

# ANNALES

# DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

AOÛT 2009 – N° 4

PRIX : 27,44 €

JOURNÉES TECHNIQUES ORGANISÉES  
PAR L'ASSOCIATION FRANÇAISE  
DE GÉNIE CIVIL AFGC



**GC'2009**

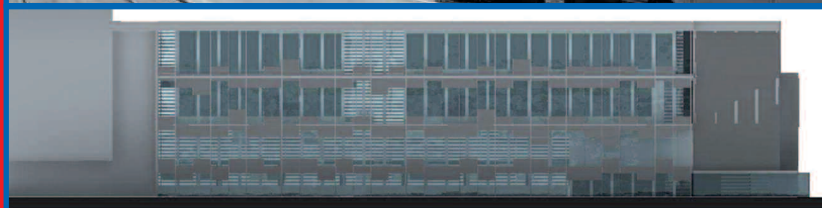
**CYCLE DE VIE DES OUVRAGES : UNE APPROCHE GLOBALE**

SESSION 1 : NOUVELLE FORME DE GOUVERNANCE

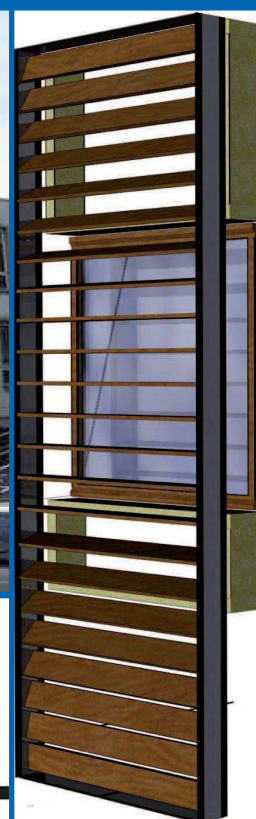
SESSION 2 : PERFORMANCE TECHNIQUE, ENVIRONNEMENTALE ET ÉCONOMIQUE

SESSION 3 : SURVEILLANCE, MAINTENANCE ET FIN DE VIE

ISA Strasbourg



Façade Nord



ISSN : 1270-9840  
CPPAP : 1002T77866

ISBN : 978-2-7472-1620-3



9 782747 216203

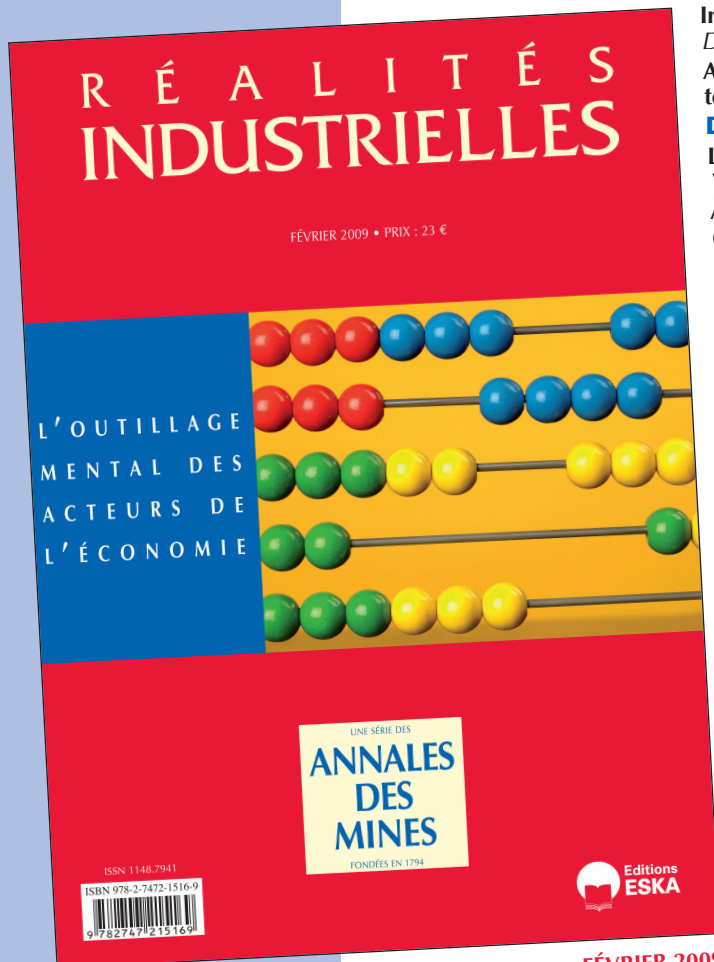
**RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR UN BÉTON ÂGÉ DE 30 ANS  
CONTENANT UN CIMENT RICHE EN LAITIER**

Editions  
**ESKA**

# R É A L I T É S INDUSTRIELLES

une série des Annales des Mines

## L'OUTILLAGE MENTAL DES ACTEURS DE L'ÉCONOMIE



Éditorial – *Pierre Couveinhes*

Introduction – *Jean-Claude Daumas, Gérard Gayot, Philippe Minard et Didier Terrier*

Avant-propos : Pour un rapprochement entre chercheurs en gestion et historiens de l'économie – *Claude Riveline*

### Des catégories aux pratiques

L'outillage mental des changeurs, en France, à la fin du Moyen Age – *Yves Coativy*

À chacun, sa vision des affaires. Marchands de la mer et de l'intérieur (Bretagne-Castille-Andalousie, XVI<sup>e</sup> siècle) – *Jean-Philippe Priotti*

L'orfèvrerie-joaillerie et l'estimation de la valeur des bijoux dans le Saint-Empire romain germanique du début du XVII<sup>e</sup> siècle : l'affirmation et l'organisation d'une spécialisation marchande – *Vincent Demont*

### Les représentations de l'ordre économique

*Nahrung*, corporations et marché en Allemagne aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles : débats et renouvellements historiographiques – *Guillaume Garner*

Commerce réel et commerce pensé en Bretagne, à la fin du XVIII<sup>e</sup> et au début du XIX<sup>e</sup> siècle : contribution à l'histoire des mentalités négociantes (Nantes, Lorient, Brest, Morlaix et Saint-Malo, 1789-1817) – *Karine Audran*

Dire le refus des machines : pétitions ouvrières et représentations de l'ordre économique en France, en 1848 – *François Jarrige*

Métayer à la Casa Spalletti (de 1821 à 1922) : un parfait associé en affaires ? – *Marie-Lucie Rossi*

### L'horizon intellectuel des patrons

La pensée économique d'Eugène Schneider (1846-1851) – *Agnès D'Angio-Barros*

« Mais ce que je vois avec un véritable effroi... » : Confessions d'Henri Sieber (1804-1882), négociant parisien au royaume duquel les grands industriels sont rois – *Sylvie Vaillant-Gabet*

Le banquier Armand Gommès : de la « myopie au désastre » à l'aveulement intellectuel – *Christophe Lastécouères*

Les mots pour le dire : les autobiographies des (très grands) hommes d'affaires contemporains – *Catherine Vuillermot*

### Quand l'État pense l'économie

L'enquête statistique de l'archiduc d'Autriche Joseph Rainer en Bohême (1806) – *Fanny Billod*

La productivité, nouvel indicateur d'une économie en expansion (France, années 1950) – *Régis Boulat*

L'outillage mental des rapporteurs de la Commission de vérification des comptes des entreprises publiques (1948-1976) – *Daniel Berthereau*

*Le dossier a été coordonné par Jean-Claude Daumas*

## BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35 - <http://www.eska.fr>

☐ Je désire recevoir ..... exemplaire(s) du numéro de **Réalités Industrielles février 2009 « L'outillage mental des acteurs de l'économie » (ISBN 978-2-7472-1516-9)** au prix unitaire de 23 € TTC.

Je joins ☐ un chèque bancaire à l'ordre des Éditions ESKA

☐ un virement postal aux Éditions ESKA CCP PARIS 1667-494-Z

Nom ..... Prénom .....

Adresse .....

Code postal ..... Ville .....



**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

Anne PANTET (université de Poitiers),  
membre du CA, chargée des publications

des rencontres de Saint-Malo

Olivier PLÉ (université de Grenoble),  
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

## ABONNEMENT :

Editions ESKA <http://www.eska.fr>

12, rue du Quatre-Septembre - 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 73 - 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@yahoo.com

## PUBLICITÉ - À la rédaction

## IMPRESSION

# sommaire

**Journées techniques organisées  
par l'Association Française de Génie Civil AFGC  
GC'2009**

## Cycle de vie des ouvrages : une approche globale

### Session 1 : nouvelle forme de gouvernance

<i>La prise en compte du coût global en construction dans les politiques publiques - aspects méthodologiques – B. LEBoulLENGER.....</i>	7
<i>Rénovation et développement durable, cas de l'INSA de Strasbourg – C. GRESS, K. DUPRÉ, B. FLAMENT.....</i>	16
<i>Exploitation d'une concession autoroutière à fortes exigences de performance : maîtrise des coûts du risque associé – L. AUGÉ, I. CORNISH-BOWDEN, B. GÉRARD, R. FRENETTE.....</i>	24

### Session 2 : performance technique, environnementale et économique

<i>Étude comparative sommaire des ponts en béton et des ponts mixtes en termes d'énergie consommée et d'émission de gaz à effet de serre – S. MONTENS.....</i>	31
--	----

### Session 3 : surveillance, maintenance et fin de vie

<i>Déconstruction et régénération des grands ouvrages métalliques du patrimoine ferroviaire – P. SCHMITT, M. TRIQUET.....</i>	37
<i>Traitements électrochimiques de réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion – V. BOUTEILLER.....</i>	45

## matériaux

<i>Retour d'expérience sur un béton âgé de 30 ans contenant un ciment riche en laitier – C. CHARRON, M. LION, A. JEANPIERRE, A. AMMOUCHE.....</i>	52
---	----

<b>résumés — abstracts.....</b>	4
<b>annonces de colloques .....</b>	61
<b>recommandations aux auteurs .....</b>	68
<b>bulletin d'abonnement .....</b>	2



## BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS  
Tél. 01 42 86 55 73 – Fax 01 42 60 45 35

Nom .....

Raison sociale.....

Adresse .....

Code postal ..... Ville ..... Pays .....

Je m'abonne pour l'année 2009 (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : <b>216 €</b>  | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : <b>261 €</b>  |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : <b>271 €</b> | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : <b>312 €</b> |

### À partir du 2<sup>e</sup> abonnement :

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : <b>174 €</b>  | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : <b>209 €</b>  |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : <b>217 €</b> | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : <b>250 €</b> |

*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

\* 4/2009

## LISTE DES ANNONCEURS

ÉDITIONS ESKA – 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> de couv

Chères lectrices, chers lecteurs,

Ces dernières années, le développement durable est devenu une préoccupation majeure, autant sur le plan politique qu'économique, avec cependant un impact encore difficile à apprécier. Construire pour un développement durable signifie que les acteurs de la construction doivent satisfaire les demandes des maîtres d'ouvrage, les souhaits des usagers et plus largement les besoins de la Société. Une approche globale s'avère de plus en plus nécessaire afin d'intégrer les attentes techniques, économiques, environnementales et sociétales. De nouvelles formes de gouvernance sont à inventer pour concevoir des ouvrages en considérant l'ensemble de leur cycle de vie et en intégrant les préoccupations du Grenelle de l'Environnement. La prise en compte du développement durable intègre donc les diverses étapes du cycle de vie des ouvrages que sont la conception, la construction, l'exploitation, la gestion, l'adaptation, la déconstruction et le recyclage.

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) entend explorer, dans le domaine qui est le sien, les éléments qui contribuent à cette stratégie du développement durable. C'est pourquoi, après les journées **GC'2007** ciblées sur « *Le développement durable, une exigence d'innovation pour le génie civil* », l'AFGC a souhaité organiser ses journées **GC'2009** sur le thème du « *Cycle de vie des ouvrages, une approche globale* », journées qui se sont tenues les 18 et 19 mars 2009 dans les locaux de l'ESTP à Cachan.

Les conférences proposées par les nombreux auteurs qui ont répondu à l'appel de l'AFGC ont été réparties en trois sessions qui ont traité respectivement de la nouvelle forme de gouvernance, de la performance technique, environnementale et économique, et enfin de la surveillance, de la maintenance et de la fin de vie.

La première session a permis d'aborder la prise en compte du coût global dans la commande publique ainsi que la prise en compte du développement durable dans les divers projets de conception et de gestion intégrée des ouvrages. Il est également apparu que l'optimisation de la durée de vie de service ainsi que l'évaluation des risques et la rationalisation de la maintenance étaient des éléments importants de la nouvelle gouvernance.

La seconde session a mis en évidence que les réflexions conduites sur le cycle de vie des matériaux permettaient d'aborder des comparaisons entre ceux-ci, et pouvaient ainsi apporter des critères de choix supplémentaires pour les concepteurs d'ouvrages. L'approche performantielle de la durabilité des matériaux et l'évaluation permanente de leurs performances ont également été des points forts de cette session.

La troisième session a montré que la maintenance se déplace progressivement du curatif vers le préventif, et que l'instrumentation et les méthodes de contrôle non destructifs permettent un suivi en continu des ouvrages et peuvent favoriser une optimisation de la maintenance. La déconstruction et la requalification des ouvrages y ont également été abordées.

Les communications ont montré qu'en quelques années, nous sommes passés des « vœux pieux » ou des idées générales aux explorations scientifiques et techniques. C'est en amont de l'ensemble de ces techniques que des progrès significatifs me semblent encore devoir être faits. En effet, si une partie de la prise en compte environnementale est maintenant balisée, à titre d'exemple, par la loi sur l'eau et par les règles de gestion des déchets, et si la protection des sites est également prise en considération, il nous manque encore une doctrine technique qui permette la rédaction, par les maîtres d'ouvrages, de cahiers des charges aux critères clairs qui permettent de prendre en compte les spécifications relatives aux aspects économiques, environnementaux et sociétaux du développement durable..

L'AFGC a donc souhaité faire partager aux lecteurs des Annales du BTP une sélection de communications des journées GC'2009 choisies pour leur intérêt général, et ceci d'un commun accord avec la rédaction de la revue. Pour les lecteurs qui souhaiteraient découvrir l'ensemble des textes des communications orales et des posters, nous les invitons à se procurer le CD des Actes des journées qui est disponible auprès du secrétariat de l'AFGC.

Bruno GODART

*Président des comités scientifique et d'organisation de GC'2009*

*Président du Comité des Affaires Générales de l'AFGC*



## LA PRISE EN COMPTE DU COÛT GLOBAL EN CONSTRUCTION DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES - ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

B. LEBoulLENGER

Le coût global est une notion familière dans l'industrie. Il l'est moins sur dans le BTP même si les bailleurs institutionnels ou sociaux ou les concessionnaires de travaux ou de service, tenus de maîtriser une rentabilité sur le long terme, savent la traduire par un loyer représentatif de l'ensemble des coûts. Le développement durable remet le coût global au centre des débats et le secteur de la construction doit combler son retard en la matière.

Il faut d'abord s'entendre sur un périmètre adéquat : le coût global cumule les coûts directs et indirects, immédiats et différés ainsi que les externalités monétisables en l'état des connaissances communes. Il faut ensuite s'entendre sur une méthode de calcul : c'est le rôle de la normalisation, qui propose une norme dédiée au coût global dans le bâtiment, l'ISO DIS 156/686. Il faut encore proposer un taux d'actualisation commun à la fois réaliste et incitatif (qui valorise les coûts futurs, en particulier celui des ressources épuisables comme le suggère le rapport STERN). Le MEEDM propose un taux unique de 4% avec une variante à 0% des énergies fossiles, ce qui revient à parier sur une hausse tendancielle de ces dernières à 5% par an au dessus de l'inflation.

Il faut enfin familiariser les décideurs, et notamment publics, avec ce mode de calcul, afin de les inciter à insérer dans les marchés publics de construction un critère d'attribution en coût global et non en coût brut. C'est l'objet du taux unique d'actualisation, qui les sécurise juridiquement. C'est aussi le but d'un guide explicatif et d'un logiciel gratuit de simulation et de calcul mis au point par le MEEDM et publié sur son site internet.

## LIFE CYCLE COST ANALYSIS IN PUBLIC CONSTRUCTION SECTOR – METHODOLOGICAL ASPECTS

*Industry is used to with life cycle cost methodology. Construction sector is not as well, excepted social housing, facility managers or utilities companies, which are ought to take into account, , in long term run, financial ratios like return on investment and have to evaluate the adequate current loan representative of all costs. Sustainable development brightens the concept to a great issue and construction sector has to make up for lost time.*

*The first step to manage is to find a common agreement on the topic. Life cycle cost involves: direct and transitive costs, current and delayed costs, and at last externalities, but only those that can be evaluated into money as far as current knowledge can do. The second step is to set formula. Normalization can help, and a new ISO DIS 156/686, devoted to life cycle cost in the building sector, emerges as a common tool to share vocabulary and formula. The third step is to focus on the actualisation rate. French ministry of sustainable development suggests 4% as common rate, and 0% for fossil energy resources. It means that these are to increase by an average of 5% a year above inflation rate.*

*At last, purchasers and especially public sector (contracting authorities) need help in using concept, formula and criteria. Guidelines and tools have to be set on public, free access web site secure purchasers when they have to choose between 2 bidders, the best value for money in life cycle cost and not the lowest cost bidder.*

## RÉNOVATION ET DÉVELOPPEMENT DURABLE, CAS DE L'INSA DE STRASBOURG

C. GRESS, K. DUPRÉ, B. FLAMENT

Les nouvelles exigences formulées en termes de développement durable (Agenda 21, cibles HQE en France, etc.), ont pour conséquences la mise en place de nouveaux modes opératoires, des effets directs sur les produits et sur l'organisation des compétences. À l'heure actuelle, ces exigences sont de plus en plus satisfaites pour les constructions neuves, mais encore peu d'opérations exemplaires font cas du parc ancien qui représente plus de 60 % du parc immobilier en France. On comprend donc l'enjeu qu'il y aurait à s'intéresser de plus près à ce parc ancien.

C'est donc fort de ce constat qu'il nous a semblé logique de vouloir mener un projet de recherche sur ce thème étant donné l'actualité de notre école. En effet, le bâtiment original de l'Insa de 1955 va faire prochainement l'objet d'une rénovation pour abaisser les coûts énergétiques mais aussi pour revaloriser l'image de l'institution. Il s'agit essentiellement d'un travail concernant l'enveloppe du bâtiment (façades et toitures).

À partir d'un exemple concret de rénovation d'un bâtiment à usage d'enseignement présentant une occupation diurne importante et variable, il s'agit de mettre au point une méthodologie préalable à la maîtrise d'œuvre en vue d'une transposition possible sur d'autres parcs immobiliers existants. Il s'agit aussi de prouver comment une réflexion énergétique qui, *a priori*, ne se concentrerait que sur l'enveloppe du bâtiment implique obligatoirement une réflexion multicritériale et plus globale.

## RENOVATION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, CASE OF THE INSA OF STRASBOURG

*The new requirements formulated in terms of sustainable development (Agenda 21, targets HQE in France, etc.) have for consequences the implementation of new operating modes, direct effects on products and on organization of the skills. At the moment, these requirements are more and more satisfied for the new constructions, but less exemplary operations make case of the ancient park which represents more than 60% of the real estate park in France. We thus understand the stake that it would be interested in it closer in this ancient park.*

*It is thus strong of this report that it seemed to us logical to want to lead a research project on this subject given the current events of our school. Indeed, the original building of Insa dated from 1955 is soon going to be the object of a renovation to lower the energy costs but also to revalue the image of the institution. This work will essentially concern the envelope of the building (facades and roofs).*

*From a concrete example of renovation of an education building presenting an important and variable diurnal activity, it is a question of working out a preliminary methodology in the project management with the aim of a possible transposition on the other existing real estate parks. It is also a question of proving how an energy reflection which, in priori, would concentrate only on the envelope of the building involves necessarily a multicriterial and more global reflection.*

## **EXPLOITATION D'UNE CONCESSION AUTOROUTIÈRE À FORTES EXIGENCES DE PERFORMANCE : MAÎTRISE DES COÛTS DU RISQUE ASSOCIÉ**

L. AUGÉ, I. CORNISH-BOWDEN, B. GÉRARD,  
R. FRENETTE

Le développement actuel des projets intégrés de conception, construction, financement et exploitation d'infrastructures de transports (réseaux autoroutiers, ouvrages d'arts, tunnels...) nécessite de plus en plus une approche globale de la gestion du cycle de vie des infrastructures.

Le cas étudié concerne la concession d'un réseau autoroutier européen (Pays-Bas), comprenant de nombreuses sections en tunnels, pour lequel le contractant devra assurer la conception, la construction, le financement, l'exploitation et la maintenance sur les 30 prochaines années. De plus, un système de pénalités a été mis en place par l'autorité afin de minimiser les indisponibilités du réseau. Ainsi, tout dépassement de critères de disponibilité par le contractant oblige celui-ci au paiement de fortes amendes.

OXAND, expert en vieillissement des ouvrages de génie civil et consultant en gestion des risques, a été mandaté par ce contractant pour l'appuyer dans l'évaluation du coût du risque associé à ces indisponibilités et lui permettre de provisionner les budgets nécessaires dans sa proposition technique et financière. Plus généralement, le travail décrit peut aussi servir à définir le rapport performance / coût des choix de conception initiaux et des niveaux de maintenance à mettre en œuvre tout au long de la durée d'exploitation, afin de minimiser les coûts rapportés à l'ensemble du cycle de vie des infrastructures.

Les conclusions ont fait ressortir le coût total du risque associé aux indisponibilités du réseau autoroutier, ainsi que sa répartition sur les trente années d'exploitation. Le contractant a ainsi pu provisionner les budgets nécessaires et communiquer de manière transparente auprès de son client pour les justifier.

## **OPERATION OF A HIGHWAY CONCESSION WITH HIGH PERFORMANCE REQUIREMENTS: CONTROL OF ASSOCIATED RISK COST**

*The current development of integrated DBFM projects (Design, Build, Finance, Maintain) for transportation infrastructure increasingly requires a global approach of infrastructure lifecycle management.*

*The study is about the concession of a european highway network (in the Netherlands), composed of numerous tunnel sections, for which the contractor will have to assure design, building, financing, operation and maintenance for the next 30 years. Moreover, a penalty system was set up by the authority in order to minimize network's unavailabilities. Consequently, the contractor will have to pay high penalties as soon as availability criteria are overpassed.*

*OXAND, expert in ageing of civil engineering structures and consultant in risk management, was mandated by this contractor to support him in the assessment of risk cost associated to these unavailabilities and to enable him to provision necessary budgets in his technical and financial proposal. More generally, described work can also be used to define the performance / cost ratio of initial design choices and of maintenance levels to be implemented throughout the lifetime, in order to minimize total costs on the whole infrastructure lifecycle.*

*Conclusions underline total risk cost associated to unavailabilities of highway network, as well as its repartition over the next 30 years of operation. Thus, the contractor was able to provision the required budgets and to communicate in a transparent manner towards its client to justify them.*

## **ÉTUDE COMPARATIVE SOMMAIRE DES PONTS EN BÉTON ET DES PONTS MIXTES EN TERMES D'ÉNERGIE CONSOMMÉE ET D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE**

S. MONTENS

Le domaine de la construction représente une part importante des activités humaines en termes d'énergie consommée et d'émission de gaz à effet de serre (GES).

Comment prendre en compte le concept de développement durable pour un ingénieur de structures de génie civil ? Le programme de l'opération d'infrastructure étant fixé par le maître d'ouvrage, le bureau d'études ne peut prendre en compte ce concept qu'au travers de la conception de la structure. Le choix des matériaux de construction fait partie de cette liberté qui reste à l'ingénieur de structures.

Nous nous intéresserons à deux indicateurs environnementaux : la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. Ces dernières contribuent au réchauffement climatique.

La présente étude ne prétend pas établir des conclusions définitives dans ce domaine en plein défrichage. Elle représente plutôt une première approche, destinée à sensibiliser l'ingénieur de structures :

- aux ordres de grandeur qui sont en jeu,
- aux sources d'informations disponibles,
- et aux méthodes d'évaluation envisageables.

## **BRIDGES IN TERMS OF ENERGY CONSUMPTION AND EMISSION OF GREENHOUSE GAS**

*In the "environmental" component of sustainable development, energy consumption and emission of greenhouse gas are among the most important aspects for civil engineering works.*

*We first situate the importance of these concepts using a few values. Then we will analyze the documentary sources available to quantify these environmental effects. The principal consists in the environmental and health declaration forms for construction products, established by the suppliers of materials and freely available for consultation.*

*A comparative study will be made between prestressed concrete bridges and composite steel-concrete bridges of short to medium span. For each type of structure we will determine the average quantities of materials consumed. The ratios of energy consumption and emission of greenhouse gas will be applied to these quantities, and we will deduce the overall values the two types of bridges.*

*The limitations of this analysis will be clarified, and some proposals will be made for a better comprehension of these problems.*

## **DÉCONSTRUCTION ET RÉGÉNÉRATION DES GRANDS OUVRAGES MÉTALLIQUES DU PATRIMOINE FERROVIAIRE**

P. SCHMITT, M. TRIQUET

Le patrimoine ferroviaire français contient un certain nombre de grands ouvrages d'art métalliques dont les âges atteignent couramment 100 à 150 ans. Ils sont constitués de matériaux métalliques très différents des aciers actuels (fonte, fer puddlé, premiers aciers...), aux propriétés particulières et ont généralement vécu une existence mouvementée : agrandissement, élargissement, bombardement, relèvement, modification d'appui, renforcement, etc.

Ils constituent aujourd'hui des maillons stratégiques de l'infrastructure ferroviaire, car amenés à supporter des trafics toujours plus lourds, ils sont souvent le siège de phénomènes de fatigue généralisée.

Les opérations de remplacement de ces ouvrages anciens, dont certains occupent une place de choix dans le patrimoine

industriel national, sont aujourd'hui conçues dans une approche globale d'opération, avec comme objectif principal la nécessité d'assurer la continuité de service de l'infrastructure et la moindre perturbation des circulations. Elles s'inscrivent dans un cycle de vie et de mort des ouvrages pris individuellement au sein d'un réseau global qui doit rester immuablement opérationnel.

Cet article aborde les techniques imaginées et mises en œuvre aujourd'hui par le Département des Ouvrages d'Art de la SNCF pour régénérer ces grands ouvrages en garantissant la continuité de service.

Il traite aussi bien des précautions particulières prises pour la déconstruction des structures métalliques anciennes compte tenu de leur historique que des sujétions importantes qui gouvernent la construction des structures les remplaçant dans un environnement très contraint et des risques qui y sont liés.

Il s'appuie sur quelques exemples récents d'opérations de régénération d'envergure telles que le pont sur le Rhône à Culoz, le pont franchissant la Seine à Oissel, le franchissement de la Durance à Orgon ou encore la « passerelle » sur la Garonne qui dessert Bordeaux.

### **DEMOLITION AND REFURBISHMENT OF OLD IMPORTANT STEEL RAILWAY BRIDGES**

*The French railway network contains many old important steel bridges, which are currently 100 or 150 years old. They are made of several types of materials, quite different from modern steel (cast iron, iron, early steel, ...) with particular behaviour properties. These bridges have usually experienced many happenings: enlargement, widening, bombardment, re-erection, modification of bearings, strengthening, etc.*

*They are now of strategic importance in the railway network, as they support always higher loading, and are therefore submitted to generalized fatigue damages.*

*The replacement of these bridges, among which some belong to the national industrial patrimony, are now designed in a global approach, in the aim of reducing as much as possible disturbances caused to the railway traffic.*

*This article deals with the techniques that have been invented by the bridge Department of the SNCF to replace this bridges without the least interruption of the service.*

*It deals first with the care that has to be taken to demolish old metallic structures regarding to their history. It deals also with the constraints who govern the construction of the replacing structures and the related risks.*

*The article presents a few recent examples of reconstruction such as the bridges over the Rhône in Culoz, the viaduct crossing the Seine in Oissel, the crossing of the Durance River in Orgon, or the "passerelle" over the Garonne in Bordeaux.*

### **TRAITEMENTS ÉLECTROCHIMIQUES DE RÉHABILITATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION**

V. BOUTEILLER

La corrosion des armatures est la cause principale de dégradation des structures en béton armés. Elle peut survenir suite à la carbonatation du béton ou bien à la présence d'ions chlorure. Un diagnostic est nécessaire pour permettre, d'une part, d'identifier la cause de la dégradation et, d'autre part, de

proposer des solutions de réparations adéquates. En plus de la réparation traditionnelle largement utilisée, des méthodes électrochimiques telles que la protection cathodique, la réalcalinisation et la déchloruration sont également disponibles. Les principes théoriques, les applications pratiques, les contrôles à effectuer pour chacune de ces techniques sont présentés dans ce document. Certains aspects des traitements électrochimiques (courant imposé, anode sacrificielle, durée du traitement, efficacité, durabilité, limites ...) font l'objet d'une discussion. Enfin un certain nombre de références bibliographiques sont fournies.

### **ELECTROCHEMICAL REPAIR TECHNIQUES FOR CORRODING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

*Steel corrosion is the main cause of degradation in reinforced concrete structures. It can either be due to carbonation or chloride attack. Assessment of the structure requires an investigation to determine the cause of the damage which in turn will provide suitable repair solutions. Patch repair has been widely used, but today electrochemical techniques such as cathodic protection, realkalization and chloride extraction are also available. For each technique, basic principles, processes, monitoring, controls, are presented in this document. Moreover, certain issues (impressed current, sacrificial anodes, time treatment, efficiency, durability, limits,...) are discussed. Finally, some references are given.*

### **RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR UN BÉTON ÂGÉ DE 30 ANS CONTENANT UN CIMENT RICHE EN LAITIER**

C. CHARRON, M. LION, A. JEANPIERRE, A. AMMOUCHE

Il est réalisé dans cette étude le diagnostic d'un béton à base de ciment au laitier utilisé dans les années soixante-dix pour la construction de voiles en béton armé d'un ouvrage situé en bordure de mer. Les résultats de cette étude permettent de montrer que le béton ne présente pas de pathologie ou de signe de dégradation marquée en lien avec son environnement. Après 30 ans d'exposition, les fronts de carbonatation et des chlorures n'ont toujours pas atteint la première nappe d'armatures. L'étude présentée détaille les résultats des nombreux essais réalisés : mesures de coefficient de diffusion des chlorures, mesures de profondeur de carbonatation, détermination des profils de chlorures et de sulfates, analyses par DRX ainsi que l'examen au MEB.

### **FEEDBACK EXPERIENCE FROM A 30 YEARS OLD CONCRETE USING CEMENT WITH A HIGH CONTENT OF BLAST FURNACE SLAG**

*In this study, we analyze the aspect of a slag cement concrete used in the seventies for the construction of the walls of a structure located close to the channel sea. From different characterization tests (chemical, physical, and micro structural), it can be conclude that the concrete is not showing any pathology and any important attack, due to the marine environment. After being exposed during 30 years, the chlorides ions have not reach the steel metal bar reinforcement and the carbonation depth is still low. This study details the results of chloride diffusion coefficient and carbonation depth measurements, sulfates and chloride quantification, XRD analysis, and SEM examination.*



# LA PRISE EN COMPTE DU COÛT GLOBAL EN CONSTRUCTION DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES – ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

**Bruno LEBoulLENGER**

MEEDDAT / Commissariat général au développement durable

## 1. INTRODUCTION

**L**e gouvernement a inscrit, dans la Stratégie nationale de développement durable<sup>1</sup> adoptée le 3 juin 2003, l'objectif d'une politique d'achats publics intégrant les exigences du développement durable, qui s'est traduit par l'insertion de clauses sociales et environnementales dans le code des marchés publics de 2006 (articles 14, 15 et 53).

L'article 5 sur le patrimoine immobilier et l'article 42 sur l'État Exemplaire de la loi « Grenelle 1 » comportent des engagements fermes de performance globale énergétique et sociétale. La concrétisation de cette exigence suppose, dans le cadre du droit européen de la commande publique (directives 2004-17 et 2004-18 du 31 mars 2004), que les acheteurs publics soient en mesure de définir leurs besoins puis de départager les offres sur la base d'un raisonnement intégrant l'ensemble des facteurs de coût et de bénéfice de chaque option, au regard du développement durable. Ce mode de calcul est dit « raisonnement en coût global ».

En matière immobilières, les coûts de fonctionnement, même actualisés, représentent entre trois et quatre fois le coût des

travaux<sup>2</sup>. Ainsi, un impératif de régulation budgétaire à court terme aboutissant à imposer aveuglément une économie sur l'investissement d'un bâtiment se traduira souvent par une augmentation des coûts de fonctionnement (une isolation de moindre qualité augmente les coûts de chauffage). Il vaudrait souvent mieux emprunter, y compris en incluant les intérêts d'emprunt, pour maintenir le niveau de qualité optimal.

Les acheteurs publics intègrent rarement ce risque dans leur pratique compte tenu des contraintes qui leur sont imposées en matière de financement (enveloppe prédéterminée) et du cloisonnement très fréquent entre investissement et fonctionnement du fait :

- des procédures (l'investissement relève des marchés publics alors que le fonctionnement est en régie) ;
- des modes de financement (le maître d'ouvrage n'assure pas le financement des coûts de fonctionnement) ;
- de la répartition des responsabilités (le responsable de l'investissement ne se sent pas responsable, ou n'est pas investi, de la qualité du service en fonctionnement).

Pour les mêmes raisons, le même acheteur ne sait pas sur quel poste il pourrait faire une économie sans perdre en qualité ou, s'il dispose de marges financières, accepte pour

1. Document téléchargeable à : [http://www.ecologie.gouv.fr/article.php3?id\\_article=1198](http://www.ecologie.gouv.fr/article.php3?id_article=1198).

2. Hors foncier, (Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques : « *Ouvrages publics & coût global* », 01/2006.

des raisons immédiates des surcoûts en investissement dont la rentabilité future est faible ou nulle, faute de maîtriser la mécanique de l'actualisation.

Inversement, la démarche «HQE» souffre de critiques portant sur son insuffisante rigueur économique, les réalisations actuelles relevant parfois de démarches d'image plus que de choix rationnels. C'est la limite d'une normalisation fondée uniquement sur des cibles et un processus.

C'est dans ce contexte que s'est constitué, au sein de l'observatoire économique de l'achat public, une réflexion destinée à enrichir la notion de «prix» directement acquitté par l'acheteur public par la prise en compte des coûts différés et diffus (dits aussi «externalités»), en toute sécurité juridique. Cet atelier « coût global » s'est fixé pour objectif de déterminer une méthode simple de calcul de coût complet sur la durée de vie du bien, voire de coût complet étendu aux effets «externalisés», c'est-à-dire diffus au-delà de la sphère de responsabilité de l'acheteur. L'atelier a également identifié le besoin d'un taux d'actualisation de référence sur la durée de vie du bien, ainsi que de progrès sur l'estimation des coûts d'élimination.

## **2. ENJEUX ET CHAMP DU COÛT GLOBAL DANS LES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES**

### **2.1. Les enjeux de la construction pour le développement durable**

Les travaux du Grenelle ont mis en évidence l'importance primordiale des enjeux portés par le secteur de la construction (bâtiment et génie civil), en raison de son poids dans la consommation nationale d'énergie finale (40 %) et des émissions de gaz à effet de serre (24 % du total). Les bâtiments tertiaires publics, qui totalisent environ 250 millions de m<sup>2</sup>, représentent 8 % de la surface totale construite en France, soit peu ou prou 8 % des consommations énergétiques et 4 des émissions de CO<sub>2</sub>.

Ce stock se renouvelle lentement, à raison d'environ 1 % par an. Néanmoins, les acheteurs publics ne sont pas sans moyen d'agir : La somme des crédits immobiliers de l'État dépasse 3 milliards d'euros par an, tandis que le recensement statistique de l'OEAP comptabilise pour 5MD€ le total annuel des marchés de travaux de l'État et des collectivités locales qui lui sont déclarés.

### **2.2. Les objectifs du Grenelle de l'environnement pour les bâtiments publics**

Deux comités opérationnels issus du Grenelle de l'environnement sont consacrés respectivement aux objectifs de l'État et des collectivités locales pour assurer la rénovation de leur patrimoine et l'adaptation de leur politique d'achat. En particulier, le COMOP 4 « État exemplaire » a fixé un objectif de réduction de moitié des émissions de CO<sub>2</sub> et de 40 % des consommations d'énergie du patrimoine immobi-

lier de l'État, des hôpitaux et des universités à l'horizon 2020. C'est l'objet de l'article 5 de la loi Grenelle « 1 » qui reprend ces objectifs à son compte pour l'État et incite les Collectivités locales à les adopter.

Les objectifs du Grenelle appliqués aux constructions neuves concernent le neuf comme la rénovation, cette dernière devant constituer à tous égards le poste principal pour la période 2009-2020.

### **2.3. Un champ non limité au code des marchés publics**

L'OEAP ne traite que du droit commun de la commande publique, à savoir le code des marchés publics ou l'ordonnance du 6 juin 2005 relative aux personnes non soumises au code et son décret d'application. Mais les outils sont évidemment transverses.

C'est le cas des contrats de partenariat issus de l'ordonnance du 17 juin 2004 et des contrats assimilés (baux emphytéotiques administratifs et locations longue durée – BEA, BEH, AOT-LOA – issus de textes sectoriels ou du nouveau code des propriétés publiques). Ces contrats globaux souvent assortis de clauses de performance prévoient, par nature et dans le texte même pour les CP, une analyse en coût global. Le coût global est même devenu le troisième critère de référence pour autoriser la passation d'un PPP (critère dit d'efficience).

## **3. LES CONDITIONS DU RAISONNEMENT EN COÛT GLOBAL**

### **3.1. L'expression des besoins en coût global**

Un principe constant du droit européen de la commande publique est qu'il faut un lien entre les clauses des marchés et leur objet, c'est-à-dire avec les besoins réels de la personne publique.

L'article 5 du code des marchés publics invite implicitement à évaluer les besoins dans une logique de coût global. C'est en fait la traduction à minima de l'obligation de « tenir compte des objectifs de développement durable » dans les achats publics. Il est conseillé, au regard du II de l'article 5, de déterminer les besoins à l'échelle du pouvoir adjudicateur, ou au moins d'une unité fonctionnelle ayant la responsabilité complète vis-à-vis de l'ouvrage à construire ou rénover. Un projet de construction en BTP relèvera toujours de l'unité fonctionnelle. Un projet = un montant. Il est donc possible, si l'acheteur n'en a pas fait mention pour lui-même, de le faire pour l'opération.

Toutefois, la possibilité d'intégrer des indicateurs de coût ou bénéfice différé ou diffus au moment de la passation des marchés dépendra des responsabilités réelles de l'acheteur. Il est préférable par exemple d'être non seulement propriétaire mais aussi gestionnaire d'un ouvrage pour intégrer les coûts futurs d'exploitation dans son marché de travaux.

En second lieu, il est conseillé de mentionner explicitement, dans la décision prise en application du II de l'article

5 la volonté du pouvoir adjudicateur de tenir compte des impacts économiques, sociaux et environnementaux de ses achats pour toutes ses compétences telles que définies par la loi. Cette mention légitimera, en cas de contentieux, le lien entre les coûts différés ou diffus et l'objet du marché. En résumé, l'article 5 ne fournit pas une aide au coût global mais constitue une condition sine qua non : il faut avoir cité le développement durable dans ses besoins avant de passer des marchés qui, au stade de la définition ou de la mise en concurrence, seront calculés en coût global.

### 3.2. Autoriser les variantes

Il ressort tant de l'expérience que de la logique même du raisonnement en coût global qu'il ne prend tout son sens que pour comparer des offres différentes dans leur contenu, lorsque leur prix ne l'intègre pas déjà. En cas de prestations identiques, il n'est pas besoin de mesurer les coûts indirects, ils seront aussi identiques.

Ce constat revient à préconiser d'autoriser les variantes chaque fois que le pouvoir adjudicateur souhaite disposer d'un choix entre des solutions différentes. Or, les variantes étant interdites si elles ne sont pas autorisées (article 50 du code). Il est donc nécessaire de les autoriser dans le document de consultation des entreprises.

Ce raisonnement ne signifie pas qu'il soit nécessaire d'autoriser les variantes pour tous les marchés. Le pouvoir adjudicateur peut centrer cette option sur certains lots les plus significatifs, voire la réserver aux marchés de maîtrise d'œuvre ou de marchés globaux. Dans le cas d'un concours de maîtrise d'œuvre, les variantes vont de soi. Le choix de marchés d'exécution avec ou sans variantes résultera ensuite du dialogue entre maître d'ouvrage et maître d'œuvre.

### 3.3. Les marchés de maîtrise d'œuvre et de contrôle technique

Les coûts de conception sont usuellement rapportés aux seules dépenses d'investissement initial dont ils constituent entre 8 et 15 %. Le contrôle technique ne représente que 1 % de ce même total. La répartition des coûts entre conception, réalisation et exploitation sur la durée de vie d'un bâtiment démontre en revanche que :

1. l'exploitation pèse pour 75 % du total ;
2. les choix opérés lors de la phase de conception engagent 90 % du coût global et seulement 10 % des coûts de réalisation ;
3. la conception ne pèse plus que 2 % sur le coût global.

Il est donc essentiel d'accorder à la conception l'attention qu'elle mérite, tant en termes de délais que de financement. Des délais et des financements trop serrés dans les phases de conception conduisent généralement à des surcoûts et des sous-qualités durablement dommageables pour la personne publique.

Cette attention doit rester égale quel que soit le mode opératoire contractuel retenu.

On désigne par « éco-conception » la recherche d'anticipation des incidences sur l'environnement au sens large dans

les choix de conception. Telle est la philosophie de la démarche HQE que reprend en l'intensifiant un logiciel tel que « EQUER » développé par l'école des Mines en lien avec un grand groupe de BTP.

C'est aussi le fil conducteur des démarches de conception numérique voire de maquette collaborative numérique de conduite de projet immobilier que porte le ministère dans le programme de recherche « Xpert » en lien avec l'ensemble de la profession.

C'est encore la philosophie des Eurocodes, dont l'une des particularités est de permettre par l'amélioration des modes de calcul non pas d'augmenter les performances mais de d'obtenir des performances identiques en réduisant l'intensité en matériaux nécessaire pour les atteindre.

### 3.4. L'assistance à maîtrise d'ouvrage (mission économique)

L'AMO économique est la désignation en droit de la commande publique de la mission confiée à l'économiste de la construction, en appui de la MOA ou de la MOE, selon le choix de conduite de projet retenu à la base. La transition de l'ancien métier de « métreur » vers celui « d'économiste de la construction » traduit bien l'évolution pro-active de cette mission qui doit chercher non seulement à transformer des longueurs et des épaisseurs en prix, mais à rechercher des solutions au meilleur rapport qualité-prix possible. L'économiste est celui qui, pour le compte du MOA ou des équipes de MOE candidates à un concours, effectue le calcul de comparaison entre variantes pour proposer ou retenir celle qui fera la différence en coût global.

### 3.5. Marché global ou marché alloti

Le calcul en coût global favorise le marché global et réciproquement, parce que l'unité de responsabilité favorise la prise en compte des coûts de nature différente mieux que lorsque ces coûts sont portés par des budgets différents. Il convient cependant de ne pas identifier coût global et marché global. Un dossier solide de conception permet ensuite d'allotir des marchés d'exécution sans dommage pour la cohérence globale.

### 3.6. Choix des procédures

Le coût global s'accorde mieux avec les procédures négociées au sens large (procédures adaptées, négociées et de dialogue compétitif, marchés de définition). La prise en compte de variantes qui en est le corollaire nécessite souvent une phase d'adaptation aux besoins lorsque l'acheteur n'avait pas anticipé la solution proposée.

D'où l'importance des modifications du code et de son utilisation sans autocensure des éléments de souplesse qu'il peut offrir. Par exemple la procédure adaptée des marchés de maîtrise d'œuvre inférieurs aux seuils, et la nouvelle possibilité de dialogue compétitif pour les marchés de réhabilitation.



## 4. LES PARAMÈTRES DU RAISONNEMENT EN CÔÛT GLOBAL

### 4.1. Le vocabulaire commun

Partager un vocabulaire commun ayant le même sens pour l'acheteur et les opérateurs économiques est un préalable essentiel. D'une part le concept de coût global a connu plusieurs acceptions au cours des dernières décennies, et d'autre part il s'insère dans un cadre européen propice aux erreurs de traduction et aux faux-amis.

La norme ISO-DIS 15686 propose un glossaire. Cette nomenclature n'est pas une structure exhaustive figée et non modulable, mais un ensemble au sein duquel l'acheteur choisira de manière privilégiée les postes sur lesquels il fait porter l'effort d'initiative des candidats puis la comparaison. Il conviendra d'acquiescer cette norme.

Trois notions clés sont à expliciter plus avant :

**Coût global simple** : il s'agit de l'ensemble des dépenses et des gains attachés à l'option examinée sur une durée donnée, dont chaque poste peut être assorti d'un prix et ce prix valorisé par l'acheteur. Il est positif ou négatif. L'UNSA (Union nationale des syndicats français d'architectes) traduit ce concept par «économie globale» afin de souligner l'importance de la prise en compte et la valorisation non seulement des charges indirectes mais aussi des bénéfices indirects.

**Coût monétisable** : charge ou bénéfice dont l'unité de base n'est pas monétaire mais qui est affecté pour l'opération donnée d'une valeur monétaire reconnue : ex le CO<sub>2</sub> et sa valeur sur le marché des droits d'émission ou plus récemment dans certaines directives (directive véhicules propres du 4 décembre 2008).

**Coût appropriable** : charge ou bénéfice indirect au regard de l'opération mais dont l'acheteur supporter immédiatement ou ultérieurement la charge ou le bénéfice. Exemple des équipements publics générés par une construction de logements, les besoins en gardiennage d'un immeuble rendu vulnérable par sa localisation ou sa fragilité, l'absentéisme consécutif à une mauvaise qualité de l'air ou une luminosité insuffisante. Cette notion est importante car elle répartit les externalités entre celles qui ont un lien avec la responsabilité de l'acheteur et celles qui relèvent d'échelons de solidarité différents, souvent plus élevés. Par exemple pour un organisme HLM les charges élevées sont une externalité appropriable à cause des impayés de loyers souvent liés à la hausse des charges. Par contre les émissions de CO<sub>2</sub> ne seront appropriables que lorsqu'un marché des droits à CO<sub>2</sub> sera étendu aux bailleurs sociaux.

**Intangibles** : il s'agit de facteurs qui sont propres à la personne publique, mais dont la quantification n'est pas déterminée par un prix de marché mais évaluée subjectivement ou monétisée forfaitairement et incluses dans les critères de sélection. Il s'agit principalement des impacts subjectifs tels que le confort des salariés ou l'image de la personne publique. Il se traduit en anglais par «goodwill». C'est parfois un biais permettant à une structure d'échelle inférieure de s'approprier une valeur d'échelle supérieure,

lorsque la collectivité intègre la bonne ou la mauvaise image dans ses choix. (Par exemple un bailleur social aura des candidats spontanés pour son parc locatif parmi les classes moyennes supérieures, sensibles aux valeurs environnementales, qui lui éviteront les coûts réservés aux bailleurs confrontés à la paupérisation de leur parc (impayés, vacance subies, etc.).

**Coût global étendu** : désigne le coût global monétisable et appropriable, incluant notamment les intangibles voire le coût global étendu aux externalités qui sont, soit monétisables mais non appropriables, soit ni appropriable ni monétisables, en l'absence de tout marché ou de moyen scientifique de leur conférer une valeur quantitative.

Il en résulte que la frontière entre coût global et coût global étendu dépend de facteurs internes à la personne publique comme le choix des impacts qu'elle considère de son ressort, et de facteurs externes que sont la capacité à mesurer des impacts, leur conférer un prix et enfin qu'ils soient devenus échangeables sur un marché.

Il convient de distinguer ces limites techniques ou économiques de la limite juridique posée à l'article 5 et par laquelle l'acheteur ne peut tenir compte que d'effets, positifs ou négatifs, dont il est autorisé à assumer la charge. A ce stade, le coût global étendu n'est clairement autorisé que dans les limites de «l'appropriable».

Il existe de nombreuses représentations schématiques du coût global, en voici deux :

1. les coûts tout le long du cycle de vie d'un bâtiment (vision diachronique, temporalisée) (figure 1).
2. la même idée en représentation «synchronique» sans répartition des coûts dans le temps (figure 2).

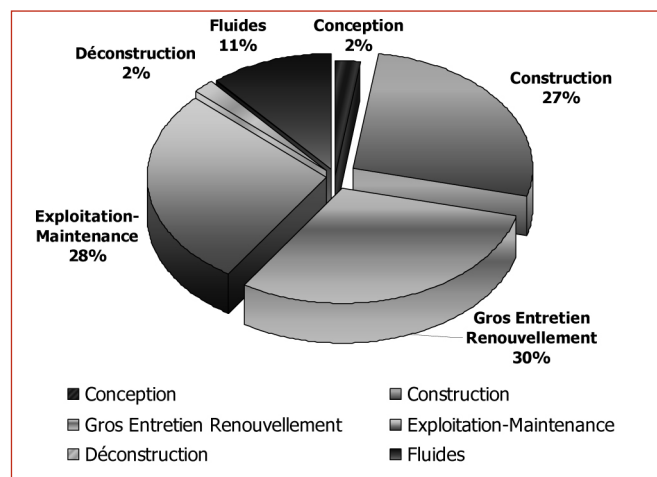


Figure 2.

### 4.2. Les paramètres usuels du coût global en construction

#### 4.2.1. Le prix

Le coût global révèle souvent des coûts cachés. Il augmente donc le coût visible. Mais il doit aussi révéler des économies cachées. Il n'y a donc pas lieu d'opposer prix budgétaire et coût global. En logique «LOLF», la nomenclature budgétaire n'est plus un obstacle à des arbitrages efficaces entre dépenses de fonctionnement et d'investissement. D'autre

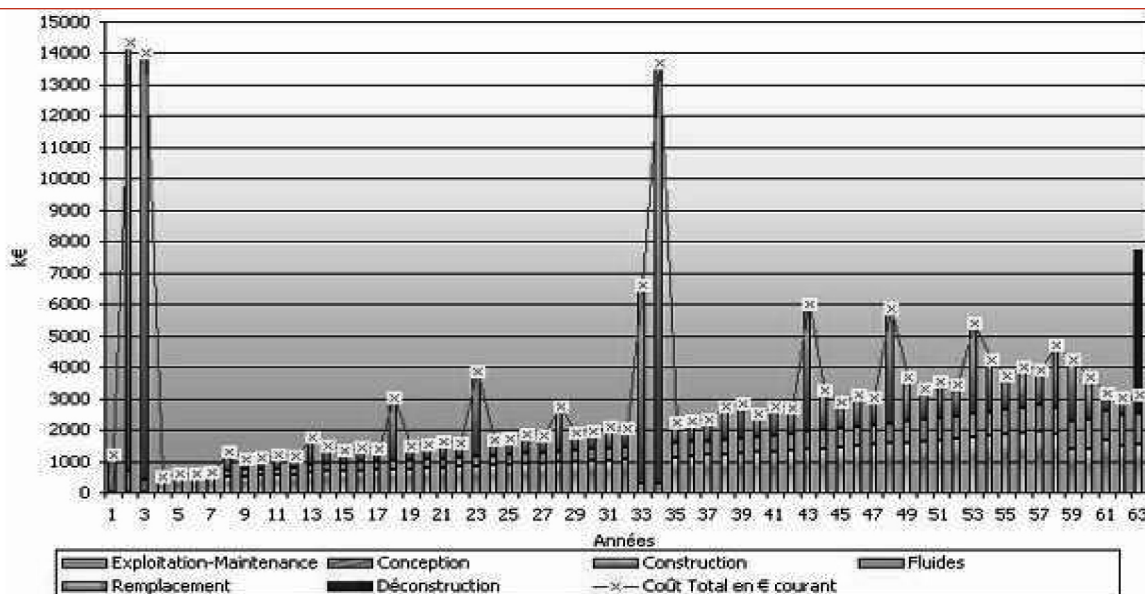


Figure 1.

part, le coût global est une construction économique permettant de départager des offres, mais ce n'est pas nécessairement le prix payé. La réalité est plus nuancée, surtout si l'État poursuit sa réforme qui crée un propriétaire immobilier unique dont les ministères sont les locataires.

Inversement, c'est parce l'achat public durable provoque l'arbitrage nécessaire entre la qualité des prestations et les différents coûts, immédiats et différés, que l'État peut se donner les moyens d'être efficace, et devrait aller vers une utilisation optimale des marges offertes par la LOLF.

#### 4.2.2. La durée de vie

C'est le paramètre essentiel, car il va fixer le cadre de l'accumulation des coûts annuels récurrents (liés à l'exploitation) et surtout a vocation à varier selon les offres : une offre à haute qualité va étendre la durée de vie escomptée de l'ouvrage, et donc étaler l'amortissement ainsi que les bilans annuels dépenses/valeur d'usage

#### 4.2.3. Les externalités non quantifiables

Par définition, le calcul en coût global ne peut intégrer que des paramètres mesurables, quelle que soit la méthodologie retenue pour les quantifier. Le logiciel d'aide et de simulation évoqué plus loi prévoit d'inclure des paramètres choisis librement par l'acheteur, de les désigner et de leur conférer une valeur et une pondération libre en euros courant. Le logiciel procède ensuite au paramétrage, à l'intégration et à l'actualisation de ces valeurs.

Mais cette valorisation se doit d'être transparente, non discriminatoire et surtout crédible pour ne pas donner prise à un contentieux soit sur l'égalité de traitement entre candidats, soit sur une dépense indue (à l'échelle de l'acheteur). L'intégration des externalités ne dépend donc pas seulement de la mise au point d'outils de valorisation mais aussi de processus progressifs d'appropriation sociale puis institutionnelle des valeurs aujourd'hui négligées, via la réglementation, la fiscalité ou la constitution de marchés de certificats.

### 4.3. Les indicateurs

#### 4.3.1. Le Temps de Retour sur investissement (TR)

Le TR permet d'estimer la période nécessaire à couvrir les coûts d'investissement pour un projet donné. Calculé en années, ce Temps de Retour représente le délai écoulé entre les investissements initiaux (et les coûts d'exploitation qui s'en suivent) et la date à laquelle les économies cumulées compensent cet investissement. Le Temps de Retour est généralement utilisé pour comparer les grands et les petits projets (en intégrant également le Taux de Rentabilité Interne de l'investissement). Il permet aussi d'estimer la période pendant laquelle l'investissement présente un risque (tant que les économies cumulées n'ont pas encore couvert les investissements).

#### 4.3.2. Les Économies Nettes (NS)

Elles correspondent à la valeur actualisée des économies relatives à l'exploitation moins la valeur actualisée des coûts d'investissement supplémentaires. Cet indicateur permet le calcul des bénéfices réalisés sous la forme de réduction des coûts. L'estimation des économies nettes peut être utilisée pour comparer les options d'investissement et les coûts associés.

#### 4.3.3. Le Rapport économies sur investissement (SIR)

Le SIR est calculé en divisant la valeur actualisée des économies relatives à l'exploitation par la valeur actualisée des coûts d'investissement supplémentaires attribuables à chaque option. En exprimant le rapport des économies du projet sur les coûts, cet indicateur permet d'évaluer si un projet est rentable (SIR est supérieur à 1) ou s'il ne l'est pas (SIR inférieur à 1). Il permet également de classer et de choisir les options d'investissement possibles en fonction des priorités, du budget global et des rentabilités relatives.

#### 4.3.4. Le Taux Interne de Rentabilité (TIR)

Le TIR correspond au taux d'intérêt actualisant les coûts et les bénéfices sur la période d'analyse et permettant une éga-

lisation entre ces coûts et ces bénéfices lorsque les flux de trésorerie (Cash Flow) sont réinvestis à un taux spécifique. Le TIR est donc le taux d'actualisation qui annule la valeur actuelle nette d'une série de flux financiers (correspondant généralement à un projet avec investissement initial suivi de cash flow positifs). Il permet ainsi la classification d'investissements de tailles différentes et générant des flux de trésorerie de différents profils de temps. Un projet d'investissement ne sera généralement retenu que si son TRI prévisible est supérieur au taux bancaire appliqué (correspondant au coût du capital). Si tous les flux de trésorerie sont négatifs, le TIR ne peut pas être calculé.

## 4.4. Le taux d'actualisation

### 4.4.1. Principe

L'actualisation est une opération mathématique permettant de comparer des flux monétaires qui s'échelonnent dans le temps. Par exemple, avec un taux d'actualisation de 4 %, investir 1 euro aujourd'hui doit créer un bénéfice de 7 euros dans cinquante ans pour être jugé pertinent.

En effet, en termes d'investissements ou d'épargne, toute personne physique ou morale exprime une instinctive préférence pour le présent comparativement au futur. Sa traduction la plus familière est la rémunération de l'argent sous forme de taux d'intérêt (le prix du renoncement à la jouissance immédiate de son pouvoir d'achat). Sous une apparence très technique, le taux d'actualisation est donc au cœur du débat sur le coût global, la question prégnante étant de concilier développement durable et logique économique.

Il faut éviter de fixer un taux trop élevé car les avantages attendus à un horizon de temps éloigné, sont alors valorisés faiblement au jour de la décision. Ainsi, un euro gagné ou économisé dans 50 ans est valorisé aujourd'hui moins de 15 centimes d'euro avec un taux d'actualisation de 4 %. C'est l'inverse de 1 euro d'aujourd'hui devant rapporter 7 euros dans 50 ans. Avec un taux de 6 %, il passe à moins de 6 centimes.

A l'opposé, ne pas actualiser reviendrait à consentir immédiatement des efforts pour le long terme en sacrifiant non seulement le présent, mais aussi le moyen terme (un investissement plus efficient).

### 4.4.2. Un taux de référence de 4 %

La norme ISO 15686-5 retient une fourchette de 0 à 4 % pour le taux réel d'actualisation. Elle constate en outre que la tendance long terme de ce paramètre suit la progression annuelle de la productivité qui oscille entre 0 et 2 %. Pour la norme, la préconisation d'une valeur proche de 0 est donc acceptable.

Le présent guide retient un taux de référence de 4 % pour l'ensemble biens et services, intervenant dans le cycle de vie de l'ouvrage, à une exception : les biens fossiles dont la raréfaction est notoirement reconnue à l'échelle de la durée de vie de l'ouvrage.

### 4.4.3. Un taux dérogatoire pour les biens rares : 0 %

Les biens dont la raréfaction est notoire sur 30 à 50 ans comprennent la plupart des énergies fossiles autres que le charbon, un taux de zéro est recommandé. Mais cela peut concerner d'autres matières premières, voire certaines espèces végétales surexploitées (exemple des essences de bois méditerranéennes ou tropicales).

Le cas de l'électricité est singulier, car elle est majoritairement produite de source nucléaire et non au gaz, au fioul ou au charbon. Il est cependant recommandé de lui appliquer un taux nul, non seulement en raison de la rareté croissante du combustible nucléaire lui-même, mais aussi d'un rapprochement tendanciel entre le prix public de l'électricité distribuée et son prix de marché, aujourd'hui supérieur dans un contexte européen.

La neutralisation du taux d'actualisation traduit le postulat par lequel le prix de ces biens finit par refléter leur rareté croissante sur une longue durée. C'est ce que traduisent les cours des énergies fossiles, indépendamment de la volatilité des mouvements de cours terme.

Attention, l'actualisation s'applique à des prix connus à la date de l'investissement et ne doit surtout pas intégrer de hausse prévisible du prix du bien lui-même, ce qui reviendrait à un taux négatif !

## 4.5. La valeur résiduelle et les coûts de déconstruction

La valeur résiduelle peut être approchée par le montant restant à amortir après la période de calcul ou la partie du coût remplacement qui correspond à la durée de vie qui lui reste à la fin de la période de calcul. Elle vient en déduction du coût global et est actualisée comme les autres postes de dépense. Elle se calcule alors en supposant que le vieillissement est linéaire.

La prise en compte de la vie résiduelle est essentielle dans la comparaison de deux solutions offrant des durées de vie différentes. A durée de vie égale, une solution de plus haute qualité sociale et environnementale augmente la valeur résiduelle en proportion du surcroît de valeur d'usage (ou valeur locative en gestion commerciale).

Il serait illusoire de proposer un modèle de valorisation absolue tant le marché est diversifié et cyclique. Cependant, il semble, sur la base des éléments collectés, que la prime de valeur résiduelle donnée par le marché entre une construction respectueuse de l'environnement et un bâtiment plus traditionnel convergerait dans une fourchette comprise entre 5 et 15 %.

Il convient ensuite d'intégrer les coûts de déconstruction. Ils sont constitués par les coûts de démolition/ déconstruction et par les coûts de traitement de ces déchets.

Le coût moyen de démolition, de tri et d'enlèvement est de 50 € HT/m<sup>2</sup> SHOB. Quant au coût moyen de recyclage, de décharge ou d'incinération, on peut l'évaluer autour de 30 € HT/tonne. On estime par ailleurs qu'un m<sup>2</sup> SHOB génère 0,5 tonne de déchets. Le coût de traitement revient donc à 15 € HT/m<sup>2</sup> SHOB.





## 5.4. Les logiciels accessibles au public

### 5.4.1. Le simulateur de la MAPPP<sup>3</sup>

Un simulateur simple d'emploi est accessible et téléchargeable sur le site de la Mission d'appui aux partenariats publics privés (MAPPP)<sup>2</sup>. Bien que conçu pour simuler l'analyse en coût global d'un contrat de partenariat incluant des frais financiers, il permet de s'initier à la méthodologie.

### 5.4.2. Le logiciel EQUER de l'école des mines<sup>4</sup>

Ce logiciel est davantage tourné vers la maîtrise d'œuvre et les entreprises. Il décline en termes opérationnels le concept d'éco-conception. Il postule que toute construction est un système comprenant des entrants (prélèvements), et des extrants (pollutions). Ce sont des flux qu'il convient d'optimiser. Pour transcrire ces flux en impacts environnementaux, EQUER propose 12 indicateurs et organise leur combinaison en plusieurs options, aboutissant à une comparabilité de ces options en coût global.

## 5.5. Un logiciel de simulation et de sensibilisation dédié aux acheteurs publics et privés

Le MEEDDAT propose en accès libre un logiciel de calcul en coût global spécialement destiné aux acheteurs publics s'inscrivant dans le cadre du code des marchés publics. Il est consultable sur le site du MEEDDAT<sup>5</sup>.

Ce logiciel développé par le CSTB inclut des données de référence habituellement utilisées pour les dépenses de fonctionnement des principales catégories de bâtiment. Ces données permettent à l'utilisateur de simuler le coût global d'un projet en le comparant avec le coût de base (construction uniquement) et surtout de comparer des options différentes. Il pourra aussi se situer par rapport à ces données de référence.

L'application qui se veut aussi simple que possible, ne comporte pas de dispositif d'identification ou de restriction d'accès. Un internaute souhaitant effectuer une simulation de coût global n'a pas besoin de s'authentifier au préalable. En contrepartie, il ne prévoit pas la mémorisation ou la conservation, même temporaire, des données saisies au-delà du calcul final. L'internaute peut toutefois copier puis télécharger les tableaux résultant de sa simulation en format PDF ou CVS transformable en feuille de calcul ou base de donnée.

Le simulateur de coût global n'exploite donc pas de bases de données pour le stockage des données de simulation saisies par un utilisateur. Toute nouvelle simulation nécessite de sa part une nouvelle saisie de paramètres. Le choix de ce mode de fonctionnement répond à un objectif de simplicité et d'attractivité. Le logiciel a pour but de familiari-

ser avec la démarche. Il n'a aucune visée opérationnelle et ne doit pas se substituer aux outils gérés par les professionnels qui ont seuls le degré de précision requis. Son objectif reste d'inciter le maître d'ouvrage en amont de son projet à recourir à cette démarche et à l'imposer dans ses marchés de conception.

## 6. CONCLUSION : COÛT GLOBAL, CONTRAINTE OU INSTRUMENT POUR GESTIONNAIRES RESPONSABLES ?

Dans la plupart des opérations immobilières, les coûts de fonctionnement, même actualisés, représentent entre trois et quatre fois le coût des travaux<sup>6</sup>. Ainsi, un impératif de gestion budgétaire à court terme aboutissant à imposer aveuglément une économie sur le coût d'investissement d'un bâtiment risquera souvent de se traduire par une augmentation des coûts de fonctionnement (une isolation de moindre qualité augmentera, par exemple, les coûts de chauffage). Cette augmentation sera souvent supérieure au coût total, incluant le coût de financement sur la même durée, de l'effort à faire pour maintenir le niveau de qualité optimal.

Les acheteurs publics intègrent rarement ce risque dans leur pratique compte tenu des contraintes qui leur sont imposées en matière de financement (enveloppe prédéterminée) et du cloisonnement très fréquent entre investissement et fonctionnement du fait :

- des procédures (l'investissement relève des marchés publics alors que le fonctionnement renvoie à une pluralité de procédures dont plusieurs peuvent ne pas relever des marchés publics) ;
- des modes de financement (le maître d'ouvrage n'assure pas le financement des coûts de fonctionnement) ;
- de la répartition des responsabilités (le responsable de la décision d'investir ne se sent pas responsable, ou n'est pas investi, des décisions de fonctionnement).

Pour les mêmes raisons, lorsque l'acheteur dispose de marges financières, il peut accepter des surcoûts en investissement dont la rentabilité future est faible ou nulle, faute de maîtriser la mécanique de l'actualisation.

Inversement, la démarche HQE souffre de critiques portant sur son insuffisante rigueur économique, les réalisations actuelles relevant de démarches d'image plus que de choix rationnels. C'est la limite d'une normalisation fondée uniquement sur des cibles et un processus.

Les premières réalisations en coût global (notamment dans le cadre du programme COPARCO) tendent cependant à démontrer que s'agissant des aspects environnementaux, leur prise en compte dans les marchés publics conduit à une économie globale nette si le calcul a cherché l'optimisation en coût global.

3. [www.ppp.bercy.gouv.fr](http://www.ppp.bercy.gouv.fr), onglet « des outils pour vous aider », puis « évaluation préalable », puis « financier », puis « étude préalable, outil de simulation » puis « outil financier » ; contenant un « guide d'utilisation » en format PDF et un « modèle financier » en format excel.

4. <http://www-cep.enscm.fr/français/logiciel/indexequer.html> et <http://www.izuba.fr/equer.htm>

5. <http://www-coutglobal-developpement-durable-gouv-fr.aw.atosorigin.com/index/accueil/origine/menu>

6. Hors foncier, Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques : « Ouvrages publics & coût global », 01/2006.

Les débats en cours sur l'ajustement des exigences réglementaires futures en matière de rénovations illustrent clairement les enjeux et en même temps constituent un apprentissage collectif de la démarche : ainsi certains souhaitaient que la priorité soit donnée aux 800 000 logements les moins performants, et, parce qu'ils sont occupés par des ménages modestes, leur imposer les normes les plus strictes en les subventionnant fortement.

Les bailleurs sociaux ont défendu avec succès un objectif un peu moins ambitieux fondé sur la démarche en coût global, en démontrant qu'il était plus avantageux pour la collectivité nationale d'accepter que la rénovation fasse passer les 800 000 mauvais logements à un niveau de performances moyen et non pas idéal, car cela correspondait à l'optimum économique à enveloppe nationale donnée.

Le surplus économisé permettra non seulement de subventionner les ménages concernés pour que leur propre quitte soit identique à celle d'un logement à haute performance», mais il devrait rester des fonds pour traiter d'autres logements afin de les faire passer d'un niveau «moyen» à un niveau «excellent».

L'utilisation du coût global suppose un apprentissage et une maîtrise progressive de données techniques et d'ingénierie financière. C'est pourquoi il s'est d'abord développé au sein d'opérateurs avisés, dans le cadre de contrats globaux et de longue durée, notamment les PPP. Sa diffusion au sein de la commande publique de base et, in fine, des particuliers, supposera à la fois un effort de simplification et de patience.

La simplification sera la condition d'une diffusion massive: il faudra accepter des approximations qui, individuellement, ne seront pas optimales, mais la loi de Pareto jouera son rôle sur la grande majorité des cas. La patience s'imposera aux partisans du volontarisme: aller trop vite dans la prise en compte des externalités conduirait à des surcoûts non récupérables, donc des distorsions pénalisantes dans un contexte concurrentiel généralisé y compris entre collectivités publiques. La marge de progrès sera déjà importante en intégrant dans un premier temps les coûts différés et les externalités monétisables (pensons à la taxe climat énergie) sans prétendre r faire du coût global l'instrument unique et omnipotent du volontarisme écologique ou social.

# RÉNOVATION ET DÉVELOPPEMENT DURABLE, CAS DE L'INSA DE STRASBOURG

**Christelle GRESS, Karine DUPRÉ, Bernard FLAMENT**

Laboratoire AMUP – INSA Strasbourg, 24 Bd de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex

## 1. INTRODUCTION

**A**fin de mettre en évidence le champ d'action que peut avoir une telle étude, on présente dans un premier temps un aperçu de la typologie des bâtiments d'enseignement et dans la mesure des renseignements disponibles, plus spécifiquement des bâtiments d'enseignements supérieurs publics. La description proposée inclut des paramètres divers (fonctionnels, matériels, techniques, etc.) et permet de proposer quelques pistes d'évolution, la prise en compte de ce facteur permettant une vision à plus long terme. En raison du nombre d'expérimentations réalisées dans la construction neuve, et de l'importance du parc bâti existant, nous nous intéressons plus particulièrement au parc existant dont les spécificités sont précisées. Une analyse de quelques rares expérimentations réalisées sur le parc bâti existant amorce la réflexion globale avec comme champ d'application le bâtiment de l'INSA de Strasbourg.

## 2. TYPOLOGIE DES BÂTIMENTS D'ENSEIGNEMENT

Notre champ d'investigation est volontairement limité aux bâtiments d'enseignement supérieur, pour différentes raisons que nous avons regroupées en trois domaines :

- les usages et les surfaces : la spécificité du fonctionnement ce type de bâtiments, l'importance de la surface bâtie dans le secteur tertiaire non marchand, la part de

leur consommation énergétique dans la consommation globale au niveau national ;

- les techniques de construction liées à l'usage et à l'ancienneté de ce parc ;
- les évolutions de ce secteur d'activités et des comportements des usagers.

### 2.1. Usages et surfaces

En France, on recense 4300 établissements d'enseignement supérieur en 2002-2003 (source ministère de l'Éducation Nationale), mais seuls 58 % de ces établissements ont un statut public. En l'absence de données pour ces bâtiments spécifiques, les données suivantes sont basées sur l'étude des ensembles immobiliers du second degré public : ces 7 348 bâtiments représentent une surface totale bâtie d'environ 76 millions de m<sup>2</sup>. Cette surface rapportée au nombre d'élève est de 17,7 m<sup>2</sup>, et le taux d'occupation moyen avoisine les 77 % [1]. A titre de comparaison, le taux d'occupation des bâtiments de l'INSA de Strasbourg est de l'ordre de 74 %, pour une surface totale de 19 723 m<sup>2</sup> et une surface par élève de 14 m<sup>2</sup>.

Une autre particularité des bâtiments d'enseignement par rapport au parc immobilier du secteur tertiaire est la proportion de la surface chauffée par rapport à la surface construite. En effet, si cette proportion est de 100 % dans les locaux dédiés à l'enseignement, elle n'est que de 85 % pour la culture [2].

De surcroît, non seulement le parc immobilier des bâtiments d'enseignement est vaste, il est également caractérisé par l'ancienneté des bâtiments. En effet, seuls 7,5%



des bâtiments sont construits après 2000, alors que la construction de plus de 41 % de ces bâtiments d'enseignement est antérieure à 1970. Les chiffres concernant le parc bâti destiné globalement à l'enseignement et la recherche confortent l'hypothèse de bâtiments anciens, dont le système constructif est décrit au paragraphe suivant.

Surface du parc tertiaire	1998	Dont parc	
	Million de m <sup>2</sup>	d'avant 1980	1981 & après
		%	%
Transport	22	62	38
Café-hôtel-restaurant	96	78	22
Commerce	175	69	31
Bureaux-administration	156	60	40
Sports-loisirs-culture	40	32	68
Enseignement-recherche	159	79	21
Santé-action sociale	88	80	20
Total du tertiaire	735	70	30

Source : estimation du parc par âge/étude SES-Enerdata.

**Tableau 1. Surfaces du parc tertiaire [1].**

Il est à noter que la distinction se fait ici à partir de 1980, essentiellement parce que cette étude porte plus généralement sur une estimation du parc immobilier tertiaire par génération, à l'échelle nationale et régionale et que les statistiques sont disponibles au niveau départemental depuis 1980.

La distinction souvent faite dans les statistiques dans les années 70-80 (tableau 1) est intéressante, car elle nous renseigne sur le parc immobilier bâti avant toute réglementation thermique (la première étant de 1975, RT75).

Par contre, le poste dépenses énergétiques occupe la troisième place avec 15 % des dépenses derrière le sécurité/sûreté (19 %), le nettoyage/gardiennage (16 %), et devant les taxes foncières (11 %). Ce qui nous amène à penser que pour valoriser une démarche globale de réflexion sur la réhabilitation des bâtiments d'enseignement il sera nécessaire d'inclure une amélioration des aspects de sécurité et de maintenance.

## 2.2 Techniques de construction

L'étude des systèmes constructifs au fil du temps nous renseigne sur les pratiques et leur évolution. Ces évolutions sont mises en parallèle avec l'évolution des réglementations thermiques et nous permettent de situer le cas étudié (bâtiment de l'INSA datant de 1955, voir Figure 1) dans son contexte.

Les techniques de construction des bâtiments étudiés évoluent ainsi :

- Jusqu'aux années 20, les bâtiments sont en mur de pierre épais, sans isolation supplémentaire. La ventilation est opérée par les ouvertures, et la consommation est estimée à environ 300 kWh/m<sup>2</sup>/an.
- Dans les années 50, période de construction de l'exemple traité, les bâtiments sont plutôt en béton ou parpaings, avec des murs d'une épaisseur d'environ 20 cm. L'isolation quasi inexistante (doublage des murs en briques, avec une lame d'air) est peu efficace.
- Dans les années 60-70, les bâtiments construits en béton ou parpaings sans aucune isolation sont certainement ceux qui présentent les performances les plus



**Figure 1: Façade actuelle du bâtiment principal de l'INSA de Strasbourg.**

déplorables, avec des déperditions très importantes en hiver et des températures intérieures parfois supérieures à la température extérieure en été. Ce type de construction ne favorise pas non plus le confort acoustique intérieur, ni l'isolation par rapport aux bruits extérieurs. Le système de ventilation naturelle se développe.

- Dans les années 75-80, la première crise pétrolière génère une prise de conscience et l'apparition de la première réglementation thermique (RT75). La conséquence directe de la mise en œuvre d'une isolation même faible est une diminution de l'ordre de 50 % de la consommation d'énergie.

## 2.3. Évolutions

L'intérêt porté aux bâtiments d'enseignement est également justifié par les capacités d'évolution particulières de ce secteur. Outre le regain d'intérêt pour les économies d'énergie lié à la crise énergétique, il y a la nécessité des bâtiments d'enseignement supérieur de s'adapter à la réforme sur l'autonomie des universités. Les universités ont désormais la responsabilité de gestion de leurs affaires, notamment dans un domaine de ressources clé : leurs bâtiments. Elles détiennent désormais le pouvoir de décision sur la capacité de leurs infrastructures à répondre de façon optimale aux besoins, ou encore de les améliorer afin d'atteindre cet objectif.

Un décret en Conseil d'État du 19 mars 2007 (JO du 21 mars 2007) sur les performances énergétiques des bâtiments existants prévoit que le maître d'ouvrage doit améliorer la performance énergétique (chauffage, ECS, ventilation et éclairage) pour les réhabilitations de plus de 1000 m<sup>2</sup>, présentant un coût de réhabilitation dépassant 25 % du prix du bâtiment hors foncier. Ce même décret prévoit un arrêté d'application pour les autres bâtiments existants explicitant la réglementation selon les exigences qui sont définies élément par élément, un niveau minimum étant requis pour chaque remplacement ou ajout d'enveloppe ou d'équipement technique. Cet arrêté est paru le 3 mai 2007 (JO du 17 mai 2007). L'objectif est alors de savoir de quelle manière parvenir à ces performances. Si des évolutions administratives et réglementaires sont en place, on peut également observer des évolutions d'ordre

sociologique de la population des usagers des bâtiments d'enseignement qu'il est nécessaire de prendre en compte. On ne peut concevoir de modification des projets sans reconsidérer les usages.

Du point de vue des usagers, la capacité d'apprentissage des étudiants évolue également. Les méthodes pédagogiques, les groupes mêmes d'enseignement évoluent (nombre, répartition par filière, etc.), pour des raisons sociologiques, matérielles ou logistiques. A l'heure où les méthodes d'enseignement virtuel se développent, la sensibilité et la perception des étudiants par rapport à leur espace d'apprentissage se développent également, voire prend de l'importance par rapport à des fonctionnements traditionnels. L'apprentissage des étudiants se fait aujourd'hui de différentes manières, ils « absorbent » des connaissances dans des espaces plus diversifiés, notamment les circulations, les cours, les buvettes ou encore les espaces extérieurs. Cette observation, soulevée notamment par Andrew Harrison (directeur de la recherche au cabinet d'architecture britannique DEWG), pose alors le problème de bâtiments évolutifs, d'espaces repensés pour des usagers qui se renouvellent perpétuellement.

Rappelons que le parc immobilier universitaire représente environ 18 millions de m<sup>2</sup>. De nombreuses constructions ont été engagées depuis les années 1990 pour accueillir un nombre croissant d'étudiants. La démographie étudiante étant en phase descendante, il est essentiel de privilégier désormais la réhabilitation des locaux, et leur optimisation. Il semble qu'il existe en effet des marges dans ce domaine. Des outils de gestion adaptés ainsi qu'une bonne organisation des formations tout au long de l'année permettraient une meilleure utilisation et valorisation des locaux. Le développement des offres de formation continue par les établissements va dans ce sens.

D'autre part, cette typologie de bâtiment comprend une organisation fortement dépendante du fonctionnement (flux). Les flux sont distingués à l'échelle journalière, hebdomadaire, semestrielle ou annuelle, sur un cycle d'année scolaire. Cet aspect est relevé dans des expériences antérieures d'évaluation de la qualité environnementale de bâtiments d'enseignement. Par exemple, Mme Mandallena [3] du laboratoire TREFLE (Université de Bordeaux I) démontre dans un rapport scientifique édité suite à la campagne de mesure et l'étude menée à l'école maternelle de Bellegrave la nécessité des relevés et mesures sur une durée relativement longue (2 ans). Cette durée semble nécessaire afin de pouvoir tirer des conclusions en tenant compte des variations de météo à l'échelle d'une année, ainsi que les variations liées au fonctionnement du bâtiment (cycle jour/nuit), activité/vacances scolaires, etc.

Ainsi, sauf raison de sécurité, on constate une tendance à un fonctionnement sur des horaires de fréquentation élargi, ce qui entraîne une durée de chauffage plus longue. Cette tendance s'explique également par le fait de ressources nouvelles ou de pluridisciplinarité des bâtiments : les programmes des bâtiments d'enseignement neufs comportent nécessairement des salles informatiques, avec des accès libres en dehors des heures d'enseignement, des laboratoires de recherche ou encore des cafétérias ou autres lieux de convivialité ou associatifs (associations sportives ou cultu-

relles). À l'échelle semestrielle ou annuelle, les périodes de congés sont de périodes de chauffage minimum. Ces rythmes d'utilisation sont totalement différents de ceux de bâtiments du secteur marchand par exemple. Les techniques permettant de limiter les dépenses énergétiques du bâtiment devront par conséquent tenir compte de ces facteurs. Par exemple, pour le poste ECS, les technologies basées sur l'énergie solaire semblent à première vue peu adaptée, puisque l'occupation des bâtiments durant les périodes les plus ensoleillées en région Alsace est très faible, voire nulle. Les différentes évolutions présentées appuient la nécessité d'une démarche concourante indispensable à un projet de réhabilitation de cette typologie de bâtiments.

### 3. PARTICULARITÉS DU BÂTI EXISTANT

La prise en compte du développement durable dans les projets d'architecture se fait à plusieurs niveaux. Si l'on reprend certains points cités par exemple par Hélène Jourda [4] ; elle spécifie ceux à prendre en compte au niveau des bâtiments, dès lors que projets d'architecture et développement durable sont considérés :

- ***L'implantation du bâtiment*** : critère qui a peu d'impact sur les projets en rénovation (si ce n'est de relever l'orientation des façades, afin d'adapter les usages et les traitements). L'apparition d'extensions ou ajouts peut notamment jouer un rôle déterminant, puisqu'ils modifient l'impact des éléments naturels extérieurs (soleil, vent, ...) ;
- ***L'énergie*** : l'objectif est de minimiser la consommation d'énergie, a fortiori d'énergies non-renouvelables et d'introduire l'utilisation d'énergies renouvelables, par exemple l'énergie solaire par des moyens passifs ou actifs. Il est cependant beaucoup plus aisé d'intégrer ces technologies dans la conception d'un projet neuf que dans le cadre d'une réhabilitation. Des exemples d'installation de panneaux solaires comme source d'énergie renouvelable pour la production d'eau chaude sanitaire ont été relevés dans la communauté urbaine de Strasbourg, en particulier sur des bâtiments de type logement social. Si l'impact des panneaux solaires installés en toiture est minime, au vu de la hauteur des bâtiments et du recul des installations, les conduites sont apparues comme des éléments modifiant notablement l'aspect des cages d'escaliers ;
- ***les matériaux*** : l'analyse des matériaux utilisés lors de la construction permet d'établir un bilan sur la réutilisation ou le remplacement de ceux-ci ; l'utilisation de nouveaux matériaux doit prendre en compte les notions d'énergie grise ;
- ***le système constructif*** : la typologie de la structure même du bâtiment qui sera analysé est un des facteurs limitant la palette de solutions envisagées. Par exemple, pour le cas d'étude présenté, les solutions de modification de la façade doivent prendre en compte les possibilités de fixation ou d'appui sur la façade ou les planchers existants, ce qui limite les possibilités par rapport à la conception de bâti neuf ;
- ***prise en compte de l'habitant usager*** : une première approche fait apparaître dans le cas étudié des pro-

blèmes de confort thermique, acoustique, dans l'ancien bâtiment, toutes les façades étant traitées de la même manière, quelle que soit leur exposition. D'autre part, la qualité des menuiseries est à déplorer, tant du point de vue thermique (non étanchéité à l'air, ponts thermiques, protection solaire nulle), qu'acoustique (en particulier au niveau des façades sur rue, ce qui constitue environ 50 % de la surface totale de façade).

Bien que ces aspects soient indispensables à une construction durable, leur prise en compte dans un projet de rénovation est difficile. L'étude de projets « neufs » de bâtiments d'enseignement, si tant est qu'ils constituent une réussite par rapport aux objectifs de développement durable visés, ne peut donc nous apporter que des éléments de réponse très succincts.

Par exemple, les maisons passives sont très simples à comprendre, mais très difficiles à concevoir. D'une manière très succincte, il s'agit de stocker le maximum de calories produites par le soleil en hiver, mais pas en été. Le nombre de fenêtres doit être réduit au Nord. Une technologie permettant une récupération calorifique interne doit également être proposée. Cet exemple nous permet de comprendre que la construction durable est encore une fois une accumulation d'évidences, de principes antiques redécouverts [5], mais ces dispositions sont en contradiction avec des espaces constitués de volumes importants, lumineux et ouverts adaptés à la typologie des bâtiments d'enseignement.

Les démarches de rénovation, restructuration, amélioration du bâti existant sont des démarches où le point de départ est fixe, connu, ce qui limite le champ des possibilités techniques, comme nous l'avons évoqué pour les façades innovantes et performantes liées à la structure du bâtiment existant.

D'autre part, si les données existent concernant le parc immobilier dit neuf, il est difficile de rassembler des données sur la parc immobilier de l'enseignement supérieur existant. Dans cette branche d'activités, on trouve en effet plus que dans les secteurs tertiaires marchands par exemple des locaux ayant changé de destination, voire d'affectation, ou des locaux laissés vacants pour des raisons diverses. Pourtant ces données sont indispensables à une évaluation du parc bâti existant, à l'échelle nationale et régionale, afin de replacer les bâtiments d'un point de vue technique dans leur contexte climatique, ou bien d'un point de vue architectural dans un contexte patrimonial propres. D'où la nécessité d'une approche à plusieurs échelles.

## 4. DE LA NÉCESSITÉ D'UNE DÉMARCHE CONCOURANTE

L'idée d'associer différentes catégories d'acteurs de l'acte de bâtir autour de cette réflexion découle des réflexions sur la démarche de conception, des expériences de conception avec une collaboration active de différentes filières et d'architecture participative.

La démarche de conception architecturale est ancrée dans le site, le « génie du lieu », selon l'expression de Christian Norbert Schultz. Citons encore un architecte, Philippe

Samyn : « Le développement durable et la construction durable sont des concepts qui touchent à la fois aux sciences exactes et aux sciences humaines. L'approche purement technique ne suffit pas. Les questions sociétales sont au centre. Disons que l'ingénierie est au mieux un art et au pire une technique ! On dit souvent que l'architecte fonde son art sur les sciences humaines et l'ingénieur sur les sciences exactes. Mais rien n'est pire qu'un architecte trop peu technicien ! L'ingénieur, qui pose un acte éminemment humain, ne pourra jamais non plus se suffire du seul outil technique ou scientifique, basé sur des modèles. S'il est consciencieux, il connaît la relativité de ses propositions et sait qu'aucune technique n'est parfaite. L'ingénieur qui veut faire œuvre "durable" doit donc être capable de se remettre en question. »

Si notre démarche s'inscrit dans cette philosophie, l'aspect innovant se situe dans l'intégration de la participation.

En 1866, Ernst Haeckle a défini l'écologie comme la science des relations. L'architecte est chargé de fabriquer un outil, l'articulation des espaces et leurs significations, imposé à des personnes qui doivent s'y adapter.

Gropius et le Bauhaus (1927) avec la Minium Existenz Haus, avaient proposé une application du modèle Tayloriste à l'architecture : une série de maisons « fonctionnelles » a été construite à Dessau. Leur façade Sud était ouverte et leur façade Nord fermée, puisqu'elle ne recevait pas la lumière. Sous la pression du premier comité de quartier, les habitants ont obtenu que des fenêtres y soient percées.

La participation des habitants à l'élaboration du projet de leur logement est une définition de l'architecture participative. Cette méthodologie est apparue en 1948 avec André Lurçat à l'occasion de la reconstruction de Maubeuge. Les besoins des habitants regroupés en corporation ont été alors exprimés en termes architecturaux. Officiellement née dans les années 60 aux États-Unis, avec le *advocacy planning*, Paul Davidoff a essayé de mettre en liaison les demandes des habitants et la ville pour protéger un quartier de Harlem.

Un autre exemple concernant un bâtiment d'enseignement : le lycée Bismarck à Gelsenkirchen (Ruhr-Allemagne). Dans ce projet de l'architecte Peter Hübner, spécialiste de l'architecture participative, les lycéens, les enseignants et même la société civile ont été invités à participer. Ce projet de lycée-village comporte un restaurant, ouvert sur le quartier, un centre social, et même un théâtre dans lequel répètent le groupe théâtral de la ville et qui intègre les élèves qui le souhaitent. Les élèves participent à l'entretien du bâtiment, en contrepartie d'une rémunération qui leur permet de financer un voyage de fin d'année.

L'exemple de l'école de technologie supérieure (ETS) à Montréal nous apprend que la collaboration d'architectes, d'ingénieurs de la construction et de fournisseurs de systèmes de communication a mené à la mise en œuvre d'un bâtiment « intelligent » dont la consommation d'énergie par unité de surface est de 50 % inférieure à celle d'un établissement d'enseignement typique construit la même année (1947).

On retient de ces expériences d'une part que la participation de diverses compétences dès les premiers stades de la

conception d'un projet, même si elle est parfois complexe à mettre en œuvre est toujours bénéfique pour la qualité du projet et d'autre part, que la participation des usagers à des degrés divers, ne serait-ce qu'un effort d'information du grand public accompagne cette réussite. En effet, si les usagers ne peuvent exprimer leurs attentes ou trouver des réponses techniques, l'effet produit par les améliorations sur le bâti et le bon usage des dispositifs mis en place est fortement dépendant de l'accompagnement des usagers.

Les études menées par le ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer et du ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement sur la maîtrise de l'énergie et la modernisation durable des bâtiments existants [6] nous montrent une corrélation évidente en France et en Europe entre les systèmes d'aides et de leviers et les travaux entrepris dans les logements par les propriétaires. Les dispositifs de crédits d'impôts et autres aides encouragent l'utilisation de certaines technologies, mais si ce système d'incitations fiscales instable qui a connu pas moins de 15 modifications entre sa mise en place en 1974 et 1997 a des effets positifs sur les dépenses énergétiques des foyers, il n'en est pas de même sur l'amélioration de la qualité environnementale du parc bâti. En l'absence d'étude thermique ou de bilan énergétique global (sans parler de diagnostic structurel ou architectural), des actions sont entreprises sans qu'elles n'aient l'effet escompté, par exemple le remplacement des ouvrants sans amélioration de l'isolation des combles perdus ou du système de chauffage sans reconsidérer l'isolation du logement. L'amélioration de la qualité environnementale demande, même à l'échelle des logements, une réflexion plus globale.

Parmi les diverses définitions de qualité environnementale, démarche HQE, développement durable, etc. nous relevons celle de Félix Guatarri qui parle des «trois écologies»: l'écologie sociale, psychologique et physique. Seule, l'écologie certes n'a pas de sens, elle doit être connectée aux deux autres (Lucien Kroll).

L'un des axes principaux de la démarche de conception est en effet la satisfaction de l'utilisateur. Autour de cet aspect peuvent se greffer différents autres, tels que les coûts, la maintenance, les relations sociales, l'espace public, l'architecture et la construction. Ces éléments qui ne constituent certes pas une liste exhaustive sous-entendent la participation de disciplines diverses, de différents acteurs tels qu'architectes, urbanistes, paysagistes, ingénieurs. C'est la nécessaire combinaison de ces compétences que nous avons essayé de démontrer que nous proposons de mettre en œuvre.

## 5. ÉLÉMENTS DE LA DÉMARCHE ET ÉTUDE DE CAS

Après avoir détaillé les raisons du choix de l'étude de la réhabilitation des bâtiments d'enseignement et explicité leurs caractéristiques, nous proposons des éléments de la démarche et une étude de cas. La première étape est la définition des champs de compétences des différents acteurs de la démarche (en cours).

Même si d'aucuns estiment que le rôle de l'architecte est d'aller au-delà de ce que l'utilisateur peut même imaginer, cette expérience unique nous démontre encore une fois qu'une telle démarche n'est possible d'une part qu'avec une collaboration de la partie représentant la maîtrise d'ouvrage, et d'autre part dans un contexte culturel particulier. Loin de ces ambitions concernant le ministère de l'Éducation Nationale, notre proposition peut se présenter de manière synthétique sous différents aspects, sans gradation aucune :

- un diagnostic technique sur les aspects énergétiques, acoustiques, structuraux, fluides, ...
- un diagnostic architectural,
- un diagnostic humain.

Nous proposons de détailler ces différents aspects, en fonction de l'état d'avancement de chacun d'entre eux.

Concernant le premier point, outre le bilan énergétique du bâtiment (connaissance des dépenses énergétiques, énergies utilisées), une étude thermique est en cours.

### 5.1. Dimension technique

L'objectif est d'établir un diagnostic du bâtiment au-delà du bilan énergétique ou de l'évaluation des performances environnementales. Seul un diagnostic complémentaire d'un point de vue acoustique et structurel par exemple permet de trouver des réponses adéquates aux déficiences du bâtiment. De surcroît, seul un diagnostic englobant l'ensemble des critères précités permet d'alimenter la démarche architecturale. Un extrait des résultats obtenus au cours de l'expérience [7] menée conjointement avec des étudiants en architecture et en génie climatique sur une durée limitée est présenté sur la figure 2. Cette expérience a déjà permis de mettre en évidence les relations entre les différents niveaux d'analyse précités (technique, humain, architectural). Par exemple, le niveau de chauffage du bâtiment est soumis à diverses contraintes directement liées à l'usage des espaces. Dans le même temps, le système de ventilation est à réguler en fonction de l'occupation des locaux. Ces critères sont donc intimement liés à l'usage des espaces. Cela démontre l'importance de considérer les cycles d'usage du bâtiment (jour/nuit, période de cours/congés) dans les projets d'améliorations des bâtiments d'enseignement.

Une première analyse nous permet de situer le bâtiment étudié par rapport au parc considéré :

Usage	Sujet d'étude	Bâtiment < 1975	Bâtiment neuf (RT 2005)
Chauffage kWh/m <sup>2</sup> /an	Secteur tertiaire (10M éq. logements)	200	20 à 130 (en fonction des régions, moyenne)
	INSA Strasbourg	180	Objectif après réhabilitation 35

*Consommation de l'énergie finale comparée (évolution en fonction de la réglementation)*

Le diagnostic technique a présenté l'opportunité d'une synergie architecte-ingénieur intéressante. En effet, une étude menée sur des bâtiments d'habitation récents dont



on peut maîtriser un maximum de données a été menée en janvier 2009. Cette étude a démontré que sur les 6 maisons individuelles étudiées et à objectif de performances environnementales, la plus grande part de l'impact environnemental est opérée en phase d'exploitation des bâtiments. Sur un plan qualitatif, l'équipe d'étudiants ingénieurs (spécialités génie civil et génie climatique) et d'étudiants en architecture encadrée par des enseignants spécialisés en génie climatique et énergétique et d'architectes a pu travailler en synergie sur les différents aspects de la construction. Cet échange a permis d'observer la nécessaire collaboration des différentes parties. En effet, les étudiants ont montré que chacun, selon sa formation n'aurait pu aboutir à un résultat, à cause de la diversité et de l'abondance de données à fournir pour qu'un logiciel aboutisse à un résultat, les données impliquant tant systèmes constructifs que la connaissance des matériaux.

## 5.2. Dimension architecturale

Le diagnostic architectural permet de poser les questions liées à l'esthétique du bâtiment, aux aspects du bâtiments à conserver ou non, mais comporte également une analyse fonctionnelle. Lors de cette analyse, chaque fonction du bâtiment est recensée, puis caractérisée, classée et valorisée. Parallèlement, une analyse des rythmes et des usages est proposée, bien au-delà du taux d'occupation défini.

Une première analyse a été proposée à des équipes mixtes d'étudiants en architecture et ingénieurs en génie climatique sur une durée limitée (une semaine) pour réfléchir à la conception d'une façade performante d'un point de vue énergétique pour un bâtiment existant qu'ils connaissent bien, celui de leur école.

Cette première expérience a mis en évidence des procédés innovants de façades non détaillés ici, mais également l'absence de données concernant certains aspects du bâtiment : des données sociales, les spécificités architecturales (matériaux prédominants de remplissage, surface vitrées/façade par époque, hauteur sous plafond, nature des éléments porteurs verticaux), hypothèses sur les améliorations existantes.

En l'absence de diagnostic technique plus approfondi sur le bâtiment de l'INSA, un projet global a ensuite été proposé à des équipes mixtes d'étudiants en architecture/ingénieurs en génie climatique. Ce projet est mené en deux temps : dans un premier temps, les projets sont élaborés en équipe réduite de 4 étudiants maximum, puis seuls les projets jugés les plus intéressants par un jury pluridisciplinaire sont repris et approfondis par des équipes élargies. Les équipes participant à la seconde étape sont composées de 8 personnes ou plus. S'il ressort de cette expérience une grande majorité de projets proposant une enveloppe autorisant à la fois une protection thermique par rapport aux déperditions et une protection solaire sur les façades les plus exposées, on peut constater que l'effet du « diagnostic » architectural a mis en évidence la volonté de conserver l'identité du bâtiment et plus particulièrement les rythmes imposées par la trame des ouvrants existant (voir figures 1 et 2).

## 5.3. Dimension humaine

L'étude de deux écoles maternelles effectuée par le laboratoire TREFLE a mis en évidence également l'importance du facteur humain et du rôle des usagers. En guise de conclusion, un bâtiment plus grand, conçu dans le cadre d'une démarche HQE en 2002 n'est pas plus performant sur certains critères définis par Mme Mandallena pour des raisons de gestion insuffisante des bâtiments, ainsi qu'une méconnaissance des systèmes mis à disposition dans les bâtiments (résultats d'enquête [8]). « La formation et la sensibilisation des acteurs de la vie du bâtiment sont incontournables pour parvenir à des résultats environnementaux conformes aux objectifs de réduction d'émission vers l'environnement. »

Fort de ces constatations, l'accent est mis sur la connaissance des attentes et des pratiques des usagers et des gestionnaires des bâtiments.

L'enquête auprès des usagers qui sera menée en deux temps significatifs portera sur les points suivants, avec une distinction suivant que les personnes interrogées soient des étudiants, des enseignants ou des personnels administratifs :

- perception du confort des locaux, avec une différenciation entre les salles de cours et amphithéâtres et les bureaux ou locaux techniques ;
- perception et connaissance du système de chauffage du bâtiment (température, répartition de la température, mode de chauffage) ;
- perception de la luminosité (confort, usage des lumières naturelles et artificielles, qualité des ouvrants et des occultations) ;
- gestion de l'eau, de l'électricité ;
- confort acoustique des différents locaux par rapport à l'égalité de la perception sonore de cours, l'audibilité des orateurs, le niveau sonore des salles de cours et autres locaux, l'isolation par rapport au bruit extérieur ;
- la perception de l'occupation des locaux : par rapport à un taux d'occupation moyen (de l'ordre de pour rappel), comment les usagers perçoivent-ils leur espace de travail ? Ce critère doit renseigner la qualité de l'organisation des espaces, reflétant peut-être des inégalités entre les catégories d'usagers ou des perceptions évolutives en fonction de la durée de fréquentation des locaux (fréquence annuelle ou durée sur plusieurs années) ;
- ressenti par rapport au bâtiment : que préférez-vous dans l'école ?

Les deux périodes d'enquêtes correspondent à deux périodes climatiques différentes (mars et juin).

## 6. CONCLUSIONS

On constate que le champ d'investigation de cette étude est vaste, bien que limité aux bâtiments d'enseignement supérieur et de la recherche. La complexité de cette étude tient essentiellement à l'absence de données sur ce parc immobilier, et à la complexité des démarches d'amélioration liée au système de gestion de ce parc.

La démarche proposée est donc expérimentée à une échelle locale, avec une collaboration d'étudiants issus de diffé-



## Projet Energie Renouvelable: Réhabilitation du bâtiment A de l'INSA

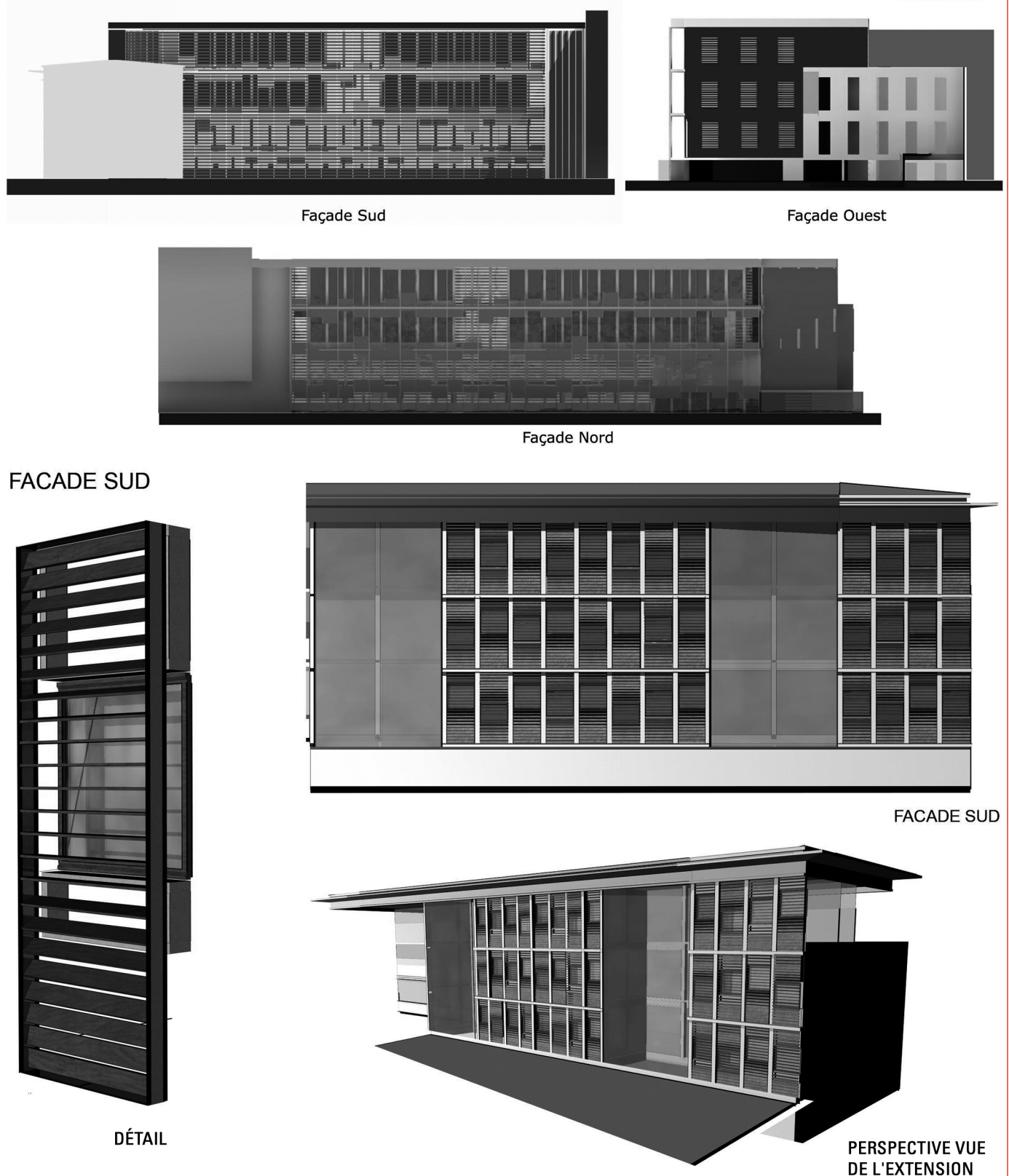


Figure 2: Projet de réhabilitation de l'INSA.

rentes filières sur un thème commun, celui de la rénovation des bâtiments de l'INSA de Strasbourg. L'objectif est d'apporter une réponse complémentaire aux méthodes d'évaluation de la qualité environnementale ou encore des émissions de carbone. En résumé, l'intégration de

ce type de méthode à une démarche plus globale comprenant des aspects techniques, architecturaux et humains permet d'aboutir à des propositions plus satisfaisantes, puisqu'elles permettent de répondre dans le même processus aux attentes et pratiques des usagers et des gestionnaires.

## 7. RÉFÉRENCES

- [1] **Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche**, 2008, « Parc immobilier et capacité d'accueil des établissements publics du second degré », Note d'information 08.04
- [2] **Girault M.**, mars-avril 2001, « le parc immobilier du secteur tertiaire », Notes de synthèse du SES
- [3] **Mandallena C., Lagière P., Puiggali J.-R.**, 23-25 mai 2007, « Évaluation et amélioration des performances environnementales d'un bâtiment tertiaire en exploitation », 25<sup>e</sup> rencontres de l'AUGC
- [4] **Jourda H.**, 2004-2005, « Réflexion sur le développement durable, le développement de la ville », Annales du cycle de conférences « L'Esquisse verte », ADEME-ARENE
- [5] **Pica Ciamarra M.**, « l'esquisse verte », conférence novembre 2004 à juin 2005
- [6] **Gueyffier M.-F.**, avril 2006, PUCA/état des lieux des bâtiments existants
- [7] **Flament, B. & Jakubik J.**, 2007, Un exemple de formation commune architectes/ingénieurs-Enseigner l'architecture dans une école d'ingénieurs, Strasbourg: INSAS, pp. 7-17.
- [8] **Mandallena C.**, 2006, « Évaluation de la qualité environnementale de bâtiments d'enseignement/ résumé du rapport scientifique de la campagne de mesures et des résultats de l'étude sur l'école maternelle Bellegrave », DDRT Aquitaine

# EXPLOITATION D'UNE CONCESSION AUTOROUTIÈRE À FORTES EXIGENCES DE PERFORMANCE : MAÎTRISE DES COÛTS DU RISQUE ASSOCIÉ

**Laurent AUGÉ, Isadora CORNISH-BOWDEN, Bruno GÉRARD**  
Oxand France, 49 avenue Franklin Roosevelt, 77210 Avon  
**Richard FRENETTE**  
Oxand Canada

## 1. INTRODUCTION

**L**a gestion dans le temps des infrastructures de génie civil, aux différents stades de leur cycle de vie (conception, construction, exploitation, démantèlement), est une problématique à laquelle doit faire face tout maître d'ouvrage ou gestionnaire d'actifs. Même si la sécurité des biens et des personnes revêt un caractère primordial et prioritaire dans ce domaine, une bonne gestion des ouvrages ne répond pas moins à de fortes exigences de performance économique. Pour chaque ouvrage, les enjeux d'une bonne gestion peuvent se décliner de différentes manières pour chacun des acteurs (maître d'ouvrage, exploitant, commanditaire...), en fonction de l'organisation et la répartition de responsabilité entre ceux-ci. Dans ce contexte se développe actuellement de plus en plus la gestion des risques appliquée à la gestion des infrastructures de génie civil [1]. Elle fournit un cadre permettant une meilleure définition des responsabilités et des budgets, tout en fiabilisant l'identification des causes de dérives ou d'incidents. Elle permet notamment de gérer l'importance croissante du vieillissement de l'état des infrastructures, en proposant une priorisation des actions. De plus, il se dessine également aujourd'hui une tendance justifiée à l'approche globale de la gestion du cycle de vie des infrastructures, c'est-à-dire à une optimisation sur le long

terme des performances économiques des projets. Un révélateur de cette tendance est le développement actuel des projets intégrés de conception, construction, financement, exploitation et maintenance (CCFEM) d'infrastructures de transport (réseaux autoroutiers, ouvrages d'art, tunnels...), pour lesquelles la vision de la gestion de l'actif sur l'ensemble de son cycle de vie est nécessaire dès la phase de conception du projet.

## 2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

L'étude présentée concerne la concession d'un réseau autoroutier européen (Pays-Bas) pour lequel le contractant devra assurer l'ensemble du projet intégré de conception, construction, financement, maintenance et exploitation sur les trente prochaines années. Un appel d'offres a été lancé par l'autorité publique pour confier à un contractant privé l'exploitation de la concession autoroutière. De tels projets se développent de plus en plus dans le monde aujourd'hui (Viaduc de Millau en France, Projet « Sea to Sky » en Colombie Britannique, autoroute 30 au Québec).

Afin de garantir la disponibilité du réseau, la sécurité et la qualité pour les usagers, un système de pénalités a été instauré à l'initiative de l'autorité publique, dans le but d'inciter fortement le contractant à se prémunir de tout écart

par rapport aux objectifs de performance, ainsi qu'à prévoir un budget pour le financement des risques associés. La qualité de la réponse des soumissionnaires consultés a notamment été appréciée à partir de leurs propositions sur ce point. Le système de pénalités a pour but en particulier de minimiser les indisponibilités du réseau. Etant donné les amendes importantes imposées au contractant en cas de non-respect des critères de disponibilité, le contractant fait face à un risque potentiel fort associé aux indisponibilités fortuites, et ce malgré les précautions déjà prises pour fiabiliser l'exploitation. Un des soumissionnaires a ainsi consulté OXAND en phase de constitution de son offre pour obtenir une évaluation financière du risque associé aux indisponibilités fortuites. Son besoin principal était de prévoir et planifier la prise en charge de ce risque et d'expliquer sa position au client public (répartition des responsabilités, financement, acteurs, organisation,...).

### 3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif principal de l'étude était de permettre au contractant, en phase de réponse à appel d'offres, de provisionner le coût du risque associé aux indisponibilités du réseau autoroutier. Les indisponibilités peuvent être de deux natures différentes : programmées ou fortuites. Les indisponibilités programmées correspondent aux prévisions d'intervention pour maintenance programmée. Les indisponibilités fortuites sont celles qui sont non-prévues et qui dépassent les limites pré-définies. Comme celles-ci peuvent survenir en marge d'un programme d'exploitation et de maintenance optimisé pour justement les réduire au minimum, on parle ainsi de risque résiduel. Tout l'enjeu de l'étude consistait donc à évaluer le risque résiduel associé aux indisponibilités fortuites.

En particulier, il s'agissait de :

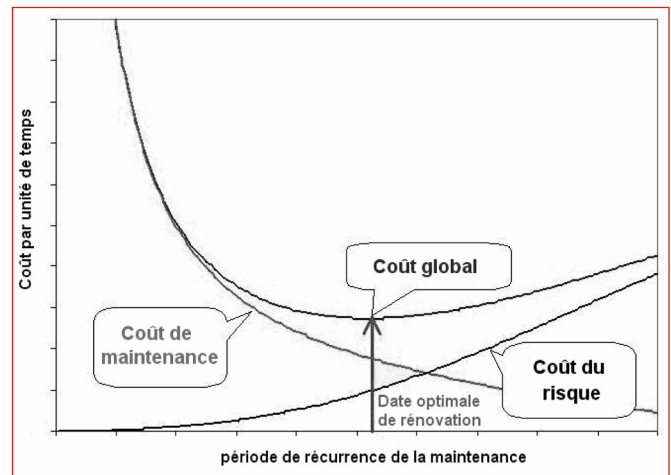
- identifier et estimer les risques :
  - fréquence d'occurrence : identifier les mécanismes de vieillissement susceptibles de remettre en cause les critères de disponibilité, évaluer leur cinétique, établir les probabilités de défaillance associées ;
  - gravité : identifier les scénarios de pénalités applicables et leur modalité d'application ;
- monétiser les risques, c'est-à-dire chiffrer financièrement le montant des risques ;
- caractériser l'évolution de ce risque chiffré quantitativement sur les trente années d'exploitation. Ceci permet de savoir combien et à quelles échéances provisionner pour le risque.

Une seconde phase à cette étude avait comme objectif l'optimisation globale des coûts prévisionnels d'exploitation rapportés à la totalité de la durée d'exploitation. Les coûts totaux d'exploitation comprennent :

- les coûts de construction, en fonction du dimensionnement retenu ;
- les coûts de maintenance sur l'ensemble de la durée de la concession ;
- les coûts d'exploitation sur l'ensemble de la durée de la concession ;

- le coût du risque associé aux indisponibilités.

L'étude a permis de faire correspondre un risque résiduel chiffré financièrement, relatif aux indisponibilités fortuites, à une série de scénarios concernant la qualité du design et les niveaux de maintenance mis en œuvre. Il est aisé de comprendre que plus les choix de design sont robustes ou plus la maintenance mise en œuvre est importante, plus le risque résiduel sera faible, et inversement. Par conséquent, le choix définitif des hypothèses de design et de maintenance relève d'une démarche de recherche d'optimum, visant à minimiser les coûts totaux du projet de concession. La Figure 1 illustre ce propos.



**Figure 1 : Coûts totaux (coûts de la maintenance + coût du risque) en fonction du niveau de maintenance mis en œuvre (période entre deux opérations de maintenance).**

### 4. DESCRIPTION DE L'INFRASTRUCTURE ÉTUDIÉE

Le tracé autoroutier étudié est l'une des connexions majeures aux Pays-Bas entre Amsterdam et la région située au nord du canal de la Mer du Nord, ce qui le rend particulièrement stratégique. Il est constitué d'un réseau autoroutier d'environ 15 km et datant d'une quarantaine d'années qui relie 3 autoroutes et permet de traverser le canal par l'intermédiaire d'un tunnel immergé d'une longueur d'environ 600 m.

Le tunnel existant est formé de deux tubes à circulation unidirectionnelle à deux voies par direction, occasionnant un rétrécissement sévère de la circulation. Il est devenu clair ces dernières années que la capacité de l'ouvrage était devenue insuffisante par rapport au trafic croissant, estimé à 100 000 véhicules par jour. Compte-tenu de ce besoin, la décision de construire un nouveau tracé parallèle à l'ancien a été prise par le Ministère des Transports des Pays-Bas, avec l'ajout d'un tunnel supplémentaire à deux tubes (Figure 2), le premier permettant de désengorger le réseau en doublant les capacités du tunnel actuel, et le second permettant d'ajouter 2 voies supplémentaires dans un sens ou dans l'autre lors des heures de pointe. Le tracé final atteindra alors une longueur cumulée proche de 50 km.



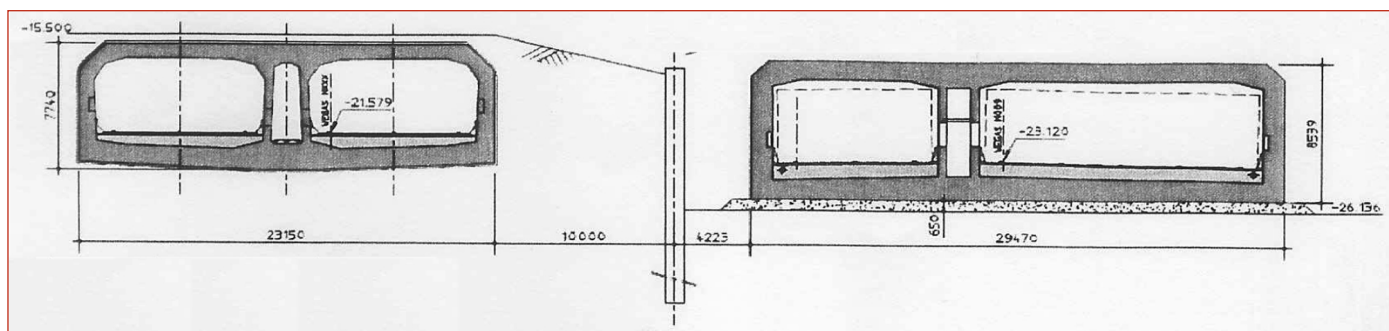


Figure 2: Système étudié : ancien et nouveau tunnels.

L'étude concernait non seulement le génie civil des ouvrages mais également tous les équipements, le tunnel de secours situé entre les tubes de circulation de véhicules et le système de surveillance et de gestion dont sont dotés les tunnels.

## 5. EXIGENCES DE PERFORMANCE DE L'INFRASTRUCTURE

La construction de ce nouveau tracé a donné lieu à un appel d'offre de type CCFEM (Conception, Construction, Financement, Exploitation et Maintenance). A la suite de la construction qui devrait s'étaler sur 4 ans et qui comprend la rénovation du tracé existant, le contractant aura également la charge d'exploiter et de maintenir l'ensemble du réseau pendant 30 ans et d'assurer que l'Etat pourra ensuite continuer son exploitation pendant une durée similaire. Le paiement du contractant au cours de l'exploitation se fera par l'Etat sur la base du niveau de disponibilité réel. Toute indisponibilité est considérée par l'Etat comme pénalisante pour les usagers du réseau et impacte alors très fortement la rémunération du contractant par l'intermédiaire de pénalités très élevées, de l'ordre du million d'euros par journée d'indisponibilité non prévue.

Le nombre élevé d'usagers journaliers rend toute indisponibilité du tracé très critique. Pour éviter au maximum que le tracé subisse constamment des opérations de maintenance, le contrat de construction et d'exploitation comprenait une clause de pénalité pour indisponibilité ainsi que des critères de qualité et de confort à respecter. Ces pénalités particulièrement élevées s'appliquent dès lors que ces critères de qualité ne sont pas respectés.

Ainsi une trentaine d'exigences de fonctionnement (Tableau 1) étaient définies dans les spécifications techniques depuis la qualité de la chaussée (rugosité, drainage, ...) jusqu'au fonctionnement correct des équipements de sécurité, notamment à l'intérieur du tunnel (éclairage, ventilation, signalisations lumineuses...). Pour chacun de ces critères et au-delà d'un certain niveau de défaillance des équipements (ex : nombre de lumières éteintes) ou de dégradation de la chaussée (ex : temps de drainage des eaux de pluie), une maintenance est imposée et le tronçon sur lequel se produit la défaillance est considéré comme étant indisponible, déclenchant alors ces pénalités.

Le montant de la pénalité appliquée dépend de plusieurs paramètres, notamment de la durée de l'indisponibilité

(nombre de quarts d'heure), du tronçon sur lequel elle se produit, du nombre de voies fermées par rapport au nombre de voies qui restent ouvertes à la circulation, et du moment de la journée (heure de pointe, heure creuse, nuit), mais aussi de la date de l'indisponibilité (pendant la construction ou la rénovation des tracés, ou pendant leur exploitation). Ces pénalités peuvent rapidement atteindre plusieurs millions d'euros.

Une parade possible contre ces pénalités est d'anticiper les défaillances et de planifier les actions de maintenance avant qu'elles soient imposées. L'exploitant du système dispose en effet de 35 nuits/an d'indisponibilité autorisée pour maintenance pendant lesquelles les pénalités ne sont pas appliquées. L'enjeu pour le contractant est alors de trouver l'optimum de son programme de maintenance entre l'anticipation des travaux qui permet d'éviter les indisponibilités fortuites et leur report qui permet d'éviter la multiplication des actions de maintenance. Il doit également prendre en considération le fait que les indisponibilités fortuites ont généralement une durée allongée par le « temps de réaction » et de sollicitation des équipes.

A ces pénalités concernant le confort des usagers du tracé s'ajoute également un autre système de « points de pénalité » relatif à l'état général des tunnels (génie civil) et à la qualité générale de la prestation vis-à-vis du client (Ministère des Transports des Pays-Bas). Ces points sanctionnent en particulier les retards d'information concernant les indisponibilités fortuites et les délais importants d'intervention pour réparer. Dans cette optique, l'ajout d'un deuxième tunnel a posé la problématique de sa construction à côté d'un tunnel existant sans en impacter la disponibilité. Une étude des risques liés à cette construction a également été menée par OXAND.

## 6. MÉTHODOLOGIE EMPLOYÉE

L'objectif de l'étude était d'évaluer financièrement le risque associé aux pénalités induites par les indisponibilités fortuites du système. Une analyse préliminaire des exigences de fonctionnement du système a mis en évidence le fait que certaines de ces exigences étaient plus critiques que d'autres. Cette criticité préliminaire a été estimée sur la base d'une dizaine de critères tels que :

- la possibilité d'anticiper la défaillance ;
- la fréquence de défaillance prévue ;
- la complexité de la remise en conformité (durée de la maintenance et temps nécessaire pour la préparer) ;

Catégorie principale	Catégorie	Description
Sécurité (tunnels)	Gestion d'accident	Lutte contre les incendies
		Fonctionnement des postes de secours
		Fonctionnement du système de ventilation du tunnel
		Présence d'une surpression dans le tunnel de secours
		Fonctionnement des barrières mécaniques de fermeture des voies
	Eclairage	Fonctionnement de l'éclairage dans les tunnels
	Evacuation	Fonctionnement de l'éclairage du tunnel de secours
		Fonctionnement des signaux lumineux indiquant les chemins d'évacuation et la localisation des extincteurs
		Accès aux tunnels de secours
		Guidage lumineux de l'évacuation
Gestion du trafic	Evacuation/ communication	Fonctionnement du signal d'alerte sonore
		Fonctionnement du système de sonorisation
	Communication	Fonctionnement du système de surveillance et de gestion
		Possibilité de communication entre les services de secours et l'utilisateur
	Communication	Fonctionnement de la signalisation
	Signalisation des ralentissements	Fonctionnement des détecteurs de trafic
	Regulation	Fonctionnement des détecteurs de hauteur de véhicules
		Fonctionnement de la signalisation spéciale
Sécurité (générale)	Chaussée	Rugosité de la surface
		Dévers transversal de la surface
		Erosion des rainures
		Uniformité longitudinale de la surface
		Régularité longitudinale au niveau des joints de dilatation
		Capacité de drainage de l'eau de la couche de surface
		Accumulation eau
	Guidage	Dégradation de la couche supérieure de la chaussée
		Fonctionnement des barrières de sécurité
		Fonctionnement du système d'assainissement
	Drainage des substances	Fonctionnement du revêtement résistant à la chaleur
		Signalisation de la hauteur sous plafond et largeur des voies

**Tableau 1 : Critères de qualité et de confort à respecter par le réseau.**

- la possibilité de fractionner les actions de maintenance de manière à limiter son impact sur la disponibilité ;
- le coût de la pénalité liée au non respect de l'exigence
- etc.

Cinq exigences principales sont ressorties de cette première analyse comme pilotant le risque pendant toute la durée d'exploitation ou comme représentatives de l'ensemble en termes d'impact financier et de type de défaillance (deux exigences relatives à la qualité de la chaussée, et trois exigences liées aux équipements) :

- rugosité de la chaussée ;
- accumulation d'eau sur la chaussée ;
- fonctionnement du système de ventilation dans les tunnels ;
- fonctionnement des détecteurs de trafic ;
- fonctionnement du système de surveillance et de gestion (salle de contrôle).

Le risque d'indisponibilité évalué financièrement à travers les pénalités encourues a alors été calculé précisément pour ces cinq exigences dans un premier temps et extrapolé à l'ensemble dans un second temps.

La démarche adoptée pour l'étude de l'indisponibilité liée à un problème de rugosité de la chaussée et à une défaillance de ventilateurs est présentée ci-dessous. De

manière générale, la probabilité d'une défaillance au cours du temps a été calculée dans un premier temps sur la base du retour d'expérience d'OXAND et des données du constructeur sur les divers équipements considérés. La probabilité de la défaillance a ensuite permis de déterminer la probabilité cumulée d'une défaillance pendant la période de concession de 30 ans.

La valeur chiffrée globale du risque de pénalité a ensuite été estimée pour chacun des tronçons en considérant ses spécificités en termes de date de construction (tronçon nouveau ou rénové), de montant de la pénalité et de probabilité de défaillance compte tenu de sa longueur et la durée estimée pour remettre le système en conformité suite à une défaillance fortuite.

## 6.1. Rugosité de la chaussée

Cette exigence consiste à définir une rugosité (coefficient de frottement) minimale afin de garantir une bonne adhérence des véhicules sur la chaussée.

La surface des chaussées du réseau sera fabriquée à partir de deux types d'asphalte selon sa localisation, un béton de type ZOAB (béton bitumineux drainant) à l'extérieur des

tunnels pour permettre l'évacuation des eaux de pluies à travers la chaussée, et un béton de type DAB (béton bitumineux dense) à l'intérieur des tunnels. Ces deux types d'asphalte possèdent des propriétés de rugosité et des cinétiques de vieillissement différentes, ce qui implique des probabilités de défaillance (non respect de l'exigence) différentes au cours du temps. Ces deux asphaltes ont donc été traités séparément. L'exemple qui suit présente les résultats obtenus pour l'étude du béton drainant ZOAB. En règle générale, la rugosité d'une chaussée augmente au cours de la première année d'exploitation dû à l'érosion progressive du liant autour des granulats, qui deviennent alors plus saillants. Ainsi, le coefficient de frottement initial peut être relativement bas et la probabilité de non respect de l'exigence de rugosité est alors non-nulle. Lorsque le liant présent en surface a disparu, le coefficient de frottement commence à diminuer de nouveau du fait du polissage des granulats et se stabilise après environ 5 ans. La probabilité de défaillance augmente alors pendant cette période, jusqu'à la rénovation de surface de la chaussée prévue tous les 10 à 13 ans par le constructeur, permettant de pallier également les autres dégradations telles que formation de nids de caillou ou orniérage (critique notamment du point de vue de l'évacuation rapide des eaux de pluie). Le coût probabilisé des pénalités présenté dans la Figure 5 a été calculé en fonction du nombre de voies qui seraient

impactées par l'indisponibilité et en tenant compte des spécificités de chaussée des différents tronçons.

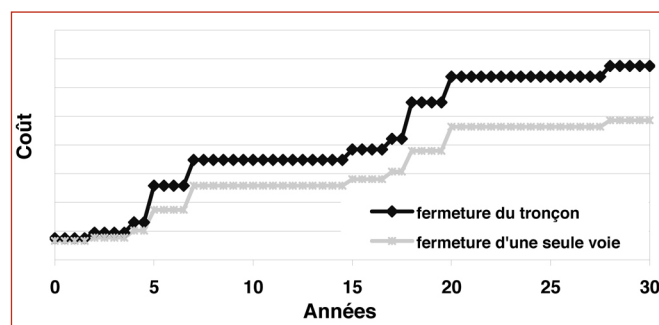


Figure 5: Coût probabilisé cumulé des pénalités d'indisponibilité dues à une trop faible rugosité de la chaussée.

## 6.2. Fonctionnement du système de ventilation dans les tunnels

Pour les équipements, la probabilité de défaillance a été déterminée d'après les données des constructeurs en utilisant une loi de type Weibull, souvent utilisée pour prédire et modéliser les durées de vie.

La loi de probabilité pour chacun des composants a été calée sur la base des durées de vie prévues (périodicités de remplacement prévues), des moyennes des temps entre pannes (*MTBF* : *mean time between failures*) fournies par les constructeurs, et des durées de vie utiles au cours desquelles une défaillance est très peu probable.

Dans le cas des ventilateurs, on considère la combinaison des probabilités de défaillance des ventilateurs eux-mêmes (usure des hélices) et des composants électroniques et électriques qui les alimentent (Figure 6).

Cette exigence n'est valable qu'au niveau des tunnels, et le risque de pénalité n'a donc été pris en compte que pour ces tronçons là.

Pour calculer le coût probable des pénalités, plusieurs choix de conception étaient possibles et notamment une possible redondance des ventilateurs était envisagée (Figure 7).

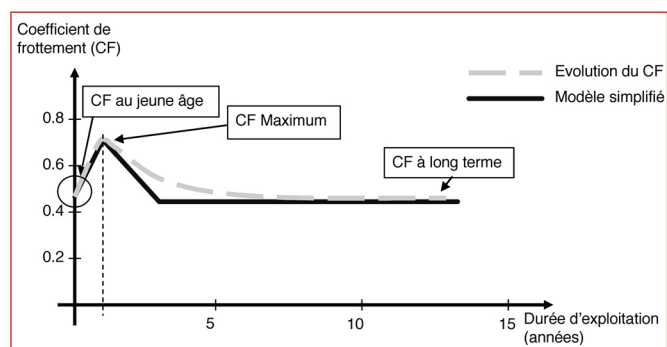


Figure 3: Évolution de la rugosité de l'asphalte dans le temps (valeur moyenne).

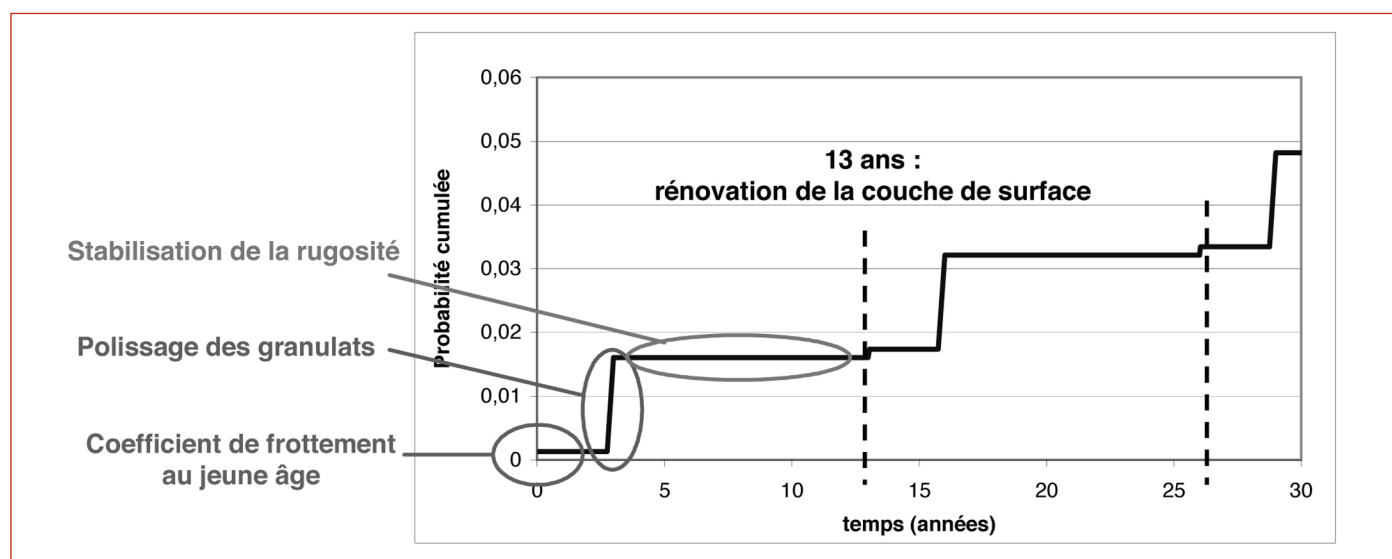


Figure 4: Probabilité cumulée d'une indisponibilité liée à la rugosité de la chaussée de type ZOAB.

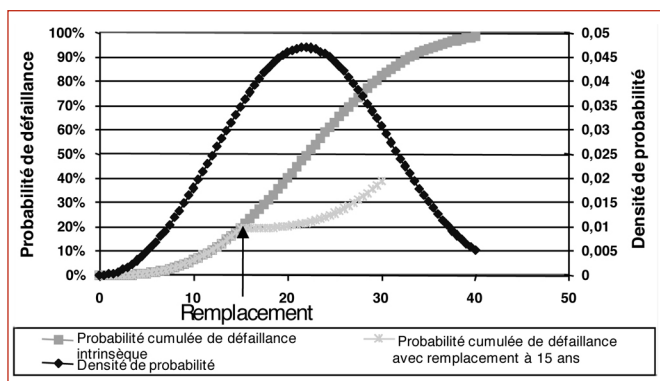


Figure 6: Probabilité de défaillance d'un ventilateur (hors composants électroniques).

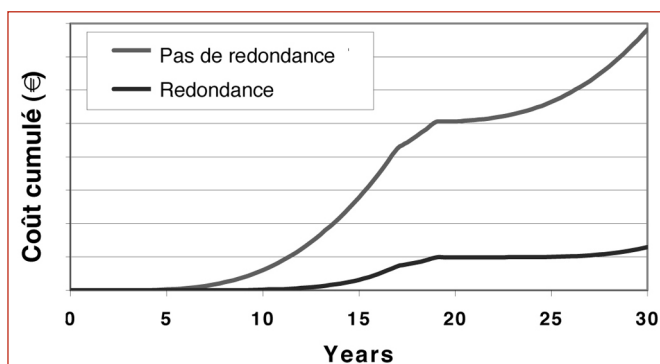


Figure 7: Valeur chiffrée cumulée dans le temps du risque résiduel d'indisponibilité liée à une défaillance de ventilateurs en fonction du choix de conception.

## 7. RÉSULTATS OBTENUS

L'approche adoptée a permis de traduire financièrement les risques d'indisponibilité liés aux exigences de performance du réseau en termes de qualité et de confort pour les usagers sur toute la période de la concession depuis la construction des nouveaux tronçons jusqu'à la fin d'exploitation. Pour chacune de ces exigences, le cumul des pénalités peut être déterminé, ce qui permet ensuite de déduire le coût total des pénalités liées au risque résiduel d'indisponibilités compte tenu des actions de maintenance prévues.

Le calcul du montant total probabilisé de pénalités d'indisponibilité a également permis de valider des choix de conception en déterminant l'optimum entre une conception

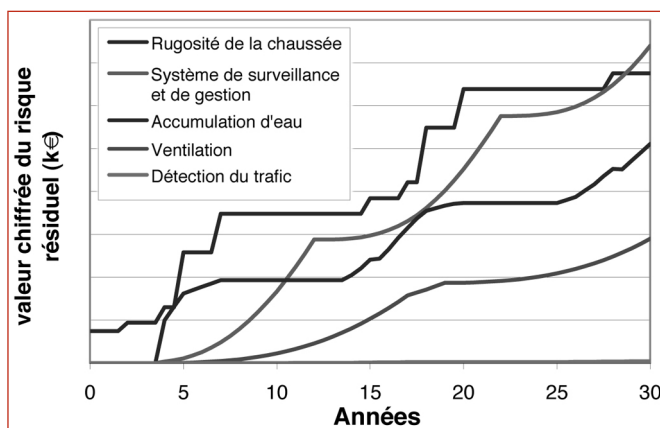


Figure 8: Valeur chiffrée cumulée dans le temps du risque résiduel d'indisponibilité pour chacune des 5 exigences analysées.

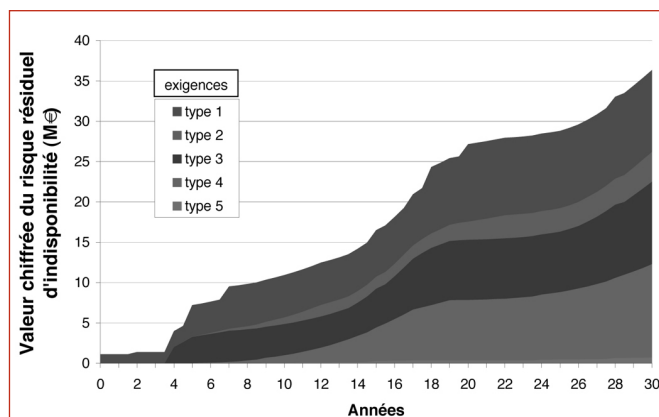


Figure 9: Valeur chiffrée cumulée dans le temps du risque résiduel global associé aux indisponibilités fortuites du tracé.

entraînant moins d'indisponibilités mais plus coûteuse (ex : redondance des systèmes) et le gain apporté par cette solution en termes de coût du risque associé à ces pénalités. De la même manière, le risque résiduel chiffré financièrement a également été calculé en considérant différentes périodicité de maintenance.

En fin d'étude, le client a obtenu une estimation probabilisée des pénalités qu'il aurait à payer avec sa répartition sur les 30 années d'exploitation. Cela lui a permis de connaître les périodes où la maintenance préventive serait à prévoir pour éviter des « pics » de défaillance.

## 8. COMMENTAIRES DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus permettent au contractant de disposer de la visibilité quantitative nécessaire sur le risque résiduel associé aux indisponibilités fortuites du réseau autoroutier. De plus, la connaissance de sa répartition dans le temps dans les trente prochaines années rend possible la programmation des budgets dans le temps.

La valeur obtenue, de l'ordre de 35 M€ sur trente ans, soit une moyenne proche de 1 M€ par an, semble importante en comparaison de l'ordre de grandeur du coût total du projet, d'environ 500 M€. Ce résultat est lié au montant très élevé des amendes en cas de non-respect des critères de disponibilité.

En connaissance de ce chiffre, le contractant a pu provisionner une somme destinée à prendre en charge le coût de ce risque. Dès lors, le contenu de l'offre financière soumise au client (l'autorité publique) a pu être commenté de manière transparente, ce qui a permis de cadrer les discussions sur la définition des responsabilités de chaque partie. En particulier, sur cette base ont pu être définis les modes de financement du risque, les risques qui étaient à la charge du contractant et les risques qui étaient à la charge de l'autorité publique.

Il apparaît ainsi que le bénéfice de ce type d'approche globale de la gestion du cycle de vie des infrastructures s'applique aussi bien au maître d'ouvrage, ou propriétaire, commanditaire, qu'au maître d'œuvre, ou exploitant, ou contractant. En effet, dans de nombreux projets, l'organisation en place autour d'une infrastructure s'articule à partir d'une dualité. A titre d'exemple :



- propriétaire / maître d'ouvrage délégué ;
- maître d'ouvrage / exploitant ;
- Special Purpose Company (SPC)/Engineering, Procurement and Construction (EPC) ; ...

Dans tous les cas, les gains de l'approche proposée sont les suivants :

- définition claire des objectifs de performance et des critères et indicateurs associés ;
- répartition claire des responsabilités de chaque partie ;
- transparence sur les risques identifiés et sur leur mode de prise en charge (qui est responsable ? quelles actions de gestion des risques à mettre en œuvre ?) ;
- défense argumentée des budgets par les parties ;
- optimisation des coûts totaux des projets d'infrastructures, rapportés à l'ensemble du cycle de vie ;
- prise en compte et préservation des enjeux propres à chacune des parties ;
- surveillance et maintenance des infrastructures par les risques, c'est-à-dire pilotées par la double considération des causes des mécanismes de vieillissement et des

enjeux impactés, selon les parties et les horizons temporels examinés.

Un aspect important de l'approche est sa capacité à faire l'adéquation entre les choix à court terme (conception, méthodes de construction), les enjeux de court terme (ex : disponibilité au jour le jour), et les implications à long terme de ces choix (coût de la maintenance sur l'ouvrage vieilli, état de l'ouvrage en fin de durée d'exploitation contractuelle...) de même que les enjeux de long terme (maintien en l'état du patrimoine, gestion durable...).

## 9. RÉFÉRENCES

- [1] Gestion durable des infrastructures par les risques : aide à la décision en génie civil, R. Frenette, B. Gérard, O. Bernard, XIV<sup>e</sup> colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 2007

# **ÉTUDE COMPARATIVE SOMMAIRE DES PONTS EN BÉTON ET DES PONTS MIXTES EN TERMES D'ÉNERGIE CONSOMMÉE ET D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE**

---

**Serge MONTENS**  
SYSTRA

---

## **1. INTRODUCTION**

**L**e domaine de la construction représente une part importante des activités humaines en termes d'énergie consommée et d'émission de gaz à effet de serre (GES).

Ainsi on estime qu'en France, et plus généralement en Europe, le secteur du BTP consomme 37 % de l'énergie totale. Environ 15 % de cette énergie (soit 5,5 % de l'énergie totale) sert à la construction des bâtiments et des ouvrages, les 85 % restants servant à leur utilisation (éclairage, chauffage, climatisation,...). Sur ces 5,5 %, 4 % sont consommés pour la production du ciment et de l'acier. C'est dire que 73 % de l'énergie consommée par la construction sont utilisés pour la production des matériaux de base : le ciment et l'acier.

En ce qui concerne les gaz à effet de serre, le BTP représente 40 % des gaz à effet de serre émis par l'homme.

La production de ciment à elle seule en représente 5 % et la production d'acier 6 % ([4]).

Le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, demande aux pays industrialisés de diminuer de 5,2 % leurs émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2012. L'Europe s'est engagée sur une valeur plus forte : 8 %.

Comment prendre en compte le concept de développement durable pour un ingénieur de structures de génie civil ? Le programme de l'opération d'infrastructure étant fixé par le maître d'ouvrage, le bureau d'études ne peut prendre en compte ce concept qu'au travers de la conception de la structure. Le choix des matériaux de construction fait partie de cette liberté qui reste à l'ingénieur de structures.

Nous nous intéresserons à deux indicateurs environnementaux : la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. Ces dernières contribuent au réchauffement climatique. Elles sont exprimées habituellement en kilogramme équivalent CO<sub>2</sub>. Tous les gaz n'ont pas le même effet de serre. Ainsi 1 kg de méthane contribue 21 fois plus à l'effet de serre que 1 kg de CO<sub>2</sub>.

La présente étude ne prétend pas établir des conclusions définitives dans ce domaine en plein défrichage. Elle représente plutôt une première approche, destinée à sensibiliser l'ingénieur de structures :

- aux ordres de grandeur qui sont en jeu ;
- aux sources d'informations disponibles ;
- et aux méthodes d'évaluation envisageables.

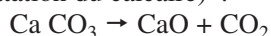
## 2. QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

### 2.1. Production du ciment et de l'acier

La production d'une tonne de ciment consomme une énergie d'environ 4 GJ, dépensée en grande partie par le chauffage du calcaire.

La production d'une tonne de ciment entraîne l'émission d'environ 0,7 tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> ([12]).

40 % sont émis par le chauffage du calcaire (four à 1500°C), et 60 % sont émis par la réaction chimique suivante (décarbonatation du calcaire) :



La considération des masses atomiques (56 pour CaO et 44 pour CO<sub>2</sub>) permet de vérifier l'ordre de grandeur de l'émission de CO<sub>2</sub> par rapport au calcaire consommé. Alors que la part due au chauffage peut être optimisée, celle due à la réaction chimique est bien sûr intangible.

La production d'acier demande une énergie d'environ 21 GJ par tonne.

L'émission de gaz à effet de serre est quant à elle d'environ 1,3 tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> par tonne d'acier.

Il faut signaler les progrès réalisés, à la fois par les sidérurgistes et les cimentiers, pour diminuer l'énergie consommée et l'émission de gaz à effet de serre.

Lafarge par exemple s'est fixée un objectif de réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre par tonne de ciment, de 20 % entre 1990 et 2010 ([12]).

Dans la sidérurgie européenne, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre ont diminué de 50 % au cours des 30 dernières années. Les émissions de gaz à effet de serre par les sites de production Arcelor en Europe ont diminué de 18 % entre 1990 et 2004, malgré une production plus importante.

Ainsi, les ratios cités ci-dessus évoluent chaque année.

### 2.2. Indices d'efficacité environnementale des matériaux

On connaît les indices d'efficacité structurelle des matériaux, encore appelés «résistances spécifiques». Il s'agit de la résistance du matériau divisée par sa masse volumique. La comparaison entre le béton et l'acier permet de montrer que l'on a intérêt à utiliser l'acier pour les ponts de grande portée car l'acier a une résistance spécifique plus élevée que le béton.

Nous définissons de même une efficacité environnementale des matériaux en comparant leurs indicateurs environnementaux à résistance égale.

Considérons un béton armé contenant 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment et 150 kg/m<sup>3</sup> de ferraille.

Sa consommation d'énergie sera, en utilisant les valeurs indiquées plus haut :

$$0,35 \times 4 + 0,15 \times 21 = 4,6 \text{ GJ/m}^3$$

Son émission de gaz à effet de serre sera de même :

$$0,35 \times 0,7 + 0,15 \times 1,3 = 0,44 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$$

Pour l'acier nous avons :

- consommation d'énergie  $21 \times 7,85 = 164 \text{ GJ/m}^3$
- émission de gaz à effet de serre  $1,3 \times 7,85 = 10,2 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$

Comparons d'abord l'efficacité en compression. Prenons un acier S355 et un béton B35. Le rapport de leurs contraintes admissibles à l'ELS est  $(355/1,4)/(0,6 \times 35) = 12$

Les valeurs environnementales par m<sup>3</sup> de l'acier doivent donc être divisées par 12 pour être comparées à celle du béton, à résistance en compression égale. On trouve ainsi :

- consommation d'énergie  $164/12 = 14 \text{ GJ/m}^3$  pour l'acier comparé à 4,6 GJ/m<sup>3</sup> pour le béton armé, soit 3 fois plus,
- émission de gaz à effet de serre  $10,2/12 = 0,85 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$  pour l'acier comparé à 0,44 t d'équivalent CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> pour le béton armé, soit 1,9 fois plus (tableau 1).

Comparons maintenant l'efficacité en cisaillement. Le rapport des contraintes admissibles à l'ELS est  $(0,6 \times 355/1,4)/3 = 50$

Les valeurs environnementales par m<sup>3</sup> de l'acier doivent donc être divisées par 50 pour être comparées à celle du béton, à résistance en compression égale. On trouve ainsi :

- consommation d'énergie  $164/50 = 3,3 \text{ GJ/m}^3$  pour l'acier comparé à 4,6 GJ/m<sup>3</sup> pour le béton armé, soit 0,72 fois la valeur du béton armé,
- émission de gaz à effet de serre  $10,2/50 = 0,2 \text{ t d'équivalent CO}_2/\text{m}^3$  pour l'acier comparé à 0,44 t d'équivalent CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> pour le béton armé, soit 0,45 fois la valeur du béton armé (tableau 1).

Mode de travail	Indicateur environnemental	Béton armé	Acier	Rapport Acier / Béton armé
Compression	Énergie	4,6 GJ/m <sup>3</sup>	14 GJ/m <sup>3</sup>	3,00
	Equ. CO <sub>2</sub>	0,44 t/m <sup>3</sup>	0,85 t/m <sup>3</sup>	1,90
Cisaillement	Énergie	4,6 GJ/m <sup>3</sup>	3,3 GJ/m <sup>3</sup>	0,72
	Equ. CO <sub>2</sub>	0,44 t/m <sup>3</sup>	0,2 t/m <sup>3</sup>	0,45

Tableau 1: Efficacité environnementale à résistance équivalente, rapportée à celle du béton armé.

Ainsi, d'un point de vue théorique, à résistance égale, le béton est plus efficace environnementalement que l'acier en compression, alors que c'est l'inverse en cisaillement. Notons bien qu'il s'agit ici de valeurs théoriques. Des contraintes diverses de conception des structures font qu'il n'est en général pas possible d'utiliser les matériaux au mieux de leur capacité en tout point de la structure. Le voilement par cisaillement des tôles par exemple, impose des épaisseurs minimales souvent bien supérieures aux épaisseurs théoriquement nécessaires.

## 3. SOURCES D'INFORMATION

### 3.1. Fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES)

Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire représentent un format de présentation commun des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction ([1]). Elles sont élaborées suivant une norme :

Fiche	Unité fonctionnelle	Volume	Ratio de ferrailage	Auteur
Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	1 ml de poutre 35 × 20 cm de portée 6,40 m	0,07 m³	129 kg/m³	SNBPE
Poutre en béton BAP (CEM I)	1 ml de poutre 35 × 20 cm de portée 6,40 m	0,07 m³	129 kg/m³	SNBPE
Poutre en béton précontraint	1 ml de poutre 35 x 20 cm de portée 6,40 m	0,07 m³	?	FIB – CERIB
Poutrelle en acier	1 ml de poutrelle IPE 360 en acier S 235 de portée 12 m	0,0073 m³	–	CONSTRUIRACIER

Tableau 2: Fiches utilisées.

Fiche	Consommation d'énergie primaire		Émissions de gaz à effet de serre	
	Valeur par unité fonctionnelle	Valeur par m³	Valeur par unité fonctionnelle	Valeur par m³
Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	186 MJ	2 740 MJ	19,5 kg équ. CO <sub>2</sub>	279 kg équ. CO <sub>2</sub>
Poutre en béton BAP (CEM I)	240 MJ	3 380 MJ	27,9 kg équ. CO <sub>2</sub>	399 kg équ. CO <sub>2</sub>
Poutre en béton précontraint	380 MJ	5 430 MJ	33 kg équ. CO <sub>2</sub>	471 kg équ. CO <sub>2</sub>
Poutrelle en acier	1 220 MJ	167 100 MJ	75.1 kg équ. CO <sub>2</sub>	10 300 kg équ. CO <sub>2</sub>

Tableau 3: Données extraites des fiches.

NF P 01-010 ([8]). Elles sont réalisées par les fabricants sur la base du volontariat.

Les caractéristiques environnementales découlent d'une analyse du cycle de vie (ACV) du produit selon la norme ISO 14040. Une analyse de cycle de vie consiste à calculer l'ensemble des impacts environnementaux (consommation énergétique, émission de gaz à effet de serre, déchets, etc.) générés tout au long du cycle de vie du produit (du berceau à la tombe), et rapportés à une durée de vie typique (DVT) du produit. Les caractéristiques sont évaluées pour une «unité fonctionnelle» (par exemple 1 ml de poutre).

Les phases du cycle de vie sont :

- production,
- transport,
- mise en œuvre,
- vie en œuvre,
- fin de vie.

Une liste des fiches existantes est tenue à jour par l'AIMCC (Association des Industries de Produits de Construction) : [www.aimcc.org](http://www.aimcc.org). Il en existe actuellement 201. Elles couvrent les domaines suivants : couverture – étanchéité, maçonnerie, façades, isolation – doublage, cloisons – plafonds, revêtements de sol, revêtements de murs, menuiseries, gouttières, canalisations, mortiers industriels, produits préfabriqués en béton, profilés PVC.

Les fiches figurent dans une base de données officielle, publique et gratuite: la base INIES : [www.inies.fr](http://www.inies.fr).

Il existe deux formats de fiche : fiche complète et fiche résumée. Une fiche complète fait parfois 31 pages, et compte jusqu'à 745 valeurs numériques non nulles ! En effet, les fiches couvrent de nombreux aspects: consommation de ressources naturelles énergétiques et indicateurs

énergétiques, consommation de ressources naturelles non énergétiques, consommation d'eau, consommation d'énergie et de matière récupérées, émissions dans l'air, émissions dans l'eau, émissions dans le sol, déchets valorisés, déchets éliminés, impacts environnementaux représentatifs des produits de construction, informations utiles à l'évaluation des risques sanitaires, contribution du produit à la qualité de vie à l'intérieur des bâtiments, écogestion du bâtiment, préoccupation économique, politique environnementale globale, définition du système d'ACV, sources de données, traçabilité.

Pour la présente étude, quatre fiches sont utilisables (tableau 2):

- poutre en béton XF1 C25/30 CEM II (septembre 2007),
- poutre en béton BAP (septembre 2007),
- poutre en béton précontraint (décembre 2005),
- poutrelle en acier (décembre 2007).

La poutrelle métallique comporte des connecteurs soudés, et des trous pour un assemblage par boulonnage. La protection anti-corrosion n'est pas comprise.

Les données utiles pour notre étude sont la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre (tableau 3).

Les valeurs très différentes obtenues par m³ pour le béton et l'acier ne peuvent pas être comparées directement car une section de 1 m² d'acier a évidemment une résistance bien supérieure à une section de 1 m² de béton.

Les FDES donnent la décomposition des impacts environnementaux selon les différentes phases du cycle de vie. Elles ne donnent malheureusement pas dans ce cas les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub>, mais les émissions pour chaque gaz. Nous considérerons les émissions de CO<sub>2</sub> lui-même car c'est ce gaz qui apparaît prépondérant.

Phase	Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	Poutre en béton BAP (CEM I)	Poutre en béton précontraint	Poutrelle en acier
Production	124	191	332	1 200
Transport	5,3	5,3	25,5	17
Mise en œuvre	42	28,2	2,9	0
Fin de vie	14,5	14,6	19,1	2
<b>Total</b>	<b>186</b>	<b>240</b>	<b>380</b>	<b>1 220</b>

Tableau 4: Énergie primaire consommée par phase (en MJ par unité fonctionnelle).



Phase	Poutre en béton XF1 C25/30 CEM II	Poutre en béton BAP (CEM I)	Poutre en béton précontraint	Poutrelle en acier
Production	14,5	23,8	28,2	71,5
Transport	0,4	0,4	1,9	1,3
Mise en œuvre	3,2	2,3	0,28	0
Fin de vie	1,0	1,1	1,5	0,2
<b>Total</b>	<b>19,2</b>	<b>27,5</b>	<b>31,9</b>	<b>73</b>

Tableau 5: Émissions de CO<sub>2</sub> par phase (en kg par unité fonctionnelle).

On observe que (tableaux 4 et 5):

- les phases de production représentent 67 à 98 % du total pour la consommation d'énergie, et 75 à 98 % du total pour les émissions de CO<sub>2</sub>,
- la phase de mise en œuvre d'une poutrelle en acier a un impact négligeable,
- le total des phases de production et de mise en œuvre représente 88 à 98 % du total pour la consommation d'énergie, et 89 à 98 % du total pour les émissions de CO<sub>2</sub>.

Le transport représente entre 2 et 6 % du total.

Même si l'on sous-estime d'un facteur 2 le transport, on ne se trompe donc que de 2 à 6 % sur le total.

### 3.2. Autres sources

La base de données européenne intitulée ODYSSEE existe depuis 16 ans. Elle est gérée par L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) dans le cadre du programme SAVE de la Commission Européenne.

Elle donne des ratios technico-économiques. Ceux-ci établissent une relation entre la consommation d'énergie ou les émissions de gaz à effet de serre, et un indicateur d'activité mesurée en termes physiques: litre de carburant ou gramme de CO<sub>2</sub> par kilomètre-véhicule, tonnes-équivalent-pétrole ou tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment, kWh ou gramme de CO<sub>2</sub> par réfrigérateur ou par logement. Cette base de données est payante. Nous ne l'avons pas utilisée.

## 4. COMPARAISON DES PONTS EN BÉTON ET DES PONTS MIXTES

### 4.1. Cas étudié

Nous allons comparer la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre correspondant à un pont autoroutier à 2 voies dont le tablier a une largeur totale de 9,75 m, les piles une hauteur de 10 m, avec des pieux forés de 15 m de longueur. Nous ferons varier la portée de 30 m à 110 m.

Deux solutions techniques de tablier seront examinées : tablier en caisson en béton précontraint, et tablier bipoutre mixte acier-béton. Les quantités de béton et de charpente métallique des tabliers seront estimées à l'aide des formules du SETRA.

Les ratios de ferrailage utilisés seront les suivants :

- tablier en béton précontraint : 150 kg/m<sup>3</sup> d'acier passif et 40 kg/m<sup>3</sup> d'acier de précontrainte;

- tablier mixte : 200 kg/m<sup>3</sup> d'acier passif;
- piles : 120 kg/m<sup>3</sup> d'acier passif;
- semelles : 140 kg/m<sup>3</sup> d'acier passif;
- pieux : 100 kg/m<sup>3</sup> d'acier passif.

Nous avons considéré que le dimensionnement des piles et fondations n'était pas gouverné par les efforts horizontaux.

### 4.2. Utilisation des FDES

Les FDES ont été établies pour des poutres de bâtiment, et non pour des ouvrages d'art.

Il manque des renseignements importants sur les FDES pour pouvoir faire des extrapolations.

Le dosage en ciment du béton n'est pas mentionné. Or celui-ci est, parmi les constituants du béton, le principal consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre.

Les quantités d'acier passif et d'acier de précontrainte de la poutre précontrainte ne sont pas indiquées.

Les distances de transport ne sont pas toujours explicitées. Cependant nous avons fait l'exercice en utilisant :

- la poutre en béton précontraint pour le tablier en béton précontraint;
- la poutre en béton XF1 C25/30 CEM II pour le béton du tablier mixte et pour les appuis;
- la poutrelle métallique pour la charpente du tablier mixte.

Ceci est imparfait puisque le taux de ferrailage n'intervient pas explicitement.

Nous avons ramené les résultats à 1 mètre linéaire de pont (tableau 6).

Portée (m)	Pont en béton		Pont mixte	
	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO <sub>2</sub> )	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO <sub>2</sub> )
30	31,8	2,86	33,7	2,47
40	33,9	3,04	38,4	2,76
50	35,9	3,22	43,4	3,07
60	38,0	3,40	48,8	3,41
70	40,0	3,58	54,4	3,76
80	42,0	3,76	60,3	4,13
90	44,1	3,95	66,4	4,51
100	46,1	4,13	72,7	4,90
110	48,2	4,31	79,2	5,31

Tableau 6: Impacts environnementaux calculés pour 1 ml de pont à 2 voies avec les FDES.

On constate que le pont mixte consomme toujours plus d'énergie que le pont en béton précontraint, et ceci d'autant plus que la portée est grande.

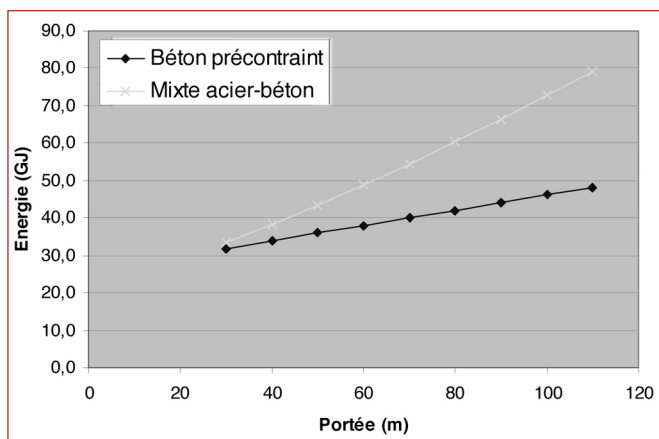


Figure 1: Énergie consommée par ml de pont.

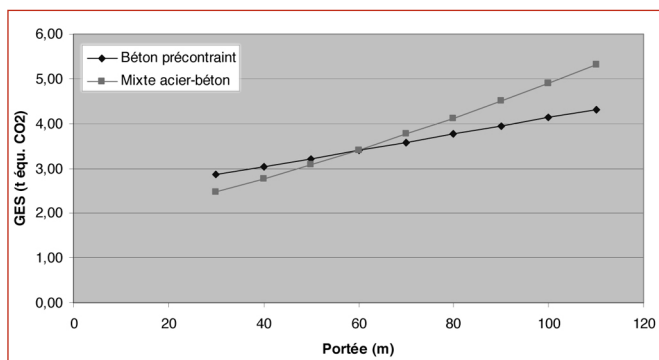


Figure 2: Émissions de GES par ml de pont.

On constate aussi que les ponts mixtes de faible portée émettent un peu moins de gaz à effet de serre que les ponts en béton précontraint.

N'oublions pas que nous avons considéré que le dimensionnement des appuis ne dépendait pas des charges horizontales. Si c'est le cas (vent ou séisme importants), le volume de béton des appuis augmentera, et la différence d'impact environnemental entre le pont béton et le pont mixte diminuera. Si on se ramène au m<sup>2</sup> de tablier, on peut retenir comme ordres de grandeur :

- consommation d'énergie : 3 à 8 MJ/m<sup>2</sup> ;
- émission de gaz à effet de serre : 300 à 500 kg équ. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

### 4.3. Utilisation de valeurs simplifiées

Les FDES n'étant pas adaptées aux ouvrages d'art, et difficilement adaptables du fait du manque de certains renseignements comme expliqué ci-dessus, nous avons essayé également de faire un calcul plus direct, basé sur les indicateurs environnementaux globaux correspondant à la **production des matériaux**. En effet, nous avons montré ci-dessus que les phases de production et mise en œuvre correspondent à 88 % à 98 % du total. Il n'est donc pas injustifié de considérer, en première approximation, ces seules phases. Les résultats ne devront pas être considérés comme des valeurs absolues, mais pourront être comparés de manière relative.

Nous avons ainsi utilisé les valeurs suivantes, déduites des données de base du § 2.1 :

- Béton précontraint : 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment  
→  $0,35 \times 4 = 1,4 \text{ GJ/m}^3$   
→  $0,35 \times 0,7 = 0,25 \text{ t équ. CO}_2/\text{m}^3$
- Autres bétons : 300 kg/m<sup>3</sup> de ciment  
→  $0,3 \times 4 = 1,2 \text{ GJ/m}^3$   
→  $0,3 \times 0,7 = 0,21 \text{ t équ. CO}_2/\text{m}^3$
- Acier : 21 GJ/t  
1,3 t équ. CO<sub>2</sub>/t

Élément	Énergie	GES
Béton précontraint	1,4 GJ/m <sup>3</sup>	0,25 t équ. CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Béton pour tablier mixte	1,2 GJ/m <sup>3</sup>	0,21 t équ. CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Béton pour appuis	1,2 GJ/m <sup>3</sup>	0,21 t équ. CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Acier pour béton	21 GJ/t	1,3 t équ. CO <sub>2</sub> /t
Acier de charpente	21 GJ/t	1,3 t équ. CO <sub>2</sub> /t

Tableau 7: Indicateurs environnementaux élémentaires considérés.

Nous avons donc refait les calculs avec ces données (tableau 7). Cette fois, le taux de ferrailage intervient explicitement, alors que le transport n'intervient pas.

Portée (m)	Pont en béton		Pont mixte	
	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO <sub>2</sub> )	Énergie (GJ)	GES (t équ. CO <sub>2</sub> )
30	33,6	3,15	40,8	2,99
40	35,7	3,34	45,5	3,28
50	37,8	3,54	50,6	3,60
60	39,9	3,74	56,0	3,93
70	42,0	3,93	61,6	4,28
80	44,2	4,13	67,5	4,65
90	46,3	4,33	73,7	5,03
100	48,4	4,52	80,0	5,43
110	50,5	4,72	86,5	5,84

Tableau 8: Impacts environnementaux calculés pour 1 ml de pont à 2 voies avec les valeurs simplifiées.

On observe (tableau 8) que toutes les valeurs sont légèrement supérieures à celle obtenues à partir des FDES, mais dans des proportions assez faibles. Ceci confirme le fait que la production des matériaux de base est l'élément dominant des impacts environnementaux. De plus, on peut faire exactement les mêmes comparaisons entre le pont en béton précontraint et le pont mixte.

### 4.4. Comparaison avec les effets du trafic

On objectera peut-être que les gaz à effet de serre émis pour la construction du pont sont négligeables par rapport à ceux qui résulteront du trafic passant sur l'ouvrage pendant 50 ans. Un petit calcul va nous donner les ordres de grandeur.

Considérons un trafic moyen de 6000 véhicules par jour par voie, avec 10 % de poids lourds. L'émission de gaz à effet de serre est de 145 g/km pour une voiture et 800 g/km pour un poids lourd. L'émission totale en 50 ans correspondant au passage des véhicules sur 1 ml de pont est donc :

$$(0,145 \times 6\,000 + 0,8 \times 6\,000 \times 0,1) \times 365 \times 50 = 25 \text{ t équ. CO}_2 \text{ par voie.}$$

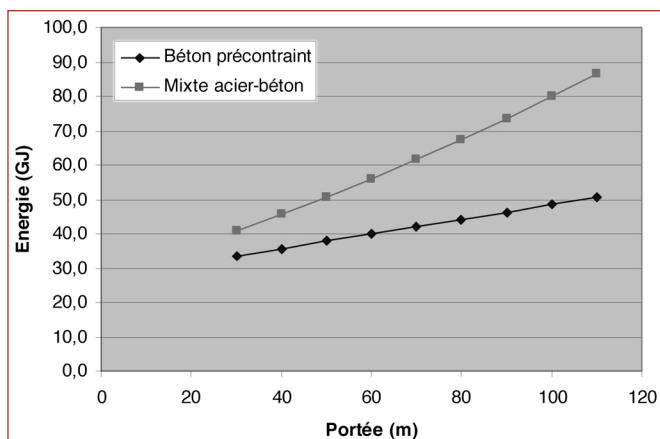


Figure 3: Énergie consommée par ml de pont.

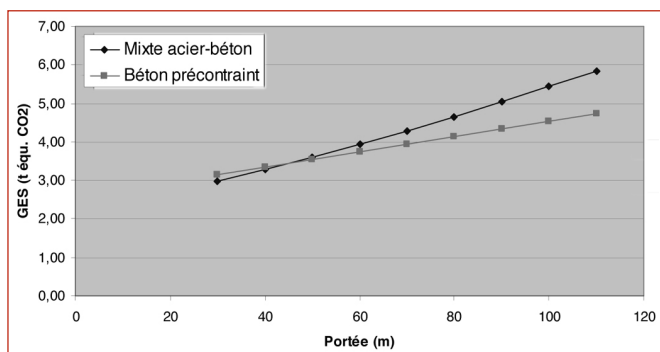


Figure 4: Émissions de GES par ml de pont.

D'après le tableau ci-dessus l'émission de gaz à effet de serre pour la construction d'un ml d'un pont en béton de 100 m de portée est de 4,52 t équ. CO<sub>2</sub> pour le pont à 2 voies étudié, soit 2,3 t équ. CO<sub>2</sub> par voie, ce qui représente 9,2 % de l'émission due au trafic pendant 50 ans. C'est peu mais cela n'est pas négligeable, surtout compte tenu du fait que les émissions de gaz à effet de serre des véhicules de demain seront probablement nettement plus faibles que celles d'aujourd'hui.

## 5. CONCLUSIONS

### 5.1. Observations

Les FDES publiées à ce jour concernant des produits de construction pour le bâtiment, sont insuffisantes pour permettre une extrapolation fiable aux ouvrages d'art.

Cependant, si on se contente d'ordres de grandeur, un calcul simplifié utilisant les valeurs de base correspondant à la production des matériaux pourrait être suffisant. On observe en effet que les phases de production et de mise en œuvre représentent 88 % à 98 % des effets totaux.

Sous réserve de toutes les approximations faites, on constate que le pont mixte consomme plus d'énergie que le pont en béton précontraint, et ceci d'autant plus que la portée est grande.

On constate aussi que les ponts mixtes de faible portée émettent un peu moins de gaz à effet de serre que les ponts

en béton précontraint, et que c'est l'inverse pour les ponts de grande portée.

Il faut garder à l'esprit que de nombreuses données intervenant dans ces calculs sont fluctuantes, du fait de l'évolution des techniques de fabrication du ciment et de l'acier ([6]).

### 5.2. Propositions

Pour faire des études d'impact environnemental de différentes variantes de ponts, il serait bien de pouvoir disposer des valeurs de base des impacts environnementaux (énergie consommée et émission de gaz à effet de serre) pour les éléments de base qu'utilise l'ingénieur structures, c'est-à-dire pour :

- un m<sup>3</sup> de béton de tel ou tel dosage en ciment de tel ou tel type,
- une tonne de ferrailage passif de telle ou telle nuance,
- une tonne d'acier de précontrainte,
- une tonne d'acier de charpente de telle ou telle nuance, et le cas échéant de tel ou tel type (poutre, caisson, treillis) si celui-ci a une influence,

Chaque valeur pourrait être affectée d'un correctif, fonction de la distance de transport effectuée.

Un groupe de travail de l'AFGC pourrait établir, d'une part un document de vulgarisation de ces concepts à l'intention des ingénieurs en génie civil, d'autre part une méthodologie simplifiée de calcul des impacts environnementaux applicable aux ouvrages d'art.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Ponthier P.**, Les fiches de déclarations environnementale et sanitaire (FDES) des produits de construction : présentation, validation et utilisation, GC'2007, AFGC.
- [2] **Dalsheimer J.**, Qualité environnementale des produits de construction : la norme NF P 01-010 et son application à des produits en acier, GC'2007, AFGC.
- [3] **Bodet R.**, Certification des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction : application aux produits en béton, GC'2007, AFGC.
- [4] **Chaturvedi S., Ochsendorf J.**, Global environmental impact due to cement and steel, Structural Engineering International, August 2004.
- [5] **Meyer C.**, Concrete materials and sustainable development in the USA, Structural Engineering International, August 2004.
- [6] **Dalsheimer J., Vigo J.M.**, Développement durable et génie civil, les atouts de l'acier, OTUA.
- [7] Rapport de développement durable 2007, Lafarge.
- [8] Norme NF P 01-010 « Qualité environnementale des produits de construction – Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction »
- [9] [www.odyssee-indicators.org](http://www.odyssee-indicators.org)
- [10] [www.aimcc.org](http://www.aimcc.org)
- [11] [www.inies.fr](http://www.inies.fr)
- [12] [www.lafarge.fr](http://www.lafarge.fr)

# **DÉCONSTRUCTION ET RÉGÉNÉRATION DES GRANDS OUVRAGES MÉTALLIQUES DU PATRIMOINE FERROVIAIRE**

---

**Patrice SCHMITT, Michel TRIQUET**  
SNCF – Direction de l'Ingénierie

---

## **1. LES OUVRAGES D'ART DU PATRIMOINE FERROVIAIRE**

**L**e réseau ferré national exploité comprend plus de 50 000 ouvrages d'art de tous types et de tous âges. Parmi ceux-ci, il existe un grand nombre de tabliers métalliques, matériau qui a été largement employé dès les origines du chemin de fer, notamment pour franchir les plus grandes portées, requises en particulier au-dessus des fleuves. Certains ouvrages sont aujourd'hui célèbres, tels que le viaduc de Garabit sur la Truyère ou la « Passerelle » sur la Garonne à Bordeaux et leur réalisation est associée à de grands noms tels que Gustave Eiffel. Leur construction a souvent été l'occasion de véritables prouesses techniques, voire d'innovations en fonction des contraintes imposées par le site.

### **1.1. Des ouvrages anciens constitués de matériaux divers**

Les grands ouvrages d'art métalliques du réseau ferré datent pour la plupart de l'époque de construction des lignes, c'est-à-dire des années 1860 à 1910.

Au cours de ces années, les techniques de construction, de même que les matériaux ont fortement évolué. Les tous premiers ouvrages étaient en fonte, puis rapidement, on employa de préférence un métal dénommé « fer puddlé », avant l'avènement de l'acier, qui connut lui-même de fortes améliorations successives en terme de qualité (acier doux - acier moderne).

Le patrimoine des ouvrages du réseau ferré est distribué de la manière suivante (cf. figure 1).

En fonction de leurs matériaux constitutifs, le comportement des structures est profondément différent. En plus d'un fort accroissement de limite élastique, la différence essentielle entre le fer puddlé et l'acier réside dans le fait que le premier est caractérisé par un comportement essentiellement fragile, alors que l'acier est ductile en condition normale d'utilisation. Le fer puddlé est de plus caractérisé par une grande anisotropie.

De ce fait, les matériaux constitutifs des ouvrages ont une influence directe sur leur sécurité rémanente en fonction de leur état. Ils déterminent également les techniques envisageables pour leur réparation et leur déconstruction.



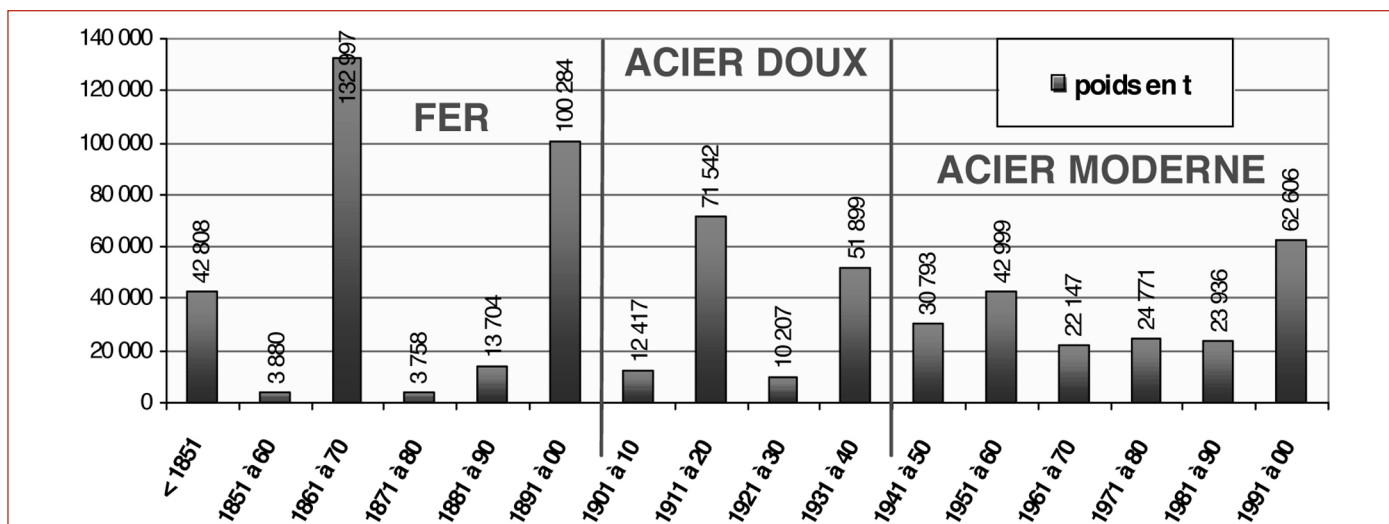


Figure 1.

## 1.2. Des ouvrages à la vie mouvementée

Durant leurs 100 à 150 ans d'existence, les ouvrages ont été exposés à diverses vicissitudes liées aux modifications de leur environnement, par accident ou par faits de guerre :

- élargissement ou allongement,
- affouillement et instabilité de certains appuis en rivière,
- modification d'appuis par exemple à l'occasion de la création d'une route sous l'ouvrage,
- insuffisance d'entretien, notamment de réfection de la protection anti-corrosion,
- déraillements de trains sur ouvrage,
- réparations ponctuelles et localisées avec substitutions de pièces ou renforcement,
- bombardements et relevage consécutifs,
- etc.

Les archives conservées font parfois état de ces événements, mais elles ne sont pas forcément disponibles ni exhaustives pour tous les ouvrages.

L'ouvrage franchissant la Seine à Oissel est représentatif des aléas qu'ont connus ces ouvrages durant les guerres notamment, où ils ont été fréquemment bombardés, puis relevés dans l'urgence et hâtivement consolidés pour faire face aux besoins de transport liés à la reconstruction. L'ouvrage de Oissel, pour sa part a été endommagé et relevé deux fois au cours de la guerre 1939-1945.

Les déraillements sur les ouvrages peuvent également avoir des conséquences considérables : une suite rapide (convoi ferroviaire utilisé pour les travaux de voies) a en effet déraillé le 24 juillet 2006 sur le pont franchissant le Rhône à Culoz, dont les travaux de remplacement étaient engagés, provoquant des dégâts très importants. La réparation de ces avaries aurait été extrêmement délicate.

Dans le passé certains déraillements ont parfois provoqué l'effondrement de certains ouvrages.

Toutes les vicissitudes qui ont ponctué l'histoire des ouvrages ont une influence directe sur leur état et leur comportement. En effet, toute modification de la structure (renforcement, diminution de section, modification de schéma statique) provoque inévitablement une redistribution des efforts de telle sorte que le fonctionnement ultérieur des

ouvrages n'est pas forcément totalement identique à celui prévu à l'origine.

Les événements accidentels (bombardement, déraillement, etc.) notamment, et les réparations consécutives de ces structures généralement hyperstatiques provoquent l'emprisonnement de contraintes internes, qu'il est très difficile

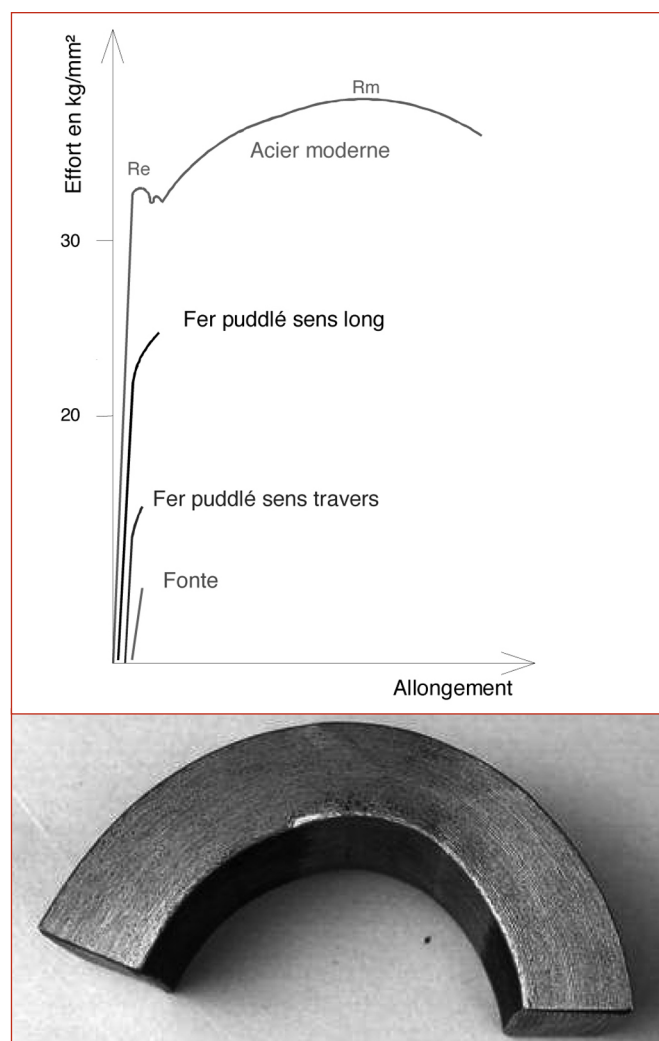


Figure 2: Essai de pliage d'acier moderne.

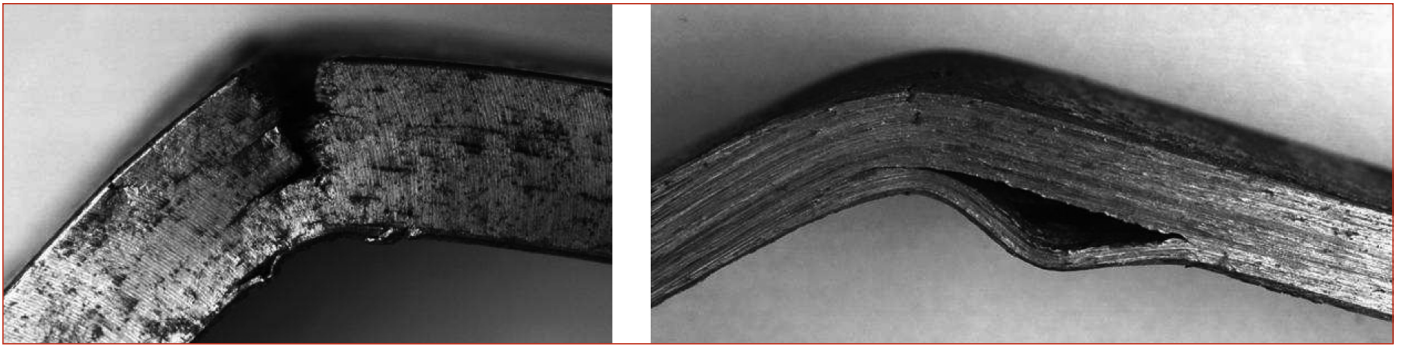


Figure 3: Essais de pliage de fer puddé.

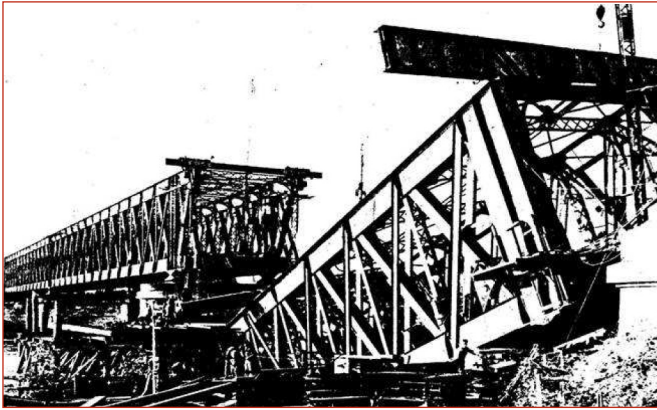


Figure 4: 1940: une travée effondrée, relevée et réparée en 1940-1941.



Figure 6: Déraillement sur le pont de Culoz en 2006.



Figure 5: 1944 : ouvrage bombardé par les alliés.



Figure 7: Effet d'un déraillement sur un tablier en fer puddé (Pont sur la Baise).

d'estimer, mais qui ont une influence directe sur leur capacité portante et leur durée de vie résiduelle.

## 2. LA RÉGÉNÉRATION DES OUVRAGES ET SES CONTRAINTES

Les grands ouvrages d'art anciens étant en général structurants pour le réseau ferré, ils font aujourd'hui l'objet d'une surveillance attentive, débouchant sur des travaux réguliers d'entretien ou de réparation. La politique actuelle prévoit que lorsque l'état des structures l'impose leur remplacement est programmé et réalisé à courte ou moyenne échéance.

### 2.1. Les pathologies des ouvrages métalliques

Les pathologies affectant les anciens ouvrages métalliques sont souvent dues aux phénomènes suivants :

- corrosion affectant des zones localisées ou généralisée ;
- fatigue consécutive au passage répété des convois ferroviaires.

L'état de corrosion de certains ouvrages est préoccupant, du fait de la non-réfection de la protection anti-corrosion pendant de longues périodes, pour des raisons budgétaires ou du fait des difficultés d'intervention sur certaines structures (ouvrages à treillis, éléments petits et multiples, contraintes environnementales, etc.). La corrosion conduit parfois à de sérieuses réductions de sections, diminuant sensiblement la capacité de résistance des sections concernées.



La fatigue se manifeste soit par l'apparition de fissures dans les éléments soit par la déconsolidation de certains assemblages, en particuliers rivetés. Elle apparaît au bout d'un certain nombre de cycles de chargement, en fonction des variations de contraintes locales provoquées par ces chargements. En ce qui concerne les ponts ferroviaires, on estime que la majeure part de l'endommagement en fatigue est due aux circulations entre 1945 et nos jours, du fait de l'augmentation du poids à l'essieu, conjugué à une densification du trafic.



Figure 8: Exemple de fissure de fatigue.



Figure 9: Exemple de corrosion de semelle.

## 2.2. La politique de régénération

Afin de garantir la sécurité des circulations, RFF et la SNCF procèdent régulièrement à des travaux, appelés «régénération» sur les ouvrages métalliques anciens. Lorsqu'elles restent localisées, les pathologies constatées sur les ouvrages lors des inspections périodiques sont réparées. Lorsque les avaries sont généralisées et que le potentiel de la ligne justifie de gros investissements, le remplacement de tout ou partie de l'ouvrage est programmé. Cependant, même dans ce cas, il est parfois nécessaire de réaliser des opérations de confortement sur l'ouvrage en attente de son remplacement, en raison des délais importants entre le moment où la décision de remplacement est prise et la mise en service du nouvel ouvrage effective.



Figure 10: Remplacement de rivets.



Figure 11: Réalisation d'une triplure.

La SNCF dispose d'équipes spécialement dédiées à la réparation des ponts métalliques, dénommées «équipes RPM». Ces équipes sont capables entre autres de remplacer des éléments isolés au sein d'une charpente, de réaliser la triplure de certains plats métalliques, ou de remplacer des rivets déconsolidés.

## 2.3. Les contraintes de réalisation des travaux

En ce qui concerne les grands ouvrages, une campagne massive de remplacement a été initiée dans les années 1990 et se poursuit à raison en moyenne d'une ou deux opérations par an. Ces chantiers demandent une grande préparation, car ils sont sensibles et soumis à de très fortes contraintes spécifiques :

- la nécessité de limiter la gêne occasionnée à l'exploitation : les ouvrages concernés étant en général stratégiques, toute interruption de circulation pour cause de travaux a des conséquences très importantes sur la gestion des circulations. Aussi, les plages travaux doivent être programmées plusieurs années à l'avance. En cours de chantier, il est très difficile de déroger aux plages qui ont été déterminées, ce qui signifie que lorsqu'un week-end ou une nuit d'interruption sont nécessaires, il est impératif de s'organiser pour respecter les dates prévues parfois quatre ans à l'avance ;
- l'environnement des ouvrages : la plupart de ces ouvrages sont des ouvrages urbains, ce qui complexifie l'organisation des travaux et la gestion du chantier. L'emprise disponible est alors généralement très

réduite, et de fortes contraintes relatives au bruit ou à la circulation des engins s'appliquent ;

- le classement en monument historique de certains ouvrages (exemple : la passerelle de Bordeaux), ce qui limite les possibilités d'intervention sur ces ouvrages ;
- l'état d'endommagement et les matériaux constitutifs de certains tabliers (fer puddlé notamment) qui imposent des précautions particulières pour toute intervention et a fortiori leur déconstruction.

### 3. LES SOLUTIONS DE RÉGÉNÉRATIONS – EXEMPLES

La réalisation de travaux de grande envergure et notamment les opérations de remplacement de tablier ou d'ouvrage complet constitue une problématique spécifique du réseau ferré, qui demande des solutions originales et adaptées à chaque contexte. L'enjeu principal, outre la maîtrise des coûts, est avant tout la limitation des perturbations générées pour le trafic ferroviaire.

Il est extrêmement rare de pouvoir bénéficier d'une coupure longue (c'est-à-dire de plusieurs mois) pour réaliser ces opérations. Par conséquent, il est souvent fait appel à des solutions particulières telles que :

- réalisation d'une déviation provisoire,
- mise sur appuis provisoires,
- réalisation de soutènements et de blindages provisoires,
- opération de ripage, de roulage, de grutage, etc.,
- construction en sous-œuvre,
- utilisation de grues de très forte capacité ( $\geq 800$  t).

En général, l'opération de reconstruction combine plusieurs de ces méthodes et se déroule suivant un phasage de réalisation complexe associé à un phasage d'exploitation des voies ferrées. Elle peut concerner uniquement le tablier métallique, avec éventuellement des travaux mineurs de confortement et d'adaptation des appuis existants qui sont conservés ou bien comprendre également la réalisation d'appuis totalement neufs.

Dès lors qu'il est nécessaire de déplacer un élément constitutif de l'ouvrage (tablier, appui) en un minimum de temps, tout gain de poids devient très profitable. Pour cette simple raison, les tabliers neufs sont, à l'image des anciens, également souvent métalliques ou mixtes.

Ci-dessous sont développés quelques exemples de chantiers de remplacement dont la SNCF a assuré la maîtrise d'œuvre (conception et suivi de réalisation).

#### 3.1. Le remplacement de la « passerelle » de Bordeaux

La « passerelle » de Bordeaux est un ouvrage à deux voies de type pont-cage, franchissant la Garonne pour desservir la gare Saint Jean et construit dans les années 1860. Dans le cadre d'une augmentation de capacité de l'accès à Bordeaux, il a été décidé d'élargir le franchissement à quatre voies. Cet objectif, cumulé à l'état médiocre (fatigue des pièces de ponts et des longerons, corrosion) du tablier historique a justifié son remplacement par une structure neuve, por-

tant deux groupes de deux voies, et construit en déviation définitive à l'aval.

Ces travaux se sont conjugués aux travaux d'aménagement des accès et à la reconstruction des viaducs sur les berges (quais de Paludate et de la Souys). Le phasage général est le suivant :

- construction du nouvel ouvrage en Garonne et de la partie aval des viaducs d'accès (circulation maintenue à deux voies sur l'ouvrage existant) ;



Figure 12: Remplacement de la passerelle de Bordeaux.



Figure 13: Charpente métallique du nouveau tablier.

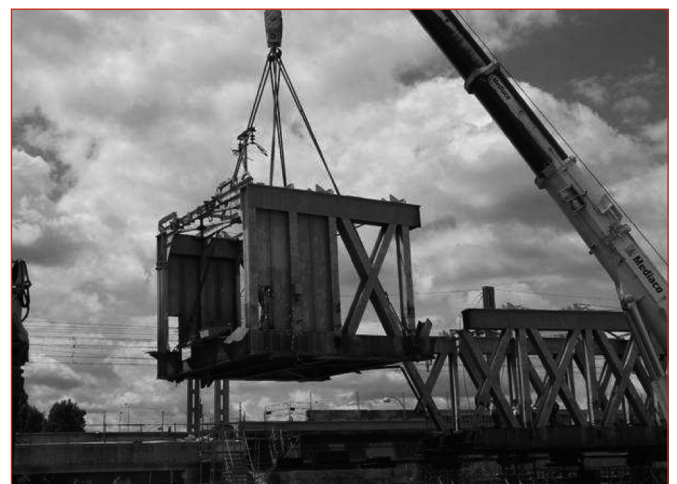


Figure 14: Démolition de l'ancien tablier.



- basculement des circulations sur les ouvrages neufs, avec deux voies exploitées ;
- démolition des anciens viaducs d'accès et des extrémités de la « passerelle » ancienne ;
- achèvement des ouvrages neufs et mise en service des deux dernières voies.

L'ouvrage neuf est constitué de trois caissons métalliques (un central et deux latéraux) et d'entretoises portant une dalle en poutrelles enrobées longitudinales. Ses portées principales sont de 77 m et correspondent à celles de l'ouvrage historique pour limiter l'impact hydraulique en phase de chantier. Les tronçons de charpente ont été amenés par bateau et mis en place à la grue.

### 3.2. Le pont sur le Rhône à Culoz

Le pont sur le Rhône à Culoz est constitué de deux tabliers indépendants de 212 m de longueur portant chacun une voie. Il a été remplacé par un tablier à deux voies de type RaPL (Pont Rail à Poutres Latérales) à âme pleine.

Le phasage de réalisation a constitué à :

- construire de nouvelles piles en sous-œuvre sous les tabliers existants en exploitation ;
- lancer la nouvelle ossature parallèlement à l'ouvrage existant sur des appuis provisoires ;

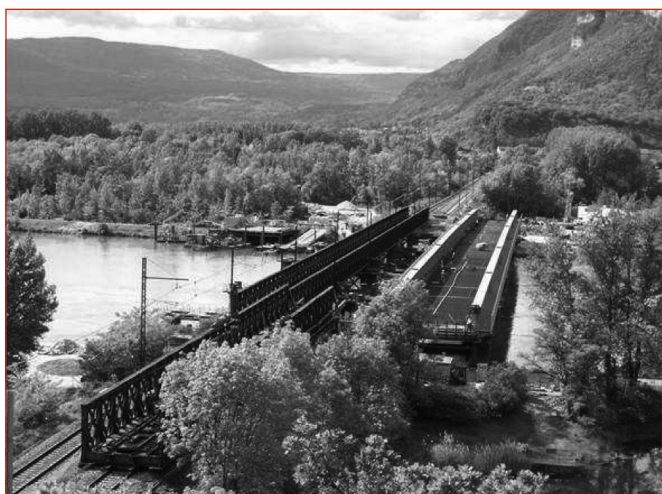


Figure 15: Vue générale : tablier neuf en construction et tablier ancien accidenté en cours de délançage.

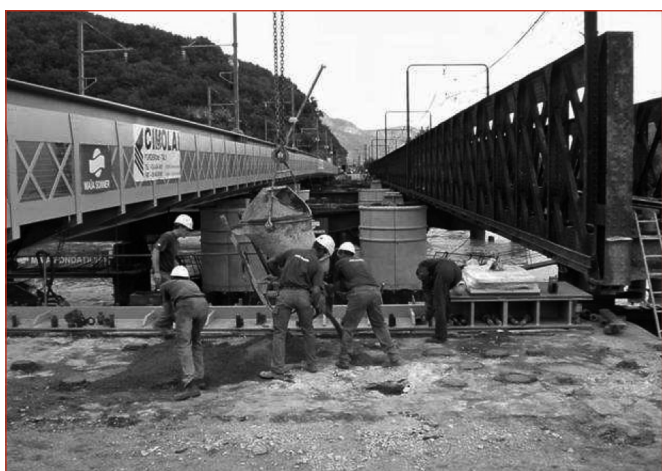


Figure 16 : Préparation du chemin de ripage sur culées.

- bétonner la dalle et l'équiper en ballast et voie ;
- au cours d'une coupure de 120 heures, délançer les tabliers anciens et riper transversalement le nouveau sur ses appuis.

Le phasage initialement prévu a été perturbé par l'accident survenu le 24 juillet 2006 qui a rendu totalement inutilisable un des deux tabliers anciens, et qui a été démonté par conséquent avant la coupure.

Le principe de régénération du viaduc d'Orgon sur la Durance durant l'été 2008 est similaire.

### 3.3. Le viaduc de Oissel sur la Seine

Le viaduc de Oissel sur la Seine est un ouvrage à trois travées de type pont cage en fer puddlé. Il a été remplacé par un ouvrage de type RaPL, avec conservation des appuis. Compte tenu des contraintes imposées par l'exploitation (ligne Paris – Rouen), le phasage retenu a été le suivant :

- lançage de la charpente et construction du nouvel tablier parallèlement à l'ouvrage ancien sur des appuis provisoires ;
- basculement des circulations sur le nouvel ouvrage, via la création d'une déviation provisoire nécessitant d'importants blindages ;
- délançage et démolition de l'ancien tablier en prenant toutes les précautions nécessaires ;



Figure 17: Charpente du tablier neuf en cours de lançage.



Figure 18: Circulation sur le tablier neuf en situation provisoire.



Figure 19: Découpe et évacuation du tablier ancien par dessous au milieu des circulations ferroviaires.

- aménagement des têtes des appuis anciens ;
- au cours d'une coupure de 72 heures, ripage transversal du nouveau tablier et raccordement définitif des voies ;
- démolition des appuis et des soutènements provisoires.

### 3.4. Les ponts sur le canal Saint-Denis

Ces ouvrages situés sur le faisceau de Paris Nord portent chacun une voie et sont constitués d'une travée unique. Il s'agit de structures à poutres treillis sous voie. Les contraintes pour leur remplacement sont les suivantes :

- coupure de courte durée limitée au plus à deux voies, les voies adjacentes restant circulées,
- seuls accès au site : voie ferrée ou canal passant sous l'ouvrage,
- grande exiguité du site.

Pour chaque tablier le phasage retenu est le suivant :

- fabrication complète du nouveau tablier (bipoutre mixte) à proximité ;
- découpe du tablier ancien et évacuation par-dessous à l'aide d'une barge sur le canal ;
- aménagement des appuis (pose de nouveaux sommiers préfabriqués à l'aide de ponts roulants) ;
- acheminement à l'aide de lorries ferroviaires de la travée neuve sur la voie adjacente, ripage transversal et prise en charge sur des tours d'étaisements ;
- dévérinage progressif de la nouvelle travée



Figure 21: Dévérinage de la nouvelle travée sur tours d'étaisements.

La principale difficulté de ce chantier provient de l'exiguité des lieux, de la multiplicité des méthodes et du voisinage immédiat des voies circulées.

### 3.5. Le viaduc de Lamothe

Le viaduc de Lamothe est un ouvrage à quatre travées appuyées sur de hautes piles maçonnées. Il porte deux voies. Constitué de poutres treillis sous voies, il a été remplacé par un bipoutre mixte de hauteur variable. Le phasage de réalisation, original, a été le suivant :



Figure 20: Amenée de la nouvelle travée.



Figure 22: Dépose du demi-tablier de l'ouvrage ancien.





*Figure 23: Bétonnage du demi-hourdis du nouveau tablier.*

- élargissement des chevêtres des piles par ajout de consoles précontraintes ;
- enfilage des entretoises du nouvel ouvrage à travers le treillis existant ;
- pose à la grue des poutres principales du nouveau tablier sur les chevêtres et assemblage des entretoises ;

- dépose du tablier métallique sous une des voies, la circulation étant maintenue sur l'autre et bétonnage d'un demi-hourdis ;
- basculement de la circulation à une voie sur le nouvel ouvrage, puis dépose de la deuxième partie du tablier métallique ;
- bétonnage de la deuxième moitié du hourdis et mise en service de la deuxième voie.

## 4. CONCLUSION

Le réseau ferré national comporte de nombreux grands ouvrages qui font l'objet de phénomène de fatigue généralisée ou de corrosion importante et qu'il est nécessaire de remplacer petit à petit. Ces opérations sont très délicates car elles sont soumises à de fortes contraintes dues à l'environnement ferroviaire exploité. Afin de limiter les interceptions de circulation il est nécessaire de trouver au cas par cas des solutions constructives originales et adaptées. Ces opérations font généralement appel à de nombreuses méthodes et opérations individuelles et se déroulent suivant un phasage complexe. Le Département des Ouvrages d'Art de la SNCF a acquis des compétences et une expérience unique de maîtrise d'œuvre pour ce type d'opération.

# TRAITEMENTS ÉLECTROCHIMIQUES DE RÉHABILITATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION

Véronique BOUTEILLER

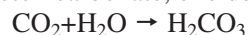
Chargée de Recherches, Université Paris Est, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,  
58 bd Lefebvre 75015 paris, France, veronique.bouteiller@lcpc.fr

## 1. LA CORROSION DES ARMATURES DANS LES BÉTONS

**A**fin d'augmenter la résistance à la traction des bétons, des armatures ont été intégrées. Les armatures habituellement utilisées sont en acier au carbone. Dans un béton sain, les armatures sont passivées car elles sont dans un environnement fortement alcalin (diagramme potentiel-pH du fer de Pourbaix). Toutefois cette situation dans le début de la vie d'un ouvrage en béton armé va évoluer : les armatures peuvent progressivement se corroder en raison, soit du phénomène de carbonatation, soit de la pénétration des ions chlorure soit enfin du mélange des deux. La corrosion est la première cause de dégradation des structures en béton armé. Lorsque le fer s'oxyde, les produits de corrosion formés occupent un volume plus important ce qui engendre la fissuration du béton. Les agressions par carbonatation et/ou par ions chlorure sont alors facilitées et le phénomène de corrosion s'amplifie ce qui peut conduire à l'éclatement du béton et à la mise à nu des armatures. La perte de section des armatures corrodées nécessite le re-calcule de la capacité portante de l'ouvrage et pose, par conséquent, la question de la durée de vie de l'ouvrage.

### 1.1. La corrosion par carbonatation

Le caractère basique d'un béton dépend de sa teneur en portlandite ou hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). La consommation de la portlandite qui réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour donner du carbonate de calcium et de l'eau (Eq. 1) va conduire à une diminution du pH. La valeur de pH d'un béton sain est égale à 13 alors que pour un béton carbonaté, elle devient voisine de 9.



puis  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$  Equation 1  
Dans ce nouvel environnement, les armatures ne sont plus passivées et la corrosion va pouvoir démarrer.

Dans ce cas de figure, la corrosion est de type « généralisée » et des pertes de section d'armature peuvent être calculées.

La carbonatation répond à une loi de diffusion telle que  $dx/dt = D_0/x$  avec  $x$  la distance,  $t$  le temps, et  $D_0$  le coefficient de diffusion (une constante).

Les facteurs qui peuvent retarder la carbonatation d'un béton sont essentiellement : une teneur en ciment plus importante, une plus grande compacité, une épaisseur d'enrobage plus conséquente, un environnement atmosphérique moins chargé en dioxyde de carbone, une atmosphère sèche, ...



La carbonatation d'un béton peut être révélée à l'aide d'un indicateur coloré : la phénolphthaleïne. Cet indicateur prend la couleur rose lorsque le béton est « sain » et devient incolore lorsque le béton est « carbonaté ». Au laboratoire, des déterminations quantitatives de pH sont extrêmement utiles pour connaître l'évolution de la basicité du béton.

## 1.2. La corrosion par les ions chlorure

Les ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) proviennent essentiellement des sels de déverglaçage et/ou des embruns marins mais dans certains cas ils peuvent avoir été ajoutés lors du gâchage du béton (cas du  $\text{CaCl}_2$  qui joue le rôle d'accélérateur de prise ou bien gâchage à l'eau de mer). La pénétration des ions chlorure jusqu'aux armatures en quantité suffisante (on parle de concentration critique) va conduire à la rupture du film passif et constitue l'initiation de la corrosion. La concentration critique en ions chlorure est de 0,4 % par rapport au poids de ciment (EN206). La concentration critique peut également être exprimée en rapport  $\text{Cl}^-$  sur  $\text{OH}^-$ . Cette notion de seuil critique est bien acceptée mais la valeur même du seuil est très incertaine pour les raisons suivantes : le pH d'un béton varie avec la formulation choisie, la nature des ions chlorure, libres ou totaux, est encore en discussion, les méthodes de dosages utilisées sont diverses, ... Après l'initiation, la corrosion entre dans une phase dite de propagation.

La corrosion en présence d'ions chlorure est de type « localisée par piqûres » : un acier peut se rompre lorsque la piqûre (qui est perpendiculaire à la barre d'acier) est suffisamment avancée par exemple. Enfin, il faut noter que les ions chlorure ne modifient pas la valeur de pH du béton.

Les facteurs qui peuvent retarder la pénétration des ions chlorure dans un béton sont essentiellement : une plus grande compacité et une épaisseur d'enrobage plus conséquente (il est d'ailleurs préconisé un enrobage de 5 cm en bord de mer au lieu de 3 cm).

Pour connaître quantitativement la teneur en ions chlorure dans un béton il convient de faire un carottage, de scier des tranches suivant la profondeur, de doser les chlorures libres

et totaux par une méthode potentiométrique. Les résultats sont énoncés en % de chlorure en poids par rapport au poids de ciment.

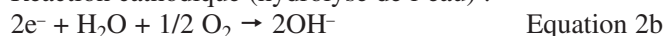
## 1.3. Les équations de la corrosion du fer

Après la dépassement de l'acier, la corrosion peut démarquer selon les réactions chimiques anodique (Eq 2a) et cathodique (Eq2b) suivantes :

Réaction anodique (oxydation du fer) :

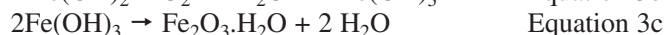


Réaction cathodique (hydrolyse de l'eau) :



Il faut noter que pour que la corrosion ait lieu il faut de l'oxygène et de l'eau.

La fissuration du béton ne provient pas de l'espèce  $\text{Fe}^{2+}$  qui est soluble dans l'eau mais bien de sa transformation (Figure 1), par exemple en hydroxyde ferreux (Eq. 3a) ou ferrique (Eq. 3b) qui donnera à terme un produit de corrosion (Eq. 3c).



L'espèce  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  occupe un volume deux fois plus grand que celui du fer. Après hydratation,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  gonfle, devient poreuse et peut occuper jusqu'à 10 fois plus de volume d'où des contraintes à l'interface acier/béton très importantes qui vont générer des fissures dans le béton.

## 2. DIAGNOSTIC DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION

### 2.1. Le diagnostic

Le diagnostic est une étape primordiale à prendre en compte dans le choix d'une solution de réparation. Par conséquent il ne faut négliger ni le temps ni l'argent à lui consacrer.

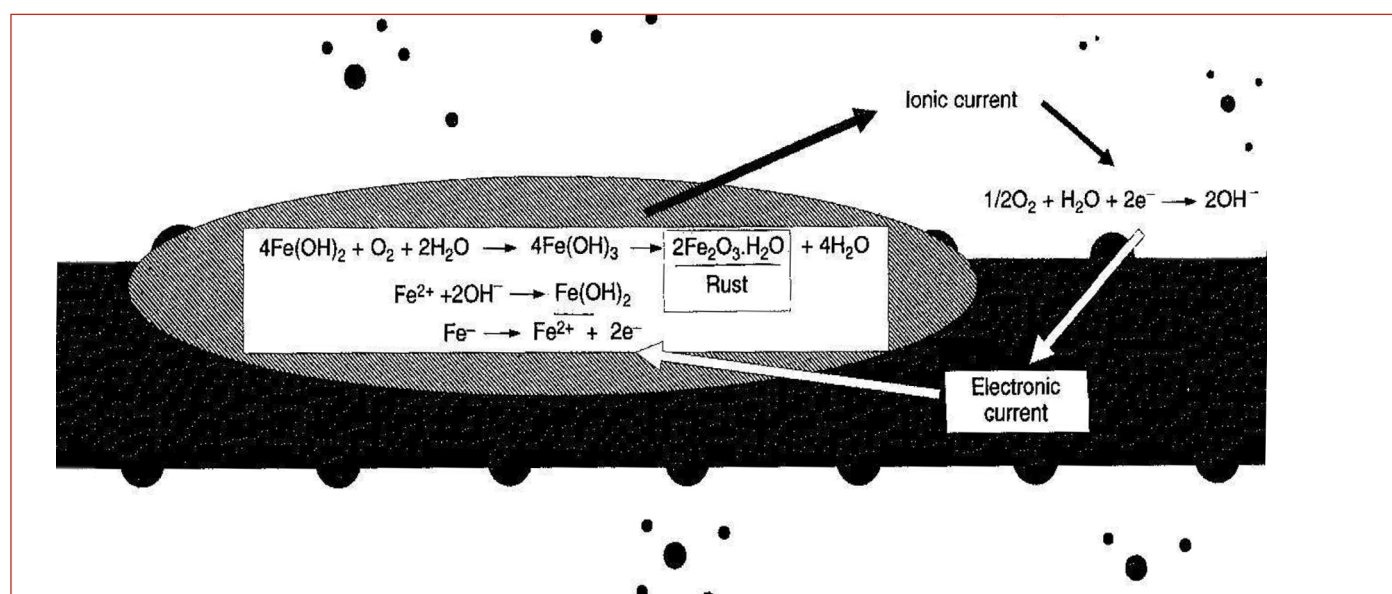


Figure 1: Les réactions de formation de la rouille [d'après Broomfield].

Le diagnostic commence toujours par une inspection visuelle de la structure qui va notamment permettre de localiser les fissures, les coulures de rouille, les épaufures, etc. et pouvoir donner une idée sur la gravité de la dégradation statistiquement sur l'ensemble de l'ouvrage.

Il faut ensuite déterminer quelle pourrait être la cause des dégradations rencontrées. Une fissure n'est pas forcément due à un phénomène de corrosion (réactions gonflantes par ex). L'auscultation au marteau peut permettre de détecter les zones de non adhérence de l'enrobage béton sur les armatures. D'autres méthodes (caméra infra-rouge, radar, ultra-sons, etc.) peuvent également être utilisées à plus grande échelle. La localisation des armatures, leur diamètre et leur enrobage sont autant d'éléments à connaître sur l'ouvrage. Pour décrire la corrosion, les techniques électrochimiques telles que les mesures de potentiel et de vitesse de corrosion sont incontournables mais l'interprétation des résultats peut s'avérer délicate (influence de la température, de l'humidité relative, de la formulation du béton, de l'agression, du matériel utilisé, etc.) et il faut donc faire appel à des personnes compétentes. La mesure de la résistivité peut parfois s'avérer utile. Pour caractériser le matériau il faut s'intéresser à la carbonatation et aux ions chlorure. Les résultats quantitatifs sont toujours préférables aux résultats qualitatifs (il faut souvent traiter les deux approches). Il faut également connaître la formulation du béton lui-même (nature du ciment, dosage, type de granulats, etc.).

### 3. RÉHABILITATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ DÉGRADÉS PAR CORROSION

Dans un contexte de réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion, diverses solutions existent : les inhibiteurs de corrosion, le remplacement des armatures au carbone par des armatures galvanisées ou des armatures inoxydables, l'utilisation de peintures ou autres types de revêtements de surface, les réparations traditionnelle ou électrochimiques. Dans ce texte, seront uniquement explicitées la réparation dite « traditionnelle » (c'est-à-dire classiquement utilisée) et les réparations électrochimiques.

#### 3.1. La réparation traditionnelle

La réparation traditionnelle est localisée : elle consiste en une purge du béton non adhérent, une reconstitution des armatures et/ou une repassivation des armatures et d'une reconstitution de béton d'enrobage. D'après le retour d'expérience, ce type de réparation conduit à l'éclatement du béton dans les zones non traitées contigües, environ 5 à 10 ans après. Ce manque de durabilité a été attribué essentiellement à une faible compatibilité entre le béton d'origine et le béton de réparation de reconstitution de l'enrobage et/ou à un effet de pile entre les zones traitées et non traitées.

#### 3.2. Les réparations électrochimiques

Les réparations de type électrochimiques sont plus récentes que la réparation traditionnelle. Toutefois, elles ne permet-

tent pas de s'affranchir de la réparation traditionnelle au préalable des réparations électrochimiques car le monolitisme du béton et la continuité des armatures doivent être assurés. Les réparations électrochimiques ont théoriquement pour avantage de traiter l'ensemble des armatures et donc d'éviter des effets de pile indésirables. Les traitements électrochimiques tels que la protection cathodique, la réalcalinisation et la déchloruration peuvent être mis en œuvre selon deux procédés différents :

- Dans le procédé par courant imposé, il faut utiliser une alimentation électrique. Les armatures (=cathode) sont connectées au pôle négatif et l'anode est reliée au pôle positif de l'alimentation. La densité de courant à débiter est choisie (généralement  $1\text{ A/m}^2$  d'acier) et elle reste constante dans le temps. Un électrolyte assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.
- Dans le procédé par courant galvanique, il n'y a pas d'alimentation électrique. Les armatures (=cathode) sont directement connectées à l'anode (qui est dite « sacrificielle »). Le courant galvanique débité dépend de « la demande » de l'acier. Un électrolyte assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.

Remarque : Les traitements par courant imposé sont les mieux connus du point de vue de leur efficacité car les courants débités sont plus élevés que ceux obtenus par courant galvanique. Ils sont également plus faciles à contrôler.

Lors d'un traitement électrochimique de protection cathodique, de réalcalinisation ou de déchloruration, l'hydrolyse de l'eau autour des armatures génère des ions hydroxyle ( $\text{OH}^-$ ) et le champ électrique créé provoque la migration des anions de l'armature vers l'anode et la migration des cations dans le sens inverse.

Le schéma général d'un traitement électrochimique est illustré sur la Figure 2.

##### 3.2.1. La protection cathodique

L'objectif de la protection cathodique est d'abaisser le potentiel électrochimique de l'armature vers une valeur seuil appelée potentiel de protection qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devienne négligeable. La protection cathodique par courant imposé (avec une densité de courant de l'ordre de 2 à  $20\text{ mA/m}^2$  d'acier) est un traitement à vie de l'ouvrage.

La protection cathodique de l'acier dans le béton fait l'objet de la norme européenne NF-EN 12 696 (juillet 2000) qui est en cours de révision en 2009. Les critères de protection énoncés dans cette norme portent sur :

- le potentiel à courant coupé ( $-750\text{ mV Ag/AgCl } 0,5\text{ M KCl}$ ),
- la décroissance du potentiel d'au moins  $100\text{ mV}$  après coupure de courant sur une période de 24h,
- la décroissance d'au moins  $150\text{ mV}$  pour des durées de coupures de courant plus longues.

Cette norme s'applique surtout à la protection cathodique par courant imposé. Les recommandations pour l'utilisation d'anodes galvaniques sont assez vagues voire inexistantes. D'autre part, il ne faut pas confondre protection cathodique et prévention cathodique dont la densité de courant est 10 fois plus petite.

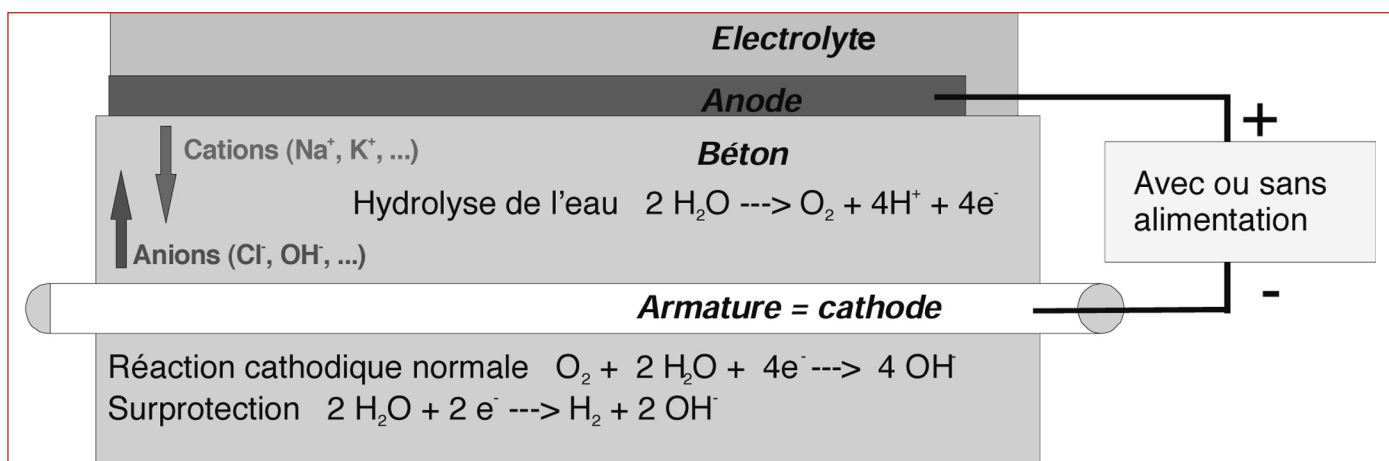


Figure 2: Schéma d'un traitement électrochimique.

Quelques étapes de l'application d'une protection cathodique sont illustrées sur la Photo 1 (de gauche à droite): pose du treillis qui sert d'anode sur le parement béton, connexion des armatures et boîtier de connexion des anodes et des cathodes

### 3.2.2. La réalcalinisation

L'objectif du traitement de réalcalinisation est de redonner une alcalinité élevée au béton et donc d'empêcher la corrosion des armatures. Lors du traitement électrochimique, la réalcalinisation se produit en deux zones différentes du béton : dans la première zone constituée par l'armature elle-même, l'hydrolyse de l'eau génère la formation d'ions hydroxyle ( $\text{OH}^-$ ); dans la seconde zone, constituée par l'enrobage béton, les ions alcalins (cations) contenus dans l'électrolyte migrent vers les armatures. La réalcalinisation, réalisée avec une densité de courant imposé de  $1 \text{A/m}^2$  d'acier, est un traitement qui va durer de 1 à 2 semaines. La réalcalinisation fait l'objet d'une spécification technique européenne FD CEN/TS 14038-1 (janvier 2005). La densité de courant imposé ne doit pas dépasser  $4 \text{A/m}^2$  de surface d'armature (sinon il y a risque de fissuration du béton) et l'alimentation électrique utilisée est limitée en

tension à 50V. Le traitement est suivi en enregistrant la charge en A/h et une valeur de  $200 \text{A.h/m}^2$  est donnée pour indiquer la fin du traitement. L'efficacité du traitement est évaluée à l'aide de phénolphtaleïne (coloration rose sur un anneau de 10 mm autour de l'acier ou bien diamètre de la barre).

La mise en place d'un traitement de réalcalinisation par courant imposé est illustrée sur la Photo 2 (de gauche à droite et de haut en bas) : purge du béton non adhérent, reconstitution du béton d'enrobage et pose du treillis anodique, projection de la pâte cellulosique (qui sert d'électrolyte), connexion des anodes et des cathodes dans le boîtier électrique, lecture de la tension et du courant de l'alimentation continue.

### 3.2.3. La déchloruration

L'objectif du traitement de déchloruration est d'extraire le plus grand nombre d'ions chlorure de l'enrobage béton de manière à ce que le film passif sur les armatures ne soit pas rompu et/ou que la propagation de la corrosion soit freinée. Les ions chlorure (anions) migrent depuis l'armature vers l'anode placée sur le parement béton sous l'action du champ électrique. Au niveau des armatures polarisées,



Photo 1 : Illustration du traitement de protection cathodique (crédit photo Freyssinet).





Photo 2 : Illustration du traitement de réalcalinisation par courant imposé (crédit photo Renofors).

l'hydrolyse de l'eau génère des ions hydroxyle ( $\text{OH}^-$ ). La déchloruration par courant imposé (avec une densité de courant imposé de  $1\text{A/m}^2$  d'acier) est un traitement qui va durer de 4 à 8 semaines.

La déchloruration fait l'objet d'un projet de spécification technique européenne prCEN/TS 14038-2 qui est en cours de discussion.

La mise en place d'un traitement de déchloruration par courant galvanique est illustrée sur la Photo 3 (de gauche à droite et de haut en bas) : sablage du béton, enduction du béton d'une pâte électrolytique adéquate, pose des anodes en sandwich dans de la pâte électrolytique, mise en place du système de régulation en humidité de l'électrolyte, connexion à l'armature et connexions des anodes et des cathodes au boîtier de connexions.

### 3.3. Quelques réflexions sur les traitements électrochimiques

A ce jour, et en France, les traitements électrochimiques sont assez peu utilisés, le retour d'expérience est donc faible et les éléments de réponse concernant l'efficacité sur le long terme de ces traitements sont rares. Toutefois, les études menées en laboratoire montrent des résultats qui semblent prometteurs.

Les principales limites de ces traitements électrochimiques sont un béton d'enrobage trop compact (mais alors en général il n'y a pas de dégradations), une quantité d'ions chlorure très importante y compris au-delà du premier lit d'armatures, une carbonatation très profonde et au delà du premier lit d'armature, des armatures non continues électriquement, des parements béton de géométrie difficile voire en dentelle, ... Il faut se montrer vigilant quant à la réparation des ouvrages comportant des câbles de précontrainte car ceux-ci sont sensible à la fragilisation par l'hydrogène. De même pour les bétons comportant beaucoup d'alcalins ou des granulats potentiellement réactifs, le trai-

tement de réalcalinisation qui ajoute encore des alcalins n'est pas conseillé pour des raisons de réactions gonflantes alcalis-silice potentielles.

Le choix de ces traitements électrochimiques nécessite également un effort en communication pour expliquer leurs fonctionnements et une remise en question du contenu du cahier des charges classique (quel traitement, quel procédé (courant imposé ou courant galvanique), quelles attentes, quelles performances, quels moyens de mesures, etc.)

De plus, les méthodes de mesures non destructives de type cartographie de potentiels et mesure de vitesse de corrosion sont souvent difficiles à interpréter au regard du chantier étudié. Il faut donc toujours veiller à recouper les résultats électrochimiques avec ceux des caractérisations analytiques qualitatives (indicateurs colorés par ex) et quantitatives (pH, dosage d'ions chlorure essentiellement, mais aussi dosage d'alcalins dans le cas d'une réalcalinisation par ex).

Dans le cas d'ouvrages tels que des piles de ponts en milieu marin, la protection cathodique par courant imposé est recommandée car elle permet de traiter aussi bien les parties de piles en zone de marnage que les parties aériennes atmosphériques. Cependant ce type de traitement est posé à vie et un suivi est nécessaire. Il faut alors se montrer vigilant quant au suivi à effectuer (le prendre en compte dès le début de la réparation) et à sa traçabilité.

Les réalcalinisations et les déchlorurations sont des traitements temporaires assez aisés à mettre en œuvre sur des ouvrages de géométrie classique y compris en sous-face ou intrados. Après dépose, généralement le parement béton n'est pas significativement modifié.

Les traitements électrochimiques en utilisant le procédé par courant galvanique posent encore de nombreuses questions (efficacité, performances, moyens de mesures, dimensionnement, durée de vie des anodes, pertinence des anodes noyées dans le béton, etc.) dont certaines sont étu-





Photo 3 : Illustration du traitement de déchloration par courant galvanique (crédit photo Freyssinet).

diées au sein du CEFRACOR (Centre Français anticorrosion) dans un groupe de travail crée en 2008.

Enfin, les normes et recommandations sur les traitements électrochimiques sont en cours de révision et/ou de projet étant donné les avancées des recherches menées.

## 4. BIBLIOGRAPHIE

Ci-après, figure une liste succincte des livres, normes et autres informations dans le domaine thématique de la réhabilitation des bétons armés dégradés par corrosion.

### 4.1. Quelques ouvrages généraux

- Atlas d'équilibres électrochimiques à 25°C, M. Pourbaix, Gauthiers-Villars, 1963
- Steel corrosion in concrete, A. BENTUR, E & FN Spon, 1997
- Corrosion of steel in concrete, J. P. Broomfield, E & FN Spon, 1997
- La corrosion et la protection des armatures dans le béton, A. Raharinaivo, Presses des Ponts et Chaussées, 1998
- Corrosion of steel in concrete – prevention, diagnosis, repair, L. Bertolini, Wiley VCH, 2000

- Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, G. Taché, Association Française de Génie Civil, 2003
- Durabilité des bétons «méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité», AFPC-AFREM, décembre 1997, LMDC, Toulouse
- Durabilité du béton armé et des ses constituants : maîtrise et approche performantielle, V. Baroghel-Bouny, LCPC, Novembre 2008
- Les méthodes électrochimiques appliquées au diagnostic et à la réhabilitation du béton armé concerné par la corrosion, A. Rahariniavo, LCPC, juin 2005

## 4.2. Quelques études scientifiques

- Cathodic protection and cathodic prevention, P. Pedferri et al., Construction and Building Materials, Vol. 10, p. 391, 1996
- Action COST 509 Corrosion and protection of metals in contact with concrete (1991-1996)
- Action COST521 Corrosion of steel in reinforced concrete structures (1997-2002)
- A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete, W. Yeih *et al.*, Construction and Building Materials, Vol. 19, p. 516, 2005
- Electrochemical chloride extraction : efficiency and side effets, J. C. Orellan *et al.*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, p. 2. 27, 2004
- Electrochemical chloride extraction of a beam polluted by chlorides after 40 years in the sea, V. Bouteiller *et al.*, J. Phys. IV, Vol. 136, p. 331, 2006

## 4.3. Quelques articles scientifiques sur les méthodes de mesures pour contrôler l'efficacité des traitements électrochimiques

- Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar, C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote and P. Castro, Cem. Concr.Res. Vol. 30, (2000), pp. 1047-055.
- Round robin test on chloride analysis in concrete Part 1: Analysis of total chloride content, M. Castellote and C. Andrade, Mater. Struct. Vol. 34, (2001), pp. 532 (Procedure A3-C4\*).
- Round robin test on chloride analysis in concrete Part 2: Analysis water soluble chloride content, M. Castellote and, C. Andrade, Mater. Struct. Vol. 34, (2001), pp. 589 (procedure B1).
- Half cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures, B. Elsener, Mater. Struct. Vol. 36, (2003), pp. 461-471.

- Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, C. Andrade and C. Alonso, Mater. Struct. Vol. 37, (2004), pp. 623-643.

## 4.4. Normes et recommandations

- ASTM C876-91 «Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete» (1999)
- RILEM TC-154-EMC «Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion», Materials and Structures, Half cell potential measurements – Vol. 36, p. 461, 2003
- RILEM TC-154-EMC «Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion», Materials and Structures, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforced in concrete by means of the polarisation resistance method – Vol. 37, p. 623, 2004
- NF EN 12696 «Protection Cathodique de l'acier dans le béton», juillet 2000
- FD CEN/TS 14038-1 «Ré-alkalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 1 Ré-alkalinisation», janvier 2005
- prCEN/TS 14038-2 «Ré-alkalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 2 déchloruration», avril 2004
- NF EN206-1 « Béton », avril 2004

## 4.5. Quelques actes de congrès et manifestations

- Concrete Solutions, Saint Malo, France, 2006
- Nucperf, Cadarache, France, mars 2006
- Eurocorr, Freiburg, Allemagne, 2007
- Concrete under Severe Conditions, Tours, France, 2007
- Ecole thématique de la corrosion, Hauteville-sur-Mer, France octobre 2007
- CEFRACTOR – Rencontre n° 10 – Protection cathodique galvanique appliquée au béton armé – Paris, France, 2007
- Durability of Building Materials and Constructions, Istanbul, Turquie, 2008
- International Congress on Durability Concrete Structures, Hangzhou, Chine, 2008
- International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape town, Afrique du Sud, 2008

# RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR UN BÉTON ÂGÉ DE 30 ANS CONTENANT UN CIMENT RICHE EN LAITIER

Christophe CHARRON\*, Maxime LION\*\*, Alain JEANPIERRE\*\*, Abdelkrim AMMOUCHE\*\*\*

\* HOLCIM, Obourg – Belgique,

\*\* EDF Ceidre-TEGG, Aix-en-Provence,

\*\*\* LERM, Arles

## 1. CONTEXTE

EDF est gestionnaire d'un parc d'ouvrages de Génie Civil dont la grande variété, en termes de localisation géographique, d'époque de construction ou encore de composition de bétons, implique la nécessité d'acquérir des connaissances approfondies sur le comportement in situ des bétons. Dans ce contexte, EDF est fréquemment amenée à réaliser des retours d'expérience sur des bétons exposés à des environnements variés. Ces bétons varient des ouvrages hydrauliques des années 1900

aux BFUP exposés durant plusieurs années au cœur d'aéroréfrigérants [1].

L'étude présentée dans cet article, issue d'une collaboration EDF/HOLCIM, vise à diagnostiquer l'état d'un béton âgé d'une trentaine d'année contenant un ciment dont la teneur en laitier est de l'ordre de 40-50 % (ciment CHF de l'époque qui entrerait dans la catégorie actuelle des CEM III/A). Les prélèvements sont issus d'un voile BA d'un ouvrage EDF du nord de la France et situé en bordure de mer (Figure 1). Le dosage théorique en ciment est de l'ordre de  $350 \text{ kg/m}^3$  et le rapport  $E_{eff}/C$  de l'ordre de 0,5.



Figure 1 : Illustration du carottage sur voile et des échantillons prélevés.



Les granulats de ce béton sont des granulats silico-calcaires.

Le béton étudié est soumis depuis plus de 30 ans à :

- un environnement humide, rarement sec, mais sans être immergé ( $HR > 80\%$ ) : exposition à la carbonatation en classe XC2 suivant la norme NF EN 206-1 [2] ;
- un environnement marin mais sans contact direct avec l'eau de mer : exposition aux sels marins (chlorures et sulfates) en classe XS1 suivant la norme NF EN 206-1 [2] ;
- un environnement industriel avec possibilité d'exposition à des attaques chimiques acides ou sulfatiques...

Un diagnostic du béton a été réalisé par le LERM [3]. De nombreux essais ont pour cela été effectués : analyses DRX et thermogravimétriques, MEB, détermination des profils de chlorures et sulfates, essais de résistance à la compression, de porosité à l'eau et de coefficient de diffusion apparent des chlorures, mesures de la profondeur de carbonatation...

En accord avec l'approche performantielle du guide AFGC 2004 [4], les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont scindés en deux parties : une première partie « indicateurs de durabilité » et une seconde « témoins de durée de vie ». Ces parties sont respectivement présentées dans les chapitres qui suivent, ce qui permettra dans le dernier chapitre de discuter des résultats dans une optique d'évaluation de la durabilité de l'ouvrage.

## 2. INDICATEURS DE DURABILITÉ ET RÉSISTANCE MÉCANIQUE

### 2.1. Porosité à l'eau

La porosité à l'eau a été mesurée suivant le mode opératoire AFPC-AFREM. Les résultats de masse volumique et de porosité sont donnés ci-dessous (Tableau 1).

Masse volumique imbibée (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité à l'eau (%)
2 370	2 250	12,6

Tableau 1 : Résultats de mesure de la masse volumique et de la porosité à l'eau.

### 2.2. Coefficient de diffusion apparent des chlorures

Le coefficient de diffusion apparent des chlorures a été mesuré par essai de migration sous champ électrique en régime transitoire, selon la méthode de TANG-NILSSON. Les résultats sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous. Le coefficient de diffusion apparent moyen obtenu est égal à  $1,7 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

	Coefficient de diffusion apparent (m <sup>2</sup> /s)
Échantillon 1	$1,9 \cdot 10^{-12}$
Échantillon 2	$1,4 \cdot 10^{-12}$
Échantillon 3	$1,7 \cdot 10^{-12}$
Coefficient de diffusion apparent moyen	$1,7 \cdot 10^{-12}$

Tableau 2 : Résultats de mesures du coefficient de diffusion apparent.

### 2.3. Teneur en portlandite

Une analyse thermogravimétrique a été réalisée sur un échantillon prélevé dans le cœur d'une carotte. La teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  mesurée est de l'ordre de 0,8 % de la masse du béton, soit de l'ordre de 5-6 % de la masse du ciment.

### 2.4. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur 3 échantillons selon la norme NF EN 12504-1. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau 3. La résistance moyenne obtenue est égale à 49,3 MPa.

	Résistance à la compression (MPa)
Carotte 1	48,0
Carotte 2	52,9
Carotte 3	47,1
Résistance à la compression moyenne	49,3

Tableau 3 : Résultats de mesure de résistance à la compression.

## 3. TÉMOINS DE DURÉE DE VIE

### 3.1. Profondeur de carbonatation

La profondeur de carbonatation a été mesurée sur 3 échantillons par le test à la phénolphthaléine sur fractures fraîches. Les résultats montrent que le front de carbonatation moyen obtenu est situé à une profondeur estimée entre 15 et 20 mm (tableau 4).

	Profondeur de carbonatation (mm)
Échantillon 1	15 à 20 mm
Échantillon 2	15 à 20 mm
Échantillon 3	14 à 20 mm
Profondeur de carbonatation moyenne	15 à 20 mm

Tableau 4 : Résultats de mesure de front de carbonatation.

### 3.2. Profil en chlorures

Le dosage des chlorures totaux a été réalisé par potentiométrie suivant le mode opératoire AFPC-AFREM sur une carotte. Les mesures ont été réalisées sur quatre tranches de 20 mm d'épaisseur afin d'obtenir un profil détaillé au niveau des 80 premiers millimètres du béton. Une cinquième mesure a été réalisée pour obtenir le dosage des chlorures à cœur (profondeur de 160-180 mm). Les résultats sont illustrés dans le graphique ci-dessous (Figure 2). La teneur en chlorures est élevée en surface du béton, traduisant un apport exogène lié à l'environnement marin. Plus en profondeur, la teneur en chlorures, de l'ordre de 0,2 % de la masse du ciment, est faible et bien inférieure à la limite de 0,4 % définie dans la norme NF EN 206-1 [2] pour les bétons armés et qui correspond généralement au seuil d'initiation de la corrosion sous l'effet des chlorures



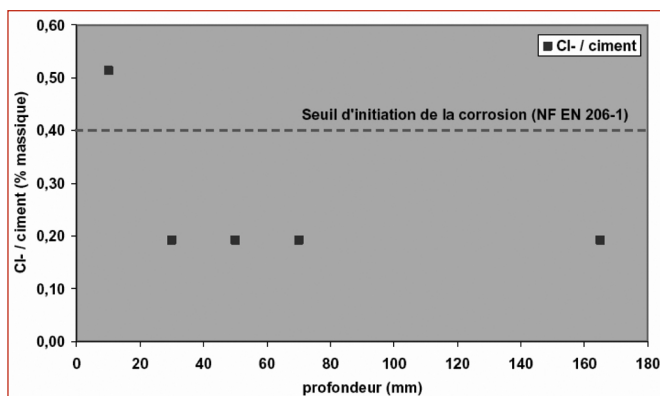


Figure 2: Profil en chlorures.

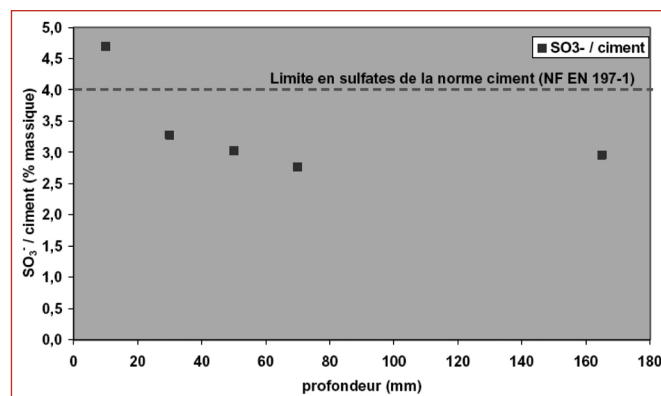


Figure 3: Profil en sulfates.

[4]. Il faut souligner que la norme NF EN 206-1 prévoit au niveau national une classe spécifique, avec un seuil de 0,65%, pour les bétons formulés avec des ciments CEM III, ce qui est le cas du béton étudié.

### 3.3. Profil en sulfates

Le dosage des sulfates a été réalisé par chromatographie ionique après attaque à l'acide chlorhydrique. A l'instar du profil des chlorures, les mesures ont été réalisées sur quatre tranches de 20 mm d'épaisseur afin d'obtenir un profil détaillé au niveau des 80 premiers millimètres du béton et une cinquième mesure a été réalisée pour obtenir le dosage des chlorures à cœur (profondeur de 160-180 mm). Les résultats sont illustrés dans le graphique ci-dessous (Figure 3).

La teneur en sulfates est élevée en surface du béton, traduisant un apport exogène lié aux environnements marin et industriel. Plus en profondeur, la teneur en sulfates, de l'ordre de 2,5-3 % de la masse du ciment, est faible et reste inférieure à la limite de 4 % en  $\text{SO}_3$  spécifiée dans la norme ciment NF EN 197-1 [5].

### 3.4. Analyses DRX et MEB

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée dans le but de comparer la nature des phases minérales cristallisées présentes dans le béton en zone carbonatée et non carbonatée. Ces analyses ont porté sur deux échantillons : un premier prélevé dans les 20 premiers millimètres où la matrice est carbonatée (échantillon A) et un second prélevé à cœur en dehors de la zone concernée par la carbonatation (échantillon C). Les analyses ont été réalisées sur des échantillons broyés passant au tamis de 40  $\mu\text{m}$  après séparation sélective des gravillons afin de maximiser la quantité de matrice analysée. Ces analyses ont permis de mettre en évidence les phases minérales cristallisées présentées dans le tableau 5.

On remarque que la portlandite est détectée seulement au cœur du béton en relation avec la carbonatation de la matrice dans la frange superficielle. En revanche, la présence d'une fraction granulaire carbonatée non négligeable ne permet pas de mettre en évidence l'abondance de carbonate de calcium néoformé en surface du béton. Les chloroaluminates de calcium sont détectés dans la frange superficielle du béton. Ceci traduit la fixation par les alu-

Minéraux	Composition chimique	Intensité relative		Raie principale (Å)
		Échantillon A Zone carbonatée	Échantillon C Zone non carbonatée	
Calcite	$\text{CaCO}_3$	+++	+++	3,03
Quartz	$\text{SiO}_2$	++	++	3,34
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	+	+	9,73
Hydrocalumite	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	+	—	7,89
Aragonite	$\text{CaCO}_3$	t	t	3,39
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	t	t	2,89
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	—	+	2,62
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—	t	7,62 – 4,28
Corps amorphe	—	p	p	—

(+++ = intensité forte, ++ = intensité moyenne, + = intensité faible, t = traces ; p = présence, ii : identification incertaine)

Tableau 5: Analyse qualitative par diffraction des rayons X.

minates hydratés d'une partie des chlorures apportés par l'environnement marin.

L'examen au microscope électronique à balayage (MEB), couplé à l'analyse élémentaire EDS, a été réalisé sur des fractures fraîches prélevées dans les 20 premiers millimètres du béton et à cœur du béton. Les figures suivantes illustrent respectivement ces observations.

On confirme que la matrice dans les 20 premiers millimètres présente des signes de carbonatation. Ceux-ci se manifestent par la présence de cristaux de carbonate de calcium néoformés par réaction entre le  $\text{CO}_2$  atmosphérique et la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ces signes sont le plus marqués au niveau de l'interface pâte-granulats où la portlandite était initialement localisée et au niveau de la matrice recouverte par les microcristaux de calcite. Par ailleurs, des cristaux de chloroaluminate de calcium sont détectés au niveau de cette frange superficielle. Enfin très ponctuellement, un amas d'ettringite à faciès massif est décelé à proximité d'un grain de clinker résiduel.

Plus à cœur, le béton se caractérise par une microstructure d'une bonne cohésion générale. La pâte de ciment est majoritairement dense malgré la présence de certaines zones microporeuses, essentiellement localisées au niveau de la pâte située entre certains granulats. Les contacts pâte-granulats sont généralement étroits. Les hydrates principaux constituant la matrice cimentaire sont :

- les silicates de calcium hydratés, généralement en assemblages denses et parfois à faciès fibreux au niveau des zones microporeuses,
- les aluminates et monosulfoaluminates hydratés,
- la portlandite, en plaquettes hexagonales au niveau des zones poreuses ou sous forme de cristaux massifs au niveau des contacts pâte-granulats,
- l'ettringite sous forme de fibres finement cristallisées.

Aucun signe de pathologie d'origine physico-chimique n'a été mis en évidence dans les échantillons de béton examinés.

## 4. DISCUSSION

Comme il a été mentionné en introduction, le béton étudié est exposé depuis plus de 30 ans à la carbonatation, aux chlorures, aux sulfates marins ainsi qu'à diverses attaques chimiques (acides, sulfates, ...) liées à l'environnement industriel.

Selon les types d'exposition énoncés, les remarques suivantes peuvent être proposées :

### *Carbonatation*

Le front de carbonatation est situé en moyenne à une profondeur estimée entre 15 et 20 mm. On peut considérer que la profondeur de carbonatation est relativement faible compte-tenu de l'âge du béton. Après plus de 30 ans d'exposition, le front de carbonatation n'a pas atteint la première nappe d'armatures et le risque de corrosion lié à la carbonatation n'est donc pas actuellement à considérer.

### *Chlorures*

La teneur en chlorures totaux est relativement élevée (0,5 % par rapport à la masse du ciment) uniquement en

surface (environ 20 premiers millimètres) traduisant un apport en chlorures lié à l'environnement marin. Cette teneur élevée est à mettre aussi en relation avec une forte présence de chloroaluminates traduisant la fixation d'une partie des chlorures par les aluminates du ciment.

Au-delà des 20 premiers millimètres, la teneur en chlorures totaux est de l'ordre de 0,2 % de la masse du ciment, c'est-à-dire clairement en dessous du seuil de 0,4 % de la norme NF EN 206-1 [2] qui s'applique pour tout béton armé, quelle que soit la nature du ciment, et dont la valeur admissible est de 0,65 % du fait de l'usage d'un ciment CEM III. Après plus de 30 ans d'exposition, le front de pénétration des chlorures n'a pas atteint la première nappe d'armatures et le risque de corrosion lié aux chlorures n'est donc pas actuellement à considérer.

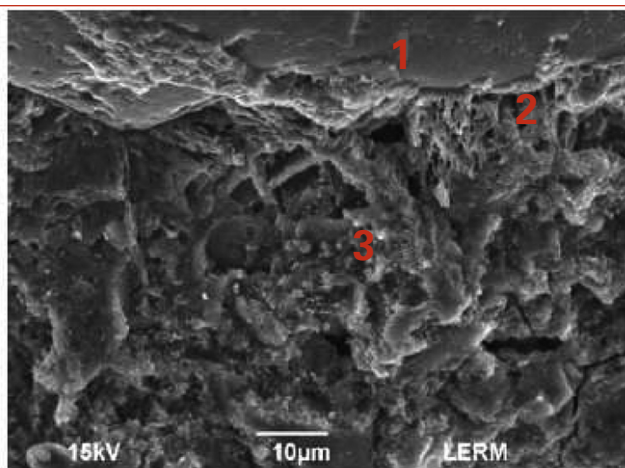
### *Attaques chimiques diverses*

En surface (environ les 20 premiers millimètres), un taux de sulfates relativement élevé est observé, ce qui est indicatif d'un apport exogène en sulfates et qui explique que très ponctuellement des amas d'ettringite à faciès massif ont été relevés à la surface du béton. Au delà de la frange superficielle, la teneur en sulfate est en dessous de 4% par rapport à la masse du ciment, valeur limite spécifiée dans la norme ciment NF EN 197-1 [5].

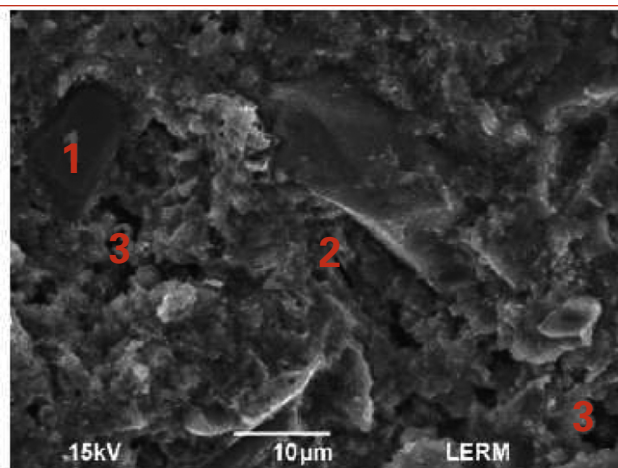
D'un point de vue microstructural, le béton présente une bonne cohésion générale. Il se caractérise par une matrice cimentaire globalement compacte et des contacts pâte-granulats majoritairement étroits. Aucun signe majeur de pathologie d'origine physico-chimique n'a été mis en évidence dans les échantillons de béton examinés (lixiviation, réaction alcali-granat, réaction sulfatique interne ou externe, ...).

### *Indicateurs de durabilité*

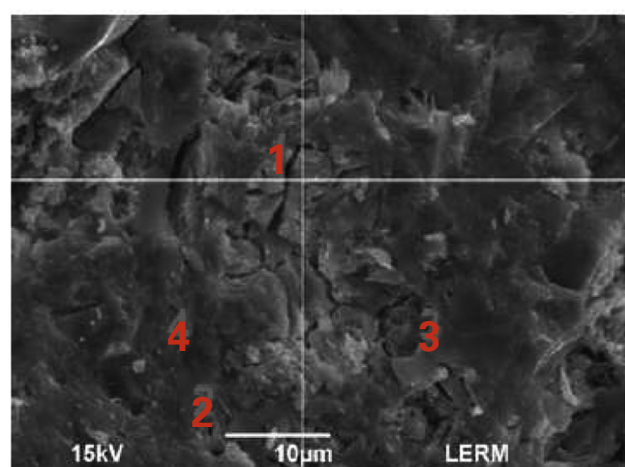
Le diagnostic ainsi effectué indique que le béton étudié bénéficie d'un bon niveau de durabilité qu'il faut mettre en lien avec les propriétés du matériau. L'application de la démarche performantielle du guide AFGC [4] peut alors aider à mieux cerner le niveau de durabilité de ce béton via les indicateurs de durabilité mesurés dans le cadre de cette étude. L'intérêt de la démarche performantielle dans le cas d'ouvrages anciens avait déjà été souligné par le LCPC lors d'une étude menée sur un béton âgé de 15 ans ainsi que sur sa réplique reconstituée en laboratoire [6] suivie d'une tentative de prédiction de la durabilité résiduelle de l'ouvrage [7]. Cette étude avait compris la mesure d'indicateurs de durabilité sur le béton prélevé mais aussi sur un béton reformulé en laboratoire avec l'objectif de caractériser son état « sain » initial, permettant ainsi d'évaluer son niveau de durabilité potentielle suivant l'approche performantielle du guide AFGC [4]. Dans le cadre de notre étude de diagnostic, les indicateurs de durabilité mesurés à cœur du béton de l'ouvrage sont plus simplement assimilés à ceux du béton d'origine, et comparés aux seuils proposés dans l'approche performantielle afin d'estimer le niveau de durabilité correspondant. Par ailleurs, il est à noter qu'il est souvent difficile de reproduire l'état « sain » initial d'un béton âgé de plus de 30 ans (impossibilité de reproduire les constituants d'origine, données parfois manquantes sur les



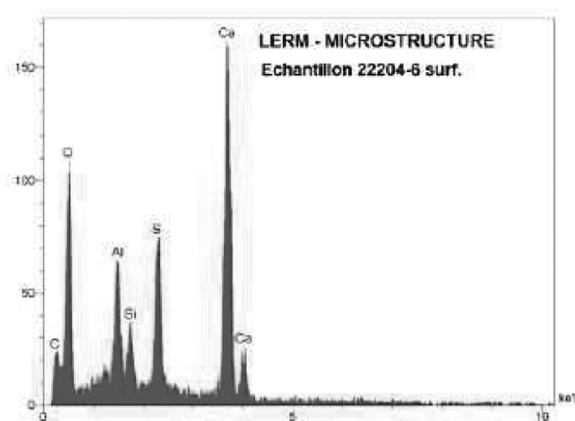
Détail de la matrice à proximité d'un granulat  
1 = granulat, 2 = portlandite partiellement carbonatée, 3 = matrice



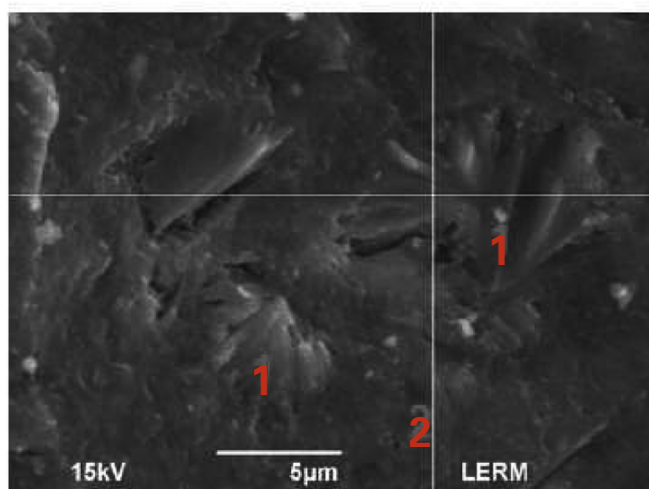
1 = laitier, 2 = matrice partiellement carbonatée, 3 = pore



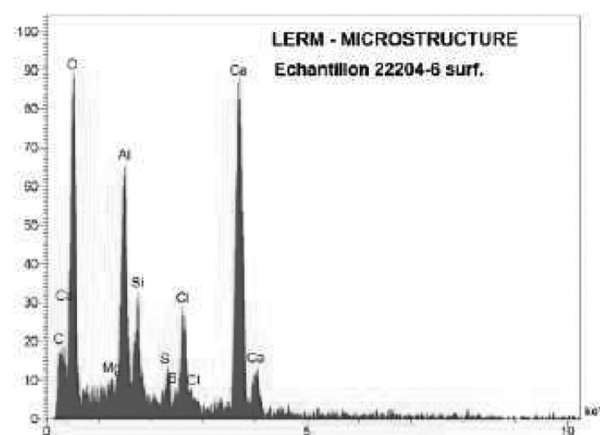
1 = amas d'ettringite, 2 = aluminates de Ca hydratés, 3 = clinker résiduel, 4 = C-S-H denses



Analyse élémentaire EDS en de l'amas d'ettringite (=1)



Vue de la matrice dense  
1 = chloroaluminates de calcium, 2 = C-S-H denses



Analyse élémentaire EDS des chloroaluminates

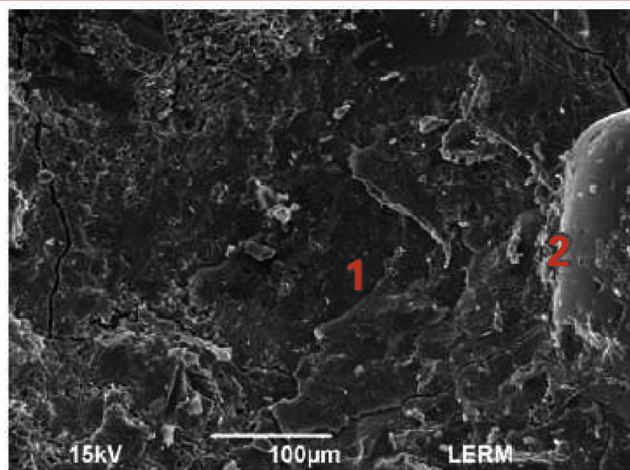
Figure 4: Vues de la microstructure du béton dans les 20 premiers millimètres.

dosages, impossibilité de reproduire la mise en œuvre initiale,...).

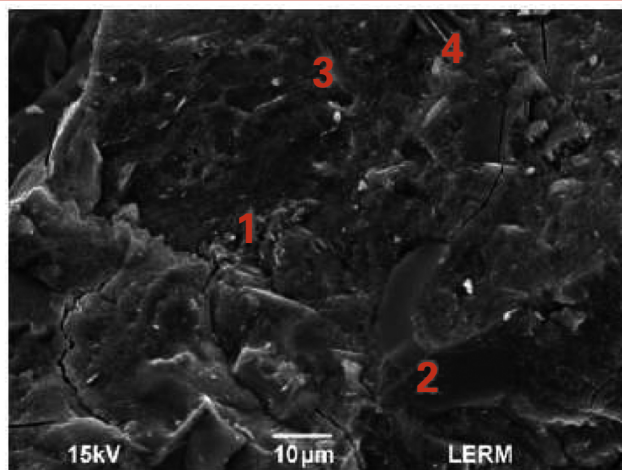
L'approche performantielle du guide AFGC permet tout d'abord de définir une classe de durabilité relative aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution

(S). La figure 6 ci-après présente les classes de durabilité évaluées en fonction des résultats obtenus : porosité à l'eau de 12,6 %, coefficient de diffusion apparent de  $1,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , pour un béton de résistance à la compression de 49,3 MPa.

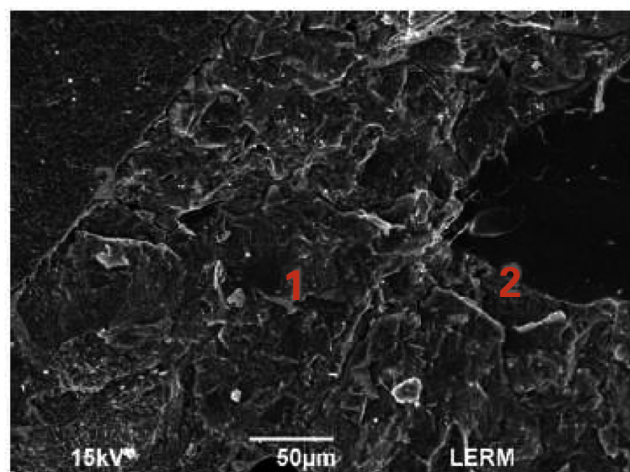




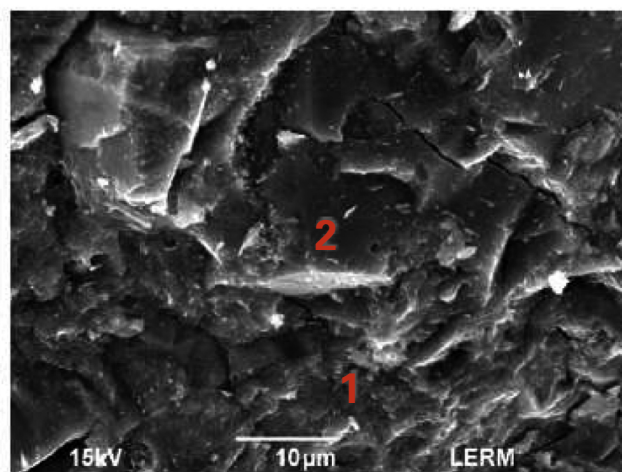
*Vue générale de la matrice dense (=1) et des contacts pâte-granulats étroits (=2)*



*Vue de détail de la matrice dense  
1 = C-S-H denses, 2 = laitier partiellement anhydre,  
3= aluminates de Ca hydratés, 4 = portlandite*



*Vue générale de la matrice généralement dense (=1) et des contacts pâte-granulats étroits (=2)*



*Vue de détail de la matrice généralement dense  
1 = C-S-H denses, 2 = laitier partiellement anhydre*

**Figure 5: Vues de la microstructure du béton à cœur.**

De manière globale, on remarque que le béton étudié se situe à une classe de durabilité potentielle moyenne/élevée. Dans un second temps, des classes relatives à la teneur en portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  peuvent être définies. La figure suivante (Figure 7) illustre l'évaluation de ces classes en fonction des résultats obtenus (teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de l'ordre de 5-6 % par rapport à la masse de ciment).

On observe que la classe de durabilité relative à la teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est très faible pour la durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures (cette faible valeur pouvant logiquement s'expliquer par le fait que le ciment utilisé est de type CEM III). Le guide AFGC souligne que les valeurs limites relatives à la teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dépendent en fait des autres indicateurs (perméabilité, porosité, coefficient de diffusion...) et prend l'exemple des BHP et BTHP qui, malgré une teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  faible voire très faible, possèdent généralement une durabilité potentielle très élevée vis-à-vis de la corrosion. Le diagnostic effectué dans le cadre de notre étude ayant montré un bon niveau de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures (carbonatation et chlorures), on peut donc considérer que ce sont les bonnes propriétés du béton étudié (porosité et coefficient

de diffusion, ...) qui permettent d'assurer ce niveau de durabilité, en compensant les effets liés à une faible teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Pour finir, les résultats de notre étude peuvent être utilisés afin de situer le béton étudié par rapport aux niveaux d'exigence qui sont définis dans le guide AGFC pour des enrobages conformes aux réglementations actuelles, c'est-à-dire un enrobage de 50 mm pour les ouvrages exposés aux chlorures et un enrobage de 30 mm pour les ouvrages exposés uniquement à la carbonatation (Figure 8).

D'après le contenu du tableau ci-dessus, on voit que le béton faisant l'objet de cette étude se situe a minima dans la catégorie d'ouvrages de niveau 3 (bâtiments et ouvrages de génie civil pour une durée de vie de 50 à 100 ans) pour des enrobages conformes aux réglementations actuelles. Par ailleurs, on peut remarquer que, de par ses caractéristiques, le béton étudié peut satisfaire à des conditions plus strictes relatives à des durées de vies plus élevées ou à des milieux plus agressifs. On voit par exemple que du point de vue de la diffusivité des chlorures, la valeur du coefficient de diffusion apparent permettrait de répondre à des niveaux d'exigence encore supérieurs (niveaux 4 et 5) vis-



		Classes et valeurs limites				
	Durabilité potentielle →	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) $P_{eau}$	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure ( $P_{Hg\ max} = 400\ MPa$ et prétraitement par étuvage à $T = 45\ ^\circ C$ pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) $P_{Hg}$		13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique ( $\Omega.m$ ) $\rho$	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion <i>effectif</i> des chlorures ( $10^{-12}\ m^2.s^{-1}$ ) $D_{eff}$	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de migration) ( $10^{-12}\ m^2.s^{-1}$ ) $D_{app(mig)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ( $10^{-12}\ m^2.s^{-1}$ ) $D_{app(dif)}$				< 5	
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{entrée} = 0,2\ MPa$ et après étuvage à $T = 105\ ^\circ C$ ) ( $10^{-18}\ m^2$ ) $K_{gaz}$	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
G	Perméabilité à l'eau liquide (à $P_{max}$ , par mesure directe du flux, après saturation, cf. § 7.2.4.1 et 7.2.4.2) ( $10^{-18}\ m^2$ ) $k_{lq}(\tau)$	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
	Type de béton (indicatif et pour des formules simples)		B25 à B40	B30 à B60	B55 à B80	> B80

Figure 6 : Classes de durabilité potentielle selon le guide AFGC [4].

à-vis de la corrosion induite par les chlorures dans le cas d'une faible concentration en chlorures libres en surface. L'exigence sur le coefficient de diffusion serait également satisfaite pour une structure de niveau 3 qui serait exposée à une forte teneur en chlorures en surface ou située en zone de marnage. Des observations similaires peuvent être faites en ce qui concerne la porosité qui est relativement faible, de l'ordre de 12,6 %, et qui par exemple est très proche du seuil de 12 % défini pour le niveau 4 vis-à-vis de la corrosion induite par la carbonatation en environnement humide.

En somme, l'application de la démarche performantielle est cohérente avec les profondeurs de pénétration limitée

des agents agressifs observées sur le béton étudié : les fronts de carbonatation et de chlorures ne dépassent pas 20 mm après 30 ans d'exposition.

## 5. CONCLUSIONS

L'étude présentée a porté sur le diagnostic d'un béton à base de ciment au laitier ayant été soumis à un environnement marin/industriel pendant plus de 30 ans. Les examens réalisés indiquent que le béton étudié ne présente aucune pathologie d'origine physico-chimique. Les caractéristiques physiques, microstructurales et minéralogiques

		Classes et valeurs limites				
Durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures →		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (% massique par rapport au ciment)		< 10	10 - 13	13 - 20	20 - 25	≥ 25
Durabilité potentielle vis-à-vis de l'alcali-réaction →		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (% massique par rapport au ciment)		≥ 20	12 - 20	8 - 12	5 - 8	< 5

Figure 7 : Classes relatives à la teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  selon le guide AFGC [4].

> 120 ans <i>Ouvrages dits exceptionnels</i> Niveau 5	de 100 à 120 ans <i>Grands ouvrages</i> Niveau 4	de 50 à 100 ans <i>Bâtiment et Ouvrages de génie civil</i> Niveau 3	de 30 à 50 ans <i>Bâtiment</i> Niveau 2	< 30 ans Niveau 1	Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / ← Niveau d'exigence	Type d'environnement ↓	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} < 100$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	Sec et très sec ( $\text{HR} < 65\%$ ) ou humide en permanence	1	Corrosion induite par carbonatation ( $e = 30 \text{ mm}$ )
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} < 100$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	Humide ( $\text{HR} > 80\%$ )	2	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10^{(4)}$	• $P_{\text{eau}} < 12^{(7)}$ • $K_{\text{gaz}} < 100^{(8)}$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(5)}$	• $P_{\text{eau}} < 15$	Modérément humide ( $65 < \text{HR} < 80\%$ )	3	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 12^{(7)}$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(9)}$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 16$	Cycles fréquents d'humidification-séchage	4	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 10$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} < 20$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 14$	• $P_{\text{eau}} < 15$	• $P_{\text{eau}} < 16$	5.1 [Cl] faible <sup>(1)</sup>	5	Corrosion induite par les chlorures ( $e = 50 \text{ mm}$ )
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 11$	• $P_{\text{eau}} < 14$	5.2 [Cl] forte <sup>(2)</sup>		
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} < 5$	• $P_{\text{eau}} < 13$ • $D_{\text{app(mig)}} < 7$	• $P_{\text{eau}} < 13$	• $P_{\text{eau}} < 15$	Immersion dans l'eau contenant des chlorures	6	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 10$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{gaz}} < 100$ • $k_{\text{liq}} < 0,05$	• $P_{\text{eau}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 3$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 11$	• $P_{\text{eau}} < 14$	Zone de marnage	7	

Figure 8 : Relations Niveau d'exigence/Indicateurs de durabilité proposée par le guide AFGC [4].



obtenues traduisent une bonne tenue de ce béton dans le milieu considéré.

Les indicateurs de durabilité mesurés (porosité, coefficient de diffusion) ont permis de positionner ce béton par rapport aux recommandations de l'approche performantielle proposée par le guide AFGC [4]. Une durabilité potentielle de classe moyenne/élevée a été obtenue pour ce béton. Le diagnostic réalisé a montré que les fronts de carbonatation et de chlorures, après 30 ans d'exposition à un environnement de type XC2 et XS1 suivant la norme NF EN 206-1, ne dépassaient pas 20 mm et n'avaient toujours pas atteint la première nappe d'armatures. Le risque de corrosion n'est donc pas actuellement à considérer après 30 ans d'exposition, ce qui conforte la disposition de ce béton dans la catégorie de béton pour ouvrages répondant à minima à un niveau 3 en terme de niveau d'exigences (bâtiments et ouvrages de génie civil pour une durée de vie de 50 à 100 ans) pour le type d'environnement considéré et pour des enrobages conformes aux réglementations actuelles.

Cette étude a montré également, à l'instar de ce qui est souligné dans le guide AFGC, que l'évaluation de la durabilité potentielle d'un béton doit considérer plusieurs facteurs pour être optimale. Pour le béton étudié dans l'environnement considéré, on a pu par exemple constater que ses propriétés (porosité et coefficient de diffusion,...) permettaient effectivement d'assurer son niveau de durabilité en compensant les effets liés à une faible teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$ , définie comme a priori prépondérante pour l'évaluation de la durabilité des armatures. En effet, si les résultats de certains de ces facteurs sont en accord avec l'aspect réel du béton, d'autres au contraire conduisent à des conclusions en opposition avec ce qui est réellement observé. Ainsi le critère teneur en portlandite semble peu approprié dans le cas présent. Malgré une faible teneur en portlandite (du fait de la nature du ciment CEM III), la carbonatation du béton est relativement faible et n'a pas dépassé les 20 mm de profondeur.

Pour finir, cette étude montre qu'une démarche basée sur des mesures d'indicateurs de durabilité associées aux méthodes de caractérisation physico-chimiques et micro-structurales, permet d'apporter au maître d'ouvrage une vision supplémentaire en situant le diagnostic d'un béton dans le cycle de vie de l'ouvrage. Une telle démarche s'inscrit directement dans la problématique de maintenance et de gestion des ouvrages, et trouve un intérêt particulier

lorsque les données sur la composition des bétons sont manquantes. En revanche, il est à mentionner que les niveaux d'exigence du guide AFGC sont définis dans une optique d'aide à la conception, en tenant compte des règles actuelles (enrobage de 30 mm pour la carbonatation et 50 mm pour les chlorures). Dans ces conditions, pour un ouvrage existant dont l'enrobage des armatures peut être différent, les données issues d'un diagnostic peuvent être utilement complétées par l'utilisation de modèles prédictifs (carbonatation et pénétration des chlorures) afin d'estimer la durée de vie résiduelle de l'ouvrage (temps d'initiation de la corrosion).

## 6. RÉFÉRENCES

- [1] Evolution in-situ de la résistance et des caractéristiques de durabilité d'un BFUP : retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant, F. TOUTLEMONDE, M. CARCASSES et M. LION, à paraître, **Congrès BFUP 2009**, 17-18 novembre 2009 à Marseille.
- [2] Diagnostic d'état d'un béton de voile à base de ciment au laitier, A. AMMOUCHE, Rapport interne **LERM** 08.22204.001.01.A, 2008.
- [3] Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Indicateurs de durabilité. **Guide AFGC** de juillet 2004.
- [4] **Norme** NF EN 206-1. Béton – Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité.
- [5] **Norme** NF EN 197-1. Ciment – Partie 1 : compositions, spécifications et critères de conformités des ciments courants.
- [6] Application d'une démarche performantielle pour évaluer la durabilité du tablier d'un grand ouvrage d'art, 15 ans après sa construction, G. VILLAIN, M. THIERY, G. PLATRET et J.L. CLEMENT, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 270-271, p. 3 à 28, 2007.
- [7] Exemple d'application d'un modèle de carbonatation in situ, M. THIERY, G. VILLAIN, S. GOYER, G. PLATRET, J.L. CLEMENT et P. DANGLA, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 270-271, p. 29 à 50, 2007.

## Le nouveau Réseau Génie Civil & Urbain

Louis DEMILECAMPS  
Président du RGC&U

## Un peu d'histoire

- Initié par les Ministres de l'Équipement et de la Recherche en 1999 (et officiellement lancé par C. Allègre, alors Ministre de la Recherche)
- Poursuit l'action incitative de l'État menée par le Plan Génie Civil en portant son champ d'action à tous les ouvrages publics et privés d'aménagement et d'équipement du territoire :
  - infrastructures de transport terrestre et aérien,
  - ouvrages portuaires, maritimes et fluviaux,
  - fondations et ouvrages souterrains,
  - réseaux de canalisations,
  - ouvrages de gestion et de protection de l'environnement,
  - équipements de production et de transport de l'énergie et ouvrages hydrauliques,
  - gros œuvre des bâtiments, constructions urbaines, rurales et industrielles.



## Qu'est-ce que le RGC&U?

- Réseau technologique de pilotage de programmes de recherche de la Direction de la Recherche et de l'Innovation dans le domaine du génie civil et de la construction
  - Rôle clé et moteur depuis 1999
  - Élément principal de son organisation : comité d'orientation,
  - Labellisation de nombreux projets selon un processus «bottom up»
  - Comité d'orientation du Programme ANR-PGCU (2005-2006)
- Tournant majeur: 2009
  - Organe de labellisation pour le montage des projets nationaux soutenus par le MEEDDAT, pour la définition des programmes de recherche du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) dans le domaine du génie civil et de la construction, et pour la sélection des projets financés par la Direction de la Recherche et de l'Innovation du CGDD.
- Grand merci à Michel Ray, président depuis 1999 et à ses membres



## Un nouveau départ

- Nouveau contexte et de nouveaux besoins
  - Apparition de nouvelles thématiques
  - Reconstitution du CODOR
  - Un nouveau président
  - Une nouvelle organisation autour de programmes
    - Programmes « Projets nationaux »
    - Programmes de recherche avec appels à projets
- Nouvelles thématiques identifiées par le Grenelle « Environnement »
  - éco-technologies du bâtiment (maîtrise de l'énergie, gestion et qualité de l'eau, traitement des déchets, produits de construction...)
  - techniques de conception et de construction en environnement urbain, à leur intégration pour mieux satisfaire les besoins et attentes des habitants, usagers et riverains
  - technologies de l'aménagement et de la gestion de la ville
  - méthodologies comme les analyses en cycle de vie et des démarches de préservation du patrimoine.

## Organisation du RGC&U

- Comité d'orientation (30 membres)
  - Définition des axes d'orientation des appels à propositions
  - Labellisation des projets (nationaux, appels à projets)
  - Proposition de sélection des projets à destination de la DRI
  - Suivi et valorisation des projets.
- Comités scientifiques par programmes
  - Comité scientifique C2D2 (10 membres + experts)
    - Responsable de la qualité scientifique de l'appel à projet
    - Evaluation des réponses en fonction de leur intérêt scientifique
    - Proposition de sélection des projets à destination du CODOR
    - Evaluation finale des projets
- Mission Génie civil et construction
  - Secrétariat du CODOR et des CS
  - Suivi de l'avancement des projets
  - Organisation des Entretiens du RGC&U (Codor) et des ateliers d'avancement et de restitution des programmes

## Programme C2D2 Concevoir et construire pour le développement durable

Louis DEMILECAMPS  
Président du RGC&U

## Objectif

- Mobiliser conjointement la communauté scientifique et les praticiens pour produire des outils et des techniques qui permettront au secteur de la construction et du génie civil de mieux intégrer les exigences du développement durable.



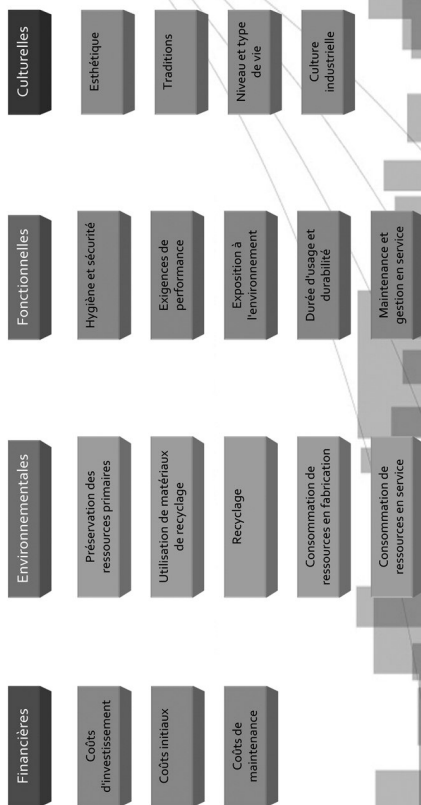
## Contexte

- Grenelle de l'environnement
- Engagement de la France à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 6% par rapport au niveau de 1990 d'ici 2012
- Contexte européen et international



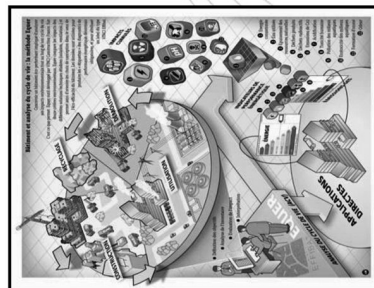
## Thèmes principaux

Exigences du client



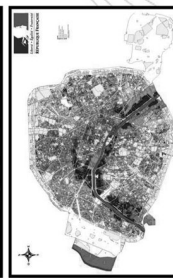
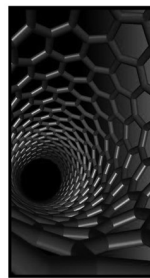
## Champ du programme C2D2

- Poursuivre les actions de recherche sur les réseaux, les matériaux, les structures, les méthodes de conception et de constructions
- Impulser des recherches en faveur de solutions globales et en rupture, permettant de répondre aux exigences d'efficacité énergétique, de consommation de ressources naturelles, de maîtrise des coûts et de qualité d'usage
  - Recherches sur la construction durable au sens large (bâtiments, ouvrages, réseaux)
  - Emergence de constructions et de réseaux d'infrastructure performants tout au long de leur cycle de vie.



## Les axes de recherche

- Trois volets
  - « Construction et exploitation durable et efficiente des bâtiments, des ouvrages et des réseaux »
  - « Sûreté de fonctionnement des services et des réseaux »
  - « Modélisation urbaine » (non ouvert en 2009)



## Construction et exploitation durable et efficiente des bâtiments, des ouvrages et des réseaux

- traite de l'ensemble des phases de vie des constructions depuis la conception jusqu'au traitement de la fin de vie, en passant par les étapes de construction, de maintenance, de réhabilitation éventuelle, de gestion et d'optimisation du service rendu
- Quelques thèmes
  - Déploiement d'une véritable conception performante des bâtiments, des ouvrages et des réseaux sur leur durée de service
  - Surveillance de la performance tout au long de leur vie
  - Développement et mise en œuvre de matériaux et de systèmes à faible impact environnemental avec ACV
  - Minimisation de la consommation de matières premières en construction et en service
  - Développement de méthodes de gestion raisonnées intégrant de manière holistique des considérations environnementales, économiques et sociales
  - Emergence de procédés de valorisation des ressources libérées lors de la fin de vie
  - Adaptabilité et la rénovation des bâtis
  - Conception des ouvrages pour NTE



## Sûreté de fonctionnement des services et des réseaux

- consiste à développer une ingénierie susceptible de fournir des éléments de réponse aux gestionnaires et aux autorités pour adapter bâtiments, ouvrages et réseaux aux impacts du changement climatique.
- Quelques thèmes
  - Etude de fragilisation des ouvrages
  - Baisse de la durabilité de certains produits ou ouvrages de constructions...
  - Modification des routines d'exploitation et d'entretien
  - Développement de l'instrumentation automatique des réseaux



## Calendrier

- Appel à projets:
- Date limite de remise des projets:
- Lancement des projets:
- Durée des projets: 24-36 mois
- Coûts total d'un projet : 200 - 500 k€
- Appel conjoint (possible) avec les programmes
  - ERA-net Eracobuild
  - ERA-net Road II
  - Calfrance

01 juillet 2009  
30 septembre 2009  
novembre 2009

## PRIX FNTP DU SUJET DE RECHERCHE

A l'issue des entretiens, **Xavier Neuschwander**, président de la commission technique de la FNTP, a remis leurs prix aux lauréats distingués par le suffrage des participants :

- **1<sup>er</sup> prix : Camille MAGNIONT**, doctorante au laboratoire de matériaux et durabilité des constructions à Toulouse, pour sa recherche : **Formulation et caractérisation d'un écomatériau de construction incluant des agroressources.**
- **2<sup>ème</sup> prix : Antonin BREUGNOT**, doctorant à EGIS Géotechnique / Laboratoire 3S-R, pour sa recherche : **Modélisation numérique des ouvrages de protection contre les chutes de blocs par une approche couplée discret-continu.**
- **3<sup>ème</sup> prix ex-aequo : Guillaume DEROMBISE**, doctorant au laboratoire central des Ponts et Chaussées, pour sa recherche : **Comportement à long terme des géotextiles aramides en milieu alcalin.**
- **3<sup>ème</sup> prix ex-aequo : Yun Yun TONG**, doctorante au laboratoire central des Ponts et Chaussées, pour sa recherche : **Réalcalinisation des bétons armés dégradés par carbonatation.**



## Informations Pratiques

**LIEU :** Palais des Congrès d'Arles, salle **Camargue**

**ADRESSE :** Avenue 1<sup>re</sup> Division France Libre  
13643 ARLES

**ACCES :** de la gare SNCF : Bus ligne 1  
(direction Barriol) station : Allende  
En voiture : à partir du périphérique autour  
d'Arles (prolongement de l'autoroute),  
Sortie N° 5 puis suivre la direction :  
Palais des Congrès-Chambre de Commerce

**ACCUEIL :** 8h 30

**LIEU DU DEJEUNER :** Palais des Congrès

**PARTICIPATION AUX FRAIS** (collation, repas,  
documentations) : **80 € TTC** (TVA 19,6 %)  
(Bon de commande ou chèque à établir à l'ordre de DVB, une  
facture justificative sera envoyée).

Pour votre inscription ou information :

**CONTACT : DVB**  
17, rue Pitois – 92800 PUTEAUX  
Tél : 01.41.44.84.10  
Fax : 01.41.44.84.14  
Mél : [Dvb@wanadoo.fr](mailto:Dvb@wanadoo.fr)  
Florence de Balsac : 06 03 05 08 92

Réponse au plus tard le 19 Octobre 2009.

**I R E X**  
IREX – 10, rue Washington – 75008 PARIS Tél. 01 44 13 32 77 – Fax : 01 43 59 68 30  
Mél : [IREX@wanadoo.fr](mailto:IREX@wanadoo.fr) - [www.irex.asso.fr](http://www.irex.asso.fr)



L'érosion interne des sols est un mal sournois qui affecte de nombreux digues et barrages en France et dans le monde, provoquant des ruptures parfois catastrophiques.

En 2005, une dizaine d'équipes françaises de recherche ou d'ingénierie se sont mobilisées pour construire un projet de R&D visant à mieux connaître, détecter et traiter cette pathologie. Baptisé « **ERINOH** » (pour Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques) et labellisé par le Pôle de Compétitivité « Gestion des Risques et Vulnérabilité des Territoires », ce projet a fait partie des tous premiers acceptés et financés d'une part par l'**Agence Nationale de la Recherche** et d'autre part par la **Direction de la Recherche et de l'Innovation du MEEDDM**. Depuis, **ERINOH** a pris une envergure européenne et va se prolonger au moins jusqu'en 2011.

Le symposium d'Arles se tient dans une région particulièrement exposée aux risques d'inondation et qui, suite aux crues traumatisantes de 1993-1994, 2002 et 2003, se fédère autour du Plan Rhône et de son programme de renforcement ou de réaménagement de digues. Cette journée permettra de faire le point d'avancement du projet **ERINOH**, après une matinée introductive où seront notamment présentées les importantes évolutions récentes de la réglementation française sur la sécurité des ouvrages hydrauliques. Un large public de maîtres d'ouvrage, publics et privés, de maîtres d'œuvre et de bureaux d'études de la profession y est convié.

## PÔLE DE COMPETITIVITE «Gestion des risques et vulnérabilités des territoires»

### NOUVELLE REGLEMENTATION NOUVELLES METHODES DE DIAGNOSTIC DE SECURITE DES DIGUES, AVANCEES DU PROJET DE RECHERCHE ERINOH

#### Symposium

**Vendredi 23 Octobre 2009**  
**Palais des Congrès d'Arles**

Sous le patronage du

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du  
Développement durable et de la Mer  
Direction de la Recherche et de l'Innovation  
Direction Générale de la Prévention des Risques,

de l'ANR, SYMADREM, Cemagref et EDF

## Programme général

### Matinée

**8h 30 - 9h 00 : ACCUEIL**

**MATIN LES NOUVEAUX ENJEUX DE LA SECURITE DES DIGUES**  
*Président : Jean-Marc KAHAN ou Nicolas MONIE (MEEDDM)*  
*Vice-Président : Hervé SCHIAVETTI (Arles)*

**09h 00 :** Bienvenue et enjeux de cette journée – Hervé SCHIAVETTI,  
maire d'Arles et Président du SYMADREM

**09h 15 :** Evolution récente de la réglementation sur les ouvrages  
hydrauliques et responsabilités des maîtres d'ouvrage  
**Jean-Marc KAHAN ou Nicolas MONIE MEEDDM -DGPR**  
Service Technique de l'Energie Electrique, des Grands  
Barrages et de l'Hydraulique (STEEGBH)

**09h 45 :** Mise en oeuvre de la nouvelle réglementation pour les digues ,  
exemples et besoins de recherche –  
**Gérard DEGOUTTE et Patrice MERIAUX, Cemagref, Unité de**  
*Recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie »*

**10h 15 : Pause**

**10h 45 :** Exemple, le cas du plan Rhône –  
**Thibaut MALLET, Directeur Technique du SYMADREM**

**11h 15 : Table ronde : questions- réponses**

**12h 00 – 13h 15 : Déjeuner**

### Après-midi

**APRES-MIDI AVANCEES DU PROGRAMME DE RECHERCHE ERINOH**  
*Président : Christian PARENT*  
*(IGPC – H Président du projet ERINOH)*  
*Vice-Président : Jean-Pierre GAUTIER*  
*(Directeur Général du SYMADREM)*

**13h 30 :** Le Projet de Recherche ERINOH  
**Christian BERNARDINI, Délégué Général de l'IREX**

**14h 00 :** L'étude de l'érosion interne dans les digues : apports d'ERINOH  
**Jean-Jacques FRY Expert EDF**

**14h 30 :** La surveillance et la détection des anomalies  
**Daniel FRANCOIS et Jean-Paul BLAIS EDF,**

**15h 00 :** Les essais de caractérisation de l'érosion interne  
**Stéphane BONELLI Cemagref et Philippe REIFFSTECK LCPC,**

**15h 30 : Table ronde : questions- réponses**

**16h 15 : CONCLUSIONS**

**16h 30 : Clôture de la journée**



## Objectifs :

Ce colloque fait suite à plusieurs manifestations ces dernières années de la **communauté française en fiabilité et analyse des risques appliquées aux matériaux et aux structures** : 5<sup>èmes</sup> journées fiabilité des matériaux et des structures, 3<sup>èmes</sup> journées de formation Méc@Proba, 2<sup>èmes</sup> journées scientifiques du GIS MR-GenCi. Il en rassemble les thématiques et les préoccupations. Dans cet esprit, il prolonge le premier atelier commun AUGC-AFM « Approches probabilistes et fiabilistes appliquées à la durée de vie des structures », qui s'est tenu lors des 25<sup>èmes</sup> Rencontres Annuelles de l'AUGC à Bordeaux en 2008.

## Thèmes de la conférence :

Les approches fiabilistes et probabilistes sont utilisées depuis déjà plus d'un demi-siècle en mécanique et en génie civil. En France, de nombreuses manifestations scientifiques ont permis de créer des espaces d'échanges : JNFiab'94 à Cachan, JNFiab'98 à Marne la Vallée, JNFiab' 01 à Bordeaux, JNFiab'05 à Clermont-Ferrand, JNFiab'08 à Nantes, journées de la commission « Mécanique Probabiliste des Matériaux et des Structures » de l'AFM (Méc@Proba 2006 à Marne la Vallée, Méc@Proba 2009 à Clermont-Ferrand), Journées Scientifiques du GIS MRGenCi (Yenne, 2007).

Parmi les **méthodes de prise en compte de l'incertain**, on s'intéressera de manière privilégiée aux **développements méthodologiques nécessitant le recours à des approches probabilistes, possibilistes ou fiabilistes**. Les communications seront regroupées en sessions thématiques, conclues par des tables rondes. Des sessions de cours et de conférences invitées seront également proposées en début de journée. Une session spéciale sera consacrée à la présentation de logiciels (OpenTurns, FERUM, OpenSees, PhimecaSoft) suivie d'ateliers interactifs d'utilisation de ceux-ci sur les stands des développeurs et/ou des utilisateurs industriels. La session posters aura lieu simultanément aux ateliers.

### TS1 : Modélisation des données

**Animateurs : C. Curt (Cemagref, Aix-en-Provence), D. Breyse (Univ. Bordeaux I)**

"*GIGO*" (*Garbage In, Garbage Out*). Comme le disent les anglo-saxons, la qualité de la prédiction d'un modèle dépend essentiellement de la qualité des données. Il en est ainsi pour les modèles probabilistes et possibilistes comme pour les modèles déterministes.

De nombreuses techniques de modélisation de la variabilité et de l'incertitude sur les données existent. Ce thème traitera de ces techniques, de leur développement et de leur utilisation, quel que soit le type de données concernées (sur les matériaux, l'environnement, les actions, voire les pratiques...). Il pourra concerner des développements académiques ou

des études de cas réels. Nous traiterons aussi, plus largement, de la modélisation de la connaissance. Enfin seront abordées des questions particulières telles que la modélisation des données en faible nombre, la prise en compte de la non-qualité des données, la combinaison de données disparates.

### TS2 : Méthodes de propagation d'incertitudes et applications

**Animateurs : B. Sudret (Phimeca Engineering, Paris), A. Nouy (Univ. Nantes)**

Ce thème scientifique a vocation à rassembler les contributions relatives aux méthodes de propagation des incertitudes dans les modèles physiques, notamment pour la résolution des problèmes de fiabilité des structures. On retiendra des communications présentant des avancées théoriques sur les sous-thèmes décrits ci-après et/ou des mises en œuvre de ces méthodes sur des applications industrielles d'envergure.

Les sous-thèmes qui se rattachent au TS2 sont en particulier :

- méthodes numériques pour la fiabilité ;
- éléments finis stochastiques, approches spectrales stochastiques ;
- surfaces de réponses / méta-modèles pour la propagation d'incertitudes ;
- conception fiable des structures (RBDO – *Reliability-based design optimization*) ;
- fiabilité et problèmes *time-variant* ou *space-variant*.

### TS3 : Maîtrise des risques et décision

**Animateurs : S.M. Elachachi (Univ. Bordeaux I), D. Boissier (Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)**

La maîtrise des risques passe nécessairement par la prise de décision (choix d'une solution optimale, comparaison multi-critères, prise en compte d'indicateurs de performance,...) en environnement incertain. On s'intéresse dans ce thème aux risques naturels et/ou technologiques, modélisés/modélisables au travers du paradigme (aléa • enjeux).

Les sous-thèmes qui se rattachent au TS3 sont (sans exhaustivité) :

- Analyse qualitative des risques, criticité ;
- Effets de l'incertitude des données, de leur variabilité, de l'erreur de modèle sur la décision ;
- Maîtrise des risques par leur mitigation, par une meilleure résilience des systèmes ;
- Recensement et évaluation des vulnérabilités aux différentes échelles.

### TS4 : Problèmes transverses en conception, inspection et maintenance

**Animateurs : F. Schoefs (Univ. Nantes), A. Sellier (Univ. Paul Sabatier, Toulouse)**

Ce thème scientifique vise à présenter des communications dans le domaine du couplage entre les méthodes fiabilistes et d'autres enjeux industriels comme : l'optimisation de la maintenance et de la conception, le suivi de structures par instrumentation, etc.

Ce thème se découpe en trois sous-thèmes (sans exhaustivité) :

- Optimisation de la conception ;
- Optimisation de la maintenance ;
- *Structural health monitoring*.

## Comité scientifique

Le comité scientifique comprend les animateurs des thèmes, les coordinateurs **M. Lemaire (IFMA, Clermont-Ferrand)** et **F. Duprat (INSA Toulouse)**, ainsi que les membres des comités scientifiques de chaque thème.

Il est ainsi composé de :

- A. Barros (Univ. Technologique de Troyes)
- C. Blanzé (CNAM, Paris)
- D. Boissier (Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)
- P.A. Boucard (ENS Cachan)
- J. M. Bourinet (IFMA, Clermont-Ferrand)
- D. Breyse (Univ. Bordeaux I)
- A. Chateaneuf (Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)
- C. Curt (Cemagref, Aix-en-Provence)
- F. Deheeger (Phimeca Engineering, Paris)
- F. Duprat (INSA Toulouse)
- S.M. Elachachi (Univ. Bordeaux I)
- N. Gayton (IFMA, Clermont-Ferrand)
- M. Lemaire (IFMA, Clermont-Ferrand)
- A. Nouy (Univ. Nantes)
- L. Peyras (Cemagref, Aix-en-Provence)
- B. Sudret (Phimeca Engineering, Paris)
- F. Schoefs (Univ. Nantes)
- A. Sellier (Univ. Paul Sabatier, Toulouse)
- T. Verdel (Ecole des Mines, Nancy)

## Comité d'organisation

- A. Bérard (INSA Toulouse)
- A. Clément (INSA Toulouse)
- N. Domède (INSA Toulouse)
- F. Duprat (INSA Toulouse)
- R. Hameed (INSA Toulouse)
- P. Jarry (INSA Toulouse)
- S. Multon (Univ. Paul Sabatier)
- F. Schoefs (Univ. Nantes)
- A. Sellier (Univ. Paul Sabatier)

## Partenaires

INSA Toulouse, Université Paul Sabatier, GIS MRGenCi, Commission MPMS de l'AFM, AUGC, ICSI, Phimeca Engineering, Région Midi-Pyrénées.

## Dates à retenir

Juin 2009 : premier appel à communication,  
 Septembre 2009 : second appel à communication,  
 31 octobre 2009 : date limite pour l'envoi des résumés,  
 31 novembre 2009 : retour de l'acceptation des résumés,  
 10 janvier 2010 : date limite pour la soumission des communications,  
 20 février : retour de l'acceptation des communications.

Les résumés de 700 mots maximum sont à envoyer à [jfms10@insa-toulouse.fr](mailto:jfms10@insa-toulouse.fr). Chaque résumé doit préciser les noms des auteurs, ainsi que le thème scientifique auquel se rattache l'étude présentée. Le contexte de l'étude, la méthodologie, ainsi que les principaux résultats attendus ou obtenus y seront décrits.

## Tarifs d'inscription

Universitaires : 280 €  
 Doctorants : 100 €  
 Industriels : 430 €  
 Visite technique (site et hall d'assemblage de l'A380) : 25 €

Une réduction de 50 € est accordée aux membres d'@MRGenCi. Les doctorants peuvent demander une aide auprès de la commission MPMS de l'AFM (Maurice Lemaire, [Maurice.Lemaire@ifma.fr](mailto:Maurice.Lemaire@ifma.fr)).

Les fiches d'inscription disponibles sur le site de la conférence sont à envoyer à Patricia Jarry ([patricia.jarry@insa-toulouse.fr](mailto:patricia.jarry@insa-toulouse.fr)).

## Programme prévisionnel

Mercredi 24 mars 2010 : session plénière 9h-18h30  
 Jeudi 25 mars 2010 : session plénière 9h-18h30, repas de gala 20h-22h30  
 Vendredi 26 mars 2010 : session plénière 9h-12h30, ateliers interactifs et session posters 13h-15h, visite technique 16h-19h

## Informations complémentaires

Le site de la conférence <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/jfms10/jfms10.htm> comprend des informations complémentaires relatives à l'hébergement, à l'accès et à l'inscription.

Pour toute information complémentaire :

- sur la conférence : Maurice Lemaire (04 73 28 80 12, [Maurice.Lemaire@ifma.fr](mailto:Maurice.Lemaire@ifma.fr)), Frédéric Duprat (05 61 55 99 30, [frederic.duprat@insa-toulouse.fr](mailto:frederic.duprat@insa-toulouse.fr))
- sur l'inscription et le paiement : Patricia Jarry (05 61 55 95 31, [patricia.jarry@insa-toulouse.fr](mailto:patricia.jarry@insa-toulouse.fr))

## Scientific Committee

### Chair:

Professor Klaas van Breugel, The Netherlands  
Professor Yongsheng Li, China  
Professor Rob B. Polder, The Netherlands

### Members:

Mark Alexander, University of Cape Town, South Africa  
Carmen Andrade, Institute of Construction Science, Spain  
Veronique Baroghel-Bouny, LCPC, France  
Muhammed Basheer, Queen's University of Belfast, UK  
Arnon Bentur, Technion, Israel  
Harald Budelmann, Technical University of Braunschweig, Germany  
Ailong Chen, Tongji University, China  
Carola Edvardsen, COWI, Denmark  
Göran Fagerlund, Sweden  
Edward J. Garboczi, NIST, USA  
Christoph Gehlen, Technical University of Munich, Germany  
Mette R. Geiker, Technical University of Denmark, Denmark  
Robert D. Hooton, University of Toronto, Canada  
A.C.W.M. van der Horst, BAM Infraconsult bv., The Netherlands  
Weiliang Jin, Zhejiang University, China  
Jin Keun Kim, Korea Advanced Inst. of Sci. and Tech, Korea  
Konstantin Kovler, Technion, Israel  
David A. Lange, UIUC, USA  
Lars-Olof Nilsson, Lund Institute of Technology, Sweden  
Yuanbao Leng, Ministry of Water Resources, China  
Christopher Leung, HKUST, Hong Kong, China  
Victor C. Li, UMICH, USA  
Yihui Lu, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, China  
Jacques Marchand, Laval University, Canada  
Viktor Mechtcherine, Dresden University of Technology, Germany  
Hans W. Reinhardt, Stuttgart University, Germany  
Asko Sarja, CIB, Finland  
Ryoichi Sato, Hiroshima University, Japan  
Karen Scrivener, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland  
Takumi Shimomura, Nagasaki University of Technology, Japan  
Klaus Soderlund, CIB Finland  
Wei Sun, Southeast University, China  
Geert De Schutter, Ghent University, Belgium  
Luc Taerwe, Ghent University, Belgium  
A.C.W.M. Vrouwenvelder, TNO/TU Delft, The Netherlands  
Shengnian Wang, Key Lab of durability Technology for Harbour and Marine Structure, China  
Jason Weiss, Purdue University, USA  
Yongjiang Xie, China Academy of Railway Sciences, China  
Yong Yuan, Tongji University, China

## Organizing Committee

### Chair:

Klaas van Breugel, TU Delft, The Netherlands  
Yong Yuan, Tongji University, China

### Members:

Guang Ye, TU Delft, The Netherlands  
Erik Schlangen, TU Delft, The Netherlands  
Xian Liu, Tongji University, China  
Eddy Koenders, TU Delft, The Netherlands  
Qi Zhang, TU Delft, The Netherlands  
Yong jin Tan, Tongji University, China

Symposium Registration Desk  
Delft University of Technology  
Faculty Civil Engineering & Geosciences  
Section Materials & Environment  
Microlab

Mrs. Iris Batterham  
P.O. Box 5048 Symposium Co-ordinator  
2600 GA Delft  
The Netherlands

T: (+31) (0)6 46735478  
F: (+31) (0)15 278 6383

Email: [servicelife2010-citg@tudelft.nl](mailto:servicelife2010-citg@tudelft.nl)  
[servicelifedesign.tudelft.nl](http://servicelifedesign.tudelft.nl)

2nd International Symposium

# 2010

ServiceLifeDesign  
for Infrastructure  
Delft, The Netherlands  
October 4 - 6

PRELIMINARY  
ANNOUNCEMENT

Co-sponsored by



Organized by



Challenge the future

## Introduction

### Introduction

Following the success of the 1st International Workshop on Service Life Design for Underground Structures held in Tongji University, Shanghai, 2006, the 2nd conference on this topic is scheduled at 4-6 October 2010, in Delft, the Netherlands. The scope of this conference on the service life design is extended from underground structure to infrastructure.

In the past few years more and more attention has been devoted to the safety and serviceability as well as durability and sustainability of structures. Meanwhile there are intensive research and development activities going on, e.g. on environmental attack, materials properties, deterioration mechanisms, geometric- and structural design, execution aspect and maintenance. Furthermore codes and standards on service life design are being discussed and partially established world wide.

It is now time to present a focused picture of the current status and future trends in this field, including theory, practice and education. The aim of the symposium is thus to provide a forum to researchers and practitioners for presenting the newest findings and to discuss their new ideas on service life design and serviceability of infrastructural works, effectiveness of service life design methods and experiences from the practice gained up to now. The organizers encourage researchers and engineers, to submit an abstract related to the service life design and serviceability of infrastructures in general and concrete structures in particular.

## Main Topics

The main topics to be presented are:

- Asset management: Economically efficient exploitation of infrastructure;  
Control of risk of safety and durability; changing demands of society
- Cathodic protection
- Corrosion and corrosion protection
- Degradation mechanisms and simulation models for durability prediction
- Design of infrastructures for safety, serviceability and durability
- Educating durability and service life design aspects
- High performance and environment-friendly materials
- Inspection, assessment and monitoring
- LCA: life cycle design and life cost design
- Maintenance, repair and strengthening strategies
- Model-based design for concrete structures
- Multi-scale analysis of deterioration mechanism
- Probabilistic performance based service life design
- Transition from early-age properties to serviceability

2nd International Symposium

# 2010

ServiceLifeDesign  
for Infrastructure  
Delft, The Netherlands  
October 4 - 6

### Registration

Registration fee will cover the welcome reception, a copy of the symposium proceeding, buffet lunches, coffee or tea, refreshments and conference banquet.

Fee	Before 1st June 2010	After 1st June 2010
Full fee:	550	600
RILEM member:	500	550
Member of Chinese Civil Engineering Society:	500	550
Student (prove):	450	500

### Timetable

Submission of abstract:	Sep 31, 2009
Notification of acceptance of abstract:	Nov 30, 2009
Submission of full paper:	Feb 28, 2010
Notification of paper acceptance:	May 15, 2010
Deadline for early registration:	June 1, 2010
Symposium:	Oct 4-6, 2010

[servicelifedesign.tudelft.nl](http://servicelifedesign.tudelft.nl)



# 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 [annalessbtp@gmail.com](mailto:annalessbtp@gmail.com)

En cas de refus de transmission pour cause de lourdeur des fichiers, l'auteur pourra envoyer un cédérom 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.

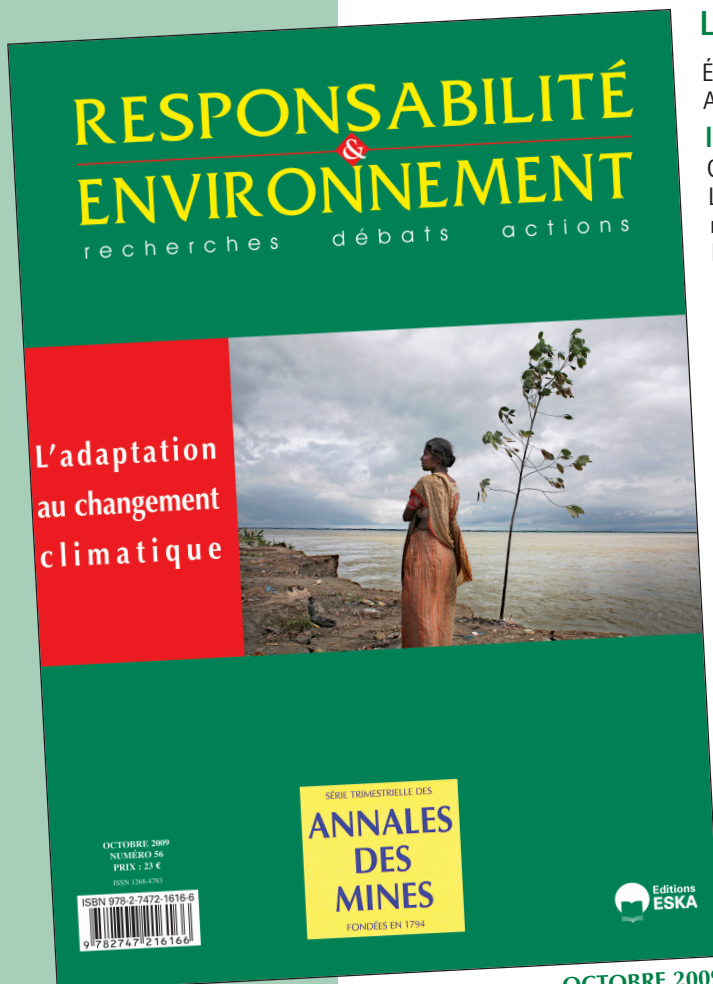
**AGPA Editions, 4, rue Camélinat, 42000 Saint-Etienne.**

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



# RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

recherches débats actions



OCTOBRE 2009  
ISSN 1268-4783  
ISBN 978-2-7472-1616-6

## L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ÉDITORIAL, *Pierre COUVEINHES*

AVANT-PROPOS, *Paul-Henri BOURRELIER*

### I - L'adaptation

Considérations sur le climat, *Emmanuel Le ROY LADURIE*

Les représentations du changement climatique : de la création divine à la responsabilité de l'homme, *René FAVIER*

Les leçons de l'histoire géologique et des grandes extinctions d'espèces, *Patrick De WEVER*

Climat, adaptation, évolution et biodiversité, *Gilles ESCARGUEL*

Les territoires face au changement climatique, *Martine TABEAUD*

Des événements naturels extrêmes aux figures de la catastrophe,

*Paul-Henri BOURRELIER et Jean DUNGLAS*

Adapter qui à quoi ? Quelle place pour l'homme dans la nature ?,  
*Michel JUFFÉ*

### II - Politiques publiques et actions de tous

La place de l'adaptation dans la politique climatique, *Marc GILLET*

La politique de la France en matière d'adaptation au changement climatique, *Pascal DUPUIS*

Cultivons notre planète : plus de biomasse, moins de gaz à effet de serre, *François PAPY*

Penser et aménager les agglomérations urbaines : quelques exemples de métropoles européennes, *Brigitte MAZIÈRE*

Pour une gestion dynamique du littoral, *Nicole LENÔTRE*

La couverture financière des événements climatiques extrêmes,  
*Erwann MICHEL-KERJAN*

L'éthique, fil conducteur de l'adaptation, *Entretien de Paul-Henri BOURRELIER avec Alain GRIMFELD, Yves Le BARS et Claudine SCHMIDT-LAINÉ*

\*\*\*\*\*

In memoriam : *François ASCHER*

(par Mme Marie-Josèphe CARRIEU-COSTA)

## ÉNERGIE : FAITS ET CHIFFRES EN 2008

Le bilan énergétique de la France pour 2008, *Bernard NANOT*

La facture énergétique de la France en 2008, *Bernard NANOT*

L'électricité en 2008, *Sylvie SCHERRER*

Le gaz naturel en France : les principaux résultats en 2008,  
*Véronique PAQUEL*

Les combustibles minéraux solides, *Sami LOUATI*

Les hydrocarbures, *Maurice GIRAULT*

Les énergies renouvelables en France : les principaux résultats en 2008,  
*Hélène THIÉNARD*

## BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35 - <http://www.eska.fr>

☐ Je désire recevoir ..... exemplaire(s) du numéro de **Responsabilité & Environnement octobre 2009 - numéro 56** (ISBN 978-2-7472-1616-6) au prix unitaire de 23 € TTC.

Je joins ☐ un chèque bancaire à l'ordre des Éditions ESKA

☐ un virement postal aux Éditions ESKA CCP PARIS 1667-494-Z

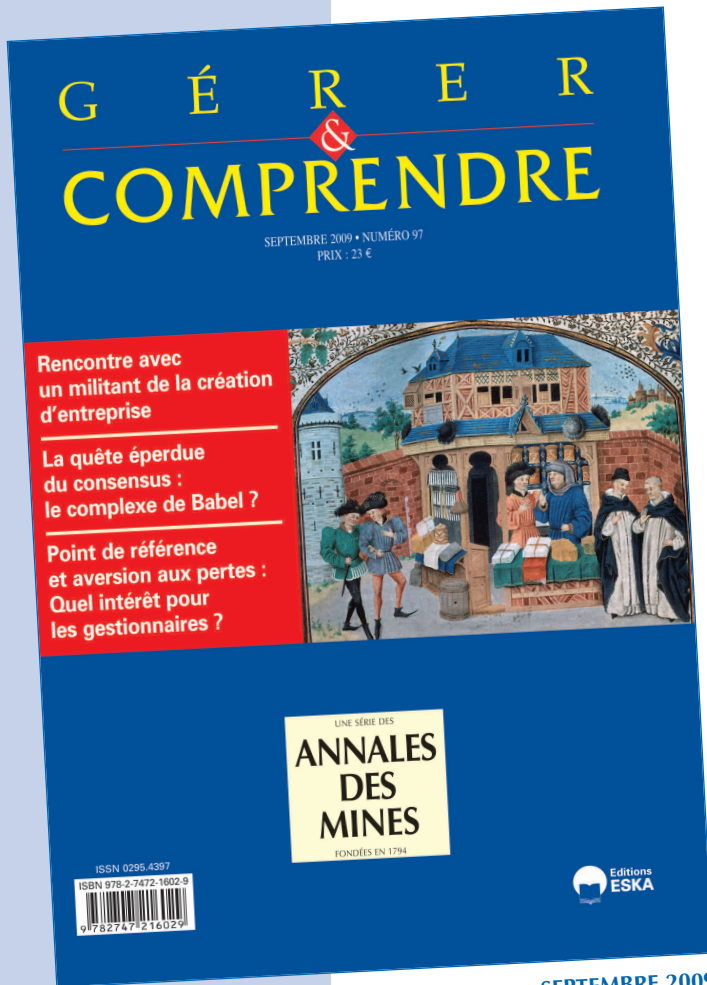
Nom ..... Prénom .....

Adresse .....

Code postal ..... Ville .....

# G É R & E R COMPRENDRE

## SOMMAIRE



SEPTEMBRE 2009  
ISSN 0295.4397  
ISBN 978-2-7472-1602-9

- RENCONTRE AVEC UN MILITANT DE LA CRÉATION D'ENTREPRISE  
Entretien avec Yvon GATTAZ  
Mené par Bernard COLASSE et Francis PAVÉ  
(25 février 2008)
- L'INTERACTION RÉGULATEUR / RÉGULÉ :  
CONSIDÉRATIONS À PARTIR DU CAS D'UNE ENTREPRISE SEVESO II SEUIL HAUT  
Par Michèle DUPRÉ, Julien ÉTIENNE  
et Jean-Christophe LE COZE
- VICES ET VERTUS DU TRAVAIL SPÉCIALISÉ  
Par Jean-Louis PEAUCELLE
- L'OMBRE PORTÉE DES OUTILS DE GESTION  
DES RESSOURCES HUMAINES : LE CAS DE LA MISE EN  
PLACE D'ENTRETIENS ANNUELS DANS UNE ENTREPRISE  
MARITIME  
Par Lionel HONORÉ
- LA QUÊTE ÉPERDUE DU CONSENSUS : LE COMPLEXE DE  
BABEL ? PLAIDOYER POUR UNE PAROLE DISSONANTE  
Par Myriam MONLA
- POINT DE RÉFÉRENCE ET AVERSION AUX PERTES :  
QUEL INTÉRÊT POUR LES GESTIONNAIRES ?  
Par Olivier L'HARIDON et Corina PARASCHIV
- Par Claude RIVELINE  
POURQUOI LE CRÉATEUR A-T-IL CRÉÉ  
LES ÉCONOMISTES ?  
À propos du livre de Pierre-Noël Giraud, *La Mondialisation, émergences et fragmentations*, Éditions Sciences humaines, 2008.
- Par Francis GINSBOURGER  
UNE TRAVERSÉE DE L'ATLANTIQUE EN 82 ANS  
À propos du livre de Walter Lippman, *Le Public fantôme* (1927), traduit en français aux Éditions Demopolis, 2008.
- Par Michel VILLETTE  
IL Y A ÉTHIQUE ET ÉTHIQUE...  
À propos du livre d'Alain Badiou, *L'Éthique, essai sur la conscience du mal*, Nous éditeur, 2003.

## BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35 - <http://www.eska.fr>

☐ Je désire recevoir ..... exemplaire(s) du numéro de **Gérer & Comprendre septembre 2009 - numéro 97 (ISBN 978-2-7472-1602-9)** au prix unitaire de 23 € TTC.

Je joins ☐ un chèque bancaire à l'ordre des Éditions ESKA

☐ un virement postal aux Éditions ESKA CCP PARIS 1667-494-Z

Nom ..... Prénom .....

Adresse .....

Code postal ..... Ville .....