurée grâce à la formation du personnel et à la mise en place d'un tri sélectif.
- Au sein du GIEA65, une cellule permanente de correspondants environnement en coordination avec les Maîtrises d'Œuvre du projet a suivi les entreprises pour assurer la continuité des mesures envisagées entre la phase conception et les travaux.



Viaduc du Ribarrouy (34 m d'ouverture)

3.3. La conception en phase chantier

La conception se prolonge en phase chantier afin de gérer les aléas terrain (découverte de zones d'affouillement dans un cours d'eau, nappe artésienne, découverte d'un enjeu environnemental complémentaire,...), les demandes spécifiques des tiers parties (administrations, collectivité, riverains,...).

4. CONCLUSION

L'A65 Autoroute de Gascogne est une nouvelle génération d'autoroute ... une autoroute grenello-compatible.

La conception environnementale de l'A65 a en premier lieu impliqué une connaissance approfondie des territoires concernés au regard de la biodiversité (faune, flore...) et une localisation précise des continuités écologiques existantes. Puis, elle a intégré les différentes composantes des paysages rencontrés dans un souci constant de concertation avec les parties prenantes (élus, riverains, associations,...). Le calage du tracé a pris en compte l'ensemble des enjeux de la zone traversée afin de définir le tracé de moindre impact, soit le tracé le plus pertinent au regard du contexte local.

Pour assurer la sauvegarde des espèces et des habitats durant la phase travaux, des mesures de protection strictes en phase chantier ont été mises en place associées à une formation et une sensibilisation du personnel.

Tout au long de la phase travaux, la conception environnementale s'est affinée pour atteindre un niveau jamais acquis de transparence écologique d'une autoroute.

Au final, ce ne sont pas moins de 150 millions d'euros qui ont été consacrés spécifiquement à l'environnement et au développement durable, soit près de 15% de l'investissement de l'A65.

respect de l'environnement

DIOGEN : BASE DE DONNÉES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES MATÉRIAUX POUR LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Guillaume HABERT¹, Yannick TARDIVEL², Christian TESSIER³

¹ Université Paris-Est – ² SETRA – ³ IFSTTAR

1. ORIGINE DE LA BASE DE DONNÉES

1.1. L'évaluation environnementale des structures de génie civil

Afin de faire vraiment émerger les solutions les plus pertinentes, que ce soit dans le domaine du Génie Civil ou ailleurs, une approche globale est toujours nécessaire. Cette approche globale suppose de compléter les approches économiques et performantielles par des évaluations environnementales permettant d'apprécier la valeur d'un projet d'infrastructure au regard des impératifs du développement durable.

L'étude de type ACV (analyse de cycle de vie) réalisée selon la norme NF EN ISO 14040 élargit le champ d'évaluation en proposant la prise en compte d'impacts environnementaux et propose également d'étendre l'évaluation aux étapes de « vie en œuvre » et de « fin de vie » du projet.

Une récente étude d'ACV d'ouvrage d'art¹ a permis de mettre en évidence le poids particulièrement important de l'étape de production des matériaux constitutifs de la structure étudiée : selon la nature des impacts évalués, cette étape représentait de 24 à 90% de la valeur totale de ceux-ci. Le second poste déterminant en terme d'impacts environnementaux était lié à la nature de l'énergie utilisée dans le cadre des différents processus couverts par le périmètre d'analyse.

1.2. Le besoin de données environnementales spécifiques

Cette même étude a soulevé de nombreux questionnements sur la disponibilité de données adaptées au domaine du génie civil, sur leur fiabilité et leur représentativité. La plupart des structures sont dimensionnées selon des contraintes spécifiques. D'autre part, afin d'accroître leur performance et leur durabilité, le secteur du génie civil continue de développer de nombreuses innovations en

¹ Guide T87 CIMBETON « Analyse du cycle de vie d'un pont en béton » (2010).

termes de conception de structures et d'élaboration de matériaux. La spécificité des formulations de béton choisies ou des désignations d'acier, l'apparition de techniques à base de matériaux alternatifs (polymères, composites, bois,...) nécessitent l'accès à une bibliothèque environnementale délivrant des données suffisamment fiables et représentatives pour évaluer les variantes présentées dans les projets.

Ces spécificités nécessitent donc la constitution d'un complément aux bases existantes, notamment celles relatives aux documents types tels que les FDES², établis selon la norme NF P 01-010 et généralement utilisés dans le cadre de projet bâtiment.

En outre, la durabilité de la structure dépend non seulement de la qualité de sa conception et de sa mise en œuvre, mais aussi des conditions d'exploitation ainsi que des opérations de surveillance et d'entretien auxquelles elle sera soumise. Celles-ci devront être intégrées à l'évaluation afin de pouvoir rapporter les impacts environnementaux à une durée de référence, la durée de vie de la structure en l'occurrence.

2. PRINCIPES DE LA BASE DE DONNÉES

2.1. Le champ d'étude retenu

Le groupe DIOGEN a pour objectif d'aboutir à la création d'une base de données librement accessible à la profession, pouvant constituer une référence dans le domaine du génie civil. Créé au sein de l'AFGC, il réunit une cinquantaine de représentants des producteurs de matériaux, des entreprises et bureau d'études, ainsi que des établissements institutionnels.

Cette base de données regroupera des données adaptées au domaine, en matière d'impacts environnementaux, de type « cradle-to-gate », en s'appuyant sur les données existantes par ailleurs, et en les combinant autant que nécessaire de façon à aboutir aux objets usuels du génie civil.

Destinée à alimenter les outils d'évaluation des ouvrages, elle sera assortie d'un cadre méthodologique d'utilisation,

et de l'appréciation d'un indice de confiance à attacher aux différentes données (représentativité, fiabilité,...).

Les frontières du champ d'étude

Il s'agit d'approcher les impacts des matériaux lors de leur production, ce qu'il faut entendre comme étant juste avant le transfert sur le chantier.

Cela inclut donc les phases de transformation des matériaux faites en usine ou en atelier, avant l'approvisionnement sur chantier. Si on prend l'exemple des armatures d'aciers, les opérations de façonnage et de soudage en atelier des armatures seront considérées, de même que le transport entre le site de production et le site de façonnage. Les autres phases dépendent fortement de la structure concernée et du contexte de sa construction, elles sont donc en dehors de la base de données Diogen, qui se veut générique, et il faut avoir conscience du caractère partiel, bien que fondamental, de cette base (voir figure 1).

Par conséquent, la base DIOGEN ne prend pas en compte le potentiel de recyclage des matériaux en fin de vie de la structure, par contre elle prend bien évidemment en compte l'atténuation des impacts due à l'incorporation de matériaux recyclés lors de la production.

Le champ d'étude lui-même

Il s'agit d'approcher les impacts environnementaux des matériaux de génie civil lors de leur production. Parmi les impacts les plus cités, on trouve le plus souvent le bilan carbone, et une forte proportion d'études se limite à ce seul critère. Cela aurait-il du sens de viser un monde où le climat serait préservé, mais avec des ressources épuisées, de l'eau et de l'air pollués,... ?

Bien évidemment une étude sérieuse se doit de prendre en compte l'ensemble des impacts environnementaux paraissant pertinents pour baser les choix à faire.

La norme NF P 01-010 intègre 10 impacts environnementaux :

- Consommation de ressources énergétiques (MJ)
- Épuisement de ressources (ADP) (kg éq. Antimoine)
- Consommation d'eau (litre)
- Déchets solides (kg)
- Changement climatique (kg éq. CO2)
- Acidification atmosphérique (kg éq. SO2)

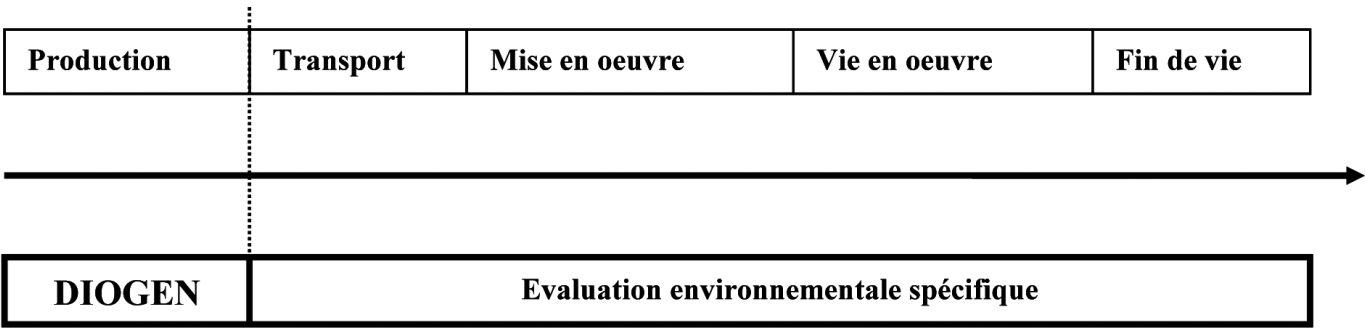


Figure 1 : Frontières du champ d'étude

² Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire.

- Pollution de l'air (m3)
- Pollution de l'eau (m3)
- Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (kg CFC éq. R11)
- Formation d'ozone photochimique (kg éq. Ehyène)

Nous pouvons à juste titre nous poser la question de la pertinence absolue de ces impacts par rapport aux problématiques du génie civil. A titre d'exemple, le bruit n'est-il pas un impact environnemental qu'il conviendrait de prendre en compte ?

Des impacts supplémentaires peuvent être apportés par les évolutions normatives, et certains impacts peuvent être modifiés. Notamment, le projet de norme prEN 15804 énonce une évolution de certains impacts de la NFP 01-010.

Dans l'attente de la validation des projets de normes, il a été décidé de travailler sur la base des impacts définis actuellement par la NF P 01-010, puis de prendre en compte les évolutions à venir.

2.2. Les matériaux constitutifs

Nous nous sommes posé la question de la meilleure façon d'aborder la structuration des matériaux auxquels on allait s'intéresser. L'enjeu était de ne pas oublier de matériaux pertinents dans l'approche des impacts des ouvrages de génie civil, et de structurer les données dans un format usuel pour les différents intervenants dans la conception de ces ouvrages.

Il fallait aussi ne proposer que des items dont la quantité serait connue ou estimable dès le début d'une démarche de conception d'ouvrage. A titre d'exemple, il était exclu de proposer une version « matériau X issu d'une filière de recyclage » et « matériau X ne provenant pas d'une filière de recyclage » – nous avons préféré présenter le matériau X avec une moyenne liée à son mode de production. Il était de la même façon exclu de découper en fonction de la provenance du matériau en question, même si l'on sait le caractère notable de l'influence de cette provenance sur les impacts liés au matériau. Nous avons en fait essayé d'estimer une moyenne représentative pour les matériaux usuellement utilisés en France.

Il convenait enfin de présenter un découpage des différents items, permettant à la fois de prendre en compte des différences notables d'impact pouvant exister entre telle ou telle variante du matériau considéré (différents bétons par exemple), mais sans multiplier inutilement le nombre de matériaux (raisonner par type de béton en fonction de sa destination par exemple). Nous avons donc pris le parti de déterminer, en fonction des observations que nous pourrions faire au cours de la démarche, des classes à la fois homogènes et raisonnables.

Il nous a semblé pertinent d'aborder ce découpage par le schéma usuel des détails estimatifs. Le document de départ recensait les différents prix liés à la réalisation d'un ouvrage de génie civil routier destiné à être complété (notamment pour d'autres types d'ouvrages) et faire l'objet de regroupement de certains items.

Les différents matériaux à aborder ont été répartis en 4 groupes :

- Les **matériaux cimentaires** s'intéresseront aux impacts des différents constituants des bétons : ciments, granulats, additions, adjuvants, mortiers spéciaux, B.P.E. et produits préfabriqués en béton. Cette approche sera complétée par les impacts globaux de bétons classiquement employés (bétons de propreté, bétons de fondation,...).
- Les **matériaux métalliques** regrouperont les armatures passives, la précontrainte, les suspensions et câbles, les aciers de construction, les pieux et palplanches, les appareils d'appui métalliques, les dispositifs de sécurité,...
- Les **matériaux de revêtement et composites** concernent les produits d'étanchéité et d'anticorrosion, produits bitumineux, produits souples d'injection, joints, canalisations...
- Enfin, un groupe est chargé de recenser les impacts à affecter au **bois**.

Dans chacun de ces groupes un important travail de recensement des données existantes est à effectuer et un découpage judicieux des items est à réfléchir (en fonction de la taille des éléments, de la classe de résistance,...).

2.3. La mise en œuvre et les matériaux associés

Nous avons vu que nous avions décidé de n'intégrer au sein du groupe DIOGEN que les données relatives à la production des matériaux, juste avant la livraison sur chantier. Cette décision a été prise compte tenu de la priorité de disposer dès que possible des données de base des matériaux constitutifs, mais elle doit être assortie d'une attention attirée des utilisateurs du fait qu'il s'agit d'une première phase dans une démarche qui se doit d'être plus globale, et ainsi de prendre en compte les phases de construction, de vie en œuvre et de fin de vie.

Il s'agit en particulier, pour ce qui concerne les données relatives aux matériaux, d'éviter les comparaisons trop rapides et trop partielles, notamment entre la préfabrication et la construction in situ. La préfabrication vient certes « plomber » les chiffres d'impact de production des matériaux, mais un bénéfice lors de la construction peut venir changer les conclusions.

A proximité de l'aboutissement des groupe « matériaux », nous envisageons donc de compléter le travail par une approche à travers un groupe chargé de l'évaluation des matériels de mise en œuvre. Devant l'impossibilité de couvrir l'ensemble des cas particuliers de construction d'ouvrages, l'idée est d'approcher un barème d'impact des matériels les plus usuellement utilisés sur les chantiers, par durée d'utilisation par exemple. On trouvera sous cette approche les groupes électrogènes, compresseurs, malaxeurs, outils de coffrage, grues,...

Chaque groupe a donc en vue le recensement des matériels les plus usuels nécessaires à la mise en œuvre sur ouvrages des matériaux qu'il considère.

Ces données de base pourront alors alimenter des bilans effectués en adoptant des durées d'utilisation adaptées au contexte du chantier envisagé.

3. LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

3.1. Les critères de jugement des données

L'analyse de gravité réalisée à partir des résultats d'une étude ACV permet de déterminer quels sont les processus et les matériaux dont le poids est déterminant. Pour ceux-ci, il est particulièrement important de disposer de données environnementales appropriées, justes et précises. Face à la multiplicité des données disponibles, il faut donc être capable de les caractériser selon des critères qui permettent de juger de leur pertinence.

La représentativité

En premier lieu, ces données doivent être représentatives du matériau étudié. La pertinence technologique, géographique et temporelle est essentielle, car elle est liée aux approvisionnements en ressources naturelles, à l'utilisation d'énergies spécifiques, etc. De même, il est souhaitable que les mesures de flux de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) soient représentatives de la production moyenne des sites producteurs et non pas d'une période trop courte ou d'une sélection géographique trop restreinte. Pour délimiter l'enveloppe à considérer, il est préférable de connaître la destination du matériau et les critères de certification autorisant son utilisation.

La fiabilité

Les données doivent également présenter un caractère de fiabilité. Leur traçabilité doit être assurée et les sources utilisées mentionnées et si possible disponibles. Par ailleurs, les mesures permettant le calcul des impacts doivent être réalisées selon des procédures et un échantillonnage de la production adaptés.

3.2. La méthode proposée

La méthode envisagée dans le groupe de travail DIOGEN vise à caractériser dans un premier temps la donnée environnementale, puis à décider de son acceptabilité. Dans la mesure où les exigences de qualité d'une donnée utilisée dans un calcul d'ACV peuvent être liées au poids de cette donnée dans le résultat (appréhendé par l'analyse de gravité), cette démarche autorise l'emploi de données de qualité moindre pour des matériaux n'ayant que peu d'influence et de porter l'effort sur les postes déterminants. Pour ce faire, il est proposé d'utiliser un indice de confiance qui permettra à l'utilisateur de déterminer si la donnée disponible est utilisable ou pas. Cet indice couvrira les différents critères de jugement évoqués ci-dessus.

La caractérisation de la donnée

Suite au §3.1., on peut retenir que les critères permettant d'apprécier la qualité d'une donnée sont de deux ordres: la représentativité (géographique, temporelle, technologique) et la fiabilité (traçabilité, fidélité, justesse et précision des mesures). La norme NF EN ISO 14044 précise également les exigences de qualité des données à retenir: représentativité, facteurs temporels, géographiques et technolo-

giques, fidélité, complétude, cohérence, reproductibilité, incertitudes, sources des données.

Les bases de données environnementales utilisent en général une méthodologie permettant de qualifier la donnée considérée. La méthode utilisée par Ecoinvent s'avère particulièrement intéressante puisqu'elle intègre le caractère propre à la mesure (notamment le fait que la mesure et la donnée qui en résulte suivent une distribution) ainsi que les facteurs influant dans la distribution des résultats obtenus. Cette méthode considère que la loi de distribution des mesures et des données qui en sont issues est modélisable par une loi log normale. Ce type de loi est adapté à un contexte où les effets de plusieurs facteurs indépendants se multiplient entre eux, ce qui est le cas des processus naturels et industriels. C'est alors le logarithme de la variable qui suit une loi normale et non la variable elle-même.

La variation des résultats est caractérisée par une valeur de Standard Deviation (SD). La distribution en loi log normale permet de s'assurer que 95% des données seront incluses dans l'intervalle SD_{95}^2 autour de la valeur de plus haute probabilité (souvent utilisée comme valeur estimée). Plus SD_{95}^2 sera important, plus la dispersion des valeurs de la variable sera grande. La Standard Deviation couvre donc l'ensemble des incertitudes issues des différents facteurs influents identifiés. On peut ainsi caractériser SD par la formule suivante :

$$SD_{95} = \sigma^2 = \exp \sqrt{[\ln(E1)]^2 + [\ln(E2)]^2 + [\ln(E3)]^2 + [\ln(E4)]^2 + [\ln(E5)]^2 + [\ln(E6)]^2 + [\ln(E7)]^2}$$

Les différents E_i représentent les valeurs des exigences permettant de définir la qualité de la donnée. Les exigences retenues sont définies à partir de la matrice Ecoinvent (Pedigree) et de la norme NF EN ISO 14044.

Chacune des exigences fait l'objet d'une cotation individuelle selon des critères précis, qui reflète l'adéquation de la réponse apportée par la donnée avec l'exigence que l'on peut en attendre. Cinq niveaux de cotation sont envisagés afin de permettre la prise en compte de différents niveaux de réponses possibles. Certaines exigences sont considérées comme particulièrement importantes, notamment les frontières du périmètre évalué et la représentativité technologique (voir tableau 1).

Si l'on considère l'exigence de fiabilité (E2), on peut ainsi envisager une cotation maximale pour des données vérifiées et établies à partir de mesures, puis une cotation décroissante si les données sont établies à partir d'hypothèses ou non vérifiées, établies sur des estimations, etc.

L'évaluation de la qualité de la donnée se traduit donc par un ensemble de cotations d'exigences au vu des éléments fournis par le producteur (ICV et rapport d'étude).

L'acceptabilité de la donnée

A partir d'une valeur de SD qui traduit la qualité de la donnée, on peut déduire un indice de confiance qui répondra ou pas au niveau d'exigence requis: $Ic = f(SD_{95})$.

Les seuils de SD_{95} figurant dans le graphique ci-contre (figure 3) correspondent à des niveaux homogènes de cotation pour les différentes exigences. Ces seuils peuvent ensuite être transformés en indice de confiance équivalent. Les intervalles de confiance sont de 25%, alors que les intervalles de SD_{95} sont plus importants pour les valeurs les

Exigences	1	2	3	4	5	Cotation
E1: frontières du périmètre considéré	1.00	–	1.50	–	2.00	
E2: fiabilité (fidélité, reproductibilité, traçabilité, cohérence)	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50	
E3: complétude et représentativité	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20	
E4: corrélation temporelle	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50	
E5: corrélation géographique	1.00	1.10	1.02	–	1.10	
E6: corrélation technologique	1.00	–	1.20	1.50	2.00	
E7: échantillonnage	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20	

Tableau 1 : Grille de cotation des exigences de qualité des données

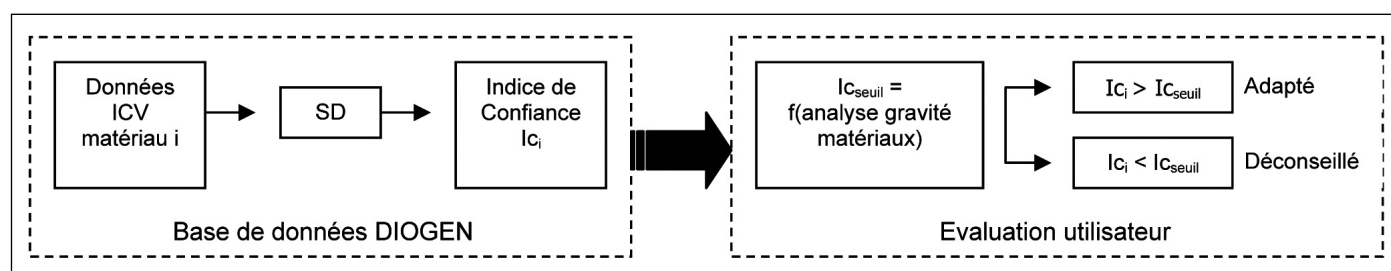


Figure 2 : Évaluation et utilisation d'un indice de confiance

moins fiables, ce qui accentue l'effet sélectif de la méthode.

L'indice de confiance équivalent permet alors de déterminer si la valeur est acceptable ou pas, ceci en fonction de l'importance du matériau considéré dans l'étude.

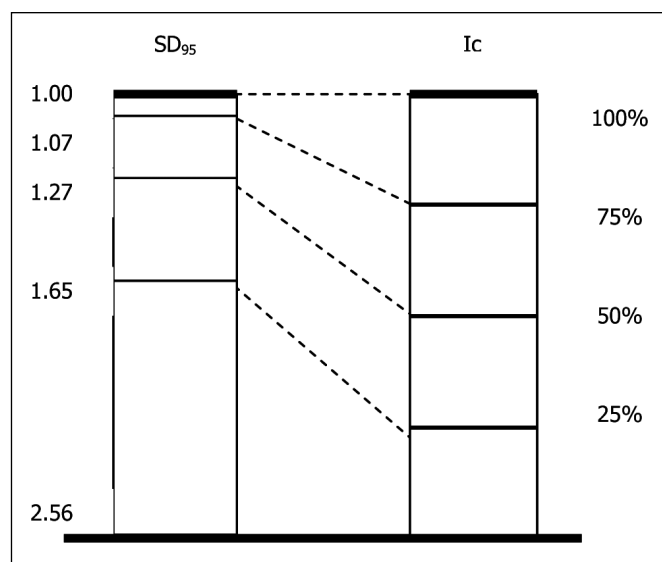


Figure 3 : Relation SD_{95} et Ic

Le graphique ci-après (figure 4) illustre la démarche proposée pour l'utilisation de données assorties d'un indice de confiance. Les seuils figurant sur l'axe des abscisses et traduisant le poids des impacts environnementaux du maté-

riau considéré ne sont qu'indicatifs : ils doivent respecter la cohérence de l'étude notamment vis-à-vis des objectifs définis.

Afin d'éviter l'écueil d'une valeur seuil en deçà de laquelle la donnée est rejetée, il semble préférable de proposer une tolérance autorisant l'emploi de la valeur en l'assortissant de réserves. Ces réserves doivent alors apparaître dans le rapport de l'étude, éventuellement assorties d'un indice de confiance global.

L'introduction de la notion de « classe de données » correspondant à un intervalle de confiance peut permettre une utilisation simplifiée de l'indice Ic (tableau 2) :

Ic	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Classe 1	Usage adapté		
Classe 2	Réserves	Usage adapté	
Classe 3	Non adapté	Réserves	Usage adapté
Classe 4	Non adapté	Réserves	

Tableau 2 : Domaine d'emploi des différentes classes de données

L'utilisation de données situées en zones grises est déconseillée et doit au minimum donner lieu à des réserves. Les données de classe 4 ne peuvent être utilisées qu'en cas d'absence de données de meilleure qualité. Dans tous les cas, l'utilisation de données non adaptées doit être accompagnée d'un commentaire justifiant ce choix et détaillant

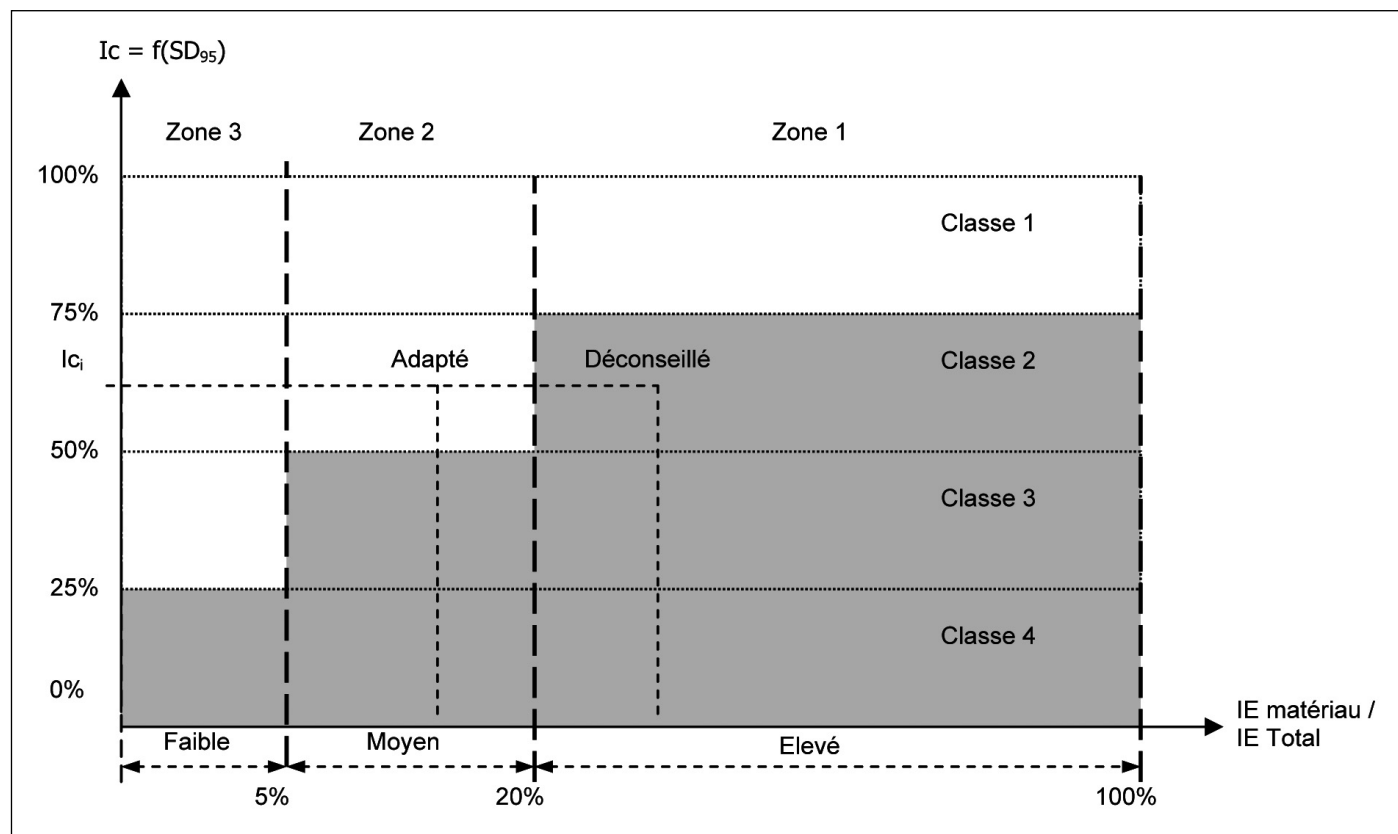


Figure 4 : Domaine d'emploi des données

les réserves qui s'imposent, ainsi que d'une étude de sensibilité vis-à-vis des résultats.

3.2.3. Extension de l'indice de confiance à l'échelle de l'étude

A l'échelle de l'évaluation d'un ouvrage, en l'absence d'incertitudes chiffrées, il peut être construit un indice de confiance relatif aux résultats obtenus, à partir des données environnementales considérées. La définition d'un tel indice reste à préciser, mais son élaboration pourrait refléter l'adéquation des données aux objectifs de l'étude ainsi que l'illustre l'exemple ci-après :

Impact « changement climatique » = 987 kg éq. CO₂ -
Indice de confiance : 78-12-10

78% du résultat est issu de données adaptées (a)

12% du résultat est issu de données avec réserves (b)

10% du résultat est issu de données déconseillées (c)

Un indice global peut être calculé, sur la base de pondérations et d'une somme des différents pourcentages :

$0.01 \cdot [10(a) + 5(b) + (c)]$ compris entre 1 et 10, avec $(a)+(b)+(c) = 100\%$, soit pour l'exemple ci-dessus $I_{c_g} = 8.50$.

La prise en compte des données non évaluées peut aussi être introduite par le biais d'un pourcentage (d) pondéré

par la valeur 0, ce qui étend la gamme de l'indice de confiance global de 0 à 10 dans le cas de figure envisagé (la non-évaluation d'une donnée doit être justifiée. Une valeur forfaitaire majorée peut être utilisée pour palier une absence de donnée). Une grille de lecture peut accompagner l'indice global, ainsi que le propose la figure 5.

4. RÉFLEXIONS ET PERSPECTIVES

L'établissement d'une base de données environnementale fiable est un objectif constant depuis le début des années 1970 et l'établissement des premières bases de données sur l'énergie. Les travaux de DIOGEN ne permettront donc pas d'atteindre cet idéal mais s'inscrivent dans cette recherche constante d'une plus grande fiabilité et d'une meilleure appréciation des impacts environnementaux. C'est pour cela que la démarche d'établissement d'un indice de confiance s'appuie sur les travaux préalables de la base de donnée Ecoinvent, qui est une référence internationale en terme de base de données. Cependant, le contexte spécifique du génie civil et de l'utilisation des études environnementales au sein de l'ingénierie de conception des ouvrages nécessite des adaptations au cadre

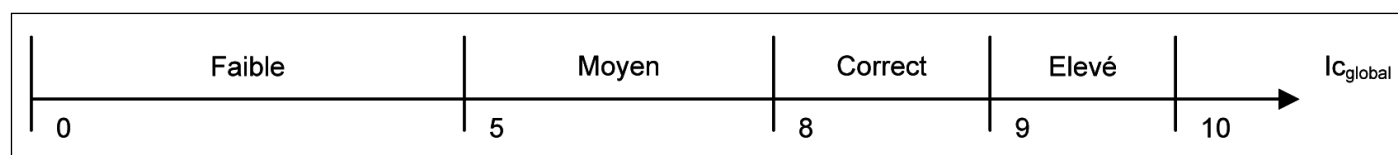


Figure 5 : Grille de lecture d'un indice de confiance global

général des sciences de l'environnement. En effet, nous sommes confrontés à deux enjeux majeurs. Le premier est que les travaux de DIOGEN puissent être utilisés par les acteurs du génie civil ce qui nécessite une adaptation des méthodes de calcul par rapport à celles utilisées par les acteurs issus des sciences de l'environnement. C'est ce que nous avons choisi de faire en retravaillant la « standard deviation » de la base Ecoinvent en « indice de confiance ». Ceci donne une réponse quantitativement moins appropriée que lorsque l'on travaille avec une « standard deviation » sur l'ensemble des valeurs de l'inventaire, mais elle permet une approche qualitative que nous jugeons, dans un premier temps, suffisante pour répondre aux objectifs immédiats qui sont de pouvoir évaluer la fiabilité d'une étude ACV. Le second enjeu est de transcrire l'esprit des méthodes de l'ACV jusque dans des points spécifiques au génie civil. Nous aborderons ici deux points importants : l'utilisation des ressources et l'affectation des impacts pour des usines produisant plusieurs produits.

4.1. L'utilisation des ressources

À l'échelle mondiale, le secteur de la construction consomme 60% des ressources naturelles extraites. La

maîtrise de l'utilisation de ces ressources est donc un objectif majeur de l'ACV en génie civil. Ceci amène 2 questions. Comment quantifier l'impact de l'utilisation des ressources et comment évaluer le recyclage de ces ressources. Pour la première question, il semble à première vue que les méthodes classiques d'ACV aient déjà résolu le problème en créant un indicateur quantifiant l'épuisement des ressources non renouvelables. Cependant, une étude détaillée du calcul de cet indicateur montre que les ressources qui dominent cet indicateur sont les ressources énergétiques (pétrole, charbon, gaz...) ce qui est bien différent des ressources effectivement utilisées en génie civil (acier, graviers, terre...). L'impact de l'utilisation des ressources spécifiques au génie civil n'est donc pas bien quantifié par cet indicateur ce qui nécessite le développement d'un nouvel indicateur. Des travaux ont été engagés et ont été récemment publiés³. Le deuxième point concerne le recyclage. Cet aspect est largement traité dans les différents travaux sur l'ACV et peut se simplifier en 2 méthodes. Lorsque une matière première peut être remplacée par un déchet ou un produit en fin de vie au sein d'un process industriel (système 2, figure 6), il faut quantifier l'impact de ce recyclage. La méthode classiquement adoptée consiste à impacter le coût du recyclage ainsi que

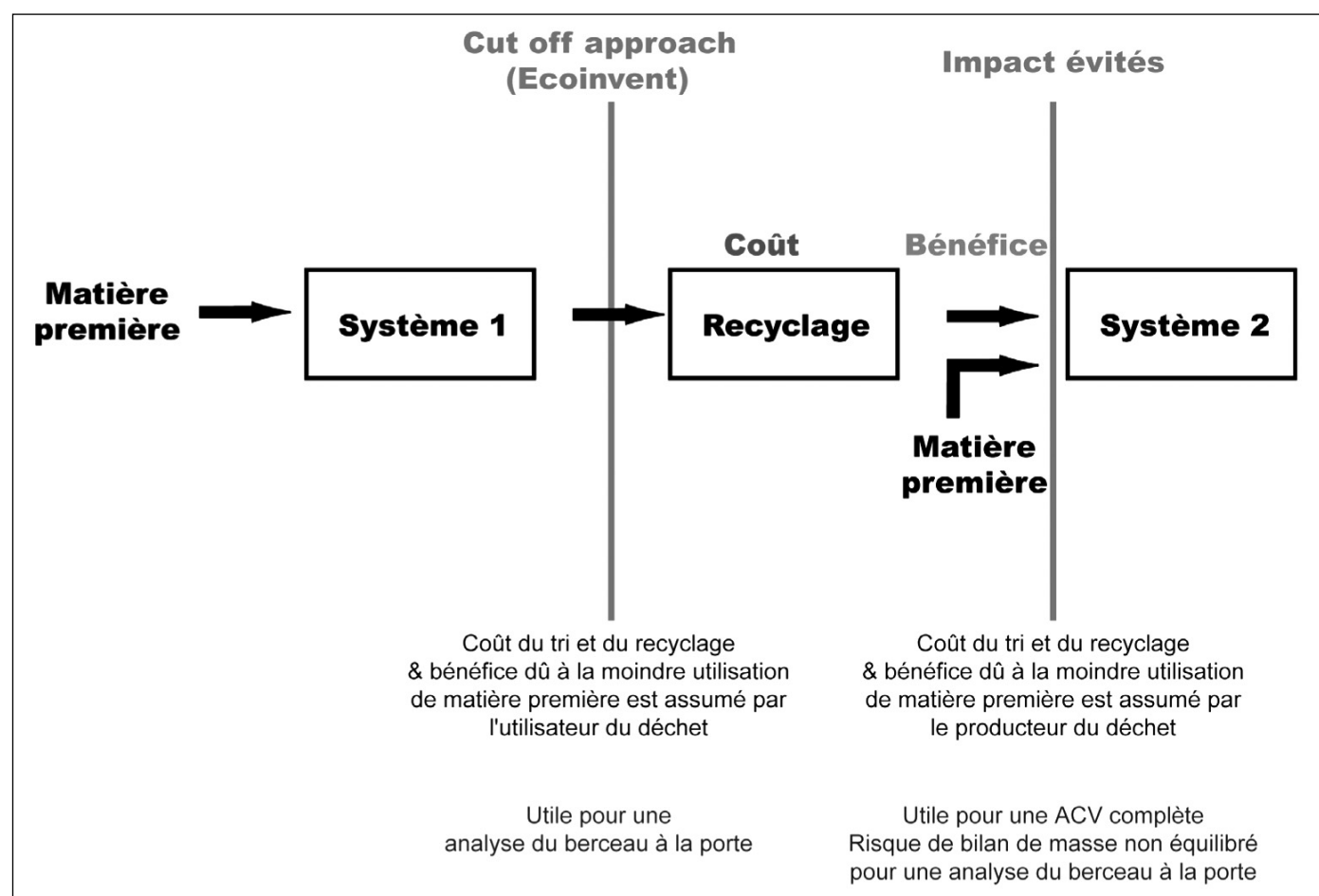


Figure 6 : Prise en compte du recyclage dans les bases de données

³ Habert et al., 2010. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. *Resources, Conservation and recycling*, 54, 364-376.

le bénéfice dû à la moindre utilisation de matière première au produit qui utilise ce déchet. Ceci est utilisé dans les études cherchant à évaluer l'impact de la production d'un produit (étude du berceau à la porte et non pas du berceau à la tombe). Cette approche est celle utilisée dans la plupart des bases de données environnementales qui agglomèrent différents procédés industriels. Une deuxième possibilité est de considérer que le déchet d'un procédé industriel (système 1) permet d'éviter d'utiliser de la matière première et donc que l'impact de l'utilisation de cette matière doit être retranché de l'impact de la production du produit primaire. Cette méthode est très utile pour choisir quelle filière de recyclage est la plus efficace d'un point de vue environnemental, mais par contre si elle est utilisée au sein d'une base de donnée environnementale, le bilan de masse n'est pas respecté ce qui conduit à construire une base de donnée non cohérente. Au sein de la base de donnée DIOGEN, l'approche utilisée dans ECOINVENT est privilégiée.

4.2. Les règles d'affectation des impacts

Un autre problème récurrent dans l'analyse de cycle de vie est de savoir comment distribuer les impacts d'un procédé industriel lorsque ce dernier produit plusieurs produits. Ce problème est récurrent car il n'existe pas de méthode idéale. Dans la norme ISO 14040 il est proposé dans ces situations d'essayer tout d'abord d'éviter d'avoir à procéder à une allocation des flux soit en découpant le système de façon à pouvoir séparer les procédés associés aux différents produits, soit en élargissant le système de façon à intégrer les différents produits dans une même étude. Ceci est cependant rarement possible lorsque l'on veut évaluer l'impact de la production d'un produit spécifique. Lorsque l'allocation est inévitable, la norme propose soit une allocation en fonction de la masse relative des différents produits, soit par une autre valeur physique ou chimique comme l'énergie et enfin si ce type d'allocation ne convient pas, la norme propose d'utiliser des valeurs non physiques, qui peuvent être économiques ou sociales. Ces règles conduisent par exemple à effectuer une allocation énergétique entre le fuel et le bitume au niveau de la raffinerie et une allocation économique entre le bois servant à faire des poutres et les branchages dégagés au moment de la coupe et servant de petit bois de chauffe. Au niveau de la construction, il reste un point non résolu au niveau des additions minérales utilisées dans le ciment. En effet, ces additions sont pour le moment considérées comme des déchets et n'ont donc pas d'impacts associés à part les procédés dus au traitement, ce qui revient à adopter l'approche cut off de la figure 6. Cependant la transposition dans la loi française de la Directive Européenne du 19 novembre 2008 sur les déchets fera que ces additions minérales (cendres volantes et laitiers) seront considérées comme des sous-produits et non plus comme des déchets. À ce moment là, l'industrie productrice de ce sous-produit sera considérée, du point de vue de l'ACV, comme produisant plusieurs produits pour lesquels il faudra répartir les impacts. Avec une allocation massique ces additions vont avoir un impact environnemental largement supérieur au ciment. Par

exemple pour l'acier, comme une tonne de fonte produite génère 250 kg de laitier, 1/5^e des impacts du haut fourneau seront affectés au laitier et 4/5^e à l'acier. Cette solution est critiquable, car on ne peut pas mettre le laitier au même niveau que l'acier. La raison d'être du haut-fourneau étant la production d'acier et non de laitier, or dans ce cas, le laitier est considéré comme un co-produit et non un sous-produit. L'autre méthode est une allocation économique basée sur les bénéfices proportionnels tirés de la vente de l'acier et du laitier. Le laitier n'étant pas vendu au même prix que l'acier, l'impact environnemental sera nettement inférieur à celui du ciment. Cette méthode est beaucoup plus juste. Son inconvénient est qu'il faut se baser sur des prix qui varient continuellement. Le pourcentage affecté au laitier est ainsi compris entre 2 et 10 % selon les prix choisis. Enfin, une dernière approche serait de considérer le système de façon plus globale. En effet la sidérurgie, l'industrie cimentaire et les centrales de production d'énergie font partie, avec l'industrie du papier et les usines de cogénération, des entreprises qui sont soumises au niveau européen au marché des émissions de carbone. Ce marché est destiné à diminuer d'un point de vue global les émissions de CO₂. Ainsi, la question est de voir quel juste poids de carbone représente l'échange de matière entre ces différentes filières industrielles.

Par exemple, en allouant une partie du CO₂ de l'acier sur le laitier, l'industrie sidérurgique diminue la quantité de CO₂ à acheter sur le marché des émissions pour une même production d'acier et par ailleurs avec une faible allocation sur le laitier, l'industrie du ciment peut produire du ciment au laitier pour un coût CO₂ largement inférieur à celui qu'elle devrait payer si ce ciment était composé uniquement de clinker. Il existe donc un compromis gagnant-gagnant pour à la fois l'industrie cimentière et celle de l'acier afin que chacun ne dépasse pas les quotas qui leur sont alloués au niveau européen et que l'objectif initial, qui est de diminuer les quantités de CO₂ émises, soit atteint. Le même type d'équilibre doit se trouver pour les cendres volantes. Cette recherche du bénéfice optimal pour les différents secteurs industriels ainsi que pour la société est schématisé dans la figure 7. Cela sera un mécanisme d'équilibrage prédominant lorsque le coût de la tonne de CO₂ sera une charge effective pour les différents secteurs industriels.

4.3. Les perspectives

Le groupe de travail DIOGEN est actuellement dans une phase de constitution de données, et de leur fiabilité. Des regroupements et des ajustements seront pratiqués en fonction des observations faites, pour aboutir à la structuration finale d'une base de données adaptée et accessible à tous.

DIOGEN s'appuie en premier lieu sur des données extérieures existantes, qu'il s'agit soit d'intégrer individuellement, soit de combiner en vue de l'obtention du produit visé. Il ne s'agit en aucun cas de faire double-emploi avec d'autres sources de données. Si une donnée figurant dans une autre base est à la fois accessible et adaptée au domaine du génie civil, DIOGEN fera tout simplement

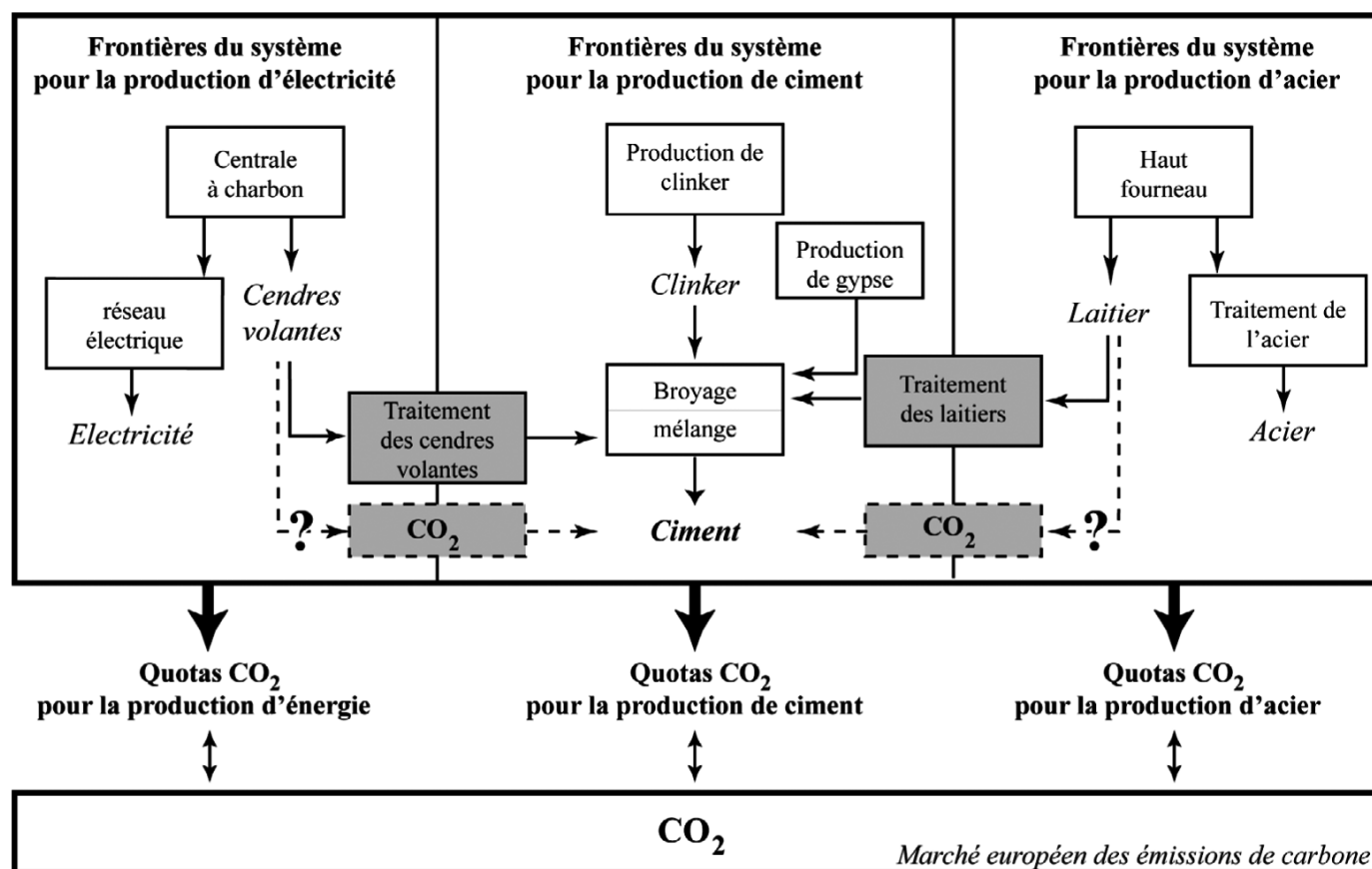


Figure 7 : Schéma des échanges de matière et de CO₂ entre les différentes filières industrielles au regard du marché européen des émissions de carbone

référence à cette base. Nous savons que tout n'est pas disponible aujourd'hui dans le domaine du génie civil. DIOGEN n'a pas pour objectif de venir combler l'ensemble des manques de données dans le domaine. Par contre, elle pourra indiquer soit les manques, soit la faible adéquation des données existantes sur tel ou tel item, attirant ainsi l'attention de tout contributeur potentiel sur le manque à combler.

La contrepartie de ces objectifs et de cette structure est que la base de données DIOGEN doit être un outil vivant, qui doit assurer à la fois sa croissance à travers les nouvelles données extérieures à prendre en compte, et sa maturité à travers la réévaluation en temps réel de la fiabilité des données qui y sont rattachées. Cette base n'est qu'un maillon de la chaîne à mobiliser. Elle pourra alimenter les outils d'évaluation, d'éco-conception et d'éco-gestion qui sont et qui pourront être élaborés par ailleurs. Elle ne constituera

cependant pas leur seule source, et de nombreuses données sont à recueillir pour intégrer les impacts des phases de chantier (à travers par exemple le groupe de travail animé actuellement par le SETRA), les impacts de gestion et de maintenance des ouvrages, ainsi que de leur fin de vie. L'exercice est d'autant plus difficile lorsqu'il s'agit d'étudier de nouvelles pratiques, de nouveaux matériaux ou de nouvelles structures. Le manque de recul impose alors de faire des hypothèses sur les modifications du cycle de vie que ces nouvelles solutions induisent, pour ne pas les considérer qu'à travers leur influence économique immédiate ou leur seul apport de résistance supplémentaire. Beaucoup de recherches restent donc encore à conduire à la fois pour disposer de données fiables tout au long du cycle de vie des ouvrages, de méthodes d'appréciation éprouvées, et de méthodes d'éco-gestion et d'éco-conception pertinentes.

CONTRÔLE DES EFFORTS DANS LES HAUBANS ET SUSPENTES : UNE NÉCESSITÉ POUR LA GESTION DES OUVRAGES D'ART

C. SAUVAGE¹, P. GILLES²

¹ Ingénieur Industriel Chef de Service, Service Public de Wallonie, Direction de l'Expertise des Ouvrages,
Rue Côte d'Or 253, B-4000 Liège, Belgique

² Premier Ingénieur des Ponts et Chaussées, Service Public de Wallonie, Direction de l'Expertise des Ouvrages,
Rue Côte d'Or 253, B-4000 Liège, Belgique

I. INTRODUCTION

Les haubans, suspentes et câbles de postcontrainte extérieure sont des éléments essentiels d'une structure. Les efforts qu'ils appliquent à l'ouvrage doivent être bien connus et vérifiés tant à la construction que durant l'exploitation.

Lors de la construction, c'est surtout la valeur absolue des efforts qui est importante. Par contre durant l'exploitation, l'attention se portera principalement sur la variation des efforts depuis la construction. Ces variations peuvent être normales (effet thermique, fluage,...) mais elles peuvent aussi traduire une dégradation de l'élément ausculté (corrosion, rupture,...).

La détermination des efforts précités peut se faire au départ des mesures de vibrations. Les haubans et suspentes sont les principaux types d'éléments auscultés. Les câbles de postcontrainte extérieure peuvent aussi être auscultés par cette technique mais aucun cas ne sera présenté ici.

Cette technique permet de déterminer les efforts avec une incertitude de 2 à 5 % lorsque la valeur absolue est recher-

chée. Si seule la variation d'effort est recherchée, l'incertitude ne dépasse pas le pourcent.

Depuis une vingtaine d'années, la Direction de l'Expertise des Ouvrages du Service Public de Wallonie (anciennement le Ministère de l'Équipement et des Transports de la Région Wallonne) applique cette technique régulièrement. Le présent article fait la synthèse de la méthode utilisée et présente quelques cas concrets dont les mesures au viaduc de Millau effectuées en 2004.

II. RAPPEL DE LA MÉTHODE

II.1 Formulation de base

Le principe de base de la mesure consiste à assimiler le hauban, la suspente ou le câble de postcontrainte extérieure à une barre tendue.

La vibration d'une telle barre tendue sollicitée par flexion (effet du vent, d'un coup de marteau,...), est décrite,

moyennant l'hypothèse de mouvements faibles, par l'équation différentielle à deux variables suivante :

$$T \frac{d^2 y}{dx^2} - EI \frac{d^4 y}{dx^4} = \mu \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (1)$$

avec : T : effort dans l'élément

E : module d'élasticité du matériau

I : moment d'inertie de l'élément

μ : masse linéique de l'élément

t : variable temps

x : variable de position des points le long de l'élément

y : variable de position des points dans le sens de la flexion.

La résolution de cette équation va se faire en considérant 3 modèles distincts :

- Modèle A : élément sans rigidité flexionnelle
- Modèle B : élément avec rigidité flexionnelle constante et articulé à ses extrémités
- Modèle C : élément ne répondant pas aux modèles A et B.

Pour les modèles B et C, les conditions d'extrémité doivent être connues, ce qui constitue une des difficultés majeures de la méthode et implique une connaissance détaillée des fixations d'extrémités et des mouvements des supports de ces fixations. Dans certains ancrages il est parfois difficile de définir la position des points fixes et donc par conséquent de déterminer la longueur vibrante de l'élément ausculté.

Pour le modèle A, le fait que EI soit nul entraîne un comportement identique quelques soient les conditions d'extrémités.

L'analyse des résultats de mesures se fera de manière à vérifier que le modèle utilisé corresponde à la réalité. En cas de doute, il est parfois nécessaire d'effectuer, en début de campagne, des mesures en parallèle et limitées en nombre, par d'autres méthodes plus coûteuses (mesures au vérin,...).

II.2. Modèle A - Élément sans rigidité flexionnelle

En négligeant la rigidité flexionnelle, le modèle se ramène à celui d'un fil pesant et tendu dont la rigidité flexionnelle EI est nulle. Robert, Bruhot et Gervais [3] ont montré que cette hypothèse d'une rigidité flexionnelle nulle était valable pour tout élément dont la rigidité flexionnelle EI vérifie la relation :

$$EI \leq 25.10^{-6}.T.L.^2$$

avec : L : longueur vibrante de l'élément

Ce modèle est d'application pour la majorité des haubans et pour certains câbles de postcontrainte extérieure.

L'équation différentielle (1) se simplifie ($EI = 0$) et ses solutions conduisent à la formulation suivante :

$$f_{iT} = \frac{i}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2)$$

avec : f_{iT} : fréquence correspondant au mode i

i : indice du mode de vibration (1, 2, 3, 4)

Le milieu étant non dispersif (la vitesse des ondes de vibration est constante), les ondes qui se réfléchissent aux points d'ancrage, forment des ondes stationnaires matérialisées par des modes de vibrations.

Les fréquences des différents modes de vibrations forment un ensemble constitué d'une fondamentale suivie de ses harmoniques qui en sont des multiples entiers.

Il en résulte que la courbe des fréquences en fonction des indices des modes de vibrations est une droite.

La vérification de cette caractéristique lors des mesures sur ouvrage permet de s'assurer de la validité du modèle de fil pesant et tendu dans le cas précis étudié.

Pour une mesure de fréquence donnée f_{iT} , l'effort est déduit de la formule (2) et vaut

$$T = (4.f_{iT}^2.L^2.\mu)/i^2 \quad (3)$$

Il arrive parfois que les modes inférieurs donnent des fréquences s'écartant de la droite précitée, suite à des phénomènes de couplage avec les fréquences propres du pont lui-même.

Dans ce cas, il y a lieu de prendre comme fréquence fondamentale de calcul f_{IT} , la moyenne pondérée des

fréquences mesurées c'est-à-dire $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{iT}}{i}$ après avoir

supprimé les fréquences douteuses.

II.3. Modèle B - Élément à rigidité flexionnelle constante et articulé à ses extrémités

Dans ce modèle, la rigidité flexionnelle EI n'est plus négligeable. Mais elle est constante sur toute la longueur vibrante de l'élément. D'autre part, les conditions d'extrémités sont assimilables à des articulations.

Ce modèle englobe certaines suspentes des ponts bow-string ainsi que certains haubans et câbles de postcontrainte extérieure (en fonction de leur longueur et de leur section).

L'analyse de ce modèle se fait en le décomposant vectoriellement suivant d'une part le modèle d'un fil pesant et tendu et d'autre part celui d'une poutre rigide sans effort axial. Cette décomposition est valable si les extrémités articulées restent fixes [4].

Le fil pesant et tendu correspond au modèle A (§ II.2).

Pour la poutre rigide sans effort axial, la fréquence propre f_{iEI} est définie par l'équation (4).

$$f_{iEI} = \frac{i^2.\pi}{2} \sqrt{\frac{E.I}{\mu.L^4}} \quad (4)$$

La combinaison vectorielle de ces deux modèles, permet de définir la fréquence modale du modèle B suivant l'équation (5).

$$f_i = \sqrt{f_{iT}^2 + f_{iEI}^2} \quad (5)$$

La figure 1 illustre la courbe de ces fréquences modales en fonction des indices modaux.

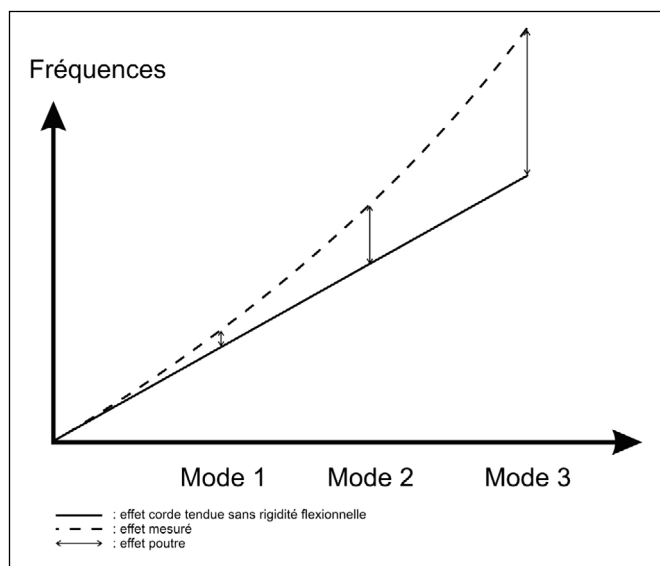


Figure 1 : Élément avec rigidité flexionnelle constante : évolution des fréquences propres avec les indices des modes de vibration

En combinant les équations (4) et (5), la formulation de la fréquence propre du modèle B devient :

$$f_i^2 = i^2 f_{iT}^2 + i^4 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\mu \cdot L^4}} \right)^2 \quad (6)$$

L'usage de l'équation (2), permet d'exprimer l'équation (6) pour deux modes distincts (a et b) et d'en déduire la valeur de l'effort T correspondant suivant l'équation (7).

$$T = 4 \cdot (b^4 f_a^2 - a^4 f_b^2) \cdot L \cdot \mu / (a^2 b^4 - a^4 b^2) \quad (7)$$

avec :

a, b : indice de deux modes

f_a , f_b : fréquences propres mesurées correspondant aux modes a et b

Le calcul de l'effort T peut être réalisé en utilisant plusieurs couples de fréquences propres. Les valeurs ainsi obtenues doivent normalement être indépendantes des couples de fréquences propres. Si tel est bien le cas, l'effort T est donné par la valeur moyenne des valeurs calculées grâce à chaque couple de fréquence. L'écart-type est également déterminé afin de vérifier la validité de la détermination de l'effort T.

II.4. Modèle C - Éléments à rigidité flexionnelle variable

Dans ce troisième modèle, la rigidité flexionnelle EI n'est pas négligeable et elle peut varier le long de la longueur vibrante. En outre les conditions d'extrémités peuvent être multiples : articulation et/ou encastrement.

Ce modèle correspond généralement aux suspentes de ponts bow-string.

La détermination analytique des efforts n'est plus possible dans ce cas. La résolution numérique va se baser sur la méthode d'intégration dite « aux différences finies ».

Cette méthode a été intégrée dans un logiciel d'analyse et

de traitement des mesures développé par la Direction de l'Expertise des Ouvrages. Il permet de déterminer les efforts dans un élément dans les cas suivants :

1. Rigidité flexionnelle EI de l'élément non nulle et éventuellement variable le long de celui-ci.
2. Longueur vibrante de l'élément pas exactement connue, c'est-à-dire lorsque les points d'attache à l'ouvrage, caractérisés par un mouvement vibratoire nul, ne sont pas précisément localisés.

La procédure de calcul se base sur deux groupes d'équations.

D'une part l'équation différentielle (1) et les équations de base de la théorie de la flexion des poutres (8) :

$$\theta = y'$$

$$M = EI y'' \quad (8)$$

$$Q = EI y'''$$

avec : θ : pente de la déformée

M : moment de flexion

Q : effort tranchant

D'autre part la relation existant entre les conditions d'extrémités exprimées pour chacune des 4 grandeurs :

1. y (déplacement latéral),
2. θ (pente de la déformée),
3. M (moment de flexion) et
4. Q (effort tranchant)

Il est démontré [2] que pour chacune de ces grandeurs, les valeurs finales F_i ($x=L$) sont des combinaisons linéaires des valeurs initiales I_i ($x=0$).

A chaque extrémité, deux grandeurs sont toujours nulles : y et θ dans le cas d'un encastrement ou y et θ dans le cas d'une articulation.

Les valeurs finales F_1 et F_2 nulles peuvent donc être définies en fonction des valeurs initiales I_1 et I_2 non nulles selon les équations (9) :

$$F_1 = a_{11} \cdot I_1 + a_{12} \cdot I_2 = 0 \quad (9)$$

$$F_2 = a_{21} \cdot I_1 + a_{22} \cdot I_2 = 0$$

Ces relations sont vérifiées dès que le déterminant est nul soit :

$$a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} = 0 \quad (10)$$

Le schéma de calcul se base sur trois étapes répétées pour chaque fréquence mesurée.

Étape 1

L'effort T et la longueur L sont estimés approximativement.

Étape 2

Autour de ces valeurs estimées, une gamme de valeurs est choisie tant en effort qu'en longueur. Au sein de chacune de ces gammes, un pas d'incrément est choisi : Δt et Δl .

Étape 3

Cette étape correspond à un double calcul itératif sur la longueur et sur l'effort. Les variables longueur l et effort t varient dans les gammes de longueur et d'effort définies à l'étape 2.

Les équations (1) et (8) sont intégrées entre $x = 0$ et $x = l$ en considérant le couple (l, t). Au terme de l'intégration, le calcul du déterminant (10) est réalisé. Le changement de son signe permet de définir que la valeur de l'effort est correcte et l'itération peut se poursuivre avec une nouvelle valeur de longueur $l + \Delta l$. A défaut, le calcul se poursuit

avec la même valeur de longueur l et une valeur d'effort incrémentée $t + \Delta t$.

Au terme de cette double intégration, une courbe de points est définie dans l'espace Effort-Longueur.

Après avoir répété ces opérations pour chaque fréquence propre, toutes les courbes vont se croiser en un même point définissant ainsi la longueur vibrante exacte et l'effort réel. En pratique ce croisement n'est pas parfaitement ponctuel. Dès lors une courbe des moyennes des efforts ainsi qu'une courbe des variances sont tracées en fonction des longueurs considérées (figure 8). Le point commun à l'ensemble des courbes est alors défini par la longueur donnant la variance minimum et par l'effort moyen correspondant.

III. APPLICATIONS

III.1. Mesures des efforts au Viaduc de Millau en France

III.1.1. Présentation de l'ouvrage

Le viaduc de Millau est un ouvrage multi haubané de 2 460 m de long qui franchit 280 m plus haut, le Tarn entre le Causse Rouge et le Causse du Larzac dans le sud de la France.

Les sept piles sont prolongées par autant de pylônes qui supportent chacun une double nappe centrale de 2×11 haubans.

Le tablier métallique a été réalisé par poussage depuis les deux culées, la jonction étant réalisée au-dessus du Tarn. Chaque morceau de tablier lancé comporte, en son extrémité lancée, un pylône avec 2×6 haubans. Après jonction, les pylônes complémentaires sont placés ainsi que l'ensemble des 154 haubans.

III.1.2. Objectif des mesures

Après montage des haubans, ceux-ci sont mis en tension suivant des valeurs d'efforts théoriques. Cette opération va conférer au tablier un certain profil en long qui ne correspond pas nécessairement à celui souhaité. Il est donc nécessaire de procéder à un réglage des efforts dans les haubans afin d'obtenir le profil en long définitif. Deux données sont nécessaires pour déterminer la valeur de ces réglages :

- le profil en long actuel
- l'effort réel dans chaque hauban.

Deux phases de mesures ont donc été réalisées, l'une pour déterminer les efforts avant réglage et l'autre pour vérifier les efforts après ce réglage.

Une troisième phase de mesure a été menée afin d'apprécier l'effet indirect des amortisseurs des haubans sur les fréquences propres. Cette dernière mesure et les efforts qui en ont été déduits serviront de référence pour toute la vie de l'ouvrage.

III.1.3 Caractéristiques des haubans

Les haubans sont constitués de torons T15S de classe 1860 MPa, galvanisés, gainés et cirés. Les torons d'un hauban sont protégés par une gaine en polyéthylène haute densité

(PEHD). Les haubans comportent de 45 à 91 torons et leur longueur varie de 57 à 180 m. La masse linéique des haubans (masse des torons et de la gaine) fluctue de 67 à 137 kg/m.

En partie inférieure, un tube anti-vandalisme protège l'amortisseur.

Les haubans sont tendus depuis l'intérieur du caisson métallique constituant le tablier. Un même effort est appliqué à chaque toron d'un hauban (système isotension)

III.1.4. Procédure de mesure

Pour chaque phase de mesure, les étapes suivantes ont été suivies :

- Placement des accéléromètres sur la gaine du hauban au-dessus du tube anti-vandalisme (figure 2).
- Mesure simultanée sur 4 haubans durant 5 minutes.
- Analyse fréquentielle des signaux enregistrés et vérification de la validité du modèle A du fil pesant et tendu (voir § II.2 ci-dessus).

Calcul des efforts sur base des fréquences correspondant au mode de vibration n°2.

Pour réaliser les mesures de l'ensemble des 154 haubans de 1 à 2 journées étaient nécessaires suivant les conditions météorologiques et de chantier.



Figure 2 : Viaduc de Millau - position de l'accéléromètre de mesure sur un des haubans

III.1.5. Validation du modèle d'analyse

La validation de la méthode consiste à vérifier que le hauban répond bien au modèle A utilisé pour calculer les efforts, à savoir celui de la corde tendue sans rigidité flexionnelle (§ II.2).

La courbe représentant l'évolution des fréquences de vibration en fonction des modes a été tracée pour chaque hauban.

Ces courbes ont été comparées aux droites théoriques, et les coefficients de corrélation obtenus sur 5 fréquences au minimum ont toujours été supérieurs à 0.99.

III.1.6. Incertitude des mesures

L'incertitude des mesures est déterminée d'une part par une analyse de propagation des incertitudes et d'autre part en comparaison avec les résultats obtenus par mesure au vérin (système isotension).

Le calcul de l'effort se basant sur l'équation (3), l'analyse de propagation des incertitudes aboutit à l'expression de l'incertitude relative de l'effort selon l'équation (11) :

$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta L}{L_{\min}} \right)^2 + 2 \left(\frac{\Delta f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \mu}{\mu} \right)^2} \quad (11)$$

avec : T : effort

ΔT : incertitude absolue sur l'effort

L : longueur

ΔL : incertitude absolue sur la longueur

f : fréquence

Δf : incertitude absolue sur la fréquence

μ : masse linéique

$\Delta \mu$: incertitude absolue sur la masse linéique

L'incertitude absolue sur la détermination des fréquences est de 1/300 Hz compte tenu de la durée de l'enregistrement et du taux d'échantillonnage.

L'incertitude relative sur la masse linéique est estimée à 2 % alors que l'incertitude absolue sur la longueur est estimée à 50 mm pour le hauban le plus court d'une longueur de 57 m.

L'incertitude relative totale sur les efforts calculée à l'aide de la relation (11) vaut donc 2.1 %

Par ailleurs, lors d'une phase de mesure préliminaire, des mesures d'effort par vibration ont été réalisées simultanément à des mesures par pesage de 10 torons par hauban (mesures réalisées par Freyssinet). Le tableau 1 donne la correspondance entre ces deux types de mesures.

Haubans	Efforts déduit des fréquences (kN)	Efforts déduit des pesages (kN)	Différences relatives (%)
P7-S11	3768.8	3682.2	+ 2.3
P7-S10	4059.0	4119.2	- 1.4
P7-S8	4784.5	4798.5	- 0.3
P7-S6	3747.1	3771.3	- 0.6
P7-S4	3203.8	3213.1	- 0.3
P7-S2	2929.4	2940.3	- 0.4

Tableau 1 – Viaduc de Millau : comparaison entre mesures d'efforts par vibration et par pesage

Les différences d'efforts entre les deux techniques sont très faibles et au maximum proche de l'incertitude relative totale de 2,1 %.

III.1.7. Problématique des amortisseurs

Comme souvent, les haubans du viaduc de Millau sont équipés d'amortisseurs destinés à éviter une amplification excessive des mouvements naturels des haubans.

Dans le cas présent, deux types d'amortisseurs ont été utilisés :

- amortisseur en élastomère pour les haubans des deux longueurs les plus courtes
- amortisseur hydraulique pour les autres haubans.

Ces amortisseurs sont positionnés, par rapport à l'ancrage inférieur, à une distance variant suivant le hauban de 1,2 m

à 3,7 m. Dans le modèle du fil pesant et tendu, il convient de bien connaître la position des points fixes des haubans afin d'en déduire leur longueur vibrante. Avant pose des amortisseurs, ces points fixes sont simples à localiser et correspondent aux ancrages. Après positionnement des dispositifs d'amortissement, le point fixe inférieur s'en trouve modifié. Sa nouvelle position devient difficile à prédire puisque rien ne permet d'affirmer qu'il se déplace au droit de l'amortisseur.

Cette incertitude a pu être levée dans le cas présent grâce à des mesures réalisées lors de différentes phases. En effet l'ensemble des fréquences des haubans de deux pylônes ont été mesurées sans et avec amortisseurs mais sans aucune charge supplémentaire sur l'ouvrage à ce stade de fin de construction. Il est donc raisonnable de supposer qu'entre les deux phases les efforts dans les haubans sont restés identiques. Toutefois, entre ces deux mesures, l'essai de chargement du pont a été effectué dès lors une petite redistribution d'efforts entre les haubans n'est pas à exclure.

La première série de mesures (sans amortisseur) a permis de calculer la valeur des efforts en considérant comme points fixes les deux ancrages. En supposant les efforts inchangés, la deuxième série de mesures des fréquences (avec amortisseur) permet de déterminer la nouvelle longueur entre points fixes. Bien entendu, seule la position du point fixe inférieur change. La courbe de la figure 3 reprend la distance entre l'ancrage inférieur et ce nouveau point fixe exprimée par rapport à la distance entre le même ancrage et l'amortisseur. L'examen de ce graphe permet de constater que les points fixes se sont déplacés de l'ancrage inférieur vers l'amortisseur à environ 80 % de la distance ancrage inférieur - amortisseur. Les variations observées sur ce graphe sont dues probablement à l'essai de chargement évoqué ci-dessus.

Ces mesures ne mettent pas en évidence une différence de comportement entre les amortisseurs en élastomère et hydrauliques.

III.1.8. Conclusions

Les mesures effectuées au viaduc de Millau ont permis de connaître rapidement et précisément (incertitude relative de 2.1 %) les efforts dans les haubans afin de procéder aux derniers réglages destinés à obtenir le profil en long souhaité pour le tablier.

Ces mesures qui constituent une référence essentielle par rapport à la gestion de l'ouvrage durant son exploitation, ont également permis de mettre en évidence l'effet des amortisseurs. Ceux-ci modifient notablement la longueur entre points fixes. Mais pour autant, les points fixes ne se déplacent pas au droit des amortisseurs mais un peu avant ceux-ci (à 20 % de la longueur amortisseur – ancrage).

III.2. Pont de Hesperange au Grand Duché de Luxembourg

III.2.1. Présentation de l'ouvrage

Le pont Victor Bodson à Hesperange se situe sur le contournement sud-est de la ville de Luxembourg et

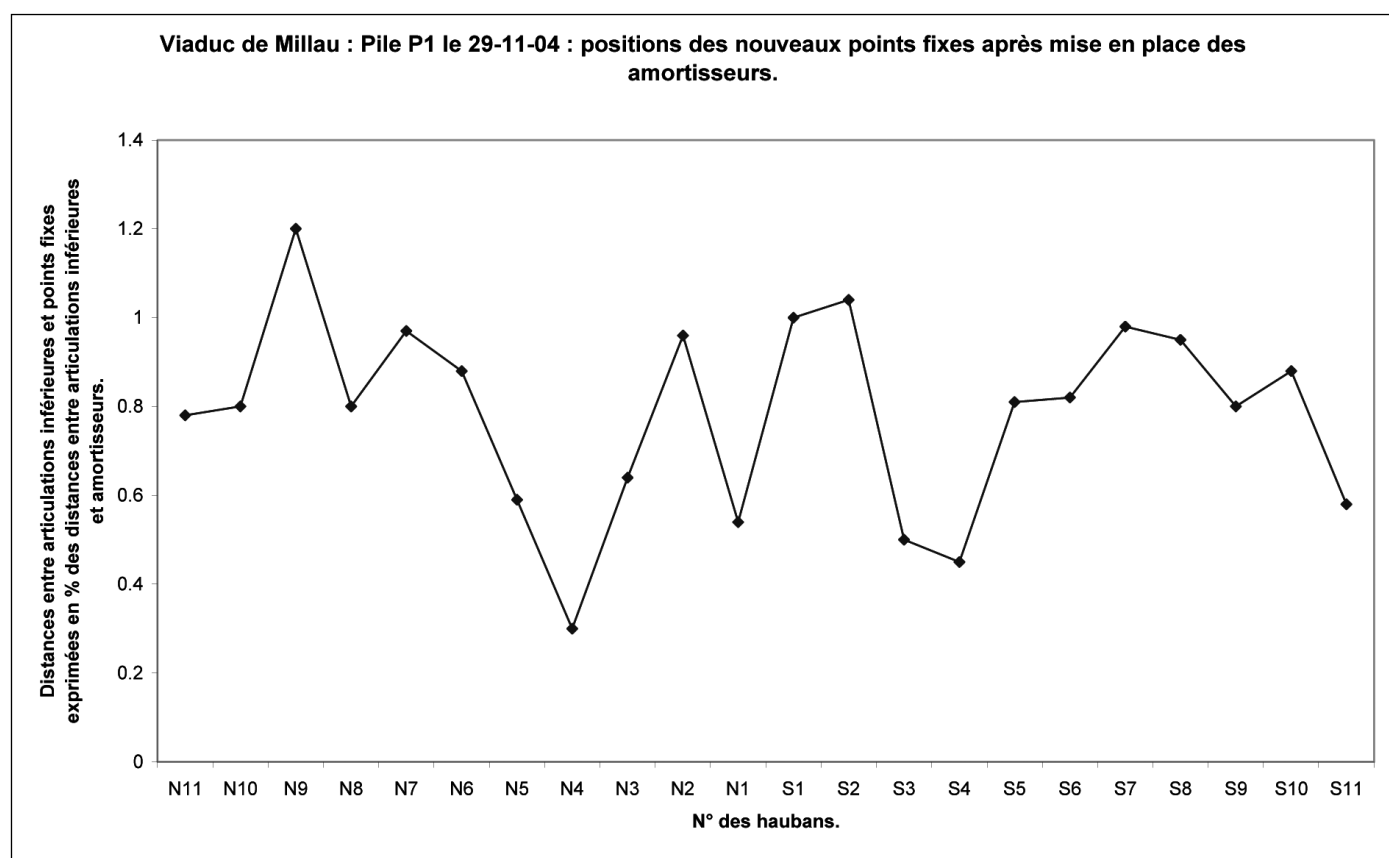


Figure 3 : Distribution des nouveaux points fixes inférieurs après mise en place des amortisseurs

enjambe la vallée de l'Alzette séparant les plateaux de Howald et d'Itzig.

Il s'agit d'un pont haubané symétrique équipé d'une double nappe centrale de 2 x 16 haubans (figure 4). Cet ouvrage courbe a une largeur de 27 m et une longueur de 260 m.

Le tablier mixte acier-béton se compose de deux caissons métalliques trapézoïdaux entretoisés et d'une dalle en béton armé d'épaisseur variable. Il est soutenu par des haubans formés chacun de 55 à 85 torons d'une longueur variant de 38 à 135 m.



Figure 4 : Pont de Hesperange – nappe de haubans en enfilade

III.2.2. Objectifs des mesures

Les premières mesures, commandées par la société responsable du montage des haubans et effectuées en 1993 et 1994, avaient 3 buts :

- contrôler, en cours de montage, la validité des valeurs théoriques des efforts,
- déterminer, en fin de chantier, les charges définitives reprises par les haubans, qui serviront de référence pour toute la vie de l'ouvrage,
- évaluer l'efficacité des amortisseurs installés sur 5 haubans à partir de la détermination du coefficient d'amortissement.

Les secondes mesures, commandées par le service gestionnaire de l'ouvrage et effectuées en 2004, avaient pour objectif de contrôler le bon comportement des haubans après 10 ans d'exploitation.

III.2.3. Résultats des mesures

Les efforts sont déduits des fréquences de vibration des haubans, après avoir contrôlé que ceux-ci se comportent bien suivant le modèle A du fil pesant et tendu (§ II.2).

Le tableau 2 reprend les valeurs obtenues à la fin de la construction du pont en 1994.

Les mesures de 2004 sont reprises en comparaison avec celles de 1994 à la figure 5. Celle-ci reprend pour chaque hauban l'évolution des efforts en pourcentage de l'effort de 1994. L'axe des ordonnées reprend le numéro des haubans suivant l'axe longitudinale du pont ; le pylône étant situé entre les haubans 16 et 17.

Haubans	Efforts déduits des fréquences de vibrations (kN)	Efforts théoriques (kN)	Différences (%)	Haubans	Efforts déduits des fréquences de vibrations (kN)	Efforts théoriques (kN)	Différences (%)
1	260	285	- 8.8	17	797	777	2.6
2	318	340	- 6.5	18	717	768	- 6.6
3	389	408	- 4.7	19	525	528	- 0.6
4	418	442	- 5.4	20	522	527	- 0.9
5	491	508	- 3.3	21	427	446	- 4.3
6	485	501	- 3.2	22	435	458	- 5.0
7	478	487	- 1.8	23	451	461	- 2.2
8	465	474	- 1.9	24	462	464	- 0.4
9	469	462	1.5	25	463	482	- 3.9
10	446	442	0.9	26	482	497	- 3.0
11	451	436	3.4	27	479	505	- 5.1
12	441	435	1.4	28	413	430	- 4.0
13	552	507	8.9	29	378	391	- 3.3
14	515	516	- 0.2	30	399	413	- 3.4
15	773	758	2.0	31	293	303	- 3.3
16	817	766	6.7	32	318	335	- 5.1

Tableau 2 - Pont Victor Bodson : Mesures d'efforts lors de la construction

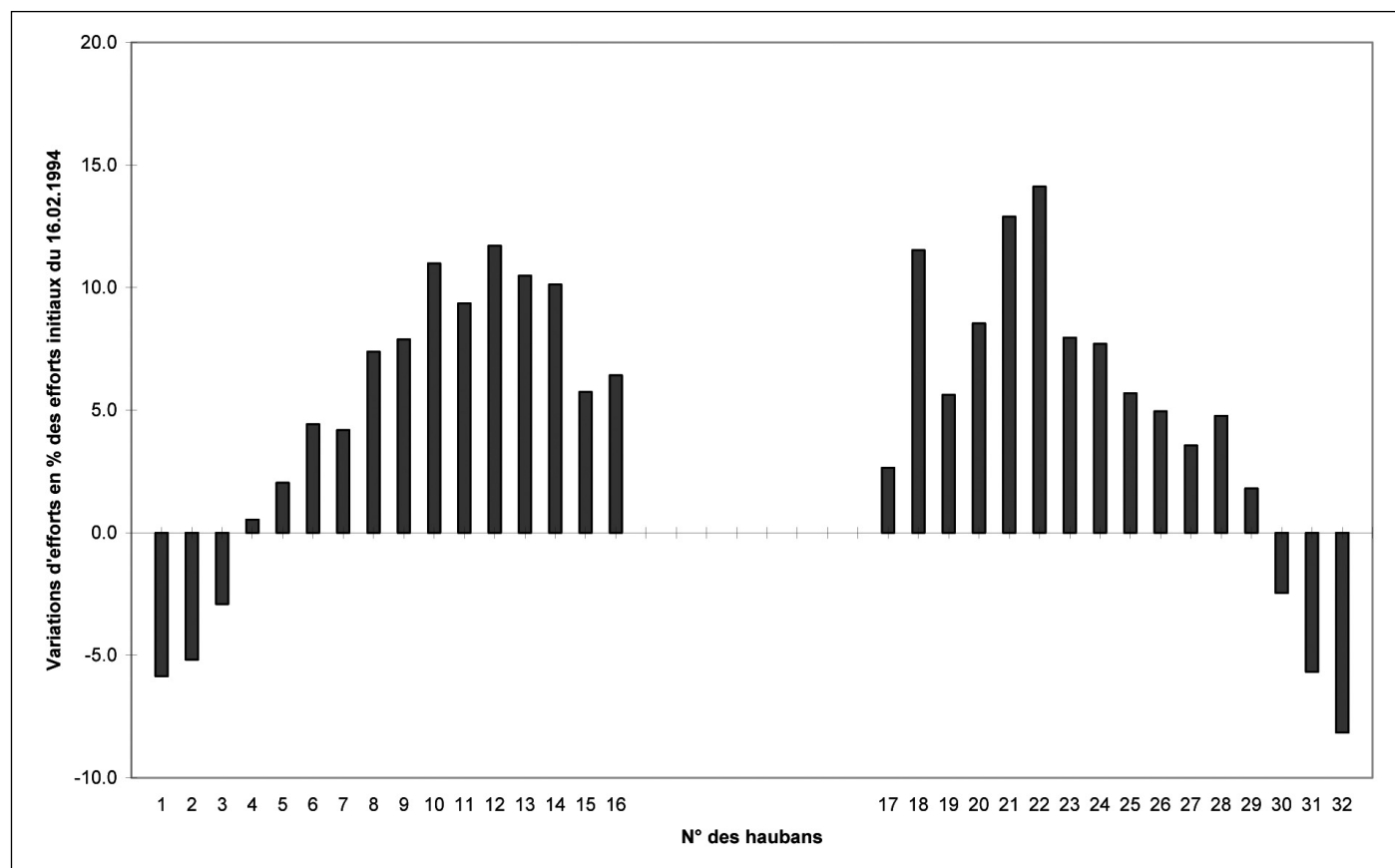


Figure 5 : Pont de Hesperange - variations des efforts durant les 10 premières années

L'allure de ces variations d'efforts présente des caractéristiques assez marquées :

- symétrie par rapport au pylône
- variation progressive
- accroissement des efforts à l'exception des haubans les plus longs qui se déchargent.

Les causes de ces évolutions sont à trouver dans le fluage combiné des haubans et du tablier. Pour les haubans les plus longs, l'incidence du fluage du tablier est faible vu la proximité de la culée et le fluage des haubans amène une baisse des efforts. Par contre, à la mi-travée, c'est le fluage du tablier qui prédomine provoquant une hausse des efforts.

III.3 Passerelle de Gembloux en Belgique

III.3.1. Présentation de l'ouvrage

La passerelle de Gembloux permet à un réseau de voie lente (accès réservé uniquement aux piétons et aux cyclistes), d'enjamber une route nationale au nord de Namur (figure 6).

L'ouvrage est biais et comporte une travée unique. Le tablier est constitué de 3 poutres métalliques principales et d'une dalle en béton armé collaborante. Il est soutenu à la mi-portée par 6 suspentes reliées à un arc métallique, qui est biais par rapport au tablier. Quatre torons, constituant le



Figure 6 : Passerelle de Gembloux.

tirant, relie les pieds d'arc. A chaque culée, un chevêtre métallique en caisson relie les pieds d'arcs avec le tablier. La passerelle a une portée de 21,7 m entre appuis et une largeur de 2,7 m.

III.3.2. Objectifs des mesures

Les mesures sont effectuées dans le cadre de l'épreuve de chargement de l'ouvrage en vue de contrôler le bon comportement des suspentes durant les différentes phases de mise en charge réalisées.

III.3.3. Résultats des mesures

Au vu du type d'ancrage, il était difficile de déterminer précisément les points fixes. Dès lors les mesures ont été interprétées en considérant le modèle C (§ II.4).

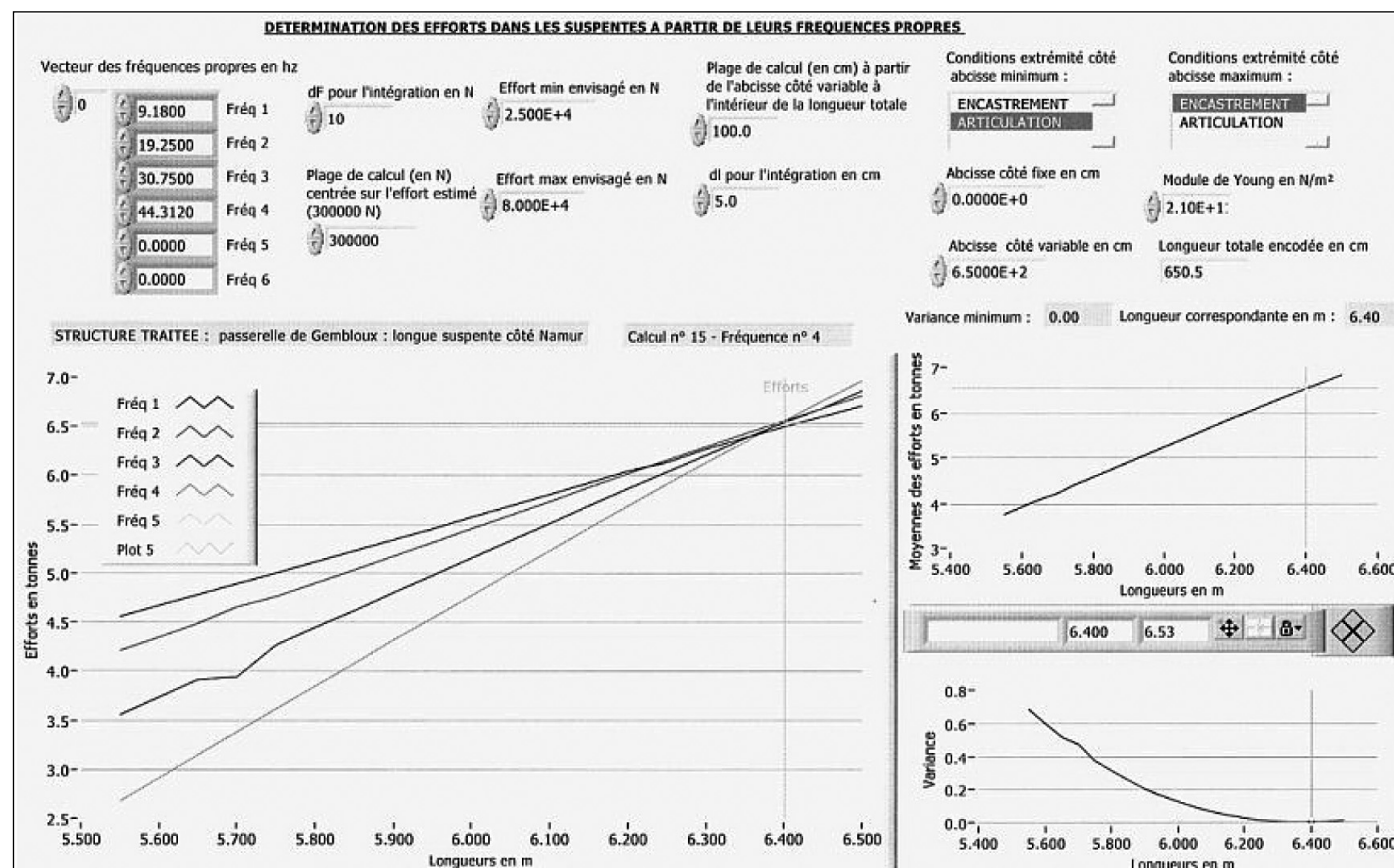


Figure 7 : Fenêtre de calcul utilisée pour la détermination des efforts dans les suspentes de ponts, lorsque les longueurs vibrantes sont indéterminées

La figure 7 représente la fenêtre de calcul du calcul par différences finies correspondant à une des suspentes de la passerelle précitée. Cette figure donne, pour une série de fréquences de vibrations mesurées, les différentes courbes calculées. Le croisement des courbes permet de déterminer pour cette suspente, la longueur entre points fixes et l'effort réel à savoir dans le cas illustré 6.4 m et 64.06 kN (6.53 tonnes).

III.4. Pont haubané de Lanaye en Belgique

III.4.1. Présentation de l'ouvrage

Le pont de Lanaye, d'une longueur totale de 232 m, franchit le canal Albert avant la frontière hollandaise. Il relie les entités de Lanaye et d'Eben-Emael.

Il s'agit d'un pont haubané asymétrique possédant un seul pylône en béton encastré sur la fondation. Il est équipé de 2 nappes de 5 haubans ancrés dans la culée contrepoids (côté Lanaye) et de 2 nappes de 10 haubans ancrés au tablier (côté Eben-Emael).

Le tablier, en forme de caisson, est constitué de deux maîtresses poutres métalliques et de dalles en béton armé (granulats légers).

La partie principale, enjambant le canal Albert, a une longueur de 177 m et une largeur de 13,3 m et les haubans, formés de 104 à 325 fils parallèles galvanisés (\varnothing 7 mm), ont des longueurs de 49,25 à 165,79 m.

Les fils sont protégés par des gaines en PEHD qui ont été injectées de résine époxy-brai.

III.4.2. Objectifs des mesures

L'ensemble des ponts haubanés gérés par le Service Public de Wallonie fait l'objet d'un contrôle périodique des efforts dans les haubans. C'est dans ce cadre que sont réalisées les mesures au pont de Lanaye.

Les haubans se comportent suivant le modèle A fil pesant et tendu (§ II.2).

III.4.3. Résultats des mesures

Les différentes campagnes de mesures réalisées au pont de Lanaye ont permis de mettre en évidence des pertes d'efforts évolutives et irréversibles sur les deux haubans les plus longs.

Le phénomène s'est d'abord présenté sur le long hauban côté Maastricht en 2001 (figure 9). Au début, le hauban a fait l'objet de différentes investigations sur site. Lorsque la chute d'effort a atteint 30 %, il a été décidé de remplacer ce hauban. Juste avant ce remplacement, la perte avait évolué jusqu'à environ 50 % de l'effort initial !

Après son remplacement, le hauban a été examiné en détail et l'origine de la dégradation a été identifiée comme étant la combinaison de plusieurs éléments, à savoir :

- infiltration d'eau dans le hauban par de petits événements non rebouchés à la construction,

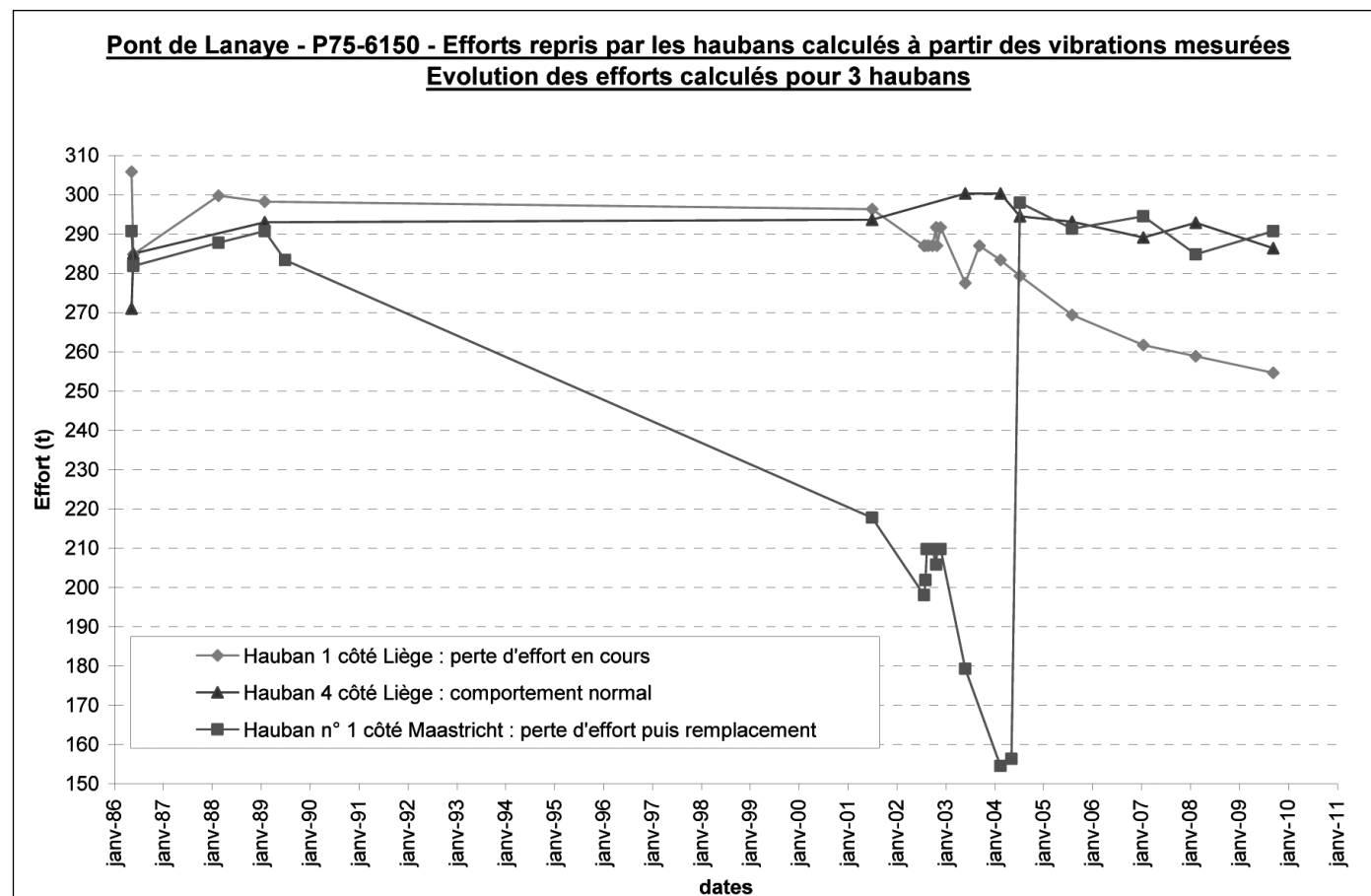


Figure 8 : Courbes d'évolution des efforts pour 3 haubans du pont de Lanaye

- fissuration dans la résine d'injection,
- défaut d'injection d'époxy-brai dans les premiers mètres supérieurs,
- disparition de la galvanisation sur certains fils en partie haute où l'injection est déficiente,
- présence sur de nombreux fils d'une fissure radiale certainement provoquée lors de la fabrication de ceux-ci,
- corrosion fissurante sous tension provoquant la rupture des fils avec perte d'adhérence.

En 2003, l'autre hauban le plus long (côté Liège) a commencé également à présenter une perte d'effort significative. En 2009, le phénomène continue et a même tendance à s'accroître (figure 9). Le remplacement de ce deuxième hauban va donc sans doute devoir être programmé.

Tous les autres haubans présentent des courbes d'évolution des efforts stables, similaires à celle du hauban 4 côté Liège, représenté sur la figure 8.

Le suivi vibratoire a clairement fourni des informations décisives par rapport à la stabilité de l'ouvrage.

Rappelons toutefois, que toutes les ruptures de fils ne provoquent pas nécessairement une chute d'effort dans le hauban. En effet, l'adhérence entre les fils et le matériau de remplissage va permettre de transférer l'effort perdu par la rupture d'un fil vers les autres fils voisins.

Dans le cas présent, les ruptures sont apparues uniquement dans la partie haute du hauban où l'injection faisait défaut. Dès lors les ruptures de fils se sont tout de suite traduites par une perte d'effort dans le hauban.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Depuis 25 ans, la Direction de l'Expertise des Ouvrages du Service Public de Wallonie utilise régulièrement la technique de mesures des vibrations pour déterminer les efforts dans des haubans, suspentes ou câbles de postcontrainte intérieure.

Cette méthode rapide et précise (incertitude relative de 2 à 3 %) permet de traiter des éléments avec ou sans rigidité flexionnelle. Elle garantit une bonne détermination des efforts à différents stades de la construction et de la vie de l'ouvrage.

La gestion d'ouvrages prestigieux, comme le viaduc de Millau, ou de passerelles plus modestes, est nettement facilitée par cet outil facile à mettre en œuvre.

Cette technique de détermination des efforts constitue un type d'interprétation des vibrations d'un ouvrage. Mais celles-ci peuvent également mettre en évidence d'autres caractéristiques. Depuis de nombreuses années, des méthodes d'auscultation se développent pour analyser de manière plus détaillée ces vibrations et en tirer des informations utiles vis-à-vis de la connaissance de l'état fonctionnel des ouvrages.

RÉFÉRENCES

- [1] Demars Ph., Hardy D., Mesures des efforts dans les structures à câbles, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, n°6, 1985, pp 515-531.
- [2] Féodossiev V., *Résistance des matériaux*, Editions MIR, Moscou, 1971, 582 pages.
- [3] Robert J.-L., Bruhat D., Gervais J.-P., Mesure de la tension des câbles par méthode vibratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 173, mai-juin, 1991, pp 109-114.
- [4] Timoshenko S., *Théorie des vibrations*, Librairie Polytechnique Ch. Beranger, Paris, Liège, 1939, 482 pages.
- [5] Méthode d'essai LPC n°35, *Mesure de la tension des câbles par vibration*, Janvier 1993.
- [6] Blevins R. D., *Formulas for natural frequency and mode shape*, Von Nostrand Reinhold Company, 1979, 492 pages.
- [7] Gautier Y., Morette O., Cremona C., *Universal curves for a practical estimation of cable tension by frequency measurements*, EVACES 05 Bordeaux, 26-28 octobre 2005, pp 261-269.
- [8] Cremer J.-M., de Ville de Goyet V., *Pont sur l'Alzette – Etudes Spéciales*, Revue technique luxembourgeoise n°3, juillet-septembre 1993.
- [9] Cremer J.-M., Counasse C., de Ville de Goyet V., Lothaire A., Dumortier A., *The stays, their dynamic behaviour, their equipment – Bridges at Ben Ahin, Wandre and upon Alzette*, Proceeding of International Symposium on Cables Dynamics, Liège (Belgium), 19-21 octobre 1995.
- [10] Cremer J.-M., de Ville de Goyet V., Del Forno J.-Y., *Viaduc de Millau : la mise au point du projet définitif : les études d'ensemble et les études spéciales*, Ponts métalliques, bulletin N°23, OTUA, octobre 2004.



Second Announcement and Call For Papers

International Conference

Numerical Modeling
Strategies for Sustainable
Concrete Structures

Website : www.sscs2012.com

May 29 - June 1, 2012

Aix-en-Provence, France



Chairmen: Pierre Rossi and Jean-Louis Tailhan
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports,
de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR, former LCPC)

Paris, France

Supporting organisations



Organised by



Cement is the more used building material constituent, and will continue to be largely used in the years to come. Its production generates CO₂ emissions.

It is, thus, of primary importance to optimize the use of this cement in the concrete structures, while checking that these structures have lifespan compatible with the stakes of the **sustainable development**. To take up this challenge, it is essential to use **adapted tools of quantification** making it possible to justify, in a rigorous and reliable way, the strategic and technical choices adopted.

The **numerical methods** (finite elements, finite volumes, finite differences ...) constitute a relevant response to this challenge. They potentially allow, due to a best taken into account of the rheological, physico-chemical, and mechanical concrete properties, and of thermo-hydro-mechanics and environmental boundary conditions on the structures, to optimize these structures (optimization with respect to time, money, safety, energy, CO₂ emissions, and, more generally, life cycle), in a way more reliable than the codes and analytical approaches currently used.

The control of the concretes placing in the formworks, their durability, their cracking, their shrinkages, and their creeps, with respect to the sustainable development (evaluation of CO₂ emissions, for example) constitute, therefore, the principal topics of this international conference.

The objective is to join together researchers, engineers, architects, urbanists, industrials and owners, to exchange and reflect on the use of these numerical tools and their contribution with respect to the current stakes of sustainable development.

Conference Topics

I. Theoretical and Numerical Models

- I.1. Flowing and Casting
- I.2. Early age behaviours
- I.3. Drying, Shrinkages and Creeps
- I.4. Cracking behaviours (static, fatigue, dynamic)
- I.5. Chemical aging (chemical reactions and transfers)
- I.6. Coupling Problems

II. Structural applications and Sustainability

- II.1. Bridges
- II.2. Buildings
- II.3. Nuclear structures and storages
- II.4. Tunnels
- II.5. Roads and Railways
- II.6. Others applications



Scientific Committee

Chairman: P. Rossi (IFSTTAR) - FRANCE

Members:

F. Barré, P. Bisch, B. Capra, X. Cespédes, S. Dal Pont, S. Erlicher, J. Mazars, A. Millard, A. Sellier, J.L. Tailhan - FRANCE

M. Di Prisco, M. Fremond, D. Gawin, B. Schrefler - ITALY

I. Carol, J. Planas - SPAIN

R. de Borst, J. Rots, E. Schlangen - THE NETHERLANDS

F.J. Barros - PORTUGAL

J. Ozbolt - GERMANY

H. Stang - DENMARK

J.E. Bolander, V. Saouma, F. Ulm - USA

P. Léger, B. Massicotte, M. Veilleux - CANADA

E. Fairbairn, F. Ribeiro - BRAZIL

K. Maekawa, N. Nakamura - JAPAN

Organising Committee

Chairman: S. Dal Pont - IFSTTAR

Members:

N. Berrahou - AFGC

D. Breyse - AUGC

P. Ducomet - RILEM

P. Guiraud - CIMBETON

J. Jacob - AFGC

M. Moussard - ARCADIS

C. Raulet - DIADES

J. Resplendino - SETEC TPI

N. Richet - ASCO-TP

P. Schumacher - fib

J.L. Tailhan - IFSTTAR

annonces de colloques

SSCS 2012

Numerical Modeling

Strategies for Sustainable Concrete Structures

Presentation of Aix-en-Provence

Historical Capital of Provence, Aix-en-Provence symbolizes the Provençal lifestyle and enjoys an advantageous geographical location in the heart of south-eastern France with easy access by air, rail and highway.

Town of water, town of art... Aix was built and has developed around this dual identity. But the town also knows how to blend different eras and culture.

Open to the world, it is a city of human dimension where the preserved heritage and the city of tomorrow blend perfectly. Here, all is colour and sensation: the light of the sky, the golden stone of the facades, the transparent green of the fountains, the shade of the plane trees at the famous "Cours Mirabeau"... The city of King René has retained a human dimension where everything is within walking distance from downtown.

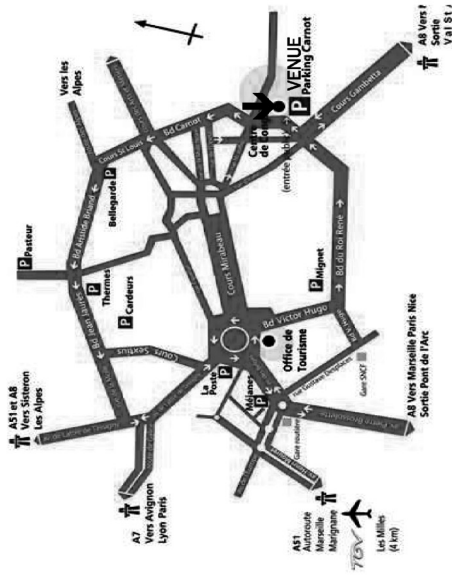
The youth of its student population, its wealth of business and the beauty of its historic pedestrian center, offers a framework and relaxation very appreciated by delegates. The hotels and restaurants in the old Aix are close to the conference center located in the heart of the city.

As it has inspired great artists in the image of Paul Cezanne, Aix-en-Provence will inspire your conference.



Venue

Centre des Congrès / Congress Center
Location: 14 boulevard Carnot
F-13100 AIX-EN-PROVENCE - FRANCE



Access:

By plane:
Marseille-Provence International Airport (25 km)
By TGV:
Aix TGV station: RD9 - Bus link to Aix (15 km)

Scientific Exhibition

A Scientific Exhibition will be held in the Congress Center. This is an opportunity for companies to present their works. Costs of booking are available on the website.

Technical Visit and Banquet

The Technical Visit will take place at the « Baux-de-Provence » on June 1st, 2012 afternoon. A banquet in a famous castle will follow the visit.

Accommodation

A large list of hotels is available on the website of the Tourism Office of Aix on: www.aixenprovencetourism.com

Reservation Center:

Tel. +33(0) 4 42 16 11 84 or 85
mailto:resaix@aixenprovencetourism.com

You must make your own reservation. You can benefit of a special discount if you specify that you attend the conference at the Congress Center.

SSCS 2012

Numerical Modeling

Strategies for Sustainable Concrete Structures

Registration Fees

Conference registration fees include: admission to all scientific programs, proceedings (CD-Rom), opening reception, coffee breaks, lunches, technical visit and conference banquet.

Fees (all taxes included)	Before February, 29 2012*	After February, 29 2012
Registration Fee	600 Euros	700 Euros
AFGC members	550 Euros	650 Euros
Students	400 Euros	450 Euros
Accompanying Persons Program	150 Euros (Reception, Banquet, Technical visit)	

* At least one author of an accepted paper has to be registered before February 29, 2012 to include the paper in the proceedings.

Key Dates and Deadlines

Submission of abstracts (maximum 500 words) via Website : www.sscs2012.com	June 30, 2011
Preliminary acceptance to authors	July 31, 2011
Submission of full-length papers (maximum 10 pages) via Website : www.sscs2012.com	October 15, 2011
Notification of final acceptance	December 15, 2011
Final Announcement	January 15, 2012
Advanced registration	February 29, 2012
Conference at Aix-en-Provence, France	May 29 - June 1, 2012

Conference Secretariat

Mrs Nadjet BERRAHO	Mr Stefano DAL PONT
Tel. + 33 1 44 58 24 29	Tel. + 33 1 40 43 53 00
Fax + 33 1 44 58 24 79	Fax + 33 1 40 43 54 93
aifc@enpc.fr	stefano.dal-pont@ifstar.fr

Website : www.sscs2012.com

Lettre AUGC - Juin 2011

Denys BREYSSE et Fabrice GATUINGT

Chères et chers collègues,

Programmer les 29èmes Rencontres de l'AUGC à Tlemcen, en Algérie n'était pas un pari gagné d'avance. Ce pari est aujourd'hui doublement réussi. D'abord parce qu'avec 300 participants dont 130 ayant traversé la Méditerranée, l'assistance a été à la hauteur de nos espérances. Nous vous remercions pour votre confiance. Ensuite parce que la disponibilité de l'équipe de Tlemcen qui nous accueillait a séduit l'ensemble des congressistes. Un public nombreux était présent dans les salles de conférence et les ateliers, jusqu'à la dernière session. Le vaste hall du bâtiment de congrès était une fourmilière, où chaque question trouvait sa réponse, et où les échanges n'ont cessé pendant deux jours et demi.

Au-delà des aspects scientifiques, chacun a pu apprécier les facettes culturelles (patrimoine architectural, traditions musicales et culinaires) de la région de Tlemcen. Nombreux ont été les adhérents à prolonger leur séjour pour approfondir leur découverte de l'Algérie.

Les prises de contact, en cercle restreint ou dans l'optique de mettre en place des réseaux de collaboration plus structurants, ont été nombreuses. Les thèmes autour desquels ces collaborations pourront se développer sont multiples : sécurité parasismique des bâtiments et des barrages, préservation et gestion du patrimoine, maîtrise des risques ... Cette soif d'échanges et de projets partagés débouchera, nous n'en doutons pas, sur de nombreuses actions concrètes. Au Sud comme au Nord de la Méditerranée, chacun en tirera bénéfice.

Les Rencontres sont aussi l'occasion de procéder au renouvellement des instances de l'association. Au Conseil d'Administration, vous avez renouvelé votre confiance à Ahmed Loukili et Hamid Bouchair, et deux nouveaux nous rejoignent : Emmanuel Ferrier et Laurent Molez. Fabien Delhomme et Yannick Vanhove ont été élus au Conseil Scientifique. Le CA a élu un nouveau bureau : Fabrice Gatuingt en sera le Président (Denys Breyse avait annoncé qu'il souhaitait abandonner cette charge tout en restant au CA), Hamid Bouchair est notre nouveau secrétaire et Christine Delisée demeure trésorière. Enfin, Hélène Carré a accepté de prendre en charge l'organisation du Concours Jeunes Chercheurs.

La finale de l'édition 2011 du Prix René Houpert a permis d'apprécier des présentations de grande qualité sur des thèmes très divers : fracturation hydraulique des roches, attaque sulfatique et fluage des bétons, fatigue des enrobés, conception sismique de rupteurs thermiques et méthodes de surveillance structurale d'ouvrages. Farah Homsy, de l'Université de Bordeaux a été la lauréate, devant Rana El Hachem (Univ. Nantes) et Antoine Clément (Univ. Toulouse). Nous leur souhaitons, ainsi qu'à tous les autres participants une brillante carrière.

Enfin, l'Assemblée Générale a validé la proposition faite par le C.A. pour que les Rencontres 2012 soient organisées par l'Université de Savoie, à Chambéry. Les pistes tracées par Pascal Perrotin lors de sa présentation nous laissent augurer d'une grande réussite.

Merci Tlemcen, à bientôt Chambéry.

recommandations aux auteurs

CONTEXTE GÉNÉRAL

Les Annales du BTP sont avant tout une revue technique francophone s'adressant à un public d'ingénieurs et de décideurs œuvrant dans les multiples secteurs du BTP au sens le plus large du terme, à savoir la construction, le bâtiment, les travaux publics, l'ingénierie, les infrastructures urbaines et territoriales.

Les grands enjeux sous-tendus dans tout article pouvant paraître dans la revue sont à mettre en regard avec les problématiques d'aujourd'hui, progrès et innovation technologiques, développement économique dans le respect de l'environnement, valorisation des produits de la recherche dans le monde professionnel, défense du secteur de la construction dans l'économie mondiale...

Les auteurs sont invités à prendre en considération ces aspects dans toute leur diversité. Beaucoup d'articles en effet ne manqueront pas de se baser sur une présentation de travaux de recherche, qu'elle soit fondamentale ou appliquée. Néanmoins, à la différence d'une revue scientifique, les Annales attendent de ses contributeurs plus une description exhaustive de l'intérêt que leurs travaux pourraient présenter à la communauté professionnelle qu'une description précise de leur cheminement intellectuel.

Quand un article est le prolongement d'un colloque ou d'une rencontre scientifique, l'auteur devra donc veiller dans la réécriture à ne pas trop détailler sa démarche, mais à montrer l'intérêt de sa recherche pour le lectorat de la revue, en montrant en particulier dans l'introduction et la conclusion quels étaient ses grands objectifs. Il ne s'approfondira pas plus que nécessaire sur l'aspect scientifique, sachant que le lecteur ne sera pas forcément un spécialiste de sa discipline. En un mot l'auteur doit chercher à vulgariser son discours.

PRÉSENTATION DU MANUSCRIT

Le texte doit être soumis sous format électronique .doc ou .odt envoyé au rédacteur en chef François BUYLE-BODIN à l'adresse annaesbtp@gmail.com

En cas de refus de transmission pour cause de lourdeur des fichiers, l'auteur pourra envoyer un cd-rom à **M. BUYLE-BODIN, rédacteur en chef de la revue Annales du BTP, Polytech'Lille – Université Lille 1, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex.**

Afin de faciliter la diffusion du savoir, l'éditeur n'exige pas des auteurs une mise en forme particulière de leur article. Aucune contrainte de longueur n'est posée, mais l'idéal est aux alentours de 15 pages en arial 10 inter-ligne simple.

Les unités de mesures et les symboles doivent respecter les règles typographiques internationales.

Il est nécessaire de préciser :

- le titre en français et en anglais ;
- le ou les auteurs : nom, prénom, titres, coordonnées ;
- un résumé de 15 lignes maximum en français et en anglais ;
- les figures et photographies originales peuvent être fournies à part en .eps, .tif ou .jpg. Elles seront publiées en noir et blanc et doivent donc être d'un bon niveau de gris, au moins 400 dpi ;
- une illustration caractéristique de l'article pourra figurer en couleur sur la une de couverture et devra donc être d'une résolution maximale. Ne pas oublier de mentionner les crédits photographiques.

FONCTIONNEMENT DE LA RELECTURE

Le rédacteur en chef accuse réception du manuscrit et lance la phase d'approbation. Il s'appuie pour la relecture et la sélection finale des articles sur un comité comprenant des experts reconnus de la profession, ainsi que des membres des conseils scientifiques des principales associations du BTP partenaires des Annales.

Le rédacteur en chef de la revue fait part à l'auteur de la décision de publier ou non le texte, il précise éventuellement les corrections à apporter.

Le rédacteur en chef se charge de la transmission du manuscrit à l'éditeur.

AGPA Editions, 4, rue Camélinat, 42000 Saint-Etienne.

L'auteur recevra gratuitement 10 exemplaires du numéro de la revue dans lequel est publié son article.