



# DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

OCTOBRE 2009 - N° 5

PRIX : 27,44 €

**ORGAGEC'08 : RÉHABILITATION D'UNE BUSE MÉTALLIQUE PAR CHEMISAGE  
À L'AIDE D'UNE GAINÉE CONTINUE POLYMÉRISÉE EN PLACE**

**GC'2009 : NOUVELLE FORME DE GOUVERNANCE LA PRISE EN COMPTE  
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES PROJETS DE TUNNELS**

**INTERACTION ENTRE LA NATURE DU CIMENT ET LES ADJUVANTS  
ENTRAÎNEURS D'AIR POUR DIFFÉRENTS RAPPORTS EAU/CIMENT**

**ÉVALUATION SISMIQUE DE BÂTIMENTS EXISTANTS – APPROCHE BASÉE  
SUR LE RISQUE INTRODUISTE EN SUISSE**

## ANNEAU DE TENSÉGRITÉ PLIABLE-DÉPLIABLE



**INTÉRÊT ENVIRONNEMENTAL DES RECHERCHES  
SUR LES COUVERTURES D'INSTALLATIONS  
DE STOCKAGE DE DÉCHETS**



ISSN : 1270-9840  
CPPAP : 1002T77866

ISBN : 978-2-7472-1629-6

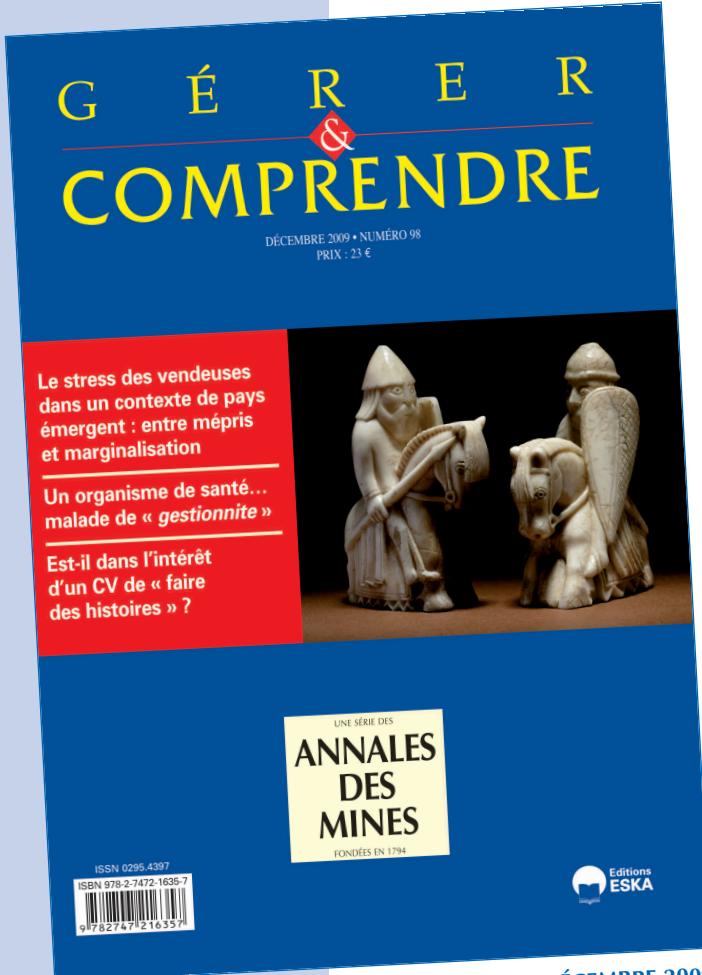


Editions  
**ESKA**

# GÉRER & COMPRENDRE

## SOMMAIRE

- LE STRESS DES VENDEUSES DANS UN CONTEXTE DE PAYS ÉMERGENT : ENTRE MÉPRIS ET MARGINALISATION  
Par Lamia HECHICHE-SALAH, Mourad TOUZANI et Asma AYARI
- DES GOUVERNEMENTS LIBÉRAUX FACE À DES CONFLITS SOCIAUX  
Par Jean-Louis PEAUCELLE
- UN ORGANISME DE SANTÉ... MALADE DE « GESTIONNITE »  
Par Mathieu DETCHESSAHAR et Anouk GREVIN
- DU « DÉVELOPPEMENT DURABLE » AU « DÉVELOPPEMENT RENTABLE » : CHRONIQUE DE LA MARGINALISATION D'UNE DÉMARCHE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS UNE GRANDE ENTREPRISE  
Par Aurélien ACQUIER
- LES APPORTS DE L'APPROCHE OPTIONNELLE À LA VALORISATION : LE CAS D'eBay  
Par Marie PEREZ et Safwan MCHAWRAB
- EST-IL DANS L'INTÉRÊT D'UN CV DE « FAIRE DES HISTOIRES » ?  
Par Thierry BOUDES, Loïc CADIN et Jean PRALONG
- Arnaud TONNELÉ  
JOSEPH JACOTOT, UN COACH AU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE  
À propos du livre de Jacques Rancière *Le Maître ignorant - Cinq leçons sur l'émanicipation intellectuelle*, 10-18, 1<sup>re</sup> éd., Paris, Éditions Fayard, 1987
- Sylvie CHEVRIER  
RECENSION  
À propos du livre de Jean-Pierre Segal, *Efficaces ensemble – Un défi français*, Paris, Éditions du Seuil, 2009
- Daniel FIXARI  
PATRON DE RENAULT  
À propos du livre de Cyrille Sardais *Patron de Renault - Pierre Lefacheux (1944-1955)*, Paris, Les Presses de Sciences Po, 2009
- Christian HERRAULT  
L'ÉPREUVE DES DIFFÉRENCES : L'EXPÉRIENCE D'UNE ENTREPRISE MONDIALE  
À propos du livre de Philippe d'Iribarne *L'épreuve des différences : l'expérience d'une entreprise mondiale*, Paris, Éditions du Seuil, 2009



## BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions AGPA-ESKA, Muriel DUBOSQUET, 4, rue Camélinat, 42000 SAINT-ÉTIENNE  
Tél. : 04 77 43 26 73 - Fax : 04 77 41 85 04 - muriel.dubosquet@eska.fr <http://www.eska.fr>

Je désire recevoir ..... exemplaire(s) du numéro de **Gérer & Comprendre décembre 2009 - numéro 98 (ISBN 978-2-7472-1635-7)** 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 .....

ISSN : 1270-9840

SÉRIE BIMESTRIELLE

**N° 5/2009**

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

OCTOBRE 2009

**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 (LCPG), 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

## ORGAGEC'08 Fin des présentations sélectionnées

- Réhabilitation d'une buse métallique par chemisage à l'aide d'une gaine continue polymérisée en place – M. MENGUY .....* 7

## GC'2009

### Cycle de vie des ouvrages : une approche globale Session 1 : Nouvelle formule de gouvernance

- La prise en compte du développement durable dans les projets de tunnels – L. D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER .....* 11

## matériaux

- Interaction entre la nature du ciment et les adjuvants entraîneurs d'air pour différents rapports eau/ciment – E.-H. KADRI, S. AGGOUN, K. EZZIANE, C. ROCHELLE .....* 19

## structures

- Anneau de tenségrité pliable-dépliable – J.F. DUBÉ, J. QUIRANT, F. CEVAËR, A.D. NGUYEN, R. MOTRO .....* 23

- Évaluation sismique de bâtiments existants. Approche basée sur le risque introduite en Suisse – P. LESTUZZI, B. DUVERNAY, R. PERUZZI, A. SCHMID....* 30

## développement durable

- Intérêt environnemental des recherches sur les couvertures d'installations de stockage de déchets – M. STAUB, J.-P. GOURC, R. SIMONIN.....* 37

- |  |                     |
|--|---------------------|
| <b>résumés — abstracts .....</b>         | 4                   |
| <b>annonces de colloques .....</b>       | 45                  |
| <b>recommandations aux auteurs .....</b> | 4 <sup>e</sup> couv |
| <b>bulletin d'abonnement .....</b>       | 2                   |



Photos de couverture : les auteurs  
Crédits photos : les auteurs



# BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS  
Tél. 01 42 86 55 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

\* 5/2009

## LISTE DES ANNONCEURS

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

## é d i t o r i a l

Chères lectrices, chers lecteurs,

Ce numéro 5 des Annales marque le passage de l'ancien système où les articles étaient proposés par des individualités motivées et divers institutionnels à un nouveau système de partenariat noué entre la revue, à savoir son éditeur et son rédacteur en chef, et des associations porteuses de la dynamique actuelle du secteur du BTP.

Les numéros précédents ont de ce point de vue été exemplaires. Ainsi les numéros portés par l'association ORGAGEC et l'AFGC qui ont marqué le début de l'année ont alterné avec des numéros comme celui-ci qui complètent ces numéros antérieurs et s'ouvrent à ce que nous pourrions appeler le public des Annales, cette force vive qui permet le développement de notre secteur au niveau national, international et particulièrement francophone.

Le prochain numéro sera intégralement consacré à des publications provenant des universitaires du Génie Civil. L'année 2009 sera ainsi close.

Pour 2010, nous savons que l'AFGC réfléchit à une réactivation du concept des « mardi » de l'ITBTP. Nous appuyons fortement cette initiative, qui fit les beaux jours de notre prédécesseur les « Annales de l'ITBTP » et sommes prêts à assurer la diffusion des principales retombées de ces manifestations.

De fidèles abonnés nous sollicitent par ailleurs pour publier dans les Annales des opérations exemplaires. Nous les accueillons avec plaisir.

Le numéro 5 que vous avez dans les mains présente en premier un article particulièrement appliqué présenté à Orgagec'08 et portant sur la réhabilitation d'une buse métallique par chemisage à l'aide d'une gaine continue polymérisée en place. Le sujet est aujourd'hui particulièrement d'actualité.

Dans le cadre des journées GC'2009 portant sur le cycle de vie des ouvrages, nous avons tenu à rajouter un article sur la prise en compte du développement durable dans les projets de tunnel en raison de la force emblématique de cette catégorie d'ouvrage et de la qualité de l'approche.

Il n'y a pas d'Annales sans articles sur les matériaux de construction, dont bien sûr le béton. Nous vous proposons de réfléchir à l'interaction entre la nature du ciment et les adjuvants entraîneurs d'air pour différents rapports eau/ciment. La protection contre les effets du gel a du sens même en France.

Nous revenons ensuite sur un sujet original, retenu il y a deux ans par la FNTP pour le prix chercheurs, l'anneau de tenségrité pliable-dépliable du professeur Motro et de ses collaborateurs. Nous n'avons pas fini de voir fleurir ces structures originales dans notre secteur dans un avenir proche.

Nous poursuivons notre présentation de l'évaluation sismique de bâtiments existants en nous intéressant à une approche basée sur le risque introduite en Suisse, qui fait écho à ce que nous avons déjà présenté pour l'Algérie.

Nous terminons enfin avec une étude sur l'intérêt environnemental des recherches sur les couvertures d'installations de stockage de déchets, intéressante tant par son approche scientifique que par la démonstration de la qualité que peuvent aujourd'hui atteindre les partenariats entre chercheurs et industriels.

Le rédacteur en chef  
François BUYLE-BODIN

# résumés — abstracts

## RÉHABILITATION D'UNE BUSE MÉTALLIQUE PAR CHEMISAGE À L'AIDE D'UNE GAINÉE CONTINUE POLYMERISÉE EN PLACE

M. MENGUY

Beaucoup de franchissements routiers ont été réalisés il y a 30-40 ans à l'aide de buses métalliques. Ces ouvrages arrivent actuellement au terme de leurs durées de vie et le problème de leurs réparations se présentent aux gestionnaires, avec de nombreuses contraintes ; environnementales, gestion des trafics, hydrauliques... La réhabilitation de la buse du Doré, de 2 m de diamètre par 50 m de long, à l'aide d'une gaine continue polymérisée en place a permis de répondre aux nombreuses contraintes du projet tout en permettant de faire des économies au Maître d'ouvrage. Cette gaine de 20 mm d'épaisseur était armée de fibre de verre et de fibre de carbone et a permis aussi de reprendre l'ensemble des efforts de l'ouvrage.

## REPAIR OF METAL NOZZLE USING A POLYMERIZED CONTINUOUS SHEATH, A CASE STUDY

*Many road underpasses were made 30-40 years ago with metal nozzles. These nozzles are now arriving at the end of their useful lives and managers face the problem of their repair with many constraints: environmental, traffic, hydraulic... Repairs to the Doré nozzle (2 m diameter by 50 m long), using a polymerized continuous sheath, enabled the numerous constraints of the project to be addressed, whilst allowing the project manager to reduce costs. The sheath was 20 mm thick and contained fibreglass and carbon fibre, and allowed to resume all the efforts of the construction.*

## LA PRISE EN COMPTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES PROJETS DE TUNNELS

L. D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER

Le Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) souhaite développer et formaliser une approche transversale visant à mieux prendre en compte les enjeux du développement durable dans les projets de tunnels. Cette approche passe notamment par l'application d'une démarche de type Analyse du Cycle de Vie (ACV) aux tunnels.

Aussi bien au niveau des projets que de la recherche, les trois piliers à la base du développement durable sont en effet interpellés : l'environnement avec la qualité de l'air et le bruit, et tous les impacts de ce type d'ouvrage ; les aspects sociaux et économiques avec la problématique de la sécurité en tunnel, celle de la maîtrise des coûts ou bien encore la gestion du patrimoine. Toutes les conditions sont donc réunies pour entamer, à l'échelle d'un projet de tunnel, une réflexion plus globale intégrant l'ensemble de ces aspects et susceptible d'orienter les choix techniques en matière d'équipements et de génie civil.

Au-delà de la formalisation d'une démarche générale, de la mise en place d'indicateurs spécifiques aux tunnels et du développement d'outils d'évaluation objectifs qui permettront au

maître d'ouvrage de choisir une solution en privilégiant un ou plusieurs aspect(s), se situent bien évidemment des problématiques plus concrètes comme par exemple :

- le recyclage plus systématique mais néanmoins encadré des matériaux d'excavation,
- l'optimisation de l'éclairage au regard des performances techniques, de la consommation d'énergie, ou bien encore la question de la qualité de l'air dans et à proximité du tunnel,
- la prise en compte des facteurs humains et organisationnels dans la sécurité.

Sans compter l'apparition de nouveaux enjeux de taille, comme par exemple, la nécessité d'intégrer très tôt les considérations relatives à l'exploitation dans les projets de conception ou de rénovation de tunnels.

## ACCOUNTING FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN TUNNEL PROJECTS

*The Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) is developing and formalizing a transversal approach in order to better address issues of sustainable development in tunnel projects. This approach especially involves the application of Life Cycle Assessment (LCA) to the design of tunnels.*

*Both in project and research studies, the three pillars at the base of sustainable development are concerned: the environment with the quality of air, the noise, and generally speaking all the impacts of such underground works; the social and economic issues with the safety in tunnels, the control of spiralling costs or even the sustainable management of infrastructure assets. All conditions are met to begin at the level of a tunnel project, a more comprehensive integration of all these aspects. This will influence the technical choices in equipments and civil engineering.*

*The formalization of a general approach includes the establishment of specific indicators for tunnels and the development of objective tools. These tools will enable an objective evaluation of projects by the contracting authority and a solution will be chosen by focusing on one or several aspects in particular. Beyond this formalization, are obviously more practical issues such as:*

- *the more systematic recycling of excavated materials,*
- *the optimization of lighting in terms of technical performances and energy consumption,*
- *the control of air quality in the tunnel and close to the extremities,*
- *the way to account for human and organizational factors in safety.*

*The emergence of new issues of size has also to be underlined, like for example, the need to very early integrate considerations relating to the phase of operation in the project of design or renovation.*

## **INTERACTION ENTRE LA NATURE DU CIMENT ET LES ADJUVANTS ENTRAÎNEURS D'AIR POUR DIFFÉRENTS RAPPORTS EAU/CIMENT**

E.-H. KADRI, S. AGGOUN, K. EZZIANE, C. ROCHELLE

Un nombre important d'adjuvants et de ciments est disponible sur le marché de la construction ce qui entraîne une difficulté dans le choix des couples compatibles pour chaque utilisation. Cette étude a pour but de trouver le dosage minimal de deux entraîneurs d'air de fabrication AXIM (France) pour générer 10% d'air occlus dans un mortier à l'état frais. Ces dosages sont déterminés pour deux types de ciments différents et deux rapports E/C. La chute des résistances mécaniques enregistrée par l'introduction des bulles d'air a été déterminée et comparée avec celle de mortiers sans entraîneur d'air. Cette étude a permis de constater que le ciment aux laitiers nécessite deux fois plus d'entraîneurs d'air que le ciment ordinaire. Ce dosage diminue avec l'augmentation du rapport E/C et avec l'amélioration de l'ouvrabilité, d'une façon plus prononcée avec les ciments ordinaires que les ciments aux laitiers. La chute de résistance est observée dans la plupart des couples ciments-adjuvants bien que certains adjuvants ont présenté une meilleure compatibilité donnant pour des faibles dosages des résistances comparables à celles de la référence.

## **COMPATIBILITY OF CEMENT TYPE AND AIR ENTRAINING ADMIXTURES WITH VARIOUS W/C RATIOS**

*A large number of admixtures and cements are used for a wide range of applications in construction industry which leads to a serious problem in the choice of the most compatible couple cement-admixture. This study attempts to find a minimal dosage for two air entraining admixtures produced by AXIM (France) to have an air content of 10% in fresh mortar. These dosages were determined with two different cements and water/cement ratios. The loss of mechanical strengths caused by the introduction of air bubbles has been determined and compared with that of the mortars without air entraining admixture. This investigation concluded that the slag cements require twice more air entraining admixture with respect to ordinary cements. This dosage decreased with increase of the w/c ratio and improvement of workability more for the ordinary cements than the slag cements. The loss of strength was noticed in most couple cement-admixtures, although some admixtures presented a better compatibility at low dosage giving strength comparable to that of the control.*

## **ANNEAU DE TENSÉGRITÉ PLIABLE-DÉPLIABLE**

J.F. DUBÉ, J. QUIRANT, F. CEVAËR, A.D. NGUYEN, R. MOTRO

L'équipe 'Conception en structures' du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'université Montpellier 2 étudie et développe depuis de nombreuses années des structures légères appelées « systèmes de tenségrité » qui satisfont à un principe structural innovant. Dans ce contexte, l'équipe a entrepris l'étude de systèmes de forme tubulaire et déployables dénommés anneaux. Le présent article traite de la première étape de leur développement à savoir la conception et l'étude du comportement d'un anneau de tenségrité à base pentagonale. Les premiers tests montrent les possibilités de déploiement et une bonne concordance entre l'expérimental et la modélisation.

## **FOLDABLE AND DEPLOYABLE TENSEGRITY RING**

*The team 'Design of Structures' of the mechanics and civil engineering laboratory of the Montpellier 2 University studies and develops since many years the called light structures*

*"systems of tensegrity". These structures satisfy an innovative structural principle with an assembly of bars and cables. In this context, we study systems called rings, with tubular form and deployable. This article treats first stage of their development with knowing the design and the study of the behavior of a tensegrity ring with pentagonal base. The first tests show the possibilities of deployment and a good agreement between experimentation and modeling.*

## **ÉVALUATION SISMIQUE DE BÂTIMENTS EXISTANTS – APPROCHE BASÉE SUR LE RISQUE INTRODUITE EN SUISSE**

P. LESTUZZI, B. DUVERNAY, R. PERUZZI, A. SCHMID

En raison des coûts importants associés à l'application des récentes prescriptions sismiques dans le cas des constructions existantes, une optique différente de celle des ouvrages neufs doit être utilisée. La Suisse applique depuis peu une approche basée sur les notions de risque. Le niveau de sécurité minimum exigé est défini en relation avec l'acceptation du risque individuel. Ensuite, une appréciation fondée sur le principe de proportionnalité doit être effectuée pour décider de l'opportunité des interventions. Cette appréciation est effectuée sur la base des coûts de sauvetage parasismiques qui correspondent statistiquement aux montants dépensés pour sauver des vies humaines. Les notions introduites sont illustrées par un exemple concret, l'évaluation d'un bâtiment scolaire à Monthey en Valais.

## **SEISMIC EVALUATION OF EXISTING BUILDINGS – RISK-BASED APPROACH USED IN SWITZERLAND**

*Due to the enormous costs related to the application of the recent standards in case of existing structures, an approach different from the one for new constructions should be used. Switzerland has started to apply an approach based on risk. The minimal security level is defined in relation to the acceptable individual risk. Afterwards, an evaluation based on the principle of commensurability should be performed to decide on the efficiency of the measures. This evaluation is achieved based on the human life saving costs. The introduced issues are illustrated with a real case, the seismic evaluation of a school building in Monthey in Valais.*

## **INTÉRÊT ENVIRONNEMENTAL DES RECHERCHES SUR LES COUVERTURES D'INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS**

M. STAUB, J.-P. GOURC, R. SIMONIN

Le Lirigm-LTHE a entrepris depuis plusieurs années des études hydromécaniques sur le comportement des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Dans le cadre du développement durable, comme il est montré dans cet article, la qualité de la couverture composite du stockage influe sur le bilan environnemental de ce procédé de traitement final des déchets. Le stockage de déchets non dangereux occasionne la production de gaz issu de la biodégradation des déchets, qui est notamment composé de méthane, un puissant gaz à effet de serre (GES). Les mécanismes de la formation du biogaz et les différentes phases de production sont détaillés. Un bilan environnemental des émissions d'une ISDND est ensuite réalisé, selon les scénarios de gestion et les types de couvertures employées (semi-perméable, imperméable). La performance environnementale des ISDND est en relation directe avec le taux de captage des émissions des déchets, et donc avec le type de couverture envisagée. Une discussion sur le concept des couvertures dans le cadre d'une exigence environnementale croissante et du contexte du bioréacteur et un panorama non exhaustif des recherches en cours ou en devenir sur l'optimisation de ces couvertures sont présentés.

## **ENVIRONMENTAL MOTIVES FOR LANDFILL COVER RELATED RESEARCH**

Lirigm-LTHE has initiated for several years studies on the hydro-mechanical behaviour of landfills. In the perspective of sustainable development, as shown in this paper, the reliability of the composite cap cover influences the environmental performance of this disposal method. Non-hazardous waste Landfills are responsible for Methane emissions, a Greenhouse Gas (GHG) with high Global Warming Potential naturally present in Landfill Gas (LFG). The mechanisms of LFG

production and the different biodegradation phases are detailed. An evaluation of Greenhouse Gas emissions from landfills depending on the way they are operated and on the cap cover characteristics (semi-permeable, impermeable) is presented. The sensitivity of the environmental performance of landfills is directly dependant on the LFG collection rate, and hence on the type of cap barrier. A discussion on the concept of landfill covers in the context of growing environmental concern and of bioreactor landfills is finally initiated. An overview of the research prospects on landfill cap covers is also presented.

# RÉHABILITATION D'UNE BUSE MÉTALLIQUE PAR CHEMISAGE À L'AIDE D'UNE GAINÉE CONTINUE POLYMERISÉE EN PLACE

**Michel MENGUY**

CETE De l'Ouest, Laboratoire régional de SAINT BRIEUC  
5 rue Jules Valles 22015 Saint Brieuc Cedex  
[michel.menguy@developpement-durable.gouv.fr](mailto:michel.menguy@developpement-durable.gouv.fr)

## 1. LE CONTEXTE

**L**a technique de réalisation de franchissements routiers par buse métallique a connu un réel succès durant les années 70 et 80 en raison de son faible coût et de sa rapidité d'exécution. Cette technique était particulièrement adaptée pour le franchissement de voies communales ou de petits cours d'eaux. En 2005, ils représentaient 7 % des ouvrages d'art du réseau des routes nationales (soit 1 849 ouvrages).

De par leur structure (coque mince métallique), les buses métalliques sont des ouvrages particulièrement sensibles (risque de corrosion et/ou de déformation) et fragiles (possible évolution brutale sans signes précurseurs). Leurs conditions d'utilisation en font, de plus, des ouvrages à enjeux : passages hydrauliques, passages inférieurs de voies à fort trafic, ... À ce titre, la rupture d'une buse métallique peut avoir de graves conséquences en terme de sécurité et d'exploitation. De plus, quand leur état le nécessite, leur réhabilitation est rendue délicate par des contraintes liées au gabarit hydraulique, à l'exploitation de la voie portée et aux techniques de réparation elles-mêmes (difficultés d'accès et de déploiement des moyens de réparation).

Ainsi, même si elles représentent une faible proportion du patrimoine d'ouvrages d'art, les buses métalliques restent des structures sensibles, fragiles et stratégiques au regard des enjeux qui en dépendent (et ce indépendamment de leur ouverture et de leur flèche).

Ces ouvrages ayant maintenant 30 ou 40 ans, ils présentent des pathologies qui sont souvent liées à la corrosion des tôles galvanisées. Ce sont les ouvrages hydrauliques qui présentent le plus de problèmes en raison de l'usure de la galvanisation par abrasion.

Quand les inspections détaillées de ces buses concluent à une défaillance complète de la structure les gestionnaires se trouvent dans l'obligation de réhabiliter ces ouvrages, avec plus ou moins de contraintes.

Deux guides ont été édités pour aider les gestionnaires confrontés à cette problématique :

- Un guide du LCPC SETRA de 1981 « Buses métalliques, Recommandation et règles de l'art » qui donne des recommandations pour la construction de ces ouvrages mais qui ne fait qu'aborder succinctement la réparation.
- Un guide du SETRA de 1992 « Buses métalliques, Guide pour la surveillance spécialisée, l'entretien et la réparation » qui traite à la fois des visites et de l'entretien, mais aussi des différentes techniques de réparation.

## 2. LE CAS DE LA BUSE DU DORÉ DANS LE DÉPARTEMENT DES CôTES D'ARMOR

En 2005, les départements bretons comptaient 119 buses métalliques avec une moyenne d'âge d'environ 30 ans. La DDE des Côtes d'Armor avait en gestion, avant la décentralisation, 360 ouvrages d'art dont une vingtaine de buses métalliques qui nécessitait une réhabilitation.

Parmi ces ouvrages prioritaires, la buse du Doré est une buse cylindrique d'environ 2 m de diamètre et de 50 m de long construite en 1972. Cet ouvrage permet au ruisseau du Doré de passer sous la RN12, 2 × 2 voies en périphérie de Saint-Brieuc avec un trafic important.

Lors de l'inspection détaillée de l'ouvrage réalisée par le LRPC Saint-Brieuc en 2004, il a été constaté une corrosion avec perforation sur la quasi-totalité de l'ouvrage au niveau des joints longitudinaux. La perte moyenne d'épaisseur des tôles était de 23 % et atteignait **66 % dans la zone de marnage**.



Figure 1: Vue de la corrosion généralisée sur la zone de marnage.

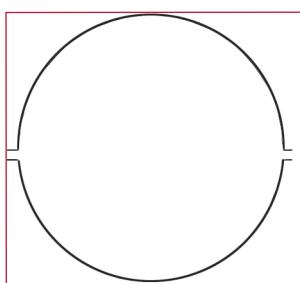


Figure 2 : Coupe type de la buse.  
Les joints longitudinaux sont de type joints à bords tombés, ils sont obtenus en repliant à l'extérieur, à angle droit, les bords ondulés d'un élément de bus. Ces bords sont percés de trous d'assemblage et utilisés pour boulonner les éléments les uns aux autres en plaçant les sommets d'onde d'une oreille dans les creux d'onde de l'autre.

Les désordres observés sur la buse faisaient donc apparaître une perte de résistance mécanique avec un risque de rupture brutale des assemblages boulonnés. L'ouvrage n'étant manifestement plus en capacité d'assurer son niveau de service, des mesures conservatoires par renforcement provisoire ont été mises en place dans l'attente des travaux de réhabilitation.

Le renforcement général de l'ouvrage ou son remplacement était à prévoir à court terme.

## 3. RECHERCHE D'UNE SOLUTION POUR LA RÉHABILITATION DE LA BUSE

Les techniques les plus couramment utilisées pour la réparation des buses métalliques consistent, soit à réaliser une coque à l'intérieur: béton coulé en place en radier et béton projeté en voûte, soit à remplacer l'ouvrage par un ouvrage en béton en intervenant depuis la surface.

Les contraintes pour la réhabilitation de la buse du Doré étaient nombreuses :

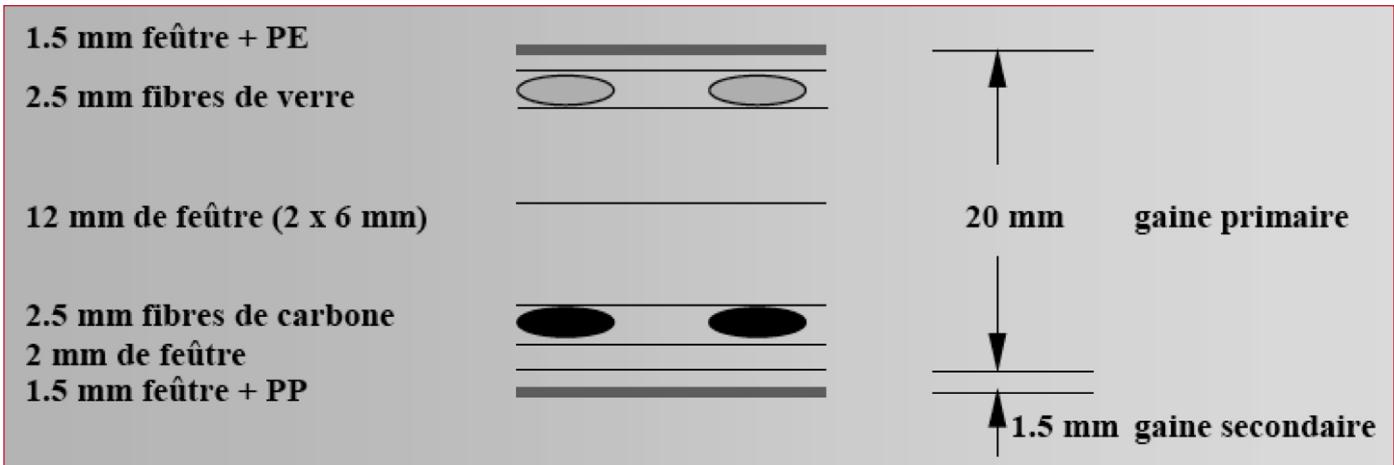
- son diamètre de 2 m ne permettait pas le recours à la technique coque béton en raison du manque de place pour projeter le béton,
- l'étude hydraulique du ruisseau avait mis en évidence une capacité d'écoulement insuffisante de l'ouvrage existant,
- le trafic important de la voie portée n'autorisait pas une intervention en tranchée ouverte,
- la stabilité de l'ouvrage n'étant pas assurée sans le confortement provisoire, il était dangereux de faire travailler des ouvriers dans l'ouvrage,
- il était nécessaire, comme dans tout ouvrage hydraulique, d'aménager une cunette calibrée pour favoriser le passage des poissons en période d'étiage,
- pendant les travaux, il y avait obligation de maintenir la capacité hydraulique de la rivière tout en préservant la vie piscicole.

La seule technique connue qui pouvait répondre à toutes ces contraintes était le fonçage d'un nouvel ouvrage en parallèle du premier mais le coût de l'opération était incompatible avec les crédits disponibles. Quelques expériences de réhabilitation par coques rigides, fibres de verres, mises en place par demi-coques avaient été faites mais jamais en considérant la technique comme structurante. De plus ces solutions diminuaient la capacité hydraulique et nécessitaient l'intervention de personnel dans l'ouvrage et n'était donc pas adaptée à notre cas de figure.

## 4. LA SOLUTION RETENUE

La technique de chemisage à l'aide d'une gaine continue polymérisée en place était décrite dans le guide de 1992 mais ne faisait pas état de retours d'expériences pour des ouvrages de ce diamètre et mettait le lecteur en garde vis-à-vis de la résistance mécanique des gaines et de leur pérennité dans le temps. Cette technique était bien connue et éprouvée dans le domaine de la réhabilitation de canalisations d'eaux usées ou pluviales. Après vérification de la faisabilité pour un ouvrage de cette dimension, elle a été retenue car elle présentait les avantages suivants :

- augmentation de la capacité hydraulique de l'ouvrage car le coefficient de rugosité de la gaine est supérieur à celui d'une buse métallique, pour une diminution du diamètre minime,
- pas de gêne aux usagers de la route,
- pas de présence de personnel dans l'ouvrage,



*Figure 3: Coupe de la gaine.*

- influence minime sur l'hydraulique et l'environnement en raison de la durée du chantier : 12 heures pour le chemisage et 5 jour pour les travaux annexes,
- coût 50 % moins cher que la solution béton.

La solution retenue par l'entreprise titulaire du marché VIDEO INJECTION INSITUFORM® était un complexe gaine+résine polymérisée à la vapeur conforme à l'avis technique du CSTB (1700-115) renforcé de fibre de verre et de carbone permettant de réduire l'épaisseur du complexe de 30,5 à 21,5 mm. Les fibres de carbone offrent un avantage vis à vis de la traction en augmentant le facteur de flueuse et en étant insensible à la corrosion sous charge.

## 6. LE CHANTIER

Après des travaux préparatoires qui consistaient à fraiser les têtes de boulons à l'intérieur de la buse et à détourner le ruisseau par pompage, la gaine a été mise en place en une seule journée.

La gaine constituée de ses feutres et de ses deux couches de fibres, verre et carbone a été préparée avant d'être imbibée de résine.

La gaine ainsi prête a été transportée en camion frigorifique à pied d'œuvre, pour éviter une polymérisation de la résine pendant le voyage.

*Principales étapes de la mise en place de la gaine.*



*Figure 4: Enfilage de la gaine principale à l'aide d'un cable.*



*Figure 5: Gonflage de la gaine puis polymérisation en place à la vapeur d'eau à 110°*



*Figure 6: Réalisation des parties béton après réalisation du gainage.*

## 7. LES CONTRÔLES

L'avis technique du CSTB (17/00-115) concerne les complexes de diamètre allant jusqu'à 1,20 m. Le procédé a donc fait l'objet d'une attention particulière en terme de contrôle de dimensionnement et de contrôle de qualité des matériaux (contrôles intérieur et extérieur). D'une manière générale, les contrôles effectués ont été ceux réalisés dans le cadre de l'avis technique du CSTB et de la norme NF EN ISO 178.

Dans la cadre de sa mission de contrôle extérieur, le LRPC Saint-Brieuc a fait réaliser à ce titre :

- un essai préalable de performance sur planche d'essai afin de valider le matériel de l'entreprise et son mode opératoire,
- des essais de flexion au LAMI ( Laboratoire Analyse des Matériaux et Identification ENPC-LCPC) : prélèvement d'un échantillon polymérisé en place avec la gaine au point le plus défavorable dans le circuit de chauffe et vérification des caractéristiques déclarées par des essais conformes à l'avis technique (flexion

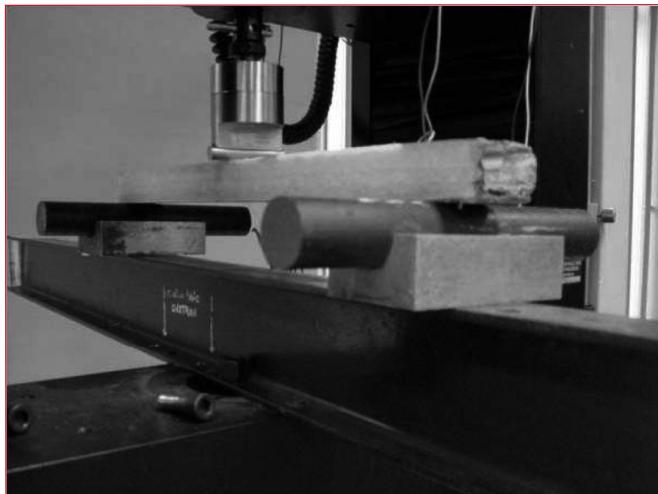


Figure 7: Essai flexion 3 points au LAMI.

3 points d'une éprouvette  $30 \times 35 \times 450$  mm selon la norme NF EN ISO 178).

## 8. CONCLUSIONS

Le recours à cette technique innovante (pour ce type de diamètre) dans le domaine des ouvrages d'art a permis de répondre aux nombreuses contraintes de ce chantier tout en permettant de réaliser d'importantes économies. Cette expérience a également montré la faisabilité et l'intérêt de cette technique pour une buse de 2 m d'ouverture.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

AFNOR 2003 Norme NF EN ISO 178 « Plastiques – Détermination des propriétés en flexion »

CSTB 2001 Avis technique 17/00-115 Réhabilitation des réseaux d'assainissement Insituform®

LCPC SETRA 1981. Guide « Buses métalliques, Recommandation et règles de l'art » qui donne des recommandations pour la construction de ces ouvrages mais qui ne fait qu'aborder succinctement la réparation.

SETRA 1992. Guide « *Buses métalliques, Guide pour la surveillance spécialisée, l'entretien et la réparation* » qui traite à la fois des visites et de l'entretien, mais ainsi des différentes techniques de réparation.

# **LA PRISE EN COMPTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES PROJETS DE TUNNELS**

**Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER**

Centre d'Études des Tunnels (CETU) – MEEDDAT  
25 avenue François Mitterrand, 69674 Bron Cedex

## **1. INTRODUCTION**

### **1.1. Les missions du CETU**

**L**e CETU est un service technique central du MEEDDAT en charge de l'ensemble des aspects techniques relatifs aux tunnels. Il est rattaché à la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) qu'il conseille notamment sur le suivi du patrimoine, sur la conduite du programme de rénovation, ainsi que sur la définition et l'évolution de la réglementation. Il intervient à tous les stades depuis la conception jusqu'à la gestion du patrimoine, tant sur le plan des équipements qu'en matière de génie civil.

Le CETU contribue à l'amélioration de la technicité et de la qualité des ouvrages à travers son implication dans de nombreux projets d'études, de construction et de rénovation en parallèle et en partenariat de maîtres d'œuvre et de bureaux d'études privés. Il fonde sa spécificité sur la complémentarité entre ses différents champs d'actions comme par exemple : les techniques et les méthodes de construction, l'insertion dans l'environnement, l'entretien, l'exploitation et la sécurité des tunnels routiers. Cette complémentarité se retrouve dans ses missions de recherche et de doctrine ainsi que dans ses interventions à caractère opérationnel d'ingénierie et d'expertise pour le

compte des maîtres d'ouvrages et des exploitants de tunnels.

### **1.2. Les enjeux liés à la prise en compte du développement durable dans les tunnels**

La construction d'un tunnel constitue toujours un chantier très lourd au plan de ses incidences économiques et de ses impacts sur l'environnement : importance des volumes de matériaux mis en œuvre, consommation énergétique, nuisances diverses, etc. L'exploitation de cet ouvrage soulève d'autres enjeux de sécurité, de transport et d'environnement mais en contrepartie préserve la surface et offre des opportunités de mieux utiliser le sous-sol.

Le projet d'études et de recherche que propose actuellement le CETU, vise à établir une hiérarchie des enjeux liés à la prise en compte du développement durable dans l'ensemble de ce processus. Pour chacune des phases identifiées, que ce soit au stade de la conception de l'ouvrage comme à celui de sa réalisation, il s'agira de préciser les enjeux principaux, puis les méthodes et outils d'évaluation disponibles et adaptés, ainsi que les possibilités de choix techniques alternatifs respectueux à la fois des fonctions à assurer et des exigences en matière de préservation de la planète.

Sur cette base, des actions concrètes pourront être lancées. Le CETU sera ainsi mieux armé pour être un relais de ces enjeux et de ces préoccupations auprès de la profession du souterrain.

## **1.3. LA RÉFLEXION MENÉE EN INTERNE AU CETU**

### ***1.3.1. Constat sur l'évolution de nos missions***

Les préoccupations et les attentes des maîtres d'ouvrages en matière d'environnement sont de plus en plus nombreuses. Des enjeux importants sont notamment liés à la recherche de solutions visant à optimiser la gestion des déblais tout en respectant les contraintes techniques et environnementales. On citera également les réflexions liées à la nécessité ou non de traiter l'air aux extrémités du tunnel, pour limiter les concentrations en polluants lorsque les ouvrages sont situés en milieu urbain.

Le CETU est également sollicité par des maîtres d'ouvrage pour soutenir et porter des réflexions, ainsi que pour développer des méthodologies d'évaluation de la prise en compte du développement durable dans le cadre de grands projets incluant des traversées en souterrain.

Ainsi, au-delà des avis réglementaires réguliers qu'il donne pour les projets du réseau routier national, le CETU est de plus en plus fréquemment amené à intervenir soit en assistance à maîtrise d'ouvrage, soit en appui ou conseil à des maîtres d'ouvrages de tunnels. C'est généralement un second regard sur des études qu'ils ont fait réaliser par ailleurs, ou la confirmation de la bonne prise en compte de l'ensemble des enjeux que recherchent ces maîtres d'ouvrages auprès du CETU. Si elle s'exerce tout naturellement pour le compte des maîtres d'ouvrage d'État, cette assistance répond aussi à un besoin réel des collectivités locales et d'autres maîtres d'ouvrages que les maîtres d'ouvrages routiers.

Par conséquent le CETU est amené à jouer un rôle prépondérant dans l'aide à la prise de décision. Facilitateur de projets, appui et partenaire dont l'expertise est précieuse dans son domaine, il répond en cela aux nouvelles attentes du MEEDDAT à l'égard de ses services [1].

### ***1.3.2. Une réflexion pour le montage d'un futur thème de recherche prioritaire***

Le CETU a mis en place depuis l'automne 2008 un groupe de travail transversal aux pôles internes de compétences. Ce groupe est chargé de conduire une réflexion sur la prise en compte du développement durable dans le domaine des tunnels. Les objectifs de ce groupe de travail peuvent se décliner de la manière suivante :

- se sensibiliser et sensibiliser ses collègues à la problématique de développement durable ;
- mettre en place les bases de ce qui constituera un nouveau thème de recherche prioritaire sur la prise en compte du développement durable dans la conception et l'exploitation des tunnels.

De manière plus concrète il s'agit :

- d'échanger autour du développement durable : de se familiariser avec ces nouveaux concepts, de se tenir informé de l'actualité politique et réglementaire, de découvrir les outils déjà développés au sein du Ministère ou à l'extérieur et de développer un nouveau réseau susceptible de servir de support à de futures collaborations ;

- de donner un nouvel éclairage à nos actions d'une part en identifiant et en valorisant les réflexions et les travaux déjà menés ou en cours au sein du CETU et susceptibles de relever de la problématique de développement durable. D'autre part en identifiant de nouvelles pistes de travail et de réflexion qui pourraient être lancées et qui pourraient apporter une dimension développement durable nouvelle à certaines de nos actions ;
- d'identifier les projets qui pourraient servir de support à la mise en pratique d'outils d'analyse des enjeux liés à la prise en compte du développement durable. Certains de ces outils existent déjà et nécessiteraient le cas échéant quelques adaptations, d'autres sont encore à développer. Ils seront mis à la disposition des décideurs afin de les éclairer sur leurs choix au regard de la problématique de développement durable.

Pour le CETU, l'année 2009 est considérée comme une année préparatoire. A ce titre, des Actions de Recherche et de Doctrine (ARD) démarrent. L'objectif étant de poser les bases du futur thème de recherche prioritaire sur la prise en compte du développement durable dans la conception et l'exploitation des tunnels et d'en préparer ainsi le lancement en 2010.

### ***1.3.3. Des conditions favorables de réussite***

Des conditions favorables à la réussite de cette réflexion sur la prise en compte du développement durable dans le domaine des tunnels, se dessinent à travers la multiplicité des compétences techniques d'ores et déjà disponibles aussi bien dans le domaine du génie civil que dans celui des équipements. Ces compétences techniques sont également complétées par des approches plus sociologiques comme par exemple sur le comportement des usagers en matière de sécurité. Au delà du seul CETU, ce travail d'approfondissement peut être relayé dans le cadre des relations privilégiées avec l'ensemble des acteurs et professionnels concernés (bureaux d'études, entreprises, aménageurs, dans le cadre de l'AFTES notamment). C'est ainsi par exemple que la dimension de l'espace souterrain peut faire l'objet d'une attention particulière du fait des opportunités nouvelles qu'elle peut offrir dans un contexte de préservation de la surface.

Il reste aujourd'hui à conduire un travail important d'acquisition et d'approfondissement des connaissances et de développement des compétences en matière de développement durable, ainsi qu'un travail sensibilisation du personnel à travers la formation et l'ouverture sur l'extérieur. La maîtrise des outils du développement durable associée à l'adhésion des personnes à une nouvelle manière de penser et d'agir, nous permettra d'assurer le succès de notre positionnement futur. Dans cette perspective, plusieurs organismes du Réseau Scientifique et Technique (RST) désormais élargi du Ministère, peuvent avoir un apport essentiel. L'expérience acquise par ces organismes (ADEME, CERTU, CETE...) permettra de gagner beaucoup de temps ; ces différents partenariats et leurs contributions attendues sont évoqués plus loin.

## **2. TUNNEL ET DÉVELOPPEMENT DURABLE**

### **2.1. La problématique**

Le premier constat que l'on peut faire est que le tunnel est généralement un élément d'une infrastructure de transport plus large.

Fort de ce constat, le tunnel ne peut pas être dissocié de l'infrastructure globale lors des phases amont ; c'est l'ensemble du projet qui doit être évalué et comparé avec d'autres types de solutions. A ce stade, la problématique consiste pour le CETU à évaluer l'apport spécifique du tunnel sous l'angle du développement durable, en considérant le plus complètement possible, aussi bien les aspects économiques (coût du tunnel, impact économique du chantier, etc.), que sociaux (incidence du tunnel sur le tissu local, etc.) ou encore environnementaux. Pour ce faire, il sera intéressant de nous rapprocher d'organismes tels que le SETRA qui a une bonne expérience de ces évaluations amont. On voit aussi l'intérêt de garder en tête, dans un premier temps, l'idée de développer des outils modulaires qui pourront être intégrés par la suite dans des outils plus globaux. Ceci, même si des interactions sont inévitables notamment en termes de stratégies de construction ou de maintenance.

En considérant toujours la phase amont, mais à partir du moment où l'objet « tunnel » peut être considéré comme un élément acquis dans le projet d'infrastructure, la problématique se situe alors dans l'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement du projet de tunnel lui-même à travers l'adoption d'une démarche du type Analyse de Cycle de Vie (ACV). Cette démarche doit être associée à une analyse socio-économique. La mise en place de cette dernière peut se faire à travers le développement d'indicateurs spécifiques aux tunnels (prise en compte des nuisances sonores pour les riverains en phase chantier et en phase d'exploitation, par exemple). Ce positionnement nécessite donc une bonne connaissance des aspects techniques du projet (solutions techniques possibles en matière de méthodes de creusement, de soutènements et de revêtements définitifs) et une prise en compte de la phase exploitation. C'est pourquoi, bien que se situant en amont, i.e. au stade des études de conception, ce positionnement nécessite quand même d'être tourné vers l'aval, i.e. vers les phases chantier et exploitation. De plus, si certains aspects ne sont pas encore définitivement arrêtés comme par exemple, le tracé exact ou bien encore l'organisation du chantier, le recours à des outils plus généraux du type de ceux développés dans le cadre du positionnement amont, peut être également intéressant.

### **2.2. Un nouvel éclairage pour nos activités**

Aujourd'hui, la question n'est pas nécessairement de lancer immédiatement de nouvelles activités. Dans un premier temps, il s'agit de mener une réflexion sur un nouvel éclairage à apporter à ce que nous faisons déjà. Ce nouvel éclairage va nous permettre, si nécessaire, de redéfinir nos priorités, et de compléter nos référentiels d'expertise. Il

s'agit de trouver une nouvelle cohérence dans nos missions, de redéfinir et d'identifier les thématiques sur lesquelles nous devons porter nos efforts afin d'identifier et de mieux maîtriser les enjeux liés à la prise en compte du développement durable dans notre champ d'action.

Un point important à souligner, est que cette réflexion induit nécessairement une vision holistique des différentes questions techniques. Ainsi, l'éclairage n'est plus seulement un simple équipement, mais il interagit également avec les propriétés photométriques de la chaussée, le génie civil et son entretien (mise en peinture et lavage des piédroits), la consommation d'énergie, les aspects sécurité et confort de l'usager, voire avec les aspects « dépollution ».

### **2.3. Les différentes phases d'un projet**

La circulaire du 7 janvier 2008 fixe les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national [2].

Cette circulaire et en particulier son projet d'annexe 1 (phases de conception et de réalisation, commandes et points d'arrêt), permettent de mieux identifier le rôle des différents acteurs tout au long du processus qui s'articule autour de grandes étapes de concertation ou de débat. Le processus est ponctué par des décisions successives qui arrêtent les choix. Le déroulement complet des études et des travaux est illustré dans la Figure 1. Cette description simplifiée nous permet de clarifier notre positionnement « amont » au stade des études d'opportunité et notre positionnement « amont tourné vers l'aval » au stade des études de conception : avant projet et projet.

### **2.4. Les outils du développement durable**

Un certain nombre d'outils existent déjà et sont mis en œuvre dans les domaines de l'aménagement, de la construction ou bien encore du bâtiment. On notera par exemple la démarche HQE® [3], l'Analyse du Cycle de Vie [4,5], la méthode Bilan Carbone® [6] développée par Jean Marc Jancovici pour le compte de l'ADEME, ou bien encore des grilles d'évaluation comme la grille RST02 développée au sein du RST par le CERTU et les CETE à la demande de la DGUHC (Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction) [7].

Même si ces outils permettent d'adopter des mesures visant à améliorer la situation actuelle, ils ne sont bien sûr pas équivalents. Ainsi, la méthode Bilan Carbone® permet de comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre de toute organisation, entreprises industrielles ou tertiaires et d'optimiser la mise en place d'actions de réduction. La grille RST02 permet, quant à elle, d'analyser un projet, de le questionner vis-à-vis du développement durable et d'identifier des marges de progrès pour l'améliorer. Un premier travail consistera donc à analyser ces outils et à voir comment ils peuvent s'appliquer à notre problématique. Des adaptations seront elles nécessaires ? Sera-t-il possible de mettre en oeuvre ces adaptations ou devrons-nous procéder à de nouveaux développements ? Cette première analyse nous amènera probablement à envisager de combiner ces différents outils selon les phases du projet ou nous nous situerons de manière privilégiée. En effet, ce ne

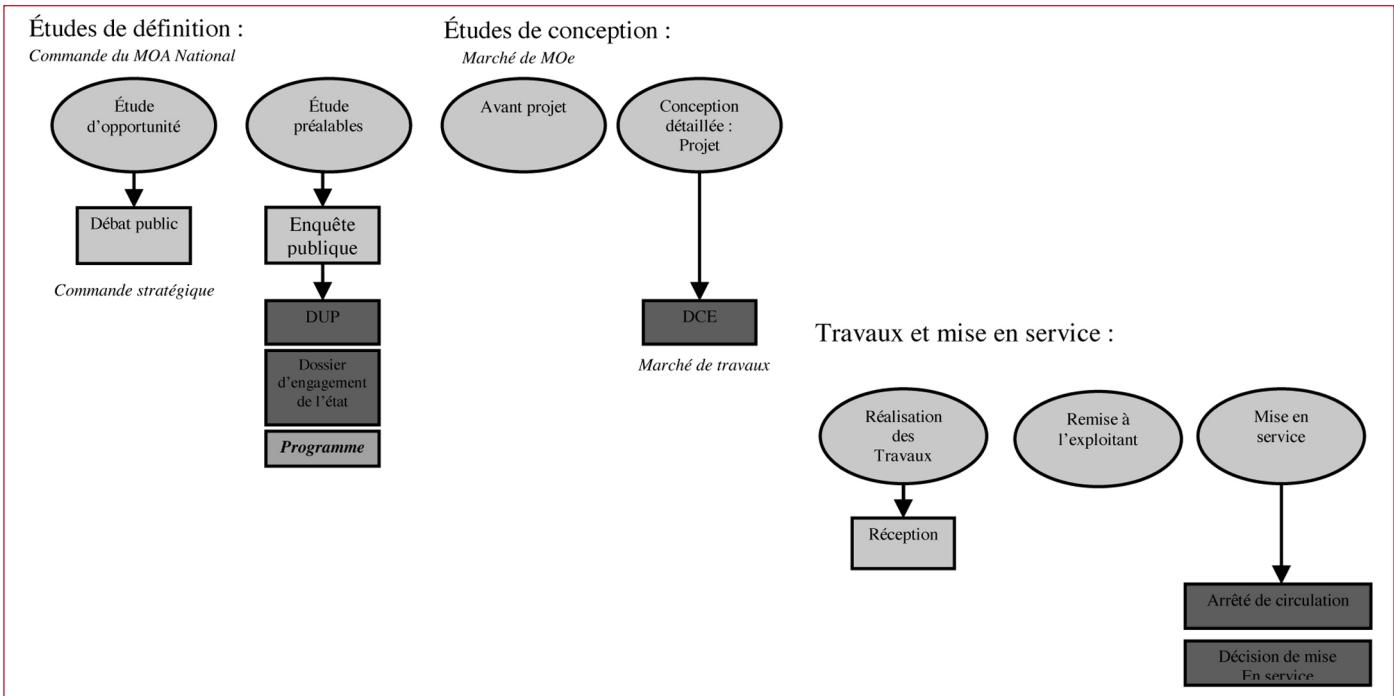


Figure 1: Les grandes phases d'un projet [2].

sont forcément les mêmes outils qui seront pertinents aux différents stades d'études et de réalisation du projet ou durant la phase d'exploitation.

## 2.5. La notion de projet « support »

Après une première sélection, une des méthodes que nous avons retenue pour analyser les outils disponibles, est leur mise en œuvre sur des projets réels afin de déterminer leur degré de pertinence. Ces projets réels dits « support » sont des projets sur lesquels nous sommes intervenus à différents stades : études de conception et/ou réalisation. Nous disposons donc de données importantes, fiables et relativement complètes sur ces projets. Ces données sont issues du retour d'expérience, voire de contacts avec les différents acteurs les ayant suivis si les projets sont encore en cours. Ces données peuvent avoir trait aux enjeux mêmes du projet, aux éléments de conception, aux éléments de réalisation (phasage des travaux, matériaux excavés ou mis en œuvre, etc.), aux éléments de maintenance et d'entretien des équipements, à la consommation énergétique en phase d'exploitation, aux éléments de sécurité, etc.

Ces projets « support » sont donc fondamentaux dans la méthodologie que nous proposons de suivre pour évaluer le degré de pertinence des outils existants.

## 3. L'ÉVALUATION « AMONT » : L'ÉTUDE D'OPPORTUNITÉ

Nous avons choisi d'évaluer la pertinence de la grille RST02 dans le cadre d'une collaboration avec le CERTU et le Département Ville et Territoires du CETE de Lyon à travers son application à un projet « support » : la LINO. Ce projet est en cours. Il a dépassé le stade de la simple étude d'opportunité, mais cela nous permettra de nous positionner à diffé-

rents niveaux y compris celui de l'étude de conception. Nous continuons en parallèle l'analyse d'autres outils existants.

### 3.1. Présentation de la grille RST02

La grille RST02 présente l'avantage d'être un outil développé au sein de notre Ministère depuis plusieurs années déjà [7,8]. Le CERTU dispose donc d'un certain retour d'expérience. Volontairement objective, elle s'appuie sur les principes de la déclaration de Rio de 1992. Elle comporte 29 critères à passer en revue. On trouve un nombre équivalent de critères selon les dimensions et les interfaces (à savoir 4, ou 5 pour la gouvernance) (cf. Figure 2a). Ces critères sont d'égale importance et non hiérarchisés entre eux. Les projets peuvent être de nature variable. Ils peuvent être relatifs à un aménagement (zone 30, requalification d'une route départementale en traversée d'agglomération, etc.) ou bien concerner un plan ou un programme d'action (un ScoT, un PLU, etc.) ou bien encore une opération contractuelle (un contrat d'agglomération, un agenda 21 local, etc.).

Un guide de questionnement et des recommandations générales permettent de s'interroger sur la qualité de la prise en compte de chaque critère dans le projet et d'attribuer une note située entre -3 et 3. Une note moyenne est alors calculée pour chaque domaine et chaque interface ainsi que pour la gouvernance. La représentation des résultats se fait essentiellement sous forme d'un diagramme radar appelé profil de développement durable (cf. Figure 2b). Il est essentiel de rappeler que cette grille doit être utilisée au sein d'une équipe projet réunissant des compétences et des sensibilités différentes. L'utilisation de cette grille est l'occasion de confronter des points de vue, de générer de la réflexion et de prendre du recul. La grille RST02 peut nécessiter l'adaptation du guide de questionnement. Les questions peuvent être reformulées et les critères réexaminés. Actuellement la grille se décline dans des métiers comme l'eau, les transports, l'urbanisme et le logement.

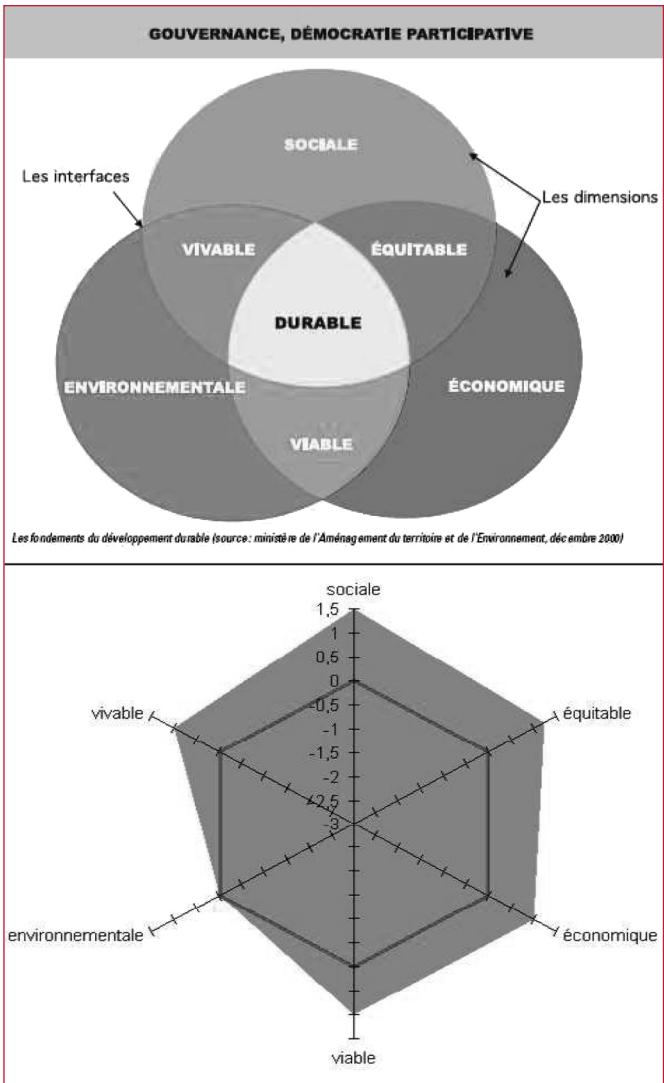


Figure 2: a : Les dimensions et interfaces du développement durable [7]. b. Exemple de profil de développement durable [7]

### 3.2. Présentation du projet « support »

La LINO est le projet de Liaison Nord de l’agglomération dijonnaise. Ce projet est en cours et le CETU assure une mission d’assistance à maîtrise d’ouvrage. A terme, la LINO reliera les extrémités de la rocade est (N274) et de l’autoroute A38. Elle permettra également de desservir les secteurs des alentours. Ce projet long de 7,5 kilomètres comprend une quinzaine d’ouvrages d’art dont un tunnel de 600 mètres et une tranchée couverte de 300 mètres.

### 3.3. La démarche adoptée

Nous avons prévu de constituer un groupe de 5 à 6 personnes. Ces personnes sont, soit directement impliquées dans le projet, soit extérieures au projet. Il s’agira donc de définir au préalable une base de références documentaires sur le projet. Cette base sera mise à la disposition du groupe. Plusieurs séances seront programmées et animées par le CETE de Lyon à quelques jours d’intervalle pour permettre un certain temps de réflexion. Lors de ces

séances, le chef de projet commencera par présenter le projet lui-même afin de travailler à partir d’un même référentiel. Il s’agira ensuite d’appliquer la grille et de définir le degré de pertinence des critères et des questions au regard du projet. La difficulté essentielle, au-delà de la connaissance même de l’ensemble des enjeux du projet, réside dans la définition même du champ d’interrogations qui oscillerait probablement et inévitablement entre celui de l’infrastructure et du tunnel. Notre objectif étant bien d’évaluer l’apport du tunnel dans le projet d’infrastructure. Dans une seconde phase, on pourra envisager d’élargir la palette d’acteurs pour réaliser l’exercice. Une troisième phase verrait alors la reformulation éventuelle des critères et/ou des questions, en vue d’une application spécifique aux tunnels. Ce qui se pratique effectivement déjà pour d’autres domaines. L’enjeu étant de conserver l’esprit d’une grille générale mais pouvant faire l’objet de déclinaisons « métiers ».

## 4. L’ÉVALUATION « AMONT TOURNÉE VERS L’aval » : LES STADES DE CONCEPTION ET DE RÉALISATION

Nous avons choisi d’appliquer la méthode ACV aux tunnels. L’hypothèse initiale est que l’objet « tunnel » est acquis dans le projet d’infrastructure. On s’intéresse alors aux impacts potentiels de sa réalisation sur l’environnement et aux aspects socio-économiques. L’idée est ici de pouvoir comparer des solutions techniques dont la mise en œuvre peut être déterminée par le contexte géologique et par des considérations économiques, tout en prenant en compte l’ensemble du cycle de vie du tunnel.

### 4.1. La méthode ACV appliquée aux tunnels

#### 4.1.1. La méthode ACV

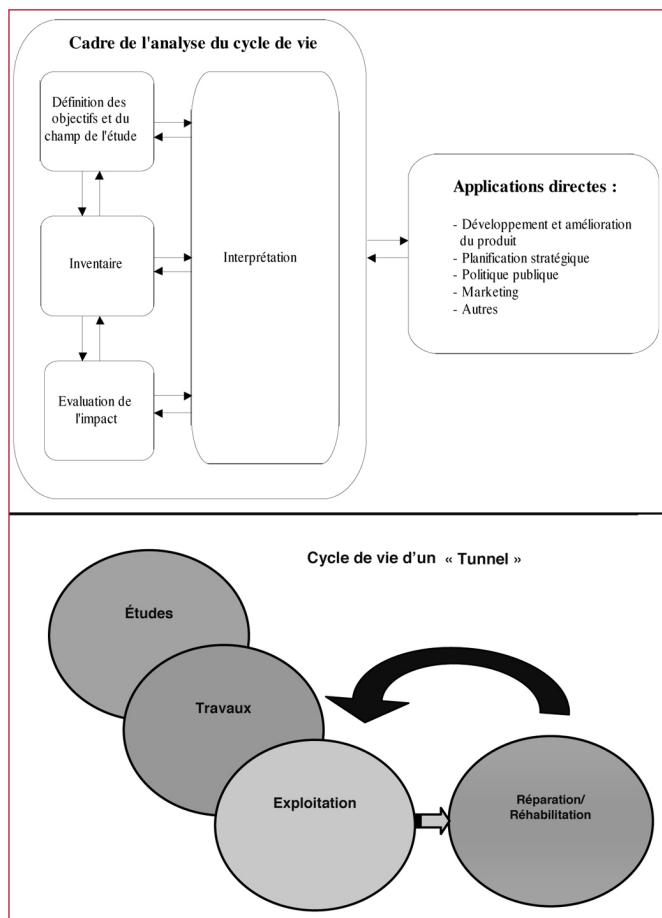
Les normes NF EN ISO 14040 et 14044 [4,5] décrivent respectivement les « principes et cadre » de l’ACV et les « exigences et lignes directrices ». L’analyse de cycle de vie est l’une des techniques destinée à appréhender les impacts environnementaux potentiels associés à la production et à la consommation de « produits » (qui inclut ici également la notion de « services »). Elle peut ainsi contribuer à l’identification des possibilités d’amélioration des performances environnementales des produits à différentes étapes de leur cycle de vie, à l’information des décideurs (dans un souci de planification stratégique, d’établissement de priorités, ou bien encore de re-conception de produits et procédés), au choix des indicateurs environnementaux pertinents associés à des techniques adéquates de mesure et enfin au marketing (cf. Figure 3a).

Cette technique s’applique déjà au domaine des produits de construction<sup>1</sup> et du bâtiment (NF P 01 010 et NF P 01 020-1 [9,10]) avec de nombreuses fiches de déclaration envi-

1. « Tout produit fabriqué en vue d’être incorporé, assemblé, utilisé ou installé de façon durable dans les ouvrages tant de bâtiment que de génie civil » (NF P 01 010) [9].

ronnementales et sanitaires (FDES) déjà publiées par type de produit. Son application aux ouvrages de génie civil permettra de traiter les impacts environnementaux potentiels tout au long de leur cycle de vie : de la production à la fin de vie (recyclage et/ou mise en décharge des produits de démolition) en passant par la mise en œuvre et le chantier, ainsi que par la phase de service. On utilise l'expression consacrée : « du berceau à la tombe ». L'ACV permet d'évaluer les interactions entre les procédés technologiques et leurs effets sur l'environnement. Elle comprend 4 phases décrites dans la NF EN ISO 14040 (cf. Figure 3a) :

- les définitions des objectifs et du champ de l'étude,
- l'inventaire du cycle de vie (ICV),
- l'évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) et
- l'interprétation.



**Figure 3 : a : Phases d'une ACV d'après la norme NF EN ISO 14040 [4]. b : Cycle de vie d'un tunnel.**

L'ACV modélise le cycle de vie d'un produit sous la forme d'un système de produits qui remplit une ou plusieurs fonction(s) définie(s). La « fonction » est par exemple le franchissement d'une vallée ou bien encore le passage vers une autre vallée via un tunnel. Le « système de produits » est alors l'ouvrage. Le système de produits est lui-même alors subdivisé en « processus élémentaires »<sup>2</sup> liés :

- entre eux par des flux de produits intermédiaires et/ou par des déchets destinés au traitement,
- à d'autres systèmes de produits par des flux de produits,
- à l'environnement par des flux élémentaires.

La décomposition d'un système de produits en processus élémentaires facilite alors l'identification des « intrants »<sup>3</sup> et des « extrants »<sup>4</sup> du système. Les flux élémentaires incluent l'utilisation des ressources et les émissions dans l'eau, l'air et le sol.

Il reste alors à définir « L'unité fonctionnelle » qui permet quant à elle de fournir une référence à laquelle les intrants et les extrants vont être liés. Cette référence va rendre possible la comparaison des résultats d'ACV.

#### 4.1.2. Les spécificités du tunnel au regard de l'ACV

Les impacts potentiels sur l'environnement du tunnel sont conditionnés par les choix techniques et le dimensionnement qui peuvent eux-mêmes dépendre des conditions de site (natures géologiques des terrains traversés, présence d'eau, etc.) et des aspects économiques, ainsi que des contraintes liées à la phase d'exécution des travaux. Ainsi la marge de manœuvre pour limiter les impacts potentiels sur l'environnement, n'est peut-être pas aussi grande qu'elle pourrait l'être, du fait des fortes contraintes techniques et économiques liées à ce type d'ouvrage.

Une interrogation subsiste sur l'impact de la phase d'exécution des travaux par rapport à celle de conception : bilan matériaux de construction et équipements. En ce qui concerne la partie entretien/maintenance de la phase exploitation, on remarquera qu'elle est surtout liée aux équipements.

Une autre interrogation de taille se situe au niveau de la disponibilité de données environnementales sur les très nombreux matériaux de construction (complexe d'étanchéité, matériaux cimentaires et éléments de soutènement divers, protections au feu, etc.), sur les équipements ainsi que sur les engins de chantier parfois très spécifiques, voire uniques comme les tunneliers par exemple.

Enfin, si on cherche à tracer le cycle de vie d'un tunnel (cf. Figure 3b), la question de la définition de la fin de vie du tunnel se pose. En effet, les tunnels n'ont pas réellement de fin de vie comme c'est le cas pour un bâtiment. On ne détruit pas vraiment un tunnel. Le plus souvent, au bout d'une durée d'exploitation significative de plusieurs dizaines d'années, qui inclut l'entretien et la maintenance des équipements, ainsi que quelques travaux de nettoyage et de mise en peinture du génie civil, on va être amené à envisager des travaux de génie civil conséquents visant à requalifier l'ouvrage. Il pourra s'agir d'une mise au gabarit : adaptation d'un tunnel ferroviaire existant en vue de l'exploiter sur une ligne TGV ou bien requalification de l'ouvrage suite à une hausse importante du trafic routier.

Le modèle que nous avons choisi pour représenter la fin de vie du tunnel sera caractérisé par l'arrêt d'exploitation, le démantèlement et le recyclage des équipements : éclairage, chemin de câbles, systèmes de ventilation, ..., le génie civil

2. Matière ou énergie entrant (ou sortant) du système étudié sans subir de transformation préalable (postérieure).

3. Flux de matière, de produits ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire.

4. Flux de matière, de produits ou d'énergie sortant d'un processus élémentaire.

restant en place. Ainsi, si on envisage un projet de tunnel avec la réutilisation d'un tunnel existant, on quantifiera les impacts potentiels liés à la reprise éventuelle du génie civil et on quantifiera également les impacts évités par la réutilisation de l'ouvrage en fin d'exploitation par rapport à une solution qui impliquerait le creusement d'un nouveau tunnel.

#### 4.1.3. La démarche adoptée

Concernant le domaine des tunnels, nous formalisons actuellement leur cycle de vie à travers la description et l'analyse des différentes étapes que constituent : le projet (étude géologique, choix des méthodes de creusement et de construction, choix et dimensionnement des équipements (éclairage, ventilation, etc.), réalisation des travaux et le suivi de l'ouvrage dans le temps (maintenance des équipements et réparations).

Dans un premier temps, nous avons choisi de travailler uniquement à partir du bilan « matériaux » de l'ouvrage. La phase d'exécution des travaux sera intégrée ultérieurement. Par ailleurs, l'entretien concerne surtout les équipements. Il reste en général très limité au niveau du génie civil ou ponctuel : mise en peinture des piédroits, lavage, éventuelles réparations du génie civil dues aux accidents du type choc de véhicules ou incendie, etc.

Il s'agit donc d'un premier travail de réflexion et d'une première étude de faisabilité. En effet, l'objectif principal étant d'étudier l'applicabilité de la méthode dite Analyse de Cycle de Vie (ACV) aux tunnels et d'en dégager les spécificités.

Nous appliquerons donc la méthode ACV aux tunnels à partir de l'unique bilan « matériaux ». Nous établirons ainsi un bilan des impacts potentiels sur l'environnement des matériaux utilisés dans la construction d'un tunnel pour un profil type donné, i.e. pour un gabarit, une méthode de creusement, un type de soutènement et un type de revêtement donnés. En effet, à l'aide d'un logiciel interne développé par le CETU dans le cadre du thème « maîtrise des coûts et des délais », nous établirons tout d'abord le bilan des quantités de « matériaux » utilisés pour chaque profil type de section courante de tunnel. Le recours à un logiciel ACV nous permettra ensuite de quantifier les impacts potentiels sur l'environnement par mètre linéaire de tunnel selon le profil type choisi. Nous effectuerons ensuite une analyse critique des résultats obtenus au regard des hypothèses simplificatrices faites et au regard de la pertinence et de la fiabilité des données environnementales disponibles. Nous étudierons également l'influence du type de soutènement, conditionné par la géologie du terrain rencontré lors du creusement, sur le bilan des impacts potentiels sur l'environnement.

Les développements ultérieurs concerneront la prise en compte de la phase d'exécution des travaux, puis celle de la phase exploitation avec notamment l'introduction des équipements dans l'analyse.

#### 4.2. Les limites de la méthode

Le cadre de l'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement nous est donné par la norme NF P 01 010 [9]. Cependant, certains impacts peuvent sortir du cadre défini par les dix indicateurs proposés par la norme. Nous nous

appuierons donc sur le fascicule environnement du dossier pilote des tunnels [11] pour identifier ces impacts plus spécifiques aux tunnels. En effet, le contenu du fascicule environnement vient d'être repris. Il bénéficie désormais de nombreux retours d'expériences et intègre le cadre fixé par les dernières évolutions de la réglementation en matière d'environnement. On peut par exemple s'interroger sur la manière de prendre en compte des nuisances sonores et des vibrations en phase d'exécution des travaux ou en cours d'exploitation. Il devient alors nécessaire de définir ou d'utiliser des indicateurs spécifiques complémentaires.

Même si nous avons posé un modèle pour la fin de vie d'un tunnel, la durée d'exploitation est conséquente et ses impacts effectifs sont difficiles à évaluer aujourd'hui. Cette durée d'exploitation peut facilement être considérée comme de l'ordre de la centaine d'années et inclure des travaux de réhabilitation et de requalification de l'ouvrage. Cette phase pourrait se révéler prépondérante dans l'approche et pénaliser fortement le bilan alors que nous ne savons pas réellement anticiper à cent ans les progrès dans les domaines des matériaux, des équipements et des techniques de réparation et de reprises du génie civil.

Enfin, si nous souhaitons prendre en compte les autres dimensions du développement durable dans notre approche, il est nécessaire de réaliser une analyse socio-économique complémentaire.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Face à un enjeu très important visant à prendre beaucoup mieux en compte toutes les incidences des choix successifs qui sont faits lors du processus de conception, construction, plus exploitation d'un tunnel, le présente étude se veut exploratoire, et force de proposition pour une adaptation de nos méthodes d'évaluation et de notre référentiel habituel de travail.

Pour avancer efficacement, il est tout à fait intéressant de s'appuyer sur les outils déjà développés ou en cours de développement au sein du réseau technique du ministère ; les partenariats envisagés notamment avec le CERTU ou les CETE permettront une première approche à la fois qualitative et quantitative. Son application sur un cas précis de tunnel, complété par une analyse de cycle de vie, devrait dégrossir les principaux enjeux et mettre en évidence les choix cruciaux au sens du développement durable.

A partir de là, les pistes pour une adaptation spécifique aux tunnels des outils actuels d'évaluation pourront être proposées et discutées avec la profession.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Le projet stratégique du Ministère, MEEDDAT, 12 juin 2008.
- [2] Circulaire du 7 janvier 2008 fixant les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national.
- [3] [www.assohqe.org](http://www.assohqe.org)

- [4] NF EN ISO 14040 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre. Octobre 2006.
- [5] NF EN ISO 14044 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices. Octobre 2006.
- [6] Bilan Carbone® Entreprises et Collectivités – version 5.0 – Objectifs et principes de comptabilisation. Janvier 2007.
- [7] Prendre en compte le développement durable dans un projet – Guide d'utilisation de la grille RST 02. Publication CERTU, 2006.
- [8] E. Boutefeu. Présentation de la grille RST02. CETU, 26 novembre 2008.
- [9] NF P 01 010 Qualité environnementale des produits de construction – Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. Décembre 2004.
- [10] NF P 01-020-1 Qualité environnementale des bâtiments – Partie 1 : Cadre méthodologique pour la description et la caractérisation des performances environnementales et sanitaires des bâtiments. Mars 2005.
- [11] Fascicule environnement du dossier pilote du CETU, à paraître en 2009.

# INTERACTION ENTRE LA NATURE DU CIMENT ET LES ADJUVANTS ENTRAÎNEURS D'AIR POUR DIFFÉRENTS RAPPORTS EAU/CIMENT

El-Hadj KADRI\*, Salima AGGOUN\*, Karim EZZIANE\*\*, Claudine ROCHELLE\*\*\*

\*Laboratoire L2MGC, Université de Cergy Pontoise, F9500 Cergy Pontoise, France

\*\*Laboratoire des sciences des matériaux et environnement, Université de Chlef, Algérie.

\*\*\*IUT département Génie Civil, Université de Cergy Pontoise, F9500 Cergy Pontoise, France

## 1. INTRODUCTION

Dans les régions froides, l'action néfaste du gel-dégel provoque une expansion de l'eau à l'intérieur du béton provoquant ainsi un éclatement et des fissurations sur la surface du béton. À mesure que l'eau gèle dans le béton humide, elle engendre des pressions osmotiques et hydrauliques dans les capillaires et les pores de la pâte de ciment et des granulats. Si la pression excède la résistance en traction de la pâte ou du granulat, la cavité se dilate et se rompt. L'effet cumulatif des cycles successifs de gel-dégel et la perturbation de la pâte et du granulat finissent par causer une importante expansion et détérioration du béton. La détérioration se manifeste par de la fissuration, de l'écaillage et de l'effritement [1].

Si l'eau excédentaire exposée au gel peut s'échapper facilement dans un vide adjacent rempli d'air, les désordres dans le béton seront évités. Lors de la confection du béton, on doit donc créer suffisamment d'air et la distribuer d'une façon homogène dans la pâte de ciment. Cette tâche est assurée par l'introduction des adjuvants appelés entraîneur d'air. Ces adjuvants sont utilisés pour entraîner volontairement des bulles d'air microscopiques dans le béton. Cet air entraîné améliore de façon spectaculaire la durabilité des

bétons exposés à des cycles de gel-dégel, la résistance des surfaces de béton à l'écaillage causé par les sels de déverglaçage et de façon substantielle la maniabilité du béton frais [1, 2].

Zhang [3] a conduit une étude pour chercher le dosage en entraîneur d'air pour obtenir 5,5 % d'air dans des ciments aux cendres volantes. Ces résultats confirment que la présence des cendres exige 2 à 6 fois plus d'adjuvants que pour un ciment ordinaire. De même, Bouzoubaa *et al.* [4] enregistrent une augmentation du dosage d'entraîneur d'air pour obtenir 5 à 7 % d'air en présence des cendres volantes, d'autant plus lorsque ces dernières sont broyées avec le clinker. Ceci a été confirmé sur d'autres ciments composés contenant 57 % de laitier où le dosage en entraîneur d'air augmentait de 2 fois par rapport à celui d'un ciment ordinaire [5].

Cette augmentation du dosage est attribuée par Hill *et al.* [6] à la teneur importante de carbone qui semble être responsable de l'adsorption de l'entraîneur d'air, et ajoute que le degré d'efficacité de l'agent entraîneur d'air est fortement lié à sa nature chimique et son mode d'action dans la pâte de ciment.

Pour un dosage donné en entraîneur d'air, la teneur en air dans le béton diminue avec le dosage et la finesse du ciment. Par contre la teneur en alcalins dans le ciment a un

effet favorable. D'autres facteurs peuvent influencer la génération et la stabilité des bulles d'air tels que l'ouvrabilité, la température et les additions minérales [1].

## 2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet et de quantifier le dosage nécessaire de deux adjuntoirs entraîneurs d'air sur le mortier. Deux types de ciments de compositions différentes ont été utilisés pour un mortier confectionné avec deux rapports E/C de 0,4 et 0,5. Le but est de trouver le dosage minimal d'adjuntoir pour l'obtention de 10 % d'air entraîné dans le mortier. A cette teneur d'air entraîné, Pigeon *et al.* [9] ont montré que le facteur d'espacement atteint une valeur proche ou inférieure à  $200 \mu\text{m}$ , caractéristique d'un béton durable face aux cycles gels-dégels.

### 2.1. Matériaux utilisés

Le mortier a été préparé avec un sable naturel normalisé composé de 98 % de silice et ayant une densité spécifique de 2,65. Deux types de ciment ont été utilisés, un ciment ordinaire (CEM I 52,5) noté C1, et un ciment composé à base de laitier de haut fourneau (CEM III/A 42,5 N) noté C2. Le ciment composé contient 36 % de clinker, le reste étant du laitier de haut fourneau à raison de 64 % avec éventuellement de 0 % à 5 % de constituants secondaires. Grâce à sa teneur en laitier, il a une haute résistance à la traction par fendage et une très bonne résistance au gel et aux sels de déverglaçage. La composition chimique, minéralogique et les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau 1. Deux adjuntoirs entraîneurs d'air de fabrication AXIM (France) ont été utilisés pour évaluer leurs dosages minimaux pour l'obtention de 10 % d'air occlus dans le mortier frais. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.

### 2.2. Composition des mélanges

Le mortier a été confectionné suivant la norme NF EN 196-1 [7], sa composition contient trois parts de sable et une part de ciment avec deux rapport E/C de 0,4 et 0,5. Deux séries de mortier ont été réalisées avec les deux ciments afin d'étudier la contribution conjointe de la qualité du ciment et de l'adjuntoir dans la génération des bulles d'air dans le mortier.

### 2.3. Détermination du pourcentage d'air occlus

L'air occlus se définit comme la quantité d'air enfermée dans un béton ou mortier à l'état frais qui se mesure à l'aide d'un aéromètre. Pour chaque dosage, on a mesuré la quantité d'air occlus, selon la norme NF P18-353 [8], jusqu'à l'obtention de la valeur de 10 %.

### 2.4. Détermination des résistances mécaniques

Après la détermination des dosages minimaux d'adjuntoir, des éprouvettes de mortier normalisé sont confectionnées dans des moules prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ . Ces éprou-

Élément (%)	CEM I 52,5	CEM III/A 42,5 N
SiO <sub>2</sub>	20,49	29,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,74	8,77
FeO <sub>3</sub>	3	1,66
TiO <sub>2</sub>	0,24	0,44
MnO	0,03	0,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,12
CaO	63,63	49,96
MgO	3,17	5,56
K <sub>2</sub> O	1,1	0,64
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,51
SO <sub>3</sub>	2,83	0,08
Perte au feu	0,97	1,23
Reste insoluble	0,18	0,55
surface spécifique Blaine	3910	3480
<b>Composition minéralogique</b>		
C <sub>3</sub> S	61,2	57,7
C <sub>2</sub> S	14,7	12,8
C <sub>3</sub> A	7,5	10,8
C <sub>4</sub> AF	9,7	7,7
<b>Résistances mécaniques (NF P 15-451)</b>		
2 jours	32,5 MPa	17,5 MPa
7 jours	50 MPa	37,5 MPa
28 jours	64,5 MPa	46 MPa

Tableau 1 : Composition des ciments utilisés.

Désignation	EA1	EA2
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1080	1038
PH	9	9,2
% extrait sec	51,1	35,5
Température congélation	- 1°C	- 1°C
Na <sub>2</sub> O	≤ 1,6	≤ 0,8
Cl <sup>-</sup>	0,3	0,2
Tensio-actif	Non ionique	anionique

Tableau 2 : Caractéristiques des entraîneurs d'air utilisés.

vettes sont vibrées par l'intermédiaire de la table à chocs puis conservées dans une chambre à température constante de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et une humidité supérieure à 75 %. Le décrofage des éprouvettes se fait après 24 heures de conservation, les éprouvettes sont ensuite conservées jusqu'à l'âge de l'essai prévu pour la résistance à la compression simple selon la norme NF EN 196-1 [7].

### 3. RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

#### 3.1. Effet de la nature des entraîneurs d'air

La détermination des dosages pour chaque entraîneur d'air montre que ces derniers se comportent d'une façon différente suivant le ciment et le rapport E/C. Il est évident que la qualité et la composition de l'adjuvant, et donc son mode d'action, influent fortement sur son efficacité et sur son dosage. La figure 1 illustre les dosages obtenus pour les deux ciments pour un rapport E/C de 0,4 où l'adjuvant EA2 s'avère le plus efficace puisque le dosage ne dépasse pas 0,32 % pour les deux ciments. En revanche l'adjuvant EA1 exige un dosage supérieur à 0,5 % pour générer la quantité nécessaire de bulles d'air. Le plus fort dosage est enregistré pour l'adjuvant EA1 avec le ciment au laitier qui atteint 1,06 % environ tandis que le plus faible est celui de EA2 avec un dosage de 0,18 % avec le ciment C1.

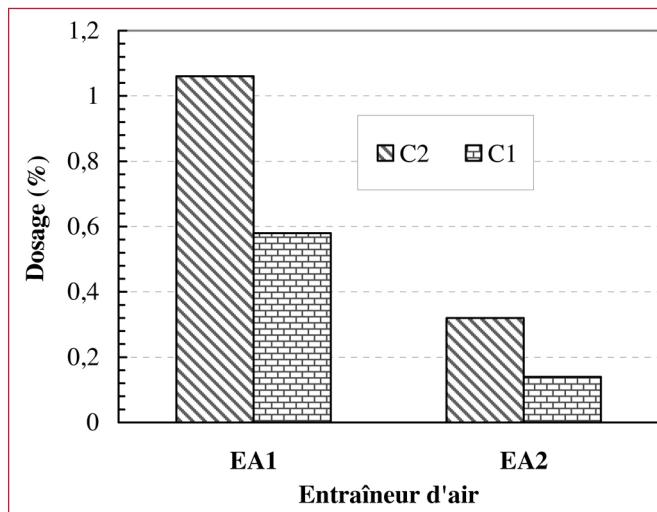


Figure 1: Dosages d'entraîneur d'air selon le type de ciment utilisé ( $E/C = 0,4$ ).

#### 3.2. Effet du type de ciment

Les résultats représentés sur la figure 1 montrent que le dosage en entraîneur d'air nécessaire pour le ciment contenant du laitier de haut fourneau C2 est deux fois plus élevé que dans le cas du ciment normal C1. La présence de laitier influe fortement sur l'absorption de l'adjuvant et sur son efficacité. Ceci confirme les résultats d'autres études faites sur le laitier [5] et les cendres volantes [4] où les ciments composés nécessitent plus d'adjuvant pour atteindre la même quantité d'air occlus. L'adjuvant EA1 semble le moins efficace en présence du laitier puisque son dosage est triplé. Par contre l'adjuvant EA2 paraît moins influencé par la présence du laitier.

Bien que le ciment C2 soit moins fin que C1, il peut présenter des proportions d'ultrafines qui atteignent des finesse supérieures lorsque le laitier et le clinker de dureté différente sont broyés ensemble. Ces ultrafines augmentent la quantité d'entraîneur d'air adsorbée sur les surfaces solides comme le confirment les travaux de Bouzzobaa *et al.* [4] et Neville [1]. Par ailleurs, la plus faible production

d'ions  $CA^{2+}$  par les ciments de laitier pourrait être à l'origine de cette plus forte demande en entraîneur d'air, ces ions intervenant dans le mécanisme de stabilisation des bulles d'air [10].

#### 3.3. Effet du rapport E/C

Pour les deux rapports E/C on a cherché le dosage requis pour les différents couples ciment et entraîneur d'air. Sur la figure 2, on a représenté les résultats concernant l'entraîneur d'air EA1 figurant parmi les moins actifs et EA2 considéré parmi les plus efficaces. La première constatation est que le dosage diminue avec l'augmentation de E/C, ce qui confirme l'effet favorable de la maniabilité sur la génération des bulles d'air [1]. D'après Du *et al.* [2], le seuil de cisaillement et la viscosité de la pâte, qui augmentent lorsque le rapport E/C diminue, agissent comme des barrières d'énergie s'opposant à la formation des bulles d'air. Pour l'adjuvant EA2, son dosage diminue de 30 % pour le ciment C2 et 24 % pour le ciment C1 lorsque le rapport E/C varie de 0,4 à 0,5 respectivement. Par ailleurs, on note que le ciment au laitier C2 est plus absorbant d'entraîneur d'air que le ciment C1 pour des E/C élevés et ce quel que soit le type d'adjuvant.

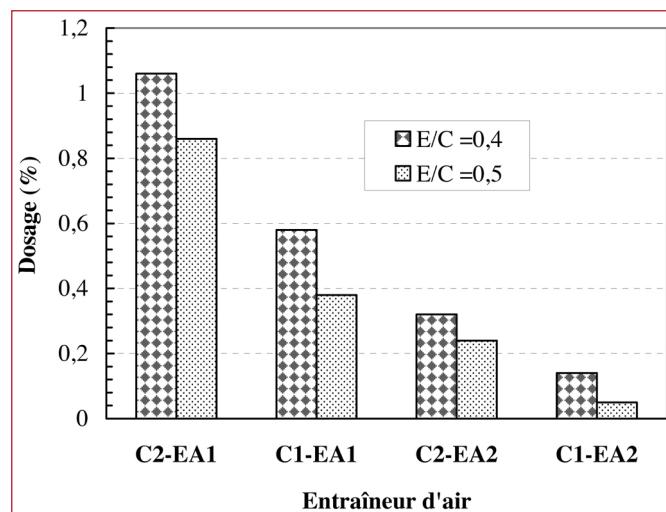


Figure 2: Influence du rapport E/C sur la consommation d'entraîneur d'air EA1 et EA2.

#### 3.4. Effet sur les résistances mécaniques

L'évolution des résistances à la compression des mortiers avec entraîneurs d'air et des mortiers témoins pour les deux types de ciment est représentée sur les figures 3 et 4. Il apparaît que l'entraînement d'air dans le béton engendre une chute de résistance quel que soit le couple ciment adjuvant utilisé. Ce résultat s'explique par la diminution de la compacité du béton en présence d'air entraîné [1]. Néanmoins cette chute dépend de l'action de l'adjuvant et de la composition du ciment. Ce résultat ne peut donc pas s'expliquer uniquement par la présence du réseau de bulles d'air, la qualité du réseau des bulles d'air engendrées par l'adjuvant, du point de vue taille et espacement, influence également les résistances.

La figure 3 montre que les résistances obtenues avec le ciment C1 sont différemment affectées bien que les mortiers aient la même quantité d'air occlus. L'entraîneur d'air EA2 s'avère le mieux adapté car ses résistances sont supérieures à celles du mortier avec EA1. Ceci montre la compatibilité de l'adjuvant EA2 avec le ciment C1, où la présence de 10 % d'air n'a entraîné qu'une réduction marginale (7 %) sur les résistances mécaniques par rapport au mortier de référence. Par contre pour l'adjuvant EA1, on observe une chute de résistance de l'ordre de 35 % environ à 28 jours.

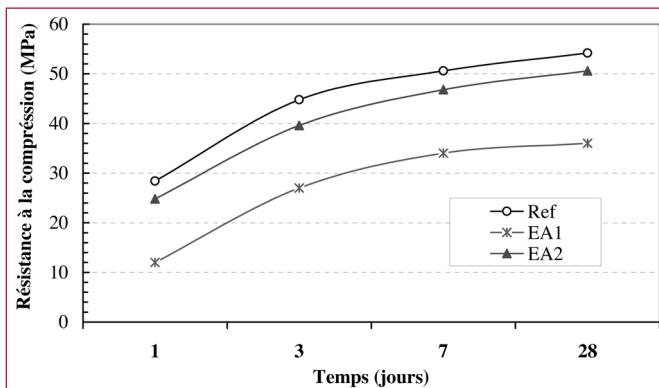


Figure 3: Évolution des résistances à la compression pour différents adjuvants entraîneurs d'air utilisés, (C1 : CEM I 52,5, E/C = 0,4).

La figure 4 illustre les résultats de résistance à la compression pour le ciment au laitier C2 qui paraît semblablement affectée par l'air entraîné. La résistance du ciment au laitier est plus sensible à la présence d'air entraîné, ce qui produit une réduction de la résistance à la compression de 42 % pour EA1 et de 31 % pour EA2.

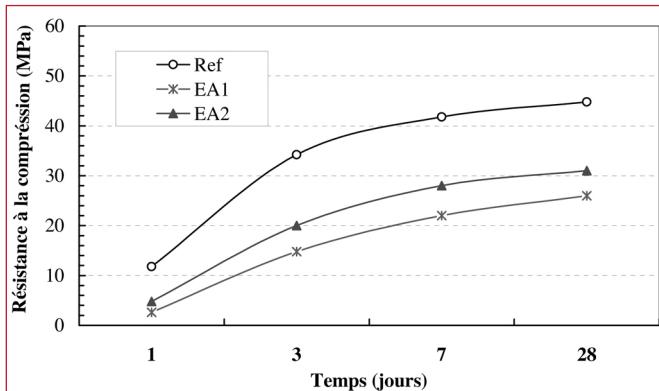


Figure 4: Évolution des résistances à la compression pour différents adjuvants entraîneurs d'air utilisés, (C2 : CEM III 42,5, E/C = 0,4).

Par conséquent, l'entraîneur d'air EA2 est l'adjuvant le plus efficace avec le ciment C1, avec des dosages nettement plus faibles et une baisse de résistance faible.

## 4. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de quantifier le dosage de certains entraîneurs d'air de fabrication AXIM (France)

avec deux types de ciment de différentes compositions et de tester leurs effets sur les résistances à la compression du mortier normalisé. Les résultats obtenus permettent de formuler les conclusions suivantes :

- Le ciment au laitier (C2) présente une demande en adjuvant entraîneur d'air deux fois supérieure à celle d'un ciment ordinaire (C1).
- La demande en adjuvant entraîneur d'air diminue avec l'augmentation du E/C, cette réduction est plus significative dans le cas des ciments ordinaires que pour les ciments au laitier.
- Les ciments composés aux laitiers fabriqués par broyage du clinker avec le laitier peuvent avoir des proportions d'ultrafines importantes qui absorbent l'adjuvant et augmentent le dosage.
- Les résistances à la compression sont largement affectées par l'air entraîné, et ceci pour les deux adjuvants. Cependant l'entraîneur d'air EA2 semble avoir une meilleure efficacité sur la qualité de l'air entraîné qui engendre des chutes de résistance plus faibles.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. M. Neville, Propriétés des bétons, Editions Eyrolles, France, 2000, 806 p.
- [2] L. Du, K. Folliard, Mechanism of air entrainment in concrete, Cement and Concrete Research, 2005, 35, 1463-1471.
- [3] D. S. Zhang, Air entrainment in fresh concrete with PFA, Cement and Concrete Composites, 1996, 18, 409-416.
- [4] N. Bouzoubaâ, M. H. Zhang, V. M. Malhotra, D. M. Golgen, Mechanical properties and durability of laboratory produced high-volume fly ash blended cements, Seventh CANMET/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Chennai (Madras), India, July 2001, 55-82.
- [5] J. Deja, Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes, Cement & Concrete Composites, 2003, 25, 357-361
- [6] R. Hill, S. L. Sarkar, R. F. Rathbone, J. Hower, An examination of fly ash carbon and its interactions with air entraining agent, Cement and Concrete Research, 1997, 27, n° 2, 193-204.
- [7] EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments, Détermination des résistances mécaniques, mars 1990, 24p.
- [8] P18 – 353, Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure du % d'air occlus dans un béton frais à l'aréomètre à béton. 06/85.
- [9] M.Pigeon, J.Marchand, R.Pleau, Frost resistant concrete, Construction and Building Materials, 1996, 10, n° 5, 339-348.
- [10] J.P.Ollivier, A.Vichot, La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2008.

# ANNEAU DE TENSÉGRITÉ PLIABLE-DÉPLIABLE

J.F. DUBÉ, J. QUIRANT, F. CEVAËR, A.D. NGUYEN, R. MOTRO

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'Université Montpellier 2 – UMR5508.  
cc48, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5

## 1. INTRODUCTION

Les systèmes de tenségrité sont des structures spatiales légères et transparentes qui ont été imaginées puis formalisées dans les années 60-70 (figure 1) [Fuller 1962, Snellen 1973].



Figure 1: Réalisation de systèmes de tenségrité,  
a) Needle Tower (1966).



Figure 1: b) projet Tensarch (2002).

Le concept de tenségrité consiste à créer des structures réticulées dans lesquelles certains éléments sont des câbles. La stabilité de la structure est assurée par la mise en précontrainte de l'ensemble : les barres sont sollicitées en compression, les câbles en traction. On parle alors d'autocontrainte car le système conçu est auto-équilibré, sans aucune extérieure supplémentaire. Cette autocontrainte conditionne non seulement la stabilité mais aussi la rigidité de l'ensemble. L'équipe 'Conception en structures'

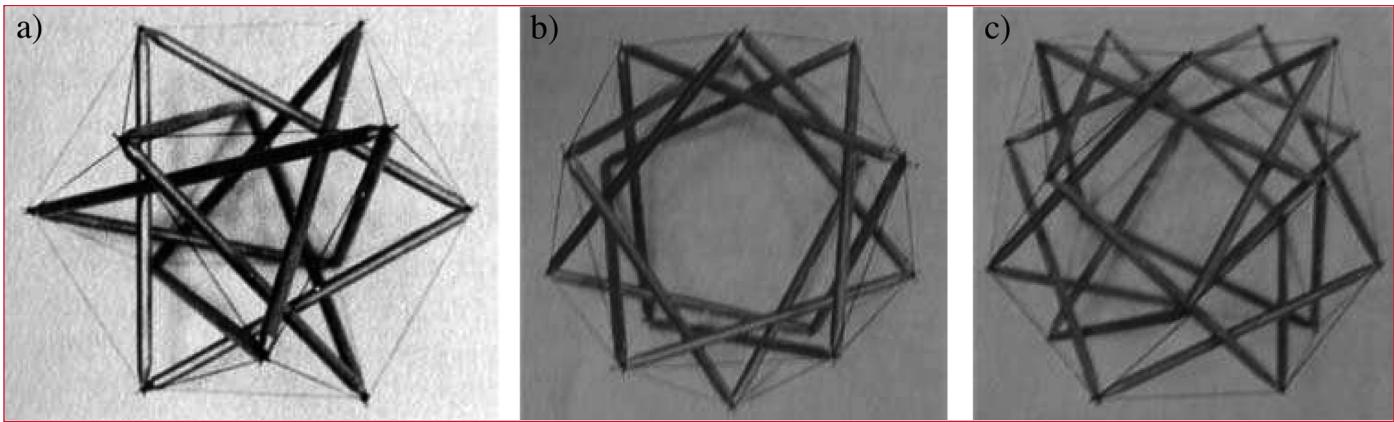


Figure 2: a) cuboctaèdre b) anneau de tenségrité à base pentagonale, c) anneau de tenségrité à base hexagonale.

du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil est spécialisée dans l'étude des structures légères dont font partie les systèmes de tenségrité [Motro 2002, 2003].

Dans son livre publié en 1976 ‘An introduction to tensegrity’, Anthony Pugh a présenté 3 modèles physiques de systèmes de tenségrité dont les éléments comprimés forment un ou plusieurs circuits continus de barres [Pugh 1976] (figure 2).

Trois brevets ont été déposés mais aucune explication n'était donnée sur la construction des systèmes. René Motro *et al.* [Motro 2006] ont proposé une méthode d'assemblage et surtout montré la possibilité de plier complètement la maquette. Ils proposent également quelques applications. La structure comprend un espace intérieur vide comme un tube, ce qui justifie la dénomination d'anneau de tenségrité.

## 2. CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN PROTOTYPE

### 2.1. Élaboration de la composition structurale

La base de la géométrie est un prisme droit à base pentagonale de hauteur  $H$  (Figure 3a). Sur chaque face du prisme on place une barre appelée barre latérale sur la diagonale du rectangle (Figure 3b). Cela assure la symétrie circulaire du prisme. Des noeuds intermédiaires se trouvent sur le plan horizontal qui passe à mi-hauteur du prisme (figure 3c). Ils sont positionnés sur la bissectrice de chaque sommet du pentagone situé à mi-hauteur. Le noeud intermédiaire est porté par cette droite et en dehors du prisme (figure 3d). A partir du nouveau noeud défini, on ajoute un couple de barres nommées barres intermédiaires dont l'une est reliée à un noeud de la nappe supérieure et l'autre à un noeud de la base inférieure comme le montre la figure 3d. Les 4 autres couples de barres sont mis en place successivement avec le même principe (figure 3e) dans le cas d'un module pentagonal. Enfin, les câbles sont positionnés sur les deux pentagones de base du prisme (câbles de nappes) et pour chaque noeud extérieur 4 câbles (câbles intermédiaires) sont liés aux noeuds des nappes comme le montre la figure 3f. On distingue 2 groupes de câbles intermédiaires : les câbles intermédiaires 1 qui sont coplanaires avec une barre transversale et les câbles intermédiaires 2, non-coplanaires avec cette barre [Nguyen 2007].

Trois paramètres définissent la géométrie globale du système :  $R$  le rayon du cercle circonscrit de la base du prisme,  $H$  la hauteur du prisme et  $R'$  le rayon du cercle circonscrit des noeuds intermédiaires (figure 4).

Dans notre cas, nous avons choisi un pentagone intermédiaire de rayon égal à celui de la base ( $R = R'$ ) et des longueurs de barres identiques. Nous pouvons alors déterminer la relation entre la hauteur  $H$  et le rayon  $R$ . La géométrie ne dépend plus que d'un seul paramètre :

$$H = 4R \sqrt{\frac{\cos(3\pi/5)}{3}}$$

### 2.2. Réalisation

Nous avons choisi de réaliser une structure de dimension relativement conséquente afin de limiter l'effet des imperfections de montage et d'obtenir une déformée importante sous chargement. Les barres sont réalisées en composite pultrudé. Ce matériau allie une résistance axiale très élevée, une excellente résistance chimique, une bonne durabilité et une bonne résistance à la fatigue. Les câbles sont des torons en acier inoxydable. Les caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure sont décrites dans les tableaux 1 à 3.

Longueur des barres	220 cm
Longueur des câbles de nappes	148 cm
Longueur des câbles intermédiaires	112 cm
Rayon $R$ du cercle circonscrit	125 cm
Hauteur $H$ du module	160 cm

Tableau 1 : Propriétés géométriques du module.

Module d'Young des barres	20 000 MPa
Résistance	220 MPa
Diamètre interne	35,0 mm
Diamètre externe	40,0 mm
Effort de compression maximal pour des barres de 2 m (force critique d'Euler)	2,566 kN

Tableau 2 : Propriétés mécaniques et géométriques des barres.

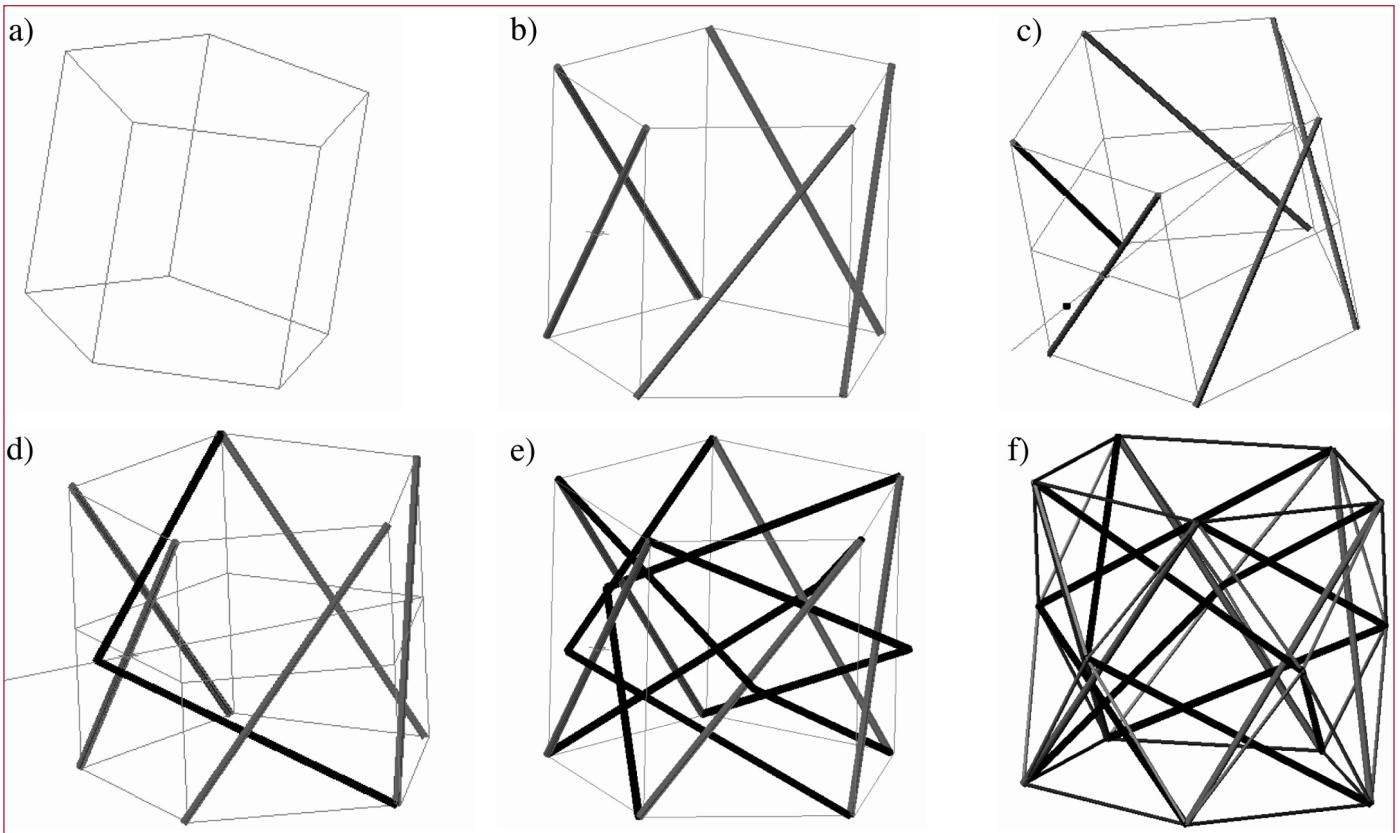


Figure 3: Détail de l'anneau de tenségrité. a) prisme de base, b) barres latérales, c) nappe intermédiaire, d) barres intermédiaires, e) toutes les barres, f) structure complète.

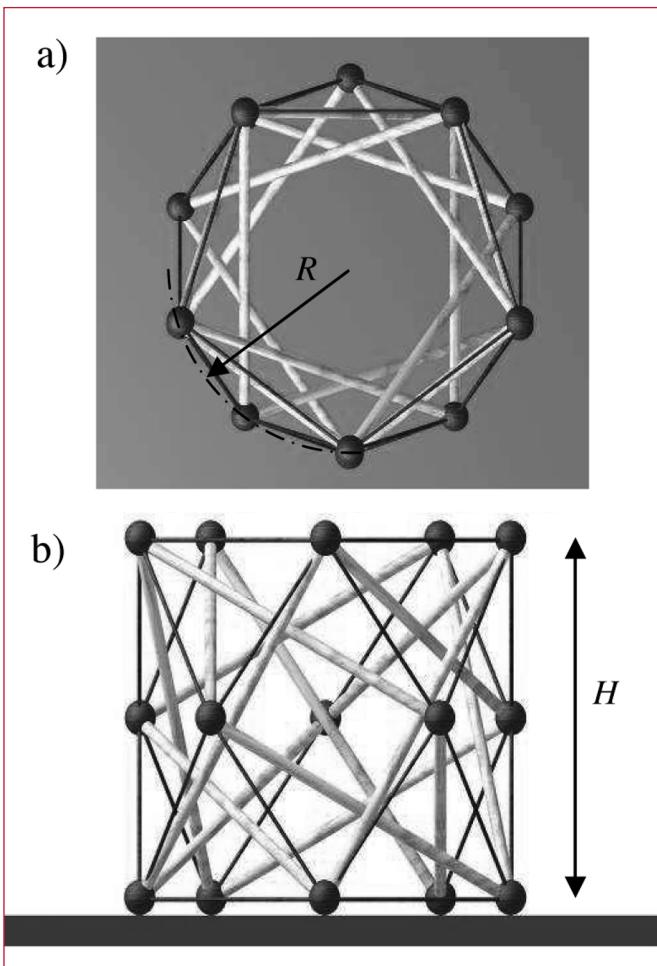


Figure 4: Anneau de tenségrité. a) vue de dessus, b) vue de côté.

Module d'Young des câbles	100 000 MPa
Résistance	1 300 MPa
Diamètre extérieur	3,0 mm
Force maximale admissible	5,03 kN

Tableau 3 : Propriétés mécaniques et géométriques des câbles.

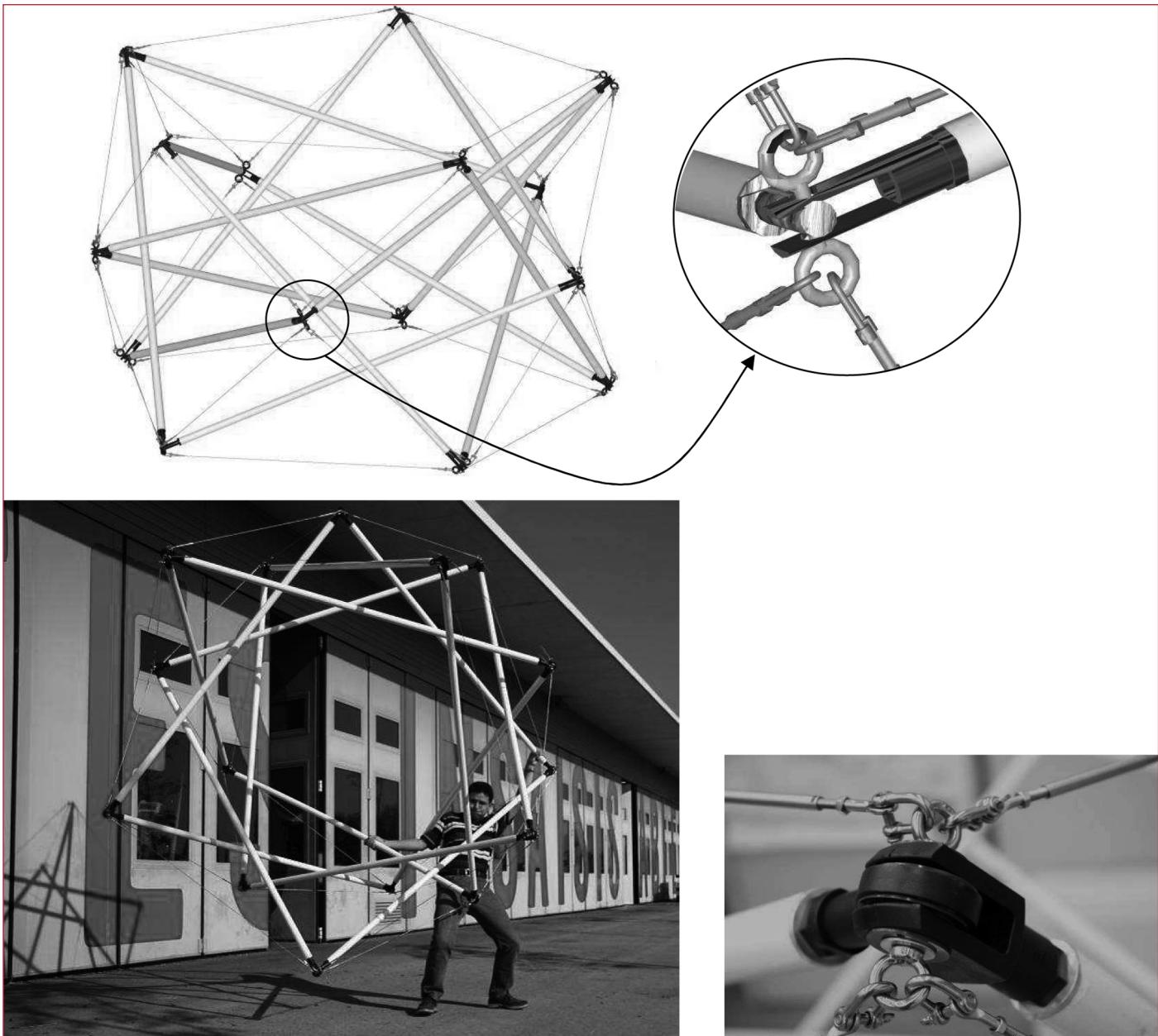
Un effort particulier a été porté sur la conception des nœuds de liaisons pour obtenir une rotule parfaite sur laquelle les câbles sont accrochés [Farrugia 2004]. Nous avons utilisé des éléments du commerce et créé la rotule par une série de pivots qui permettent les rotations suivant les trois angles d'Euler. L'anneau de tenségrité réalisé pèse 25 daN pour un diamètre extérieur de 2,5 m (figure 5).

### 3. PLIAGE DE LA STRUCTURE

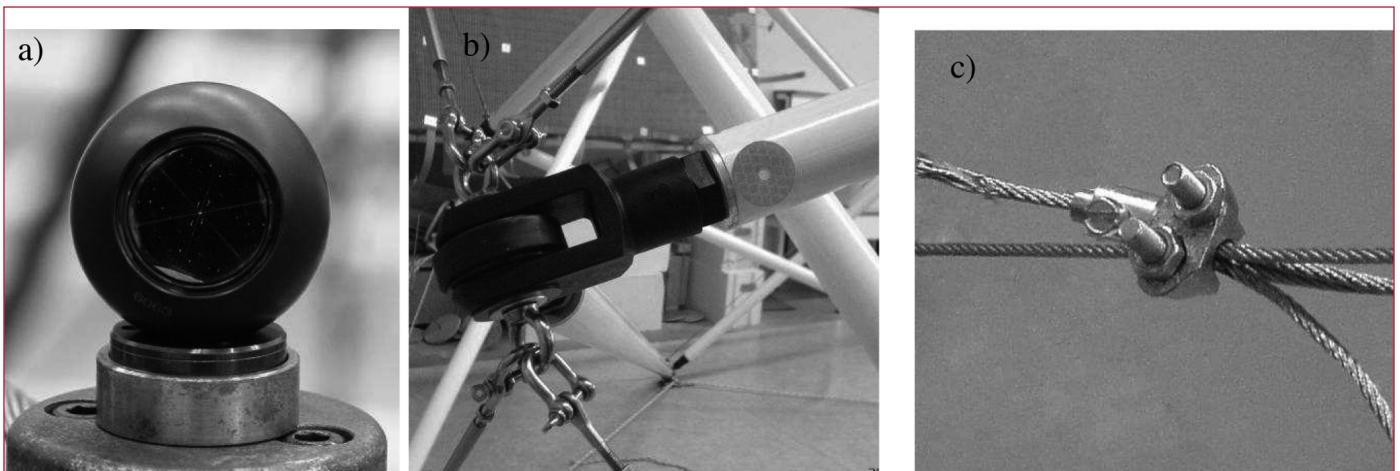
La pliabilité du module a été préalablement validée par l'étude des mécanismes finis induits par la modification des longueurs des câbles de nappe. Elle a été confortée par la mise en œuvre de modèles physiques.

#### 3.1. Dispositif expérimental

Le pliage de la structure est piloté par le relâchement simultané des câbles de la nappe supérieure et inférieure. Pour mesurer les déplacements, nous disposons d'un théodolite Leica TDA 5005 qui permet de relever les positions de réflecteurs ou de cibles réfléchissantes (figure 6a et 6b). Les réflecteurs sont précis à 100 µm



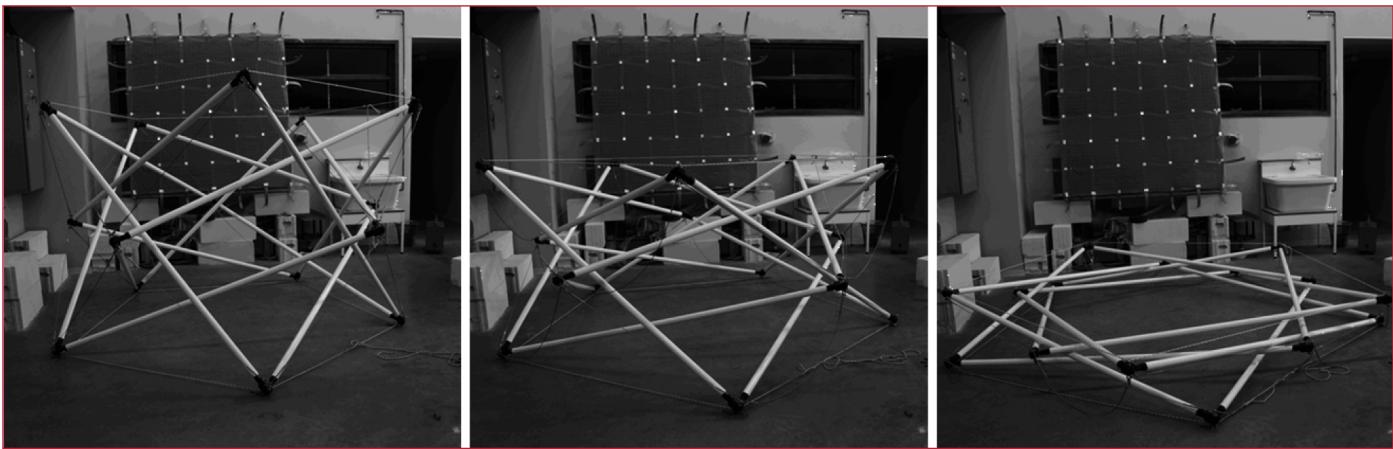
*Figure 5: L'anneau de tenségrité pèse 25 daN.*



*Figure 6: Dispositifs de mesure et réglage, a) réflecteur, b) cible réfléchissante, c) serre-câble pour ajustement.*

près et permettent de recaler le théodolite lors d'un changement de position pour suivre l'ensemble des cibles réfléchissantes fixées sur les barres. Le prototype d'anneau de tenségrité est équipé de deux câbles de nappe

continus en acier dont la longueur peut être ajustée (figure 6c). Les pieds du module reposent sur des patins en téflon. La géométrie de la structure est mesurée dans sa position initiale autocontrainte.

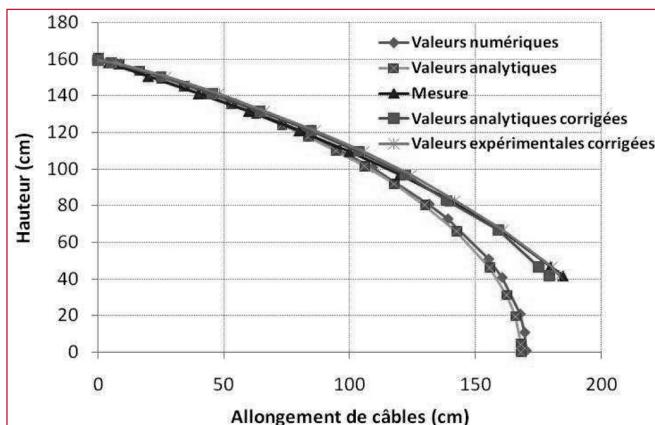


**Figure 7: Pliage de l'anneau par allongement des câbles de nappes.**

Par la suite, des positions intermédiaires sont obtenues par allongement progressif des câbles de nappe par pas de 20 cm (figure 7). A chaque étape, les positions des cibles collées sur les barres sont relevées.

### 3.2. Comparaisons des résultats

Parallèlement aux mesures, nous avons développé un modèle analytique et un modèle numérique du déploiement de la structure. Le modèle analytique est basé sur les relations géométriques de la structure lors de son déploiement. Le modèle numérique utilise le code de calcul ANSYS [ANSYS 2005]. Il sert ensuite aux simulations du comportement sous chargement en prenant en compte les grands déplacements et les effets du second ordre [Kébiche 1999, Abebi 2004]. Lors de la conception des noeuds, pour faciliter la réalisation, nous avons choisi de déporter légèrement les câbles (figure 5) alors que dans les modèles analytiques et numériques ils sont concourants au centre des noeuds. On constate alors qu'au cours du pliage, les noeuds reliés par les câbles coplanaires ont tendance à se rapprocher alors que la longueur réelle des câbles ne varie pas. Ce phénomène est causé par le changement d'orientation des anneaux sur lesquels sont attachés les câbles. Cette variation est loin d'être négligeable puisqu'elle conduit en moyenne à une variation apparente de longueur des câbles de 2,5 cm. Une nouvelle simulation a été effectuée afin de tenir compte de ce biais évolutif. Après cette correction, nous obtenons une parfaite concordance entre les mesures et les simulations (figure 8).



**Figure 8: Évolution du déplacement moyen de la nappe supérieure en fonction de l'allongement des câbles de nappe.**

Toutefois, pour une hauteur égale à 40 cm les barres entrent en contact, ce qui explique le fait que nous n'atteignons pas la valeur nulle des simulations.

## 4. COMPORTEMENT SOUS CHARGEMENT

Dans cette section nous présentons une partie de l'étude du comportement mécanique de la structure soumise à un état d'autocontrainte préalablement défini en fonction des limites de sollicitation des éléments. Cet état d'autocontrainte assure la stabilité et la rigidité de la structure [Pellegrino 1986, Vassart 2000].

### 4.1. Mise en autocontrainte

Pour définir l'état d'autocontrainte et son niveau, comme les efforts dans les éléments sont proportionnels, nous fixons celui de l'élément barre le plus comprimé et nous en déduisons les autres avec un logiciel dédié (Tenségrité 2000 - [Quirant 2000] - figure 9). Dans notre application, nous choisissons le niveau d'autocontrainte pour lequel l'effort dans les barres latérales est 1 kN ( $\sim 40\%$  de la charge critique d'Euler), ce qui donne comme efforts dans les autres éléments le tableau 4.

Barres intermédiaires	- 0,34 kN
Barres latérales	- 1,00 kN
Câbles des nappes	0,34 kN
Câbles intermédiaires 1	0,87 kN
Câbles intermédiaires 2	0,33 kN

**Tableau 4 : Efforts dans les éléments.**

### 4.2. Présentation du chargement

Le but est d'analyser le comportement en compression de l'anneau de tenségrité. La structure est chargée par des forces verticales identiques. Pour cette première campagne d'essai, la charge est appliquée à l'aide de poids suspendus aux 5 noeuds de la nappe supérieure (figure 10). La valeur donnée dans les graphiques est la force totale appliquée. Le comportement mécanique est mesuré et comparé à celui que l'on obtient numériquement.

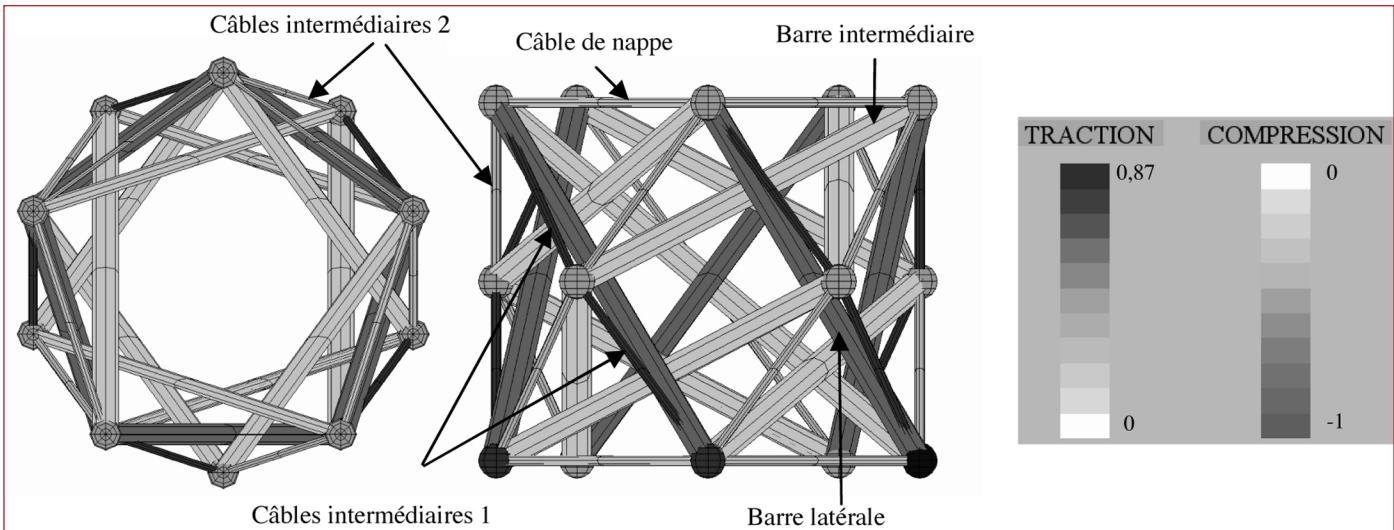


Figure 9: Visualisation de l'état d'autocontrainte initial donné par Tenségrité 2000.



Figure 10: Chargement de la structure.

Huit pas de chargement sont appliqués de façon statique. Le changement de poids est fait noeud par noeud et pour ne pas endommager le système, nous nous limitons à 23,6 kg par noeud. Les déplacements sont relevés pour 5 barres : 2 barres latérales et 3 barres intermédiaires.

#### 4.3. Comparaisons des résultats

La figure 11 présente l'évolution de la moyenne des déplacements des nœuds de la nappe supérieure.

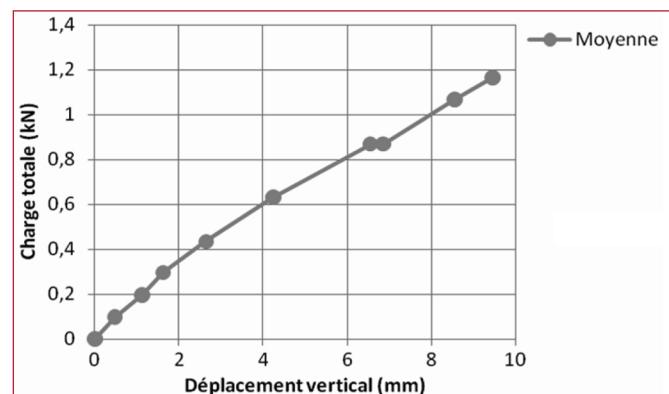


Figure 11: Courbe expérimentale charge - déplacement moyen.

La simulation du comportement sous chargement réalisée avec le code ANSYS est présentée figure 12.

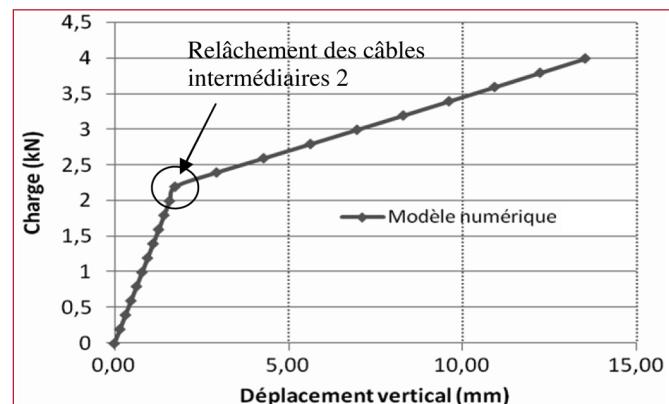


Figure 12: Simulation du comportement sous chargement.

Le changement de pente observé dans la courbe correspond au relâchement de certains câbles. Le comportement expérimental est quasi linéaire et ne montre pas le moment où les câbles non-coplanaires se détendent. Il est probable que ce relâchement intervient dès le premier pas de chargement, c'est même vérifié sur le plan théorique en l'absence d'autocontrainte. La rigidité globale déduite de la courbe expérimentale est de 123 N/mm. On constate une nette différence avec le comportement simulé qui présente une raideur plus importante au début de

la courbe (1260 N/mm) et du même ordre ensuite (150 N/mm). Le comportement de la structure réelle suit donc celui de la seconde partie de la courbe simulée avec les câbles détendus. Comme nous ne disposions pas encore d'outils fiables pour mesurer correctement les tensions des câbles en place, l'état d'autocontrainte théoriquement prévu n'a pas pu être correctement appliqué. Il est donc probable que les câbles intermédiaires non-coplanaires devaient avoir une tension initiale trop faible et se sont certainement détendus dès le premier chargement. Si l'état d'autocontrainte n'influe pas sur le pliage de la structure (figure 8), il s'avère primordial dans le comportement sous chargement.

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous étudions l'application d'un nouveau concept de structures légères et déployables en alliant la réalisation expérimentale, le modèle analytique et les simulations numériques. Nous avons montré que l'anneau de tenségrité présente la possibilité d'être plié et déployé par action sur les deux câbles de nappe seulement. Les modélisations développées ont montré une bonne concordance avec les mesures expérimentales pour le pliage de la structure. Toutefois, un écart important est constaté pour le comportement sous chargement qui peut s'expliquer par une mauvaise mise en tension du prototype. Un travail est actuellement réalisé pour pouvoir déterminer l'état réel de l'autocontrainte introduite. La suite de l'étude consiste à simuler l'assemblage de plusieurs anneaux de tenségrité pour constituer un tube de tenségrité déployable de plus grande envergure. Des applications pourraient voir le jour dans le domaine des tours d'étalement ou pour des ouvrages de franchissement provisoires.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abedi, K. and Shekastehband, B. (2004), Investigation into Stability Behavior of Tensegrity

Structure, *Extended Abstract, IASS Symposium IASS Symposium*, Montpellier, France, pp. 108-109.

- [2] ANSYS (2005), Basic analysis guideANSYS Release 10.0, ANSYS, Inc. Ltd.
- [3] Farrugia, P., Nooshin H., Disney , P. and Parke, G. A. R. (2004), Spatial foldable rings, *Extended Abstract, IASS Symposium*, Montpellier, France, pp. 70-71.
- [4] Fuller, R.B. (1962), Tensile Integrity Structure, *US PATENT 3.063.572*.
- [5] Kébiche, K., Kazi Aoual, M. N. and Motro, R. (1999), Geometric nonlinear analysis of tensegrity systems, *J. of Engineering Structures*, vol. 21. pp. 864-876.
- [6] Motro, R. and Raducanu, V. (2002), Tensarch Project, *5<sup>th</sup> Int conf on Space Structures*, University of Surrey, Guildford.
- [7] Motro, R. (2003), Tensegrity, *Kogan Page Science*, ISBN : 1903996376.
- [8] Motro, R., Maurin, B., Silvestri, C. (2006), Tensegrity rings and the hollow rope, *Extended Abstract, IASS Symposium*, Beijing, China, pp. 470-471.
- [9] Nguyen, A.D., Cevaër, F., Dubé, J-F., Quirant, J. (2007), Construction and deployment of tensegrity ring, *IASS symposium 2007*, Venice.
- [10] Pellegrino, S. and Calladine, C. R. (1986), Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks, *Int. J. of Solids and Structures* 22, pp. 409–428.
- [11] Pugh, A. (1976), An introduction to tensegrity, *University of California Press*, California, USA.
- [12] Quirant, J. (2000), Systèmes de tenségrité et autocontrainte : qualification, sensibilité et incidence sur le comportement, Thèse, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Université Montpellier 2.
- [13] Snelson, K. (1973), Tensegrity Mast, Bolinas Californie, *Shelter Publications*.
- [14] Vassart N., Laporte R., Motro R. (2000), Determination of mechanism's order for kinematically and statically indetermined systems, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, p. 3807-3839.

# **ÉVALUATION SISMIQUE DE BÂTIMENTS EXISTANTS. APPROCHE BASÉE SUR LE RISQUE INTRODUITE EN SUISSE**

**Pierino LESTUZZI\*, Blaise DUVERNAY\*\*, Roberto PERUZZI \*\*\*, Alexandre SCHMID \*\*\***

\*Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction, ENAC-IS-IMAC

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Bâtiment GC, Station 18, CH-1015 Lausanne  
pierino.lestuzzi@epfl.ch

\*\* Office fédéral de l'environnement (OFEV), Centrale de coordination pour la mitigation des séismes,  
Division prévention des dangers, CH-3003 Berne

\*\*\* Bureau d'ingénieurs civils Kurmann & Cretton SA, Avenue de la Gare 37B CH-1870 Monthey

## **1. INTRODUCTION**

L'appréciation de l'évaluation sismique des bâtiments existants est problématique car ces derniers ont été généralement construits sans tenir compte de ce type de risque ou bien avec des méthodes inadaptées. Principalement en raison de l'adaptation à la hausse de l'aléa sismique dans les régions à sismicité modérée comme la Suisse, une grande majorité d'entre eux devraient être renforcés s'ils étaient évalués selon les mêmes critères que les bâtiments neufs. Afin de limiter raisonnablement les investissements nécessaires, une approche différente, basée sur le risque, a été récemment introduite dans un document complémentaire des normes suisses de construction (SIA D 0211, 2005). L'article décrit les fondements de cette approche novatrice et présente un exemple concret d'application.

Sur le plan sismique, l'élément essentiel qui distingue les ouvrages neufs des ouvrages existants concerne le coût des mesures. Pour les constructions neuves, le coût de l'application des prescriptions des nouvelles normes de construction est quasiment négligeable. En Suisse, des études ont montré que le surcoût se monte au plus à quelques pour cent du montant du gros-œuvre. A titre de comparaison,

c'est moins cher que l'installation d'un paratonnerre! Par ailleurs, ce coût peut être notablement réduit avec une conception adéquate de la structure porteuse. Pour les constructions existantes, c'est un tout autre problème. Contrairement aux constructions neuves, aucun choix bénéfique quant à la conception de la structure ne peut évidemment être effectué. En outre, leur assainissement sismique est très coûteux, pouvant atteindre plusieurs dizaines de pour cent de la valeur de l'objet. Par conséquent, des approches différentes sont nécessaires pour les constructions nouvelles et pour les constructions existantes. Le cahier technique SIA 2018 (2004) formalise une telle approche, basée sur les concepts de proportionnalité et d'exigibilité dans le contexte de la réduction du risque et des coûts d'intervention. Il permet, entre autres, de fixer des limites d'investissements raisonnables.

## **2. LE SÉISME DANS LES NORMES SUISSES DE CONSTRUCTION SIA**

En 2003, les normes suisses de construction SIA ont subi une importante évolution pour les rendre compatibles avec

les Eurocodes. Symbole de cette évolution, les normes SIA de l'édition 2003 ont été renommées de 260 à 267. Le dernier chiffre est celui des Eurocodes correspondants (par exemple, la norme SIA 261 correspond à l'Eurocode 1). L'évolution la plus marquée concerne incontestablement les aspects sismiques. La grande nouveauté réside dans l'introduction explicite du dimensionnement en capacité, dénommé dimensionnement ductile. Il faut noter ici que les normes SIA s'appliquent aux structures habituelles et nouvelles comme les bâtiments et les ponts, par exemple. Elles ne concernent pas les bâtiments existants et les monuments historiques. De plus, elles ne s'appliquent pas aux structures spéciales et sensibles comme les barrages ou les centrales nucléaires qui, elles, sont soumises à la réglementation plus stricte de l'ordonnance fédérale sur les accidents majeurs.

Le séisme n'a pas toujours été considéré dans les normes SIA. Avant 1970, les actions sismiques étaient tout simplement ignorées. Le séisme apparaît pour la première fois dans l'édition de 1970. Cependant, c'était bien trop faible et rudimentaire. L'édition de 1989 a apporté une première amélioration avec une carte de danger sismique, une répartition en classes d'ouvrages et des mesures constructives spécifiques. Cependant, seule la méthode de dimensionnement conventionnelle était proposée, ignorant les spécificités de l'action sismique. L'édition de 2003 intègre les derniers développements du génie parasismique, en particulier le dimensionnement en capacité (SIA D 0181, 2003). A terme, les Eurocodes devraient être applicables en Suisse. Cette transition, prévue pour 2009 au plus tôt, sera grandement facilitée par la compatibilité des nouvelles normes SIA avec les Eurocodes.

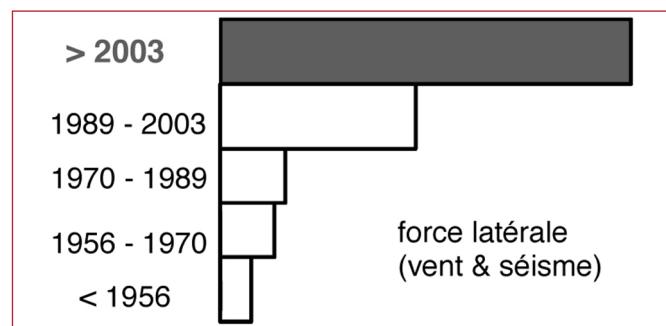
Le traitement du séisme dans les différentes éditions des normes SIA se résume ainsi (Lestuzzi, 2008) :

- avant 1970 : néant ;
- édition 1970 : rudimentaire ;
- édition 1989 : conventionnelle ;
- édition 2003 : dimensionnement en capacité.

### 3. LE CAHIER TECHNIQUE SIA 2018

Pour les constructions existantes, le relèvement du danger sismique de la dernière édition des normes SIA pose un sérieux problème. En plus de l'augmentation significative des sollicitations à considérer (voir figure 1), plusieurs régions ont été classées dans une zone de danger sismique supérieure, certaines sautant même deux zones d'un coup. Par ailleurs, l'immense majorité du bâti existant en Suisse a été construite avant 1989, date de l'entrée en vigueur de considérations sismiques convenables. Par conséquent, une grande partie du bâti existant devrait certainement faire l'objet d'un assainissement, si elle était évaluée dans le cadre d'une application stricte des nouvelles normes. Cette situation n'est pas envisageable d'un point de vue économique car les ressources pour ces assainissements ne sont évidemment pas disponibles. La SIA a donc chargé un groupe de travail d'élaborer les bases des réflexions supplémentaires nécessaires à l'application des nouvelles normes avec des constructions existantes. Le résultat a été

publié dans le cahier technique SIA 2018 (2004) : « Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants ».



*Figure 1 : Représentation schématique de l'évolution de la force latérale à considérer avec les différentes générations de normes SIA.*

L'optique retenue dans le cahier technique SIA 2018 est une approche basée sur les notions de risque. Ce document novateur dissocie le risque individuel du risque collectif et définit le niveau de sécurité minimum exigé en relation avec l'acceptation du risque individuel. Les éléments suivants constituent l'ossature du cahier technique SIA 2018 :

- le risque individuel ;
- le principe de proportionnalité ;
- le principe d'exigibilité.

#### 3.1. Risque individuel

Dans le cahier technique SIA 2018, le niveau de sécurité minimal exigé est défini en relation avec l'acceptation du risque individuel. Le risque individuel correspond à la probabilité moyenne qu'une personne décède suite à un séisme. L'estimation du risque individuel s'effectue sur la base d'une personne qui se trouve en permanence dans le bâtiment considéré. En fait, exprimé de cette manière, le risque individuel est plus un indicateur de la sécurité structurale du bâtiment qu'un risque aux individus proprement dit car personne ne séjourne de manière permanente dans un bâtiment.

Le risque individuel acceptable doit garantir les droits à la sécurité de l'individu. Il s'agit d'une valeur qui doit être déterminée par comparaison avec d'autres risques car elle doit exprimer la position de la société en la matière. Généralement, la probabilité de décès est exprimée sur la base d'une période d'un an. Les valeurs couramment proposées dans la littérature spécialisée oscillent entre  $10^{-3}$  et  $10^{-6}$  par année. C'est-à-dire que les valeurs varient entre un pour mille et un pour un million. Cette variation importante reflète la marge entre des risques consentis et influençables avec un grand bénéfice pour l'individu (par exemple, activité de loisir dangereuse) et des risques non consentis, peu influençables et sans bénéfice pour l'individu (par exemple, industrie chimique du point de vue des riverains).

Dans le cadre plus restreint des dangers naturels, des valeurs comprises entre  $10^{-4}$  et  $10^{-5}$  par année sont considérées comme acceptables. La dernière valeur a été retenue dans le cahier technique SIA 2018. Celle-ci correspond au

risque additionnel pris en effectuant 10'000 km en train ou un vol en avion par année. A titre de comparaison, cette valeur est bien inférieure au risque accepté lors de la pratique du motocyclisme ou même de la randonnée en montagne, par exemple.

La valeur du risque individuel acceptable ayant été fixée, reste l'étape la plus difficile, c'est-à-dire la relier à la sécurité structurale des bâtiments. Il s'agit là de l'opération la plus délicate du processus car elle est entachée d'une grande incertitude. Bien que le cahier technique SIA 2018 traite des constructions existantes, il a été décidé de baser les évaluations sur le niveau imposé par les nouvelles normes SIA. Le lien du risque individuel acceptable avec la sécurité structurale s'effectue alors à l'aide du facteur de conformité. Celui-ci quantifie dans quelle mesure, un ouvrage existant répond aux exigences posées pour un ouvrage neuf selon les nouvelles normes SIA. Actuellement, la faible quantité de cas de bâtiments existants traités avec les nouvelles normes SIA est responsable d'un supplément important d'incertitude. Concrètement, la détermination du lien a été essentiellement effectuée sur la base de jugements d'experts.

Tout d'abord, le risque individuel doit être déterminé pour différents types de bâtiments. Cette opération a été effectuée à l'aide des classes de vulnérabilité définies dans l'EMS-98 (Grünthal *et al.*, 2001). Rappelons que le risque individuel représente le risque encouru par une personne qui se trouve en permanence dans le bâtiment durant une année. Il peut être estimé à l'aide du calcul des probabilités et correspond au produit de la probabilité d'occurrence des séismes par la probabilité d'endommagement du bâtiment considéré. La probabilité d'occurrence d'un séisme d'intensité donnée en un lieu donné est définie dans la norme SIA 261 sur la base de quatre zones sismiques. La probabilité d'endommagement est déterminée sur la base de l'EMS-98.

Ce processus a abouti à l'établissement d'une courbe matérialisant la relation entre le risque individuel et le facteur de conformité. Cette courbe est représentée à la figure 2. Le facteur de conformité ( $\alpha_{\text{eff}}$ ) se trouve sur l'échelle horizontale et le risque individuel (RF) sur l'échelle verticale. Logiquement, le risque individuel diminue rapidement avec l'augmentation du facteur de conformité. Des applications pilotes ont mis en évidence la grande dispersion à

laquelle il faut s'attendre dans ce contexte. Finalement, la courbe passe à une valeur de risque individuel de 1 pour 100'000 par année lorsque le facteur de conformité atteint la valeur de 0,25. Un facteur de conformité égal à 0,25 correspond donc au risque individuel acceptable. En d'autres termes, la sécurité de l'individu est garantie pour un bâtiment existant si celui-ci répond à 1/4 des exigences des nouvelles normes SIA.

Un facteur de conformité de 0,25 constitue un plancher en-dessous duquel des mesures de protection sismique doivent impérativement être prises car la sécurité individuelle n'est alors plus assurée. Si le facteur de conformité est supérieur à 0,25, il faut introduire un critère supplémentaire pour décider de l'opportunité des mesures de protection sismique. Ce critère supplémentaire est constitué par le coût de sauvetage d'une vie humaine.

### 3.2. Coût de sauvetage d'une vie

La valeur limite du coût de sauvetage d'une vie humaine est intrinsèquement liée au contexte socio-économique. Cette valeur doit refléter ce que la société est prête à investir pour sauver une vie humaine. Elle ne peut donc être déterminée que par comparaison avec les montants consentis dans d'autres situations. Le cahier technique SIA 2018 a fixé la valeur de 10 millions de francs (environ 6 millions d'€) par vie sauvée pour la limite de proportionnalité.

### 3.3. Principe de proportionnalité

Une fois le critère d'acceptabilité du risque individuel rempli (facteur de conformité  $> 0,25$ ), il faut apprécier la proportionnalité des mesures d'intervention sur la base des coûts de sauvetage parasismiques qui correspondent statistiquement aux montants dépensés pour sauver des vies humaines. Pour utiliser ce critère, il faut déterminer le risque collectif qui dépend du nombre de personnes se trouvant dans le bâtiment ainsi que de leur temps de présence. Par ailleurs, étant donné que l'estimation s'effectue sur une base annuelle, il faut considérer la durée d'utilisation restante pour répartir les investissements envisagés.

Sans entrer dans les détails, le calcul des coûts de sauvetage fait intervenir la réduction du risque lié à l'intervention selon la courbe de la figure 2, l'occupation moyenne du bâtiment (PB) et la durée d'utilisation restante. Logiquement, plus la réduction du risque est importante, plus le bâtiment est occupé et plus celui-ci sera utilisé longtemps, moins les coûts de sauvetage seront élevés. Il faut noter que la période de retour de l'action sismique étant bien plus élevée (env. 500 ans) que la durée d'utilisation restante (de l'ordre de 50 ans) et qu'un bâtiment est rarement occupé en permanence, les interventions ne permettent de sauver statistiquement que des fractions de vies humaines. Ainsi, les montants considérés comme proportionnels n'atteignent également qu'une fraction de la limite des 10 millions de francs.

A titre d'exemple, considérons un bâtiment de bureaux dont le facteur de conformité ( $\alpha_{\text{eff}}$ ) est juste égal au seuil minimal ( $\alpha_{\text{eff}} = \alpha_{\text{min}} = 0,25$ ). L'adjonction de voiles en béton armé permet d'obtenir un facteur de conformité

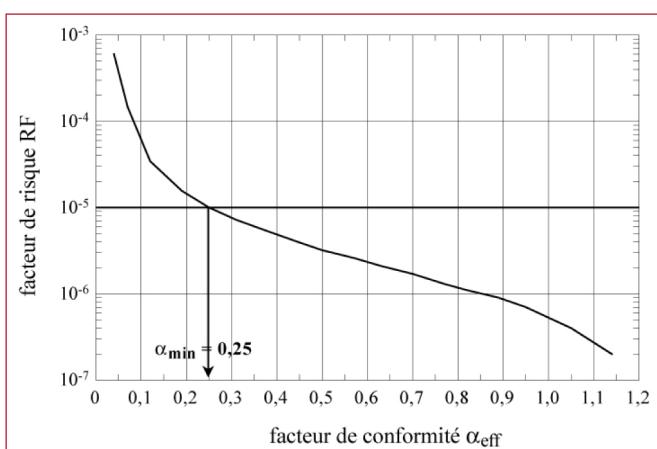


Figure 2: Risque individuel (RF) en fonction du facteur de conformité ( $\alpha_{\text{eff}}$ ).

après intervention de  $\alpha_{int} = 0,85$ . Dans ce cas, la réduction du risque est de  $10^{-5} - 10^{-6} = 9 \cdot 10^{-6}$  /an (voir figure 3). Si l'occupation moyenne de ce bâtiment est de  $PB = 11$  personnes, cela signifie que l'intervention prévue permet de sauver  $11 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-4}$  vie/an, c'est-à-dire 1 dix millième de vie par année ! Par conséquent, même avec une durée d'utilisation restante de 50 ans, seul un montant de l'ordre de grandeur de 100'000 francs (env. 60'000 €) satisfait au critère de la proportionnalité ce qui est bien inférieur à la limite des 10 millions de francs (env. 6 millions d'€).

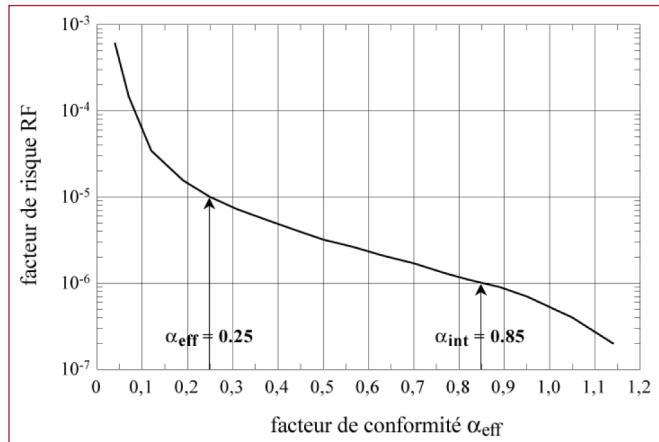


Figure 3: Détermination de la réduction du risque pour le calcul des coûts de sauvetage.

### 3.4. Principe d'exigibilité

Une autre notion a également été introduite. Il s'agit de l'exigibilité. En principe, des mesures doivent être prises lorsque le facteur de conformité est inférieur à 0,25. Cependant, il peut exister des situations, par exemple des bâtiments rarement fréquentés par des personnes, pour lesquels de telles mesures seraient trop coûteuses, sans amélioration des coûts de sauvetage. La notion d'exigibilité a été introduite pour ces cas-là. Ce terme est utilisé dans le langage courant, mais également dans le domaine juridique. Il est généralement utilisé dans un contexte avec un aspect contraignant, mais qui doit rester dans les limites du raisonnable. Dans le cadre du cahier technique SIA 2018, les interventions visant à atteindre le facteur de conformité minimum de 0,25 sont jugées raisonnablement exigibles lorsque les coûts de sauvetage sont inférieurs à 100 millions de francs (env. 60 millions d'€) par vie sauvée.

Si les dépenses nécessaires pour atteindre un niveau de risque individuel acceptable ne sont pas raisonnablement exigibles, il faut s'efforcer, par des mesures organisationnelles à réduire le nombre de personnes exposées ou le temps d'exposition de celles-ci. Par exemple, on peut fixer un taux d'occupation qui ne doit pas être dépassé ou bien l'affectation du bâtiment peut être modifiée. Lorsqu'il n'existe pas d'interventions raisonnablement exigibles pour atteindre le facteur de conformité minimal, le risque doit être consciemment accepté.

Il faut relever que la proportionnalité et l'exigibilité ne doivent pas nécessairement être prises au pied de la lettre. Elles doivent également prendre en compte les valeurs relatives des montants à dépenser pour l'amélioration de la sécurité sismique par rapport aux coûts globaux d'une

transformation. Ainsi, même s'ils sont supérieurs aux limites de 10 ou 100 millions de francs par vie sauvée, les coûts peuvent être considérés comme proportionnels ou exigibles s'ils ne représentent que quelques pour cents des coûts globaux d'une transformation.

### 3.5. Appréciation de la sécurité parasismique

Afin de guider la tâche des ingénieurs, le cahier technique formalise l'appréciation de la sécurité sismique à l'aide de la figure 4 qui représente le facteur de conformité ( $\alpha_{eff}$ ) en fonction de la durée d'utilisation restante (n). Une gradation de l'opportunité d'intervention selon trois degrés décroissants y est graphiquement formulée.

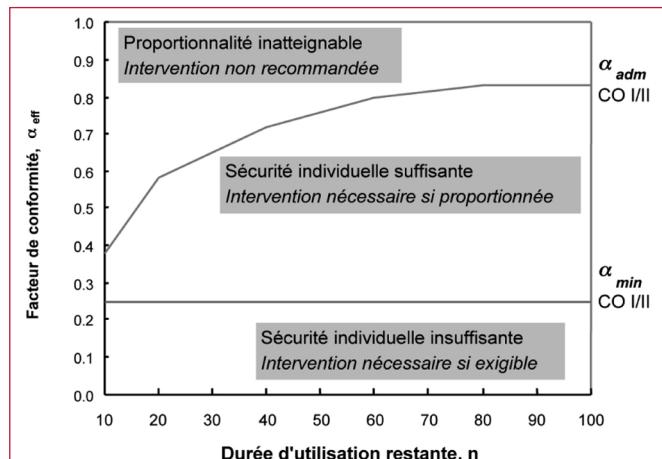


Figure 4: Recommandations d'intervention dans le cahier technique SIA 2018.

L'intervention est nécessaire si le facteur de conformité est inférieur à 0,25, quelle que soit la durée d'utilisation restante. En effet, dans ce cas, la sécurité individuelle n'est pas garantie (voir 3.1), mais il faut encore vérifier que les mesures d'intervention sont raisonnablement exigibles. Avec un facteur de conformité supérieur à 0,25, l'intervention est nécessaire si elle est proportionnée. La proportionnalité doit être vérifiée avec le critère des coûts de sauvetage. Les montants à considérer englobent le montant des travaux de la mesure de protection proprement dit, mais également le montant des travaux de remise en état (y compris le crépiissement des murs, les travaux de peinture, etc.), les honoraires et les coûts induits par l'utilisation réduite de l'ouvrage.

D'une manière générale, les coûts de sauvetage sont élevés si les mesures envisagées sont chères et imputables uniquement à la sécurité sismique, si le bénéfice en sécurité est faible, si les mesures ne profitent qu'à peu de personnes et si les coûts des mesures doivent être amortis dans un court laps de temps. En revanche, les coûts de sauvetage sont faibles si une partie des coûts des mesures peut être incluse dans le cadre d'un assainissement plus global, si le bâtiment est sujet à un fort taux d'occupation ou si les coûts peuvent être amortis sur une longue période (la durée d'utilisation restante est grande).

En bref, plus la durée d'utilisation restante est faible, moins les mesures d'intervention sont proportionnées car elles doivent être amorties sur une durée restreinte. Pour

cette raison, une limite supplémentaire a été introduite au-delà de laquelle aucune intervention n'est opportune. Il s'agit de la courbe supérieure de la figure 4 qui délimite le domaine dans lequel les mesures d'intervention ne sont forcément pas proportionnées. Par conséquent, au-dessus de cette limite il n'est pas nécessaire d'examiner la proportionnalité. Logiquement, avec cette courbe, le facteur de conformité diminue avec la durée d'utilisation restante. Pour finir, il faut relever que ce concept de contrôle avec des exigences minimales d'une part et les critères de proportionnalité et d'exigibilité d'autre part, peut être appliqué à d'autres actions accidentelles et rares comme les explosions, par exemple.

## 4. EXEMPLE D'APPLICATION : CYCLE D'ORIENTATION DU REPOSIEUX À MONTHEY (VALAIS)

Réalisé en 1971 sur la commune de Monthey en Valais, le bâtiment du cycle d'orientation (CO) est constitué d'une structure porteuse métallique et de façades en aluminium. Il reflète le genre de constructions de cette époque qui devait répondre à un important besoin en matière d'infrastructure scolaire en minimisant les délais d'exécution tout en restant économique.



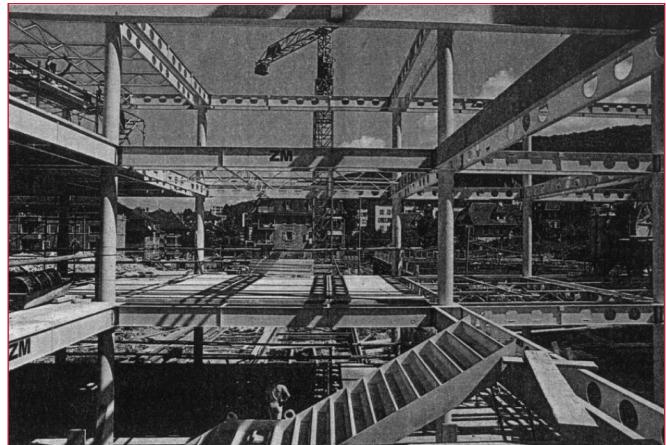
*Figure 5: Bâtiment du CO du Reposieux à Monthey en Valais.*

Compte tenu du nombre grandissant des effectifs des élèves, la commune de Monthey projette la construction d'un étage supplémentaire sur ce bâtiment existant. En outre, après plus de 35 ans d'utilisation, le bâtiment ne répondant plus aux exigences thermiques ainsi qu'aux nouvelles directives incendie, le maître d'ouvrage souhaite procéder à un assainissement général de celui-ci.

En application à la loi cantonale valaisanne relative à la protection sismique des bâtiments, une vérification de la sécurité structurale dans ce domaine doit être effectuée et, en cas d'insuffisance, un concept de renforcement satisfaisant les exigences des normes en vigueur doit être proposé.

### 4.1. Système structural

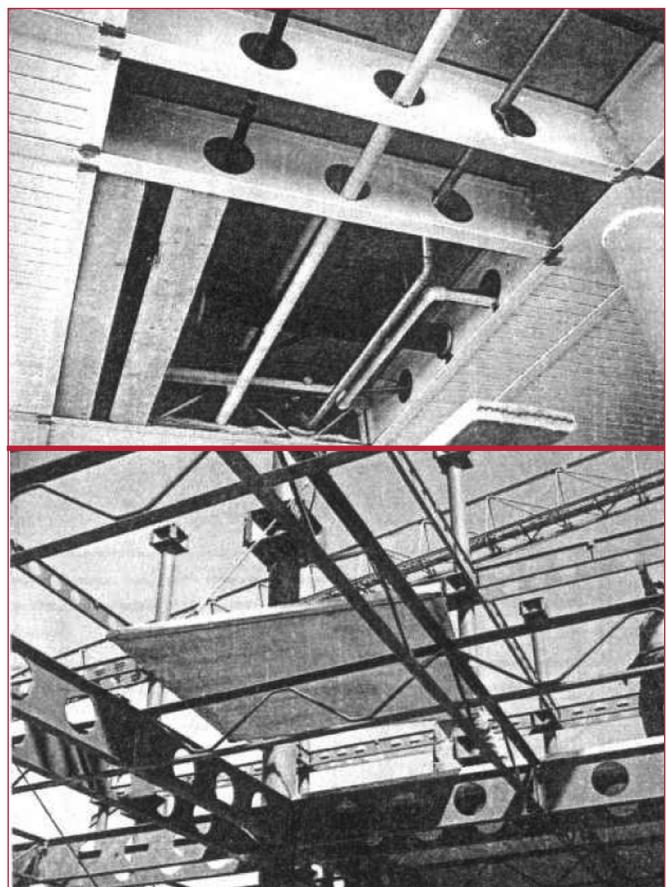
Le système structural se compose de portiques métalliques bidirectionnels auto stables espacés selon deux travées types de 7,8 m et 5,4 m (*cf. figure 6*). Le bâtiment possède



*Figure 6: Système structural (portiques bidirectionnels auto stables).*

une longueur de 39 m et une largeur de 34 m. La hauteur actuelle sur sous-sol est de 14 m environ.

La traverse du portique est formée de deux profilés composés soudés de 450 mm de hauteur espacés l'un de l'autre de 600 mm. Les montants des portiques sont des tubes ROR Ø 355,6 mm d'une épaisseur variable selon leur position. Les planchers se composent de dalles préfabriquées en béton (épaisseur 8 cm) posées sur des poutrelles métalliques secondaires espacées de 2,40 m.



*Figure 7: Vue des traverses principales du portique (à gauche) et pose d'une dalle préfabriquée (à droite)*

Le système statique est donc une grille spatiale de portiques à noeuds rigides. Ainsi, comme le système est auto stable, il n'existe aucun contreventement dans le bâtiment (*cf. figure 8*). Par ailleurs, les dalles préfabriquées étant simplement

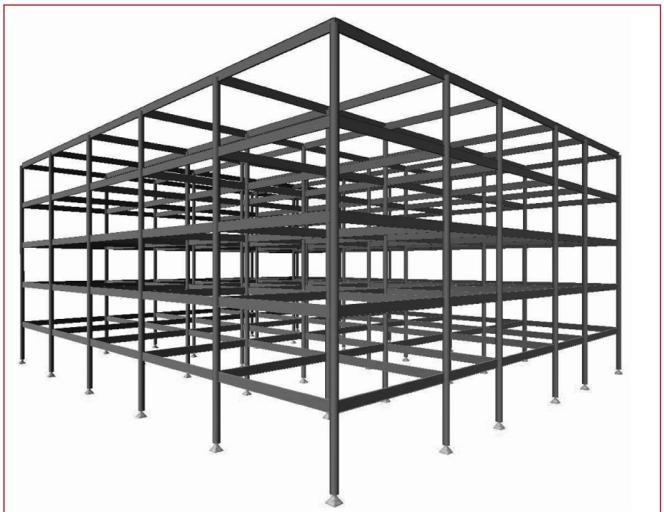


Figure 8: Modélisation de la structure porteuse en grille spatiale de portiques.

appuyées sur la structure métallique, aucun effet diaphragme dans le plan horizontal ne peut être considéré.

#### 4.3. Sollicitations sismiques

Au sujet des sollicitations sismiques à considérer, il faut noter que la région de Monthey a fait l'objet d'un micro zonage spectral ayant abouti à un spectre de réponse spécifique au site (voir figure 9). Pour cette région, le spectre de site (en trait continu) se situe nettement au-dessus de celui prescrit par la norme SIA 261 (en pointillé).

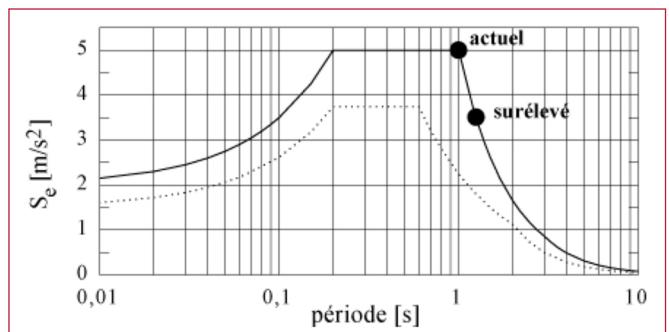


Figure 9: Spectre de réponse pour la région de Monthey (micro zonage) avec diminution de  $S_d$  due à l'assouplissement du bâtiment surélevé.

#### 4.4. Facteurs de conformité à l'état actuel et à l'état surélevé

A l'état actuel, le CO du Reposieux possède 4 masses d'étage totalisant 2900 t. Avec un étage supplémentaire, la masse totale se montera à plus de 3 770 t soit une augmentation de 30 %. Cependant, contrairement à la première intuition, cette augmentation de masse ne sanctionne pas, dans une même mesure, la vulnérabilité sismique du bâtiment.

En effet, l'analyse dynamique de la structure démontre que la surélévation n'induit que 1,5 % d'augmentation de forces horizontales sismiques par rapport à celles du bâtiment actuel. Cette faible variation des efforts sismiques du bâtiment surélevé s'explique par l'augmentation de la période fondamentale de la structure comportant un étage supplémentaire (augmentation de la masse). Cet assouplis-

sement a pour effet bénéfique de diminuer la valeur spectrale de dimensionnement (cf. figure 9).

En soumettant le bâtiment actuel aux sollicitations sismiques selon les normes en vigueur, celui-ci présente un déficit de résistance survenant en premier lieu au niveau de l'encastrement des traverses principales sur les montants du portique. A l'état actuel, le bâtiment présente dans les deux directions des valeurs de facteurs de conformité identiques :  $\alpha_{\text{eff}} = 0,17$ . Avec la surélévation, sans intervention parasismique, le bâtiment présenterait également une défaillance au niveau de l'encastrement des traverses et les valeurs des facteurs de conformité calculées s'élèveraient à :  $\alpha_{\text{eff}} = 0,16$ .

#### 4.5. Appréciation de la sécurité parasismique selon SIA 2018 (2004)

Les valeurs des facteurs de conformité après intervention obtenues dans les deux directions sont très faibles et se situent en dessous du seuil minimal de  $\alpha_{\min} = 0,25$ . Cela signifie qu'une intervention est nécessaire si elle est raisonnablement exigible.

#### 4.6. Concept de renforcement parasismique

Un concept de renforcement s'est rapidement dégagé. En effet, comme l'avant-projet prévoyait deux escaliers extérieurs métalliques pour permettre la mise en conformité de l'école face aux nouvelles directives incendie, le renforcement parasismique proposé consiste à enfermer ces escaliers à l'intérieur de deux noyaux en béton armé positionnés sur les façades Nord et Sud. Les seules incidences significatives de ces tours en béton armé comparativement à des cages d'escaliers usuelles sont l'épaisseur des murs (épaisseur 35 cm) ainsi que des fondations, posées sur micro-pieux, relativement massives. Les positions des deux tours stabilisatrices ne sont pas très favorables du point de vue dynamique, car elles conduisent, dans le sens transversal, à une excentricité de 9,30 m entre le centre de masse (M) et le centre de cisaillement (S) qui s'accompagnera donc d'effet de torsion important pris en compte

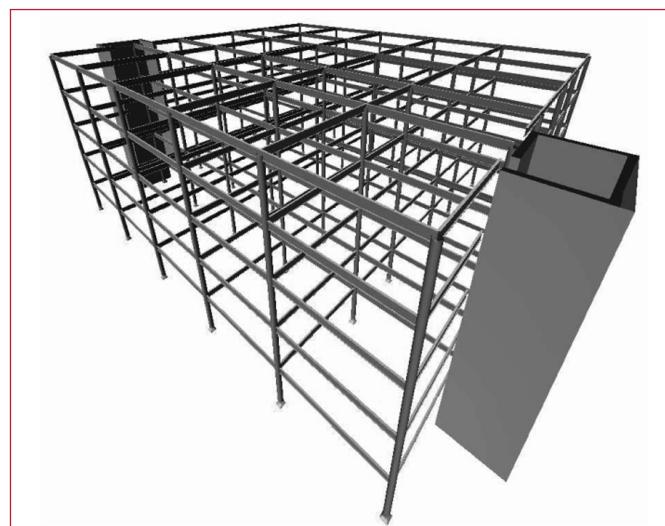


Figure 10: Modélisation du bâtiment surélevé avec les deux noyaux parasismiques en béton armé.

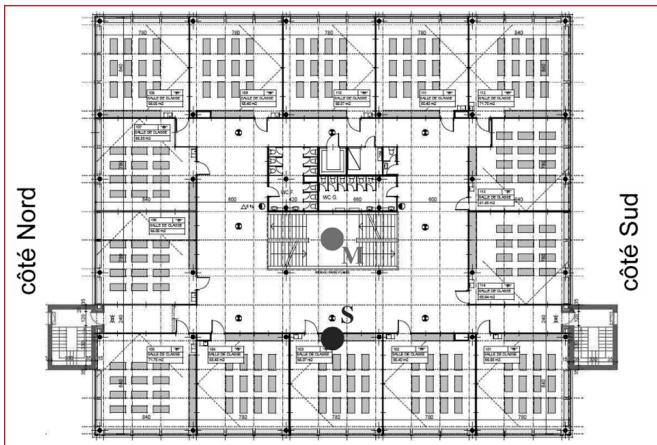


Figure 11: Vue en plan d'un étage type et position des deux tours en béton armé conduisant à une excentricité marquée entre le centre de masse (M) et le centre de cisaillement (S).

lors du dimensionnement (cf. figure 11). Cet emplacement excentré des noyaux est imposé par la tour Nord, car au niveau du sous-sol, celle-ci se positionnerait au milieu d'une salle d'auditoire en cas de positionnement centrée des deux noyaux.

#### 4.7. Exigibilité du renforcement parasismique

Pour le bâtiment du CO du Reposieux, en accord avec le maître d'ouvrage, la durée d'utilisation restante a été fixée à 60 ans. Compte tenu du caractère public du bâtiment, l'occupation est importante et atteint la valeur de PB = 76 personnes. Par conséquent, dans ce cas, avec la limite de 100 millions de francs (env. 60 millions d'€) par vie sauvée un investissement pouvant atteindre jusqu'à Fr. 2'650'000.- peut être considéré comme raisonnablement exigible pour renforcer le bâtiment.

Le montant total des travaux de gros-œuvre des deux noyaux parasismiques, incluant même la mise en œuvre des escaliers qui devrait être normalement imputée aux exigences de sécurité incendie, s'élève à Fr. 1'850'000.- (TTC). Par conséquent, l'exigibilité du renforcement parasismique fut rapidement confirmée par la commune de Monthey, puisque son coût est très nettement inférieur à la limite d'exigibilité.

## 4. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

En raison des coûts importants associés à l'application des récentes prescriptions sismiques dans le cas des constructions existantes, une optique différente de celle des ouvrages neufs doit être utilisée. La Suisse applique depuis peu une approche basée sur les notions de risque et formalisée dans une directive novatrice, le cahier technique SIA 2018. Le niveau de sécurité minimum exigé est défini en relation avec l'acceptation du risque individuel. Par comparaison avec d'autres risques, le risque individuel est considéré comme acceptable si le facteur de conformité est supérieur à 0,25. Le facteur de conformité quantifie dans quelle mesure, un ouvrage existant répond aux exigences posées pour un ouvrage neuf selon les dernières prescriptions sismiques. Une fois le critère d'acceptabilité du risque individuel rempli (facteur de conformité > 0,25), une appréciation basée sur le principe de proportionnalité doit être effectuée pour décider

Zone sismique	<b>3a</b> $a_{gd} = 1.3 \text{ m/s}^2$
Classe de sol	Micro zonage spectral région Monthey
Choix du comportement de la structure de renforcement parasismique	<b>q = 2</b> non ductile
Dimensions en plan du bâtiment renforcé	39 x 34,2 m.
Hauteur du bâtiment surélevé hors terre	17,90 m
Nombre d'étages	6
Valeur du bâtiment	Fr. 24'000'000.-
Montant des travaux de renforcement parasismique y compris honoraires	Fr. 1'850'000.-
Rapport renforcement / valeur	7,7 %

Tableau 1 : Le renforcement du CO de Monthey en chiffres.

de l'opportunité des interventions. Cette appréciation est effectuée sur la base des coûts de sauvetage parasismiques qui correspondent statistiquement aux montants dépensés pour sauver des vies humaines. Le cahier technique SIA 2018 fixe la limite de proportionnalité à 10 millions de francs (env. 6 millions €) par vie sauvée. Une autre notion a été également introduite. Il s'agit de l'exigibilité. Lorsque le facteur de conformité est inférieur à 0,25, les interventions visant à atteindre le minimum de 0,25 sont jugées raisonnablement exigibles lorsque les coûts de sauvetage sont inférieurs à 100 millions de francs (env. 60 millions €) par vie sauvée. L'exemple de l'assainissement du bâtiment scolaire de Monthey montre, d'une part, que des mesures de protection sismiques sont nécessaires car le facteur de conformité est inférieur au seuil de  $\alpha_{min} = 0,25$  et, d'autre part, que l'intervention prévue est raisonnable car son coût est très nettement inférieur à la limite d'exigibilité.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Grünthal G., Levret A., *L'Échelle Macroseismique Européenne (European Macroseismic Scale 1998, EMS-98)*, Luxembourg, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 19, Conseil de l'Europe, 2001.
- [2] Lestuzzi P., *Séismes et construction. Éléments pour non-spécialistes*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.
- [3] SIA 2018 (cahier technique), *Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2004.
- [4] SIA 261 (norme), *Actions sur les structures porteuses*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2003.
- [5] SIA D 0211 (documentation), *Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Introduction au cahier technique SIA 2018*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2005.
- [6] SIA D 0181 (documentation), *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Actions sur les structures porteuses. Introduction aux normes SIA 260 et 261*, Zurich, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, 2003.

# INTÉRÊT ENVIRONNEMENTAL DES RECHERCHES SUR LES COUVERTURES D'INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS

**Matthias STAUB, Jean-Pierre GOURC, Raphaël SIMONIN**

Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement – Université de Grenoble  
UMR CNRS 5564 – BP 53 – 38041 Grenoble Cedex 09

## 1. INTRODUCTION

**L**e stockage de surface de déchets non dangereux reste actuellement la principale méthode de traitement des déchets en France (FNADE, 2007). Les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) sont de vrais sites industriels bien loin des rustiques « décharges non contrôlées » aujourd’hui en voie de disparition. De nombreuses recherches ont été menées durant la dernière décennie, notamment au Lirigm-LTHE, sur l’optimisation du stockage et la minimisation de ses impacts environnementaux dans le contexte de la lutte contre le changement climatique et de forte pression sur les ressources énergétiques. Les émissions non contrôlées de biogaz liées au stockage sont le principal problème environnemental posé par les ISDND. Le stockage, méthode de traitement final et d’élimination souvent décriée, se révèle être en fait un procédé environnementalement très acceptable, si l’on applique des méthodes de confinement évoluées telles que mentionnées dans cet article. Les ISDND constituent un thème très actuel pour des recherches interdisciplinaires incluant en particulier des études géotechniques.

Le contrôle de ces émissions impose de s’intéresser aux dispositifs de confinement de couverture, qui permettent le captage du biogaz produit par les déchets, avant qu’il ne

soit collecté et acheminé vers les installations de traitement et/ou de valorisation énergétique. Cette étude propose donc un bilan consolidé des émissions de GES résultant du stockage de déchets. Elle poursuit un double objectif : identifier les potentialités de réduction des émissions de GES par l’établissement d’un bilan consolidé, et identifier la sensibilité des performances environnementales des installations en fonction du type de couverture et des options de traitement des déchets.

Les émissions générées par le stockage de déchets sont abordées, ainsi que les particularités des différents types de couvertures qui doivent permettre un captage efficace des gaz émis par la biodégradation. Différents scénarios de gestion seront ensuite testés et des éléments de comparaison par rapport à l’incinération des déchets non dangereux en unité d’incinération des ordures ménagères (UIOM) seront donnés à titre de repère. Une discussion sera enfin engagée sur les moyens efficaces à mettre en œuvre en terme de génie environnemental pour limiter les émissions diffuses de GES des ISDND. Les calculs d’émissions issues du traitement des déchets sont souvent entachés d’une certaine incertitude, et les résultats donnés ci-après sont à interpréter avec prudence. Cet article reprend certains éléments publiés dans le numéro 52 de Déchets, Sciences & Techniques, qui contient également le détail

des calculs réalisés (Staub et Gourc, 2008). Cette contribution s'intéresse principalement aux mesures à prendre en terme de stratégie de réduction des émissions et détaille davantage la conception des couvertures d'ISDND.

## 2. LE STOCKAGE DE DÉCHETS ET LES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES

### 2.1. Les barrières de couverture d'une ISDND, lieux de multiples transferts

La Figure 1 présente la structure schématique des barrières composites d'une ISDND. La couverture d'une ISDND est généralement composite (sol et géosynthétique). Sa principale fonction est de garantir une étanchéité au moins partielle vis-à-vis du biogaz, et ce malgré des tassements importants et différentiels des déchets sous-jacents (Camp, 2008). Pour les déchets non dangereux fermentescibles, il est spécifié dans l'Arrêté ministériel consolidé du 9 septembre 1997 qu'on appliquera une couverture semi-perméable permettant une humidification passive des déchets par les eaux de pluie, et donc une amélioration de leur biodégradation. La couche supérieure de la couverture pourrait éventuellement être oxydante (recherches en cours dans ce domaine) pour oxyder les flux diffus de méthane en dioxyde de carbone. Pour les déchets non biodégradables, une couverture imperméable est requise.

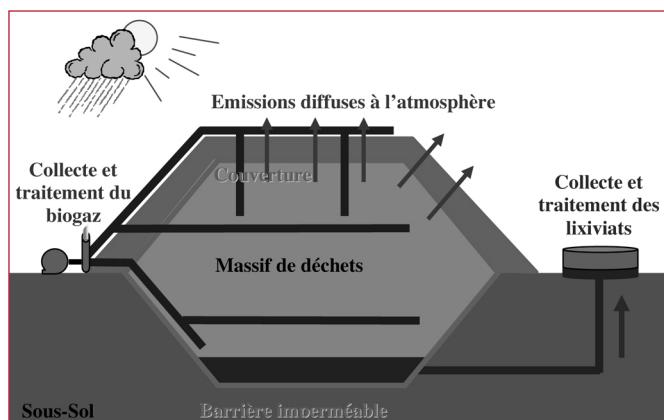


Figure 1: Schéma d'une installation de stockage de déchets avec traitement des effluents.

Cette couverture semi-perméable a le défaut d'occasionner des apports d'eau mal contrôlés en quantité et en qualité de distribution dans le massif de déchets. Une réflexion est en cours sur les barrières types pour les bioréacteurs, qui ne font pas l'objet actuellement d'une réglementation. L'une des variantes pourrait être :

- une composante étanche comprenant un sol fin et une géomembrane et/ou un géosynthétique bentonitique (GSB) ;
- en dessous de l'étanchéité, une couche drainante de collecte des biogaz intégrant un système d'injection des lixiviats (couche naturelle ou synthétique) ;
- au-dessus de l'étanchéité, une couche drainante des eaux de ruissellement recouverte par une couche de terre végétale.

Deux différents types de barrières, semi-perméable et de type « bioréacteur » seront considérées par la suite pour évaluer l'influence du type de couverture sur les émissions des ISDND.

### 2.2. Gaz générés par la biodégradation des déchets non dangereux

Le stockage de déchets non dangereux s'accompagne de la biodégradation de la matière organique présente dans les déchets. Après leur mise en place, l'oxygène piégé dans les vides poraux est rapidement consommé dans une première phase aérobiose qui peut durer quelques semaines, et produit majoritairement du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>. Toutefois, le procédé majeur mis en œuvre lors de la biodégradation est la phase stable de méthanolisation anaérobiose qui s'initie assez rapidement. Cette réaction qui conduit à la synthèse de méthane CH<sub>4</sub> et de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> nécessite une certaine teneur en eau minimale dans le déchet (Figure 2). Le biogaz d'ISDND est alors généralement composé à 60 % de méthane CH<sub>4</sub>, à 40 % de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, et de composés en traces (Arigala *et al.*, 1995 ; Reinhart et Townsend, 1997).

Dans le cadre de l'optimisation de la production de méthane, ce gaz pouvant être valorisé énergétiquement, de nombreux pays ont lancé des programmes de recherche sur le concept de bioréacteur (Olivier *et al.*, 2007), qui prévoit d'humidifier *in situ* les déchets afin d'en accélérer la stabilisation. Dans ce procédé, un apport contrôlé d'humidité en recirculant les lixiviats est prévu. Il en résulte une cinétique plus rapide de dégradation et un temps de suivi en post-exploitation plus court.

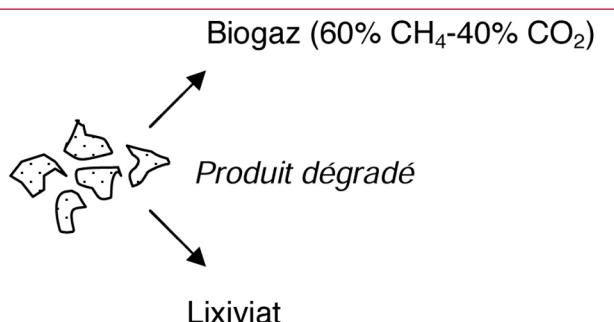


Figure 2: Principe de la biodégradation anaérobiose (d'après Gachet, 2005).

## 2.2. Emissions globales comparées de GES

Le méthane et le dioxyde de carbone sont deux gaz à effet de serre (GES), mais la prise de conscience de l'importance du méthane dans sa contribution à l'effet de serre est récente (Dessus *et al.*, 2008 ; Schmidt, 2008). Les effets de ce gaz à faible durée de vie doivent être considérés à un certain horizon temporel pour être comparés aux effets du dioxyde de carbone.

Pour comparer les GES entre eux, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC, IPCC en Anglais) a introduit la notion de pouvoir de réchauffement global (PRG). Par définition, le PRG du CO<sub>2</sub> est égal à 1 quel que soit le temps  $T$ . Pour tous les autres gaz, le PRG doit être défini pour un horizon temporel  $T$ . Ainsi, le PRG du CH<sub>4</sub> vaut 25 pour  $T$  égal à 100 ans. Cette valeur est retenue depuis le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2007), et diffère de la valeur de 21 considérée auparavant, qui n'intégrait pas les effets indirects liés au méthane (IPCC, 2001). On parle alors d'équivalent-CO<sub>2</sub> (eq-CO<sub>2</sub>) pour toute émission de GES ramenée à une émission d'un kilogramme de CO<sub>2</sub>. Ainsi, un kilogramme de méthane sera considéré comme équivalent à 25 kilogrammes d'équivalent-CO<sub>2</sub> (pour  $T$  égal à 100 ans). Le PRG du méthane est bien plus fort à court terme, puisqu'il vaut 101 à 5 ans, et 50 à 40 ans par exemple. Dans les simulations faites dans cet article, un PRG de 25 sera considéré, et les résultats pour un PRG de 50 seront également donnés à titre de comparaison.

Les émissions françaises de méthane atteignent les 3 millions de tonnes de méthane pour l'année 2004 (Jancovici, 2008). Sur ces émissions, près de 16 % proviennent des sites de stockage de déchets (Figure 3). Les chiffres pour les États-Unis sont de 22 millions de tonnes de méthane émises en 2003 (USEPA, 2006), dont un quart proviennent des ISDND. Le stockage des déchets est donc un domaine où une réduction significative des émissions aurait une efficacité réelle. La faisabilité technique de cette réduction semble de plus bien meilleure que dans d'autres secteurs, comme celle de l'agriculture.

Les estimations des émissions de méthane des ISDND au niveau mondial, qui sont difficiles à réaliser en raison de l'absence complète de données pour de nombreux pays, varient entre 2 % et 15 % des émissions totales de GES, avec des estimations récentes situées entre 4 % et 10 % (Spokas *et al.*, 2006 ; Zhang *et al.*, 2008). Elles sont donc très significatives parmi les émissions globales de méthane (Figure 4). On voit clairement l'intérêt d'une réduction des émissions de méthane dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre. Les réflexions qui en découlent sur les stratégies à adopter en vue de la réduction des émissions de GES ont été discutées par d'autres auteurs (Dessus *et al.*, 2008).

La comptabilité généralement adoptée en terme d'émissions est la suivante (IPCC, 2007) : le CO<sub>2</sub> biogénique émis (biodégradation aérobie et combustion du méthane collecté brûlé en torchère) n'est pas comptabilisé dans les émissions de CO<sub>2</sub>. Seul le CO<sub>2</sub> émis à partir du carbone d'origine fossile est comptabilisé. Les émissions de CH<sub>4</sub> sont quant à elles comptabilisées, bien qu'étant issues de la

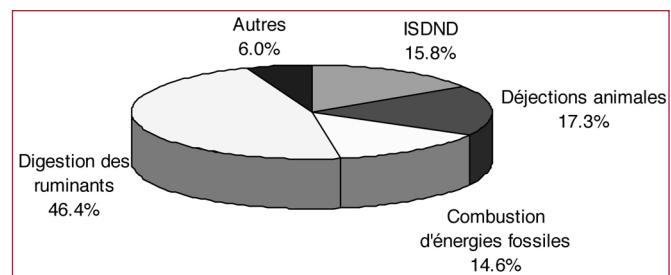


Figure 3: Émissions de méthane en France en 2004 (d'après Jancovici, 2008).

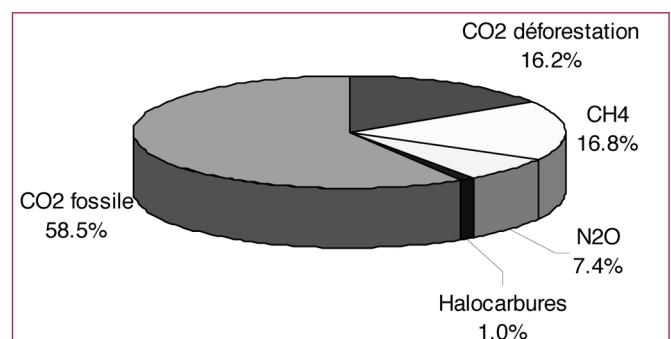


Figure 4: Émissions de GES dans le monde, comparées en équivalents-CO<sub>2</sub> (d'après Jancovici, 2008).

fraction biogénique du carbone, en raison du fort PRG de ce gaz. En ce qui nous concerne, nous considérerons de façon distincte les émissions de chaque fraction, tout en indiquant les émissions provenant de carbone d'origine biogénique sur les graphiques.

## 3. ÉMISSIONS EN FONCTION DU TYPE DE DÉCHET ET DE SON TRAITEMENT

### 3.1. Devenir des fractions du déchet en fonction du traitement

Un déchet « non dangereux » type est considéré afin d'obtenir un bilan d'émissions quantitatif. Il correspond à un mélange pour moitié d'ordures ménagères (OM) et de déchets industriels banals (DIB). La composition type de ce déchet est donnée sur la Figure 5a. En fonction de la biodégradabilité de chaque fraction du déchet, on peut détailler le devenir de chaque fraction au cours du stockage (Figure 5b) :

- les déchets très biodégradables, dits « putrescibles », seront dégradés lors de la courte phase aérobie qui suit la mise en place des déchets ;
- les déchets moyennement et plus lentement biodégradables sont principalement dégradés durant la phase anaérobiose ;
- les déchets inertes et non organiques n'occasionnent pas de production de biogaz.

Dans ce qui suit, on suppose une biodégradation complète du carbone biogénique compris dans les papiers-cartons, et une dégradation de la moitié du carbone biogénique des fractions

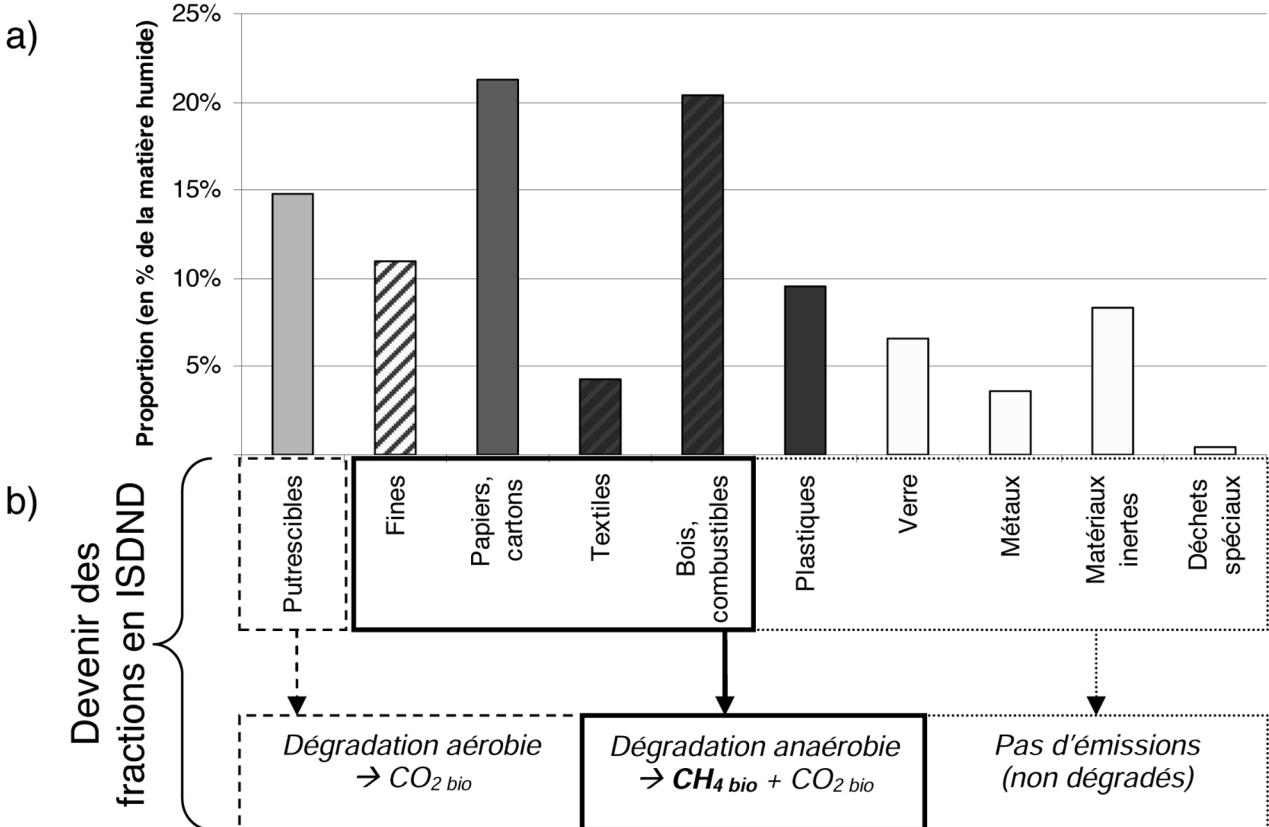


Figure 5 : Composition du déchet type (a) et devenir des fractions en ISDND (b) et en UIOM (c).

fines, textiles et bois/combustibles (Figure 5a). Le carbone biogénique contenu dans les putrescibles sera supposé être dégradé durant la phase aérobie et il n'est pas comptabilisé.

La même étude peut être réalisée pour le devenir des déchets lors de leur incinération en UIOM (Figure 5c) :

- les déchets organiques d'origine biogénique occasionnent l'émission de  $CO_2$  d'origine biogénique, non comptabilisé dans les émissions selon la comptabilité du GIEC (voir section 2.2.), mais pris en compte séparément ici ;
- les déchets organiques d'origine fossile (essentiellement les plastiques) occasionnent l'émission de  $CO_2$ , comptabilisé selon la méthode du GIEC ;
- les déchets inertes n'occasionnent que très peu ou pas d'émissions de GES.

### 3.2. Phases d'exploitation d'une ISDND et captage des biogaz

Le captage et le traitement du biogaz d'ISDND ont un impact positif très fort sur l'environnement. Les gaz captés sont soit brûlés à la torchère, soit valorisés énergétiquement pour produire de la chaleur ou de l'électricité, ou les deux simultanément (cogénération). Les contraintes technico-économiques ne permettent toutefois pas de maintenir un équipement de valorisation pour une durée trop longue sur un site (INERIS, 2005). Cinq phases sont à considérer durant la vie d'une ISDND (IWWG, 2009) :

- phase 1* : Phase d'opération (alvéole ouverte et mise en place des déchets), durant une période d'environ 3 à 6 mois ;

- *phase 2* : Phase de post-opération où une couverture temporaire est mise en place, pendant environ 2 ans : pour éviter l'endommagement de la couverture définitive du stockage en raison de forts tassements en phase 2, une couverture géosynthétique temporaire est généralement utilisée (Figure 6) ;
- *phase 3a* : Phase primaire de post-exploitation où une couverture finale est en place, durant laquelle est réalisé un traitement des émissions et des mesures systématiques ;
- *phase 3b* : Phase secondaire de post-exploitation jusqu'à l'obtention de critères environnementaux éco-compatibles (stabilisation bio-mécanique) jusqu'à environ 30 ans, durant laquelle un traitement au moins partiel des émissions est encore réalisé ;
- *phase 4* : Phase de veille où un suivi ponctuel du site éco-compatible non contraignant et une réutilisation potentielle du site peuvent être envisagés (aire de loisirs...).

Ces phases sont présentées sur les Figures 6 et 7 en fonction des tassements dont la vitesse tend à décroître en fonction du temps, et de la production de biogaz, qui passe par un maximum au bout de quelques années. Les chiffres sont donnés à titre purement indicatif.

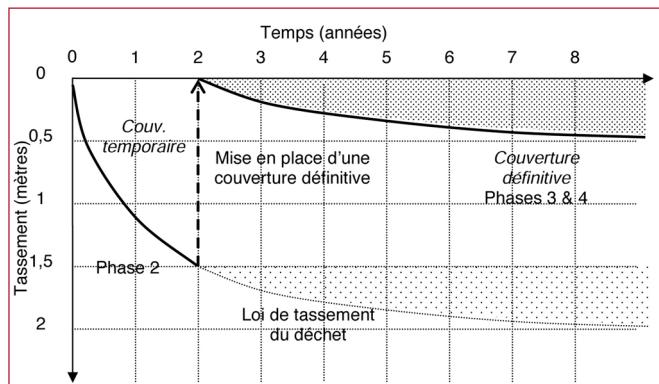


Figure 6 : Tassement sommital du déchet, de la couverture temporaire et de la couverture définitive.

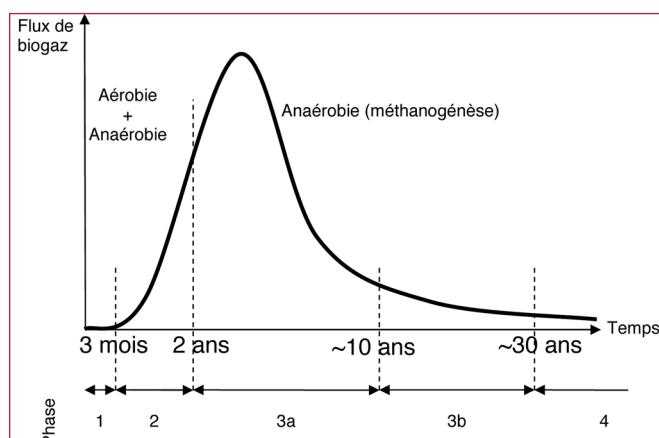


Figure 7 : Production de gaz et phases de vie d'une ISDND conventionnelle.

Durant la phase (1), la biodégradation concerne en principe surtout le déchet putrescible qui n'est pas comptabilisé dans notre approche. Par souci de simplification, la cou-

verture temporaire est supposée offrir la même imperméabilité aux émissions que la couverture définitive, et l'efficacité de captage de la couverture définitive sera supposée constante au cours du temps. Selon les sites, un choix pour une couverture semi-perméable ou pour une couverture imperméable est fait au cas par cas. A ces deux scénarios et aux taux de captage correspondants sera rajouté un troisième, avec un taux de captage de 100 %, pour voir quelle performance environnementale maximale pourrait être obtenue par une ISDND :

- scénario de captage 100 % : Etanchéité parfaite ;
- scénario de captage 90 % : Barrière imperméable (10 % d'émissions furtives) ;
- scénario de captage 50 % : Barrière semi-perméable (50 % d'émissions furtives).

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Résultats des calculs d'émissions selon les scénarios envisagés

La Figure 8 donne les résultats des calculs d'émissions pour les scénarios envisagés. Les résultats avec un PRG du méthane de 50 et les émissions pour une même tonne de déchets incinéré sont également indiqués à titre indicatif. Les détails de ces calculs ainsi que les calculs prenant en compte les émissions évitées du fait de la valorisation sont donnés dans une autre publication (Staub et Gourc, 2008). L'Ademe donne pour valeurs-guides d'émissions furtives de CH<sub>4</sub> biogénique de 100 à 1 000 kg d'équivalents-CO<sub>2</sub> pour le stockage (le méthane collecté étant brûlé en torchère ou valorisé) et de 250 à 400 kg d'équivalents-CO<sub>2</sub> issus de la combustion du carbone fossile pour l'incinération (Ademe, 2006). Ces chiffres sont donnés en considérant la comptabilité du GIEC, présentée au paragraphe 2.2, à savoir que les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine biogénique ne sont pas considérées. Ces résultats sont à comparer aux valeurs trouvées ici, à savoir 139 kg d'équivalents-CO<sub>2</sub> pour un site performant avec un taux de captage de 90% et 695 kg d'équivalents-CO<sub>2</sub> pour un site qui ne capterait que la moitié du biogaz. L'incinération n'occasionnerait que l'émission de 175 kg d'équivalents-CO<sub>2</sub> provenant du carbone fossile. Les résultats trouvés ici sont donc cohérents avec les valeurs guides

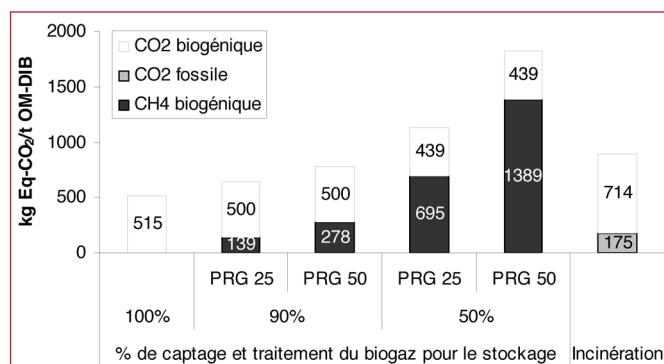


Figure 8 : Résultats des calculs d'émissions furtives selon les différents scénarios.

de l'Ademe, les légères différences venant notamment de l'hypothèse sur le déchet type, ici un mélange d'ordures ménagères et de déchets industriels banals.

Cette étude permet de dégager l'importance cruciale d'avoir un bon taux de captage, et permet aussi de voir que, selon la comptabilité du GIEC, un incinérateur occasionne une quantité d'émissions brutes du même ordre qu'une ISDND « bien gérée » équipée de barrières imperméables (taux de captage de 90 %). Ces résultats sont à nuancer si l'on prend en compte les émissions évitées du fait de la valorisation énergétique (Staub et Gourc, 2008).

#### 4.2. Différents concepts de couverture d'ISDND

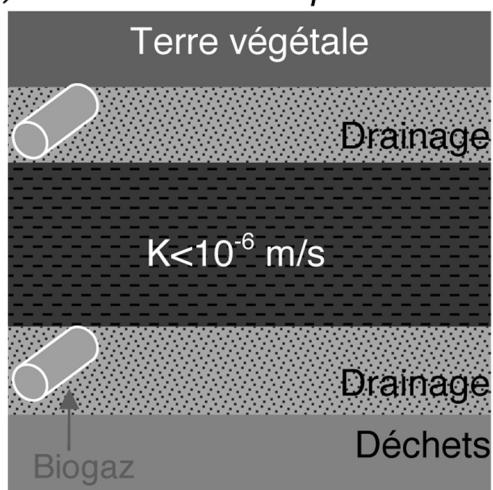
Les couvertures semi-perméables ont été préconisées pour les déchets biodégradables (Figure 9a), car elles permettent, par l'entrée d'une « certaine » quantité d'eau susceptible de traverser la barrière, de ne pas assécher totalement le massif de déchets, et de permettre ainsi une lente mais complète biodégradation. Il s'agit d'une imbibition passive non contrôlée d'eau météorique. Les couvertures imperméables, quant à elles, s'appliqueraient au principe d'un bioréacteur contrôlé (Figure 9b). En effet, elles ne permettent pas l'humidification non contrôlée par l'eau de pluie,

et il y a risque d'assèchement du massif (« tombe sèche »). Le bioréacteur prévoit toutefois une injection active de lixiviats afin d'accélérer la biodégradation tout en traitant les effluents liquides de l'installation. Notons que les couvertures de type « bioréacteur » sont plus complexes et plus coûteuses que les couvertures semi-perméables. Mais outre le meilleur contrôle de l'humidification du massif, ces couvertures ont des taux de captage des biogaz fortement améliorés, au lieu d'une valeur proche de 50 % pour les couvertures semi-perméables, on obtient 90 % pour les couvertures imperméables (taux moyens déterminés d'après différentes sources, notamment Couturier, 2002 ; Ademe, 2006 ; Spokas *et al.*, 2006). Ces taux correspondent au scénarios présentés plus haut.

#### 4.3. Discussion : quelles perspectives pour la « couverture de demain » ?

D'après des données obtenues auprès de différents exploitants en France, le taux de captage moyen serait de l'ordre de 90 % à 95 % pour les grands sites français équipés de couvertures imperméables. En revanche, ce taux ne serait que de 50 % à 60 % pour les sites de capacité réduite, où un suivi moins poussé est réalisé, et où l'investissement à réaliser pour effectuer un meilleur captage n'est pas ren-

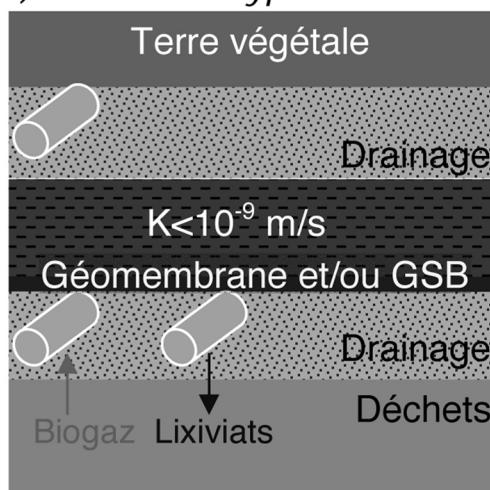
a) Couverture semi-perméable



**Efficacité de la Barrière:**  
50% biogaz capté

+ Scénario « cible » 100% biogaz capté

b) Couverture type bioréacteur



**Efficacité de la Barrière:**  
90% biogaz capté

Figure 9 : Couvertures semi-perméable (a) et imperméable (b), et scénarios résultants en terme de taux de captage.

table. Certains sites, qui offrent un excellent taux de captage, voient le fonctionnement de leur dispositif de valorisation-brûlage perturbé par une trop forte teneur en oxygène et azote. Quoi qu'il en soit, un pas a été franchi, en raison des exigences environnementales croissantes, vers des installations à très haut niveau de qualité environnementale. Ainsi, la valorisation énergétique du biogaz permet de récupérer jusqu'à plus de 750 MJ par tonne de déchet stocké (Staub et Gourc, 2008).

Les défis soulevés par les bioréacteurs nécessitent toutefois des recherches pour définir des géosystèmes capables à la fois de distribuer le lixiviat pour une imbibition homogène, et de collecter le volume total de biogaz (Stoltz, 2009).

La question des émissions diffuses résiduelles (phases (3b) et (4)) est également très importante. En effet, on peut se poser la question de savoir si les taux de captage supposés sont raisonnables sur le long terme, en raison de tassements différenciels et du vieillissement des matériaux. De plus, les durées maximales reportées de valorisation énergétique et/ou d'installation de brûlage sont de l'ordre de 30 ans. Au-delà des seuils limites de rentabilité ou de faisabilité technique, on note toutefois encore un potentiel de biodégradation non négligeable (Ritzkowski et Stegmann, 2007).

Si la solution de l'aération in situ est a priori impossible en France en raison de la législation, dans le cas d'émissions diffuses résiduelles de faible flux, le concept de barrière oxydante est envisageable : l'oxydation du méthane peut se faire par une couverture de sol aérée, si possible riche en matière organique (compost) et bénéficiant d'une humidité optimale. Ces couvertures permettraient d'atteindre des rendements de 1.5 à 150 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/h.ha dégradés par oxydation (Zeiss, 2006).

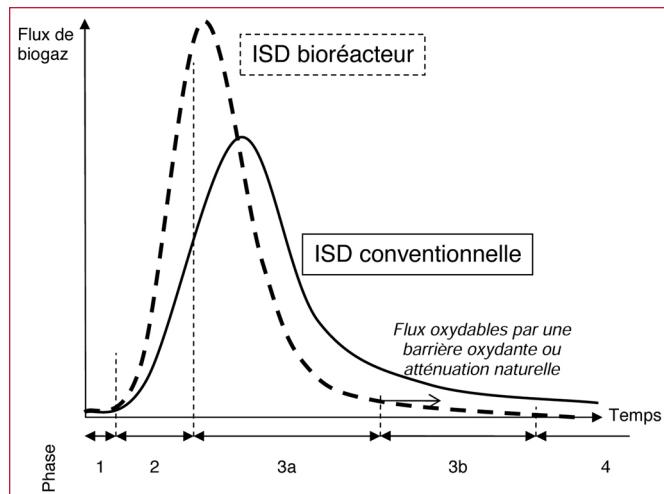


Figure 10 : Flux de biogaz en fonction des phases de vie de l'ISDND.

Notons que la technique du bioréacteur permet de réduire a minima les reliquats de matière potentiellement biodégradable sur une durée inférieure à 30 ans et d'envisager ainsi qu'une barrière oxydante soit suffisante pour atténuer les reliquats de biogaz générés en phases (3b) et (4), ce qui n'est pas certain dans le cas d'une alvéole conventionnelle (Figure 10). Il peut paraître cependant paradoxal d'associer à une membrane « imperméable » (pour un bioréacteur) un dispositif de couverture oxydante spatialisée sur l'intégra-

lité du domaine. On peut alors préconiser par exemple un perçage de la géomembrane à l'issue de l'exploitation du biogaz, ou préférer une solution avec un biofiltre déporté qui serait connecté au réseau de biogaz.

#### 4.4. Les recherches sur le comportement hydromécanique des couvertures d'ISDND et des déchets sous-jacents

Le comportement de la couverture dépend du tassement sommital du déchet, tassement pouvant atteindre plusieurs mètres, et être différentiel. Garder l'intégrité de la fonction de couverture malgré des déformations importantes suppose d'améliorer la flexibilité de ces couvertures. Ainsi, des recherches ont été menées ces dernières années au LTHE également dans ce domaine (Camp, 2008). L'approche géo mécanique du déchet est aussi incontournable. Le comportement hydromécanique de déchets à composante biodégradable a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. Les déchets sont des matériaux hétérogènes poreux très compressibles. L'étude de la cinétique de tassement est très importante pour l'exploitation d'un site de stockage et l'estimation sa stabilité mécanique (Olivier, 2003). Cette cinétique dépend de la biodégradation avec perte de masse solide (Olivier *et al.*, 2007 ; Gourc *et al.*, 2009). Le concept de bioréacteur se base sur une humidification optimale du déchet et suppose une circulation des biogaz vers les puits de collecte et la couverture d'une part (flux ascendants), des lixiviats vers l'ensemble de la matrice du déchet à humidifier d'autre part (flux descendants). Les lois de perméabilité aux fluides en zone non saturée sont donc à étudier (Stoltz, 2009). Actuellement, les ISDND font l'objet de programmes de recherche importants (ANR bioréacteur par exemple – ANR, 2009), qui ont des répercussions sur l'évolution de leur conception.

### 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les spécifications actuelles relatives aux barrières de couverture d'ISDND ne sont pas suffisamment précises. L'interprétation de la législation étant large, de nombreux sites, notamment de petite taille, ont des dispositifs relativement rustiques de couverture.

Par ailleurs, le concept de barrière « semi-perméable » officiellement préconisé pour les déchets non dangereux ne permet pas un captage correct des biogaz, et induit une humidification quantitativement aléatoire du déchet. Le concept de barrière « imperméable » doit quant à lui être associé à un système d'injection pour ne pas bloquer la biodégradation et permettre les tassements de la masse de déchets. Il paraît indispensable de ne pas dissocier de la discussion sur les couvertures celle du devenir des émissions résiduelles en fin d'exploitation. Donc les barrières de couverture des installations de stockage de déchets doivent encore faire l'objet de recherches, compte tenu de leur rôle environnemental majeur et des multiples fonctions qu'elles doivent remplir, variables dans le temps, et ce malgré des sollicitations hydromécaniques difficiles à soutenir sur plusieurs décennies.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADEME (2006). Evaluation Environnementale des plans d'élimination des déchets. Guide de l'ADEME, coll. « Connaître pour agir », 74 p.
- [2] ANR (2009). ANR PRECODD « Bioréacteur » 2007-2009, Programme de recherche associant Suez Environnement, Veolia, le BRGM, le Cemagref, le LGCIE-Insa Lyon et le LTHE-Université de Grenoble. Site web, mise à jour de mars 2009, URL : <http://www.anr-bioreacteur.fr>
- [3] Arigala S. G., Tsotsis T. T., Webster I. A., Yortsos Y. C., Kattapuram J. (1995). Gas Generation, Transport and Extraction in Landfills. *Journal of Environmental Engineering* 121, 33-44.
- [4] Camp S. (2008). Comportement sous flexion d'une argile : application à la couverture d'une ISD TFA. Thèse de doctorat, LTHE Université de Grenoble, 350 p.
- [5] Couturier C. (2002). Améliorer le bilan effet de serre des installations de stockage des déchets. Actes du colloque « Déchets, énergie et changement climatique », AMORCE-ACRR-Energies Cités-Ville de Paris, Paris, France, Décembre 2002.
- [6] Dessus B., Laponche B., Le Treut H. (2008). Effet de serre, n'oublions pas le méthane. *La Recherche* 417, mars 2008, 46-49.
- [7] FNADE (2007). Le secteur des déchets ménagers et son rôle dans la lutte contre le changement climatique. Etude Bio Intelligence Service (deuxième édition), 16 p.
- [8] Gachet C. (2005). Evolution bio-physico-chimique des déchets enfouis au CSDU du SYDOM du Jura sous l'effet de la recirculation des lixiviats. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 271 p.
- [9] Gourc J.-P., Staub M., Conte M., Benbelkacem H., Bayard R., Redon E. (2009). A Biomechanical Model to predict long-term Secondary Settlements of MSW – Comparison with trials run on large-scale Bioreactor Cells. *Proceedings of Sardinia 2009, 12<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, October 5<sup>th</sup>-9<sup>th</sup>, S. Margherita di Pula, Italy.
- [10] INERIS (2005). Evaluation des risques liés aux émissions gazeuses des décharges : propositions de seuils de captage. Rapport de l'INERIS, Décembre 2005, 120p.
- [11] IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.
- [12] IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [13] IWWG (2009). Exchanges at the workshop of the Sustainable Landfilling Task Group, April 29<sup>th</sup>, Toulouse, France.
- [14] Jancovici J.-M. (2007). Comment évoluent actuellement les émissions de gaz à effet de serre ? Site web, mise à jour de septembre 2007, URL : <http://www.manicore.com/documentation/serre/GES.html>
- [15] Olivier F. (2003). Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat, UJF-Lirigm, 334 p.
- [16] Olivier F., Marcoux M. A., Gourc J.-P. and Machado S. L. (2007). Hydro-mechanical behaviour of a mechanically pretreated MSW confined two years in a large-scale laboratory cell. *Proceedings of Sardinia 2007, 11<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, October 1<sup>st</sup>-5<sup>th</sup>, S. Margherita di Pula, Italy.
- [17] Reinhart, D. R., Townsend, T. G. (1997). Landfill bioreactor design and operation. Lewis, Boca Raton, Florida.
- [18] Ritzkowski M., Stegmann R. (2007). Controlling greenhouse gas emissions through landfill in situ aeration. *International Journal of Greenhouse Gas Control I* 281-288.
- [19] Schmidt G. (2008). La fulgurante ascension du méthane. *Les Dossiers de la Recherche* 31, mai 2008, 52-59.
- [20] Spokas K., Bogner J., Chanton J. P., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-Le Golvan Y., Hébé I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management* 26, 516-525.
- [21] Staub M., Gourc J.-P. (2008). Possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au stockage de déchets. *Déchets, Sciences & Techniques* 52, 8-16.
- [22] Stoltz G. (2009). Transferts en milieu poreux biodégradable, non saturé, déformable et à double porosité. Application aux ISDND. Thèse de Doctorat, LTHE Université de Grenoble, 287 p.
- [23] USEPA (2006). Methane: Sources and Emissions. Site web, mise à jour d'octobre 2006, URL : <http://www.epa.gov/methane/sources.html>
- [24] Zeiss C. A. (2006). Accelerated methane oxidation cover system to reduce greenhouse gas emissions from MSW landfills in cold, semi-arid regions. *Water, Air and Soil Pollution* 176, 285-306.
- [25] Zhang H., He P., Shao L. (2008). Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. *Atmospheric Environment* 42, 5579-5588.

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 129-234.

# annonces de colloques

## ConserBati2010 Conservation du Patrimoine Bâti Colloque national



### Infos Pratiques

Le colloque ConserBati2010 se tiendra sur le site de Polytech'Orléans les jeudi 1er avril et vendredi 2 avril 2010. Pour plus d'informations sur les modalités pratiques de notre séjour : comment se rendre à Orléans, hébergement, tout sur la ville d'Orléans, etc., consultez le site web du colloque.

#### Pré-enregistrement

Pour des raisons d'organisation, un pré-enregistrement (sans obligation), permettant de prévoir le nombre de participants, est déjà possible sur le site web du colloque. De plus amples informations sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.univ-orleans.fr/conserbati2010>

## Comité d'organisation (Polytech'Orléans)

Président : M. Al-Mukhtar  
Secrétaire : N. Belayachi  
Trésorier : X. Brunetraud  
K. Beck : site web

### > Appel à communications

### > Inscription

1 et 2 avril 2010 à Orléans  
Polytech'Orléans



### Contact

M. Al-Mukhtar  
Tél : 02 38 49 92 ou 02 38 25 78 81 / Fax : 02 38 41 70 63  
Naima Belayachi  
Tél : 02 38 49 25 02 / Fax : 02 38 41 70 63  
e-mail : naima.belayachi@univ-orleans.fr

<http://www.univ-orleans.fr/conserbati2010>

### Comité Scientifique

Présidente : G. Ariguie (LMDG)  
K. Ait-Mohktar (LEPTIAB)  
M. Al Heib (INERIS)  
J.-P. Baleyssac (LMDC)  
D. Breyssse (DGAG)  
A. Chabas (LSA)  
L. Divet (LPC)  
F. Ghomari (Univ. Tlemcen)  
B. Godart (LPC)  
X. Guillot (ATHL)  
P. Guiraud (CNRS/TON)  
C. Guiorgadze  
A. Khelidj (GEM)  
J.-P. Lefebvre

G. Martinet (LERM)  
F. Masroui (LAEGO)  
J.-D. Mertz (LRMH)  
J. Mougin (Baudin-Chateauneuf)  
A. Pantet (LOMC - Université du Havre)

V. Perthusot (INL)

B. Plu (SNCF)

P. Thevard (Epic Chambord)

J.-M. Torrenti (EFB)

J.-P. Touret

T. Verdel (LAEGO)

D. Vernin (APRR)

S. Yotte (DGAG)



## ConserBati2010

Ce colloque scientifique, patrinié par l'AUGC et organisé à Orléans, vise à rassembler les acteurs concernés par la conservation du patrimoine bâti : chercheurs, ingénieurs, industriels, maitres d'ouvrages, afin d'échanger leurs connaissances et expériences. L'exigence économique, sociétale et culturelle de préserver notre patrimoine bâti encourage les acteurs du génie civil à se préoccuper de la sauvegarde des édifices historiques et des ouvrages d'art, ce qui nécessite d'étudier la durabilité des matériaux du génie civil (bétons, aciers, bois, pierres...) face aux environnements urbains aussi bien que ruraux.

Une protection optimale du patrimoine passe par la connaissance des mécanismes de dégradation, le diagnostic de l'état d'altération, le suivi de l'ouvrage, l'estimation de l'effet des conditions environnementales sur sa pérennité et la planification de solutions de restauration adaptées. Ainsi, le colloque traite de l'ensemble des problématiques liées à la conservation, restauration du patrimoine relevant du génie civil : diagnostic, expertise et prescription, recherches, normalisation, traitement et suivi.

La conservation du patrimoine s'impose comme une discipline aux méthodes et techniques éprouvées et ce colloque ambitionne de faire l'état de l'art concernant les études et les recherches liées aux problématiques de la conservation et de l'altération des matériaux du patrimoine.

## Appels à Communication

Les auteurs sont invités à soumettre leurs résumés en français (2 pages maximum) au plus tard le 20 novembre 2009 soit sur le site du colloque soit par e-mail ou courrier au Secrétariat du colloque, en précisant le thème (1 à 8, voir ci-dessous) dans lequel s'inscrit la communication.

## Pour vous inscrire, 2 options :

- Inscrivez-vous à partir du site web : <http://www.univ-orleans.fr/conserbati2010>
- Ou remplissez le formulaire ci-joint ▶



# ConserBati2010

## Conservation du Patrimoine Bâti

### Colloque national

1 et 2 avril 2010 à Orléans

## Formulaire d'inscription

- 1 Suivi des ouvrages, diagnostic, contrôle non-destructif et maintenance
- 2 Etude de cas
- 3 Caractérisation multi-échelle en laboratoire de l'état d'altération des ouvrages
- 4 Mécanismes de dégradation
- 5 Simulation expérimentale du vieillissement
- 6 Modélisation et simulation numérique de l'évolution des ouvrages à long terme
- 7 Moyens et techniques de conservation préventive
- 8 Réglementation et aspect normatif

Nom : \_\_\_\_\_  
Prénom : \_\_\_\_\_  
Organisme : \_\_\_\_\_  
Adresse : \_\_\_\_\_

## Calendrier

### Vendredi 20 novembre 2009

Date limite de soumission des résumés (2 pages maximum) des communications.

### Lundi 30 novembre 2009

Notification aux auteurs de l'acceptation de leur résumé.

### Vendredi 15 janvier 2010

Date limite de réception des textes des communications.

### Vendredi 5 mars 2010

Date limite de retour des versions corrigées et définitives des textes des communications, accompagnées du support des présentations orales (ppt ou pdf).

Vous pouvez soumettre vos résumés en français par envoi (e-mail ou courrier) au Secrétariat du colloque.

- Inscription avant 15 février 2010 après
- Standard 250 € 300 €  
 Doctorant 200 € 250 €  
 Membre AUGC 200 € 250 €

A retourner au Secrétariat du colloque :

Naima Belayachi, Polytech Orléans  
8 rue Léonard de Vinci  
45072 Orléans Cedex2

## COLLOQUES

### ● Génie civil et habitat du futur.

Inclut le Colloque Annuel du GFP.

Matiériaux innovants, polymères, bétons, bois, matériaux argileux, durabilité

### ● Stockage et conversion de l'énergie.

Hydrogène, piles à combustibles, batteries, supercondensateurs, photovoltaïque,

matériaux thermoélectriques

### ● Énergie nucléaire.

Réacteurs de génération IV, matériaux sous irradiation, fusion nucléaire, durabilité, matériaux de gainage, céramiques

### ● Transports.

Allégement, titane, procédés aéronautiques, mise en œuvre, composites, assemblages

### ● Procédés d'élaboration.

Spark Plasma Sintering/frittage flash, purification, affinage, poudres, matériaux frits, nouvelles méthodes de frittage

### ● Surfaces et interfaces.

Surfaces, traitements mécaniques, froissement/lubrification, protections contre la corrosion, couches minces, objets du patrimoine

### ● Propriétés mécaniques et endommagement.

Inclut les Journées Techniques de la COFREND.

Solicitations dynamiques, durabilité, milieux aéroïsés, matériaux hétérogènes, indentations à différentes échelles, contrôles non destructifs

### ● Transfert, conservation et gestion de la chaleur.

Réfractaire, thermodynamique haute température, revêtements, isolation, stockage, composites à matrice carbone ou céramiques

### ● Santé.

Biomatériaux, biocompatibilité, microscopie/ microstructure, matériaux vecteurs de thérapies, biofonctionnalisation, prothèses

### ● Matériaux fonctionnels.

Isolant, piezoelectricité, ferroélectricité, magnétisme, corrélation électronique, mémoires non volatiles

### ● Poreux et de grande surface spécifique.

Membranes, filtration, catalyse, séquestration des gaz, porosité, revêtements, recyclage, écomatériaux, valorisation, écobilan

### ● Nanochimie, nanomatériaux, nanostructure.

Sanité, environnement, nanotechnologies, nanohybrides, nocivité, nanosystèmes

### ● Le soudage au service des énergies du futur.

8<sup>e</sup> Journées Nationales du Soudage.

Soudage, assemblages, procédés, métallurgie, inspections, matériaux à hautes performances

## EXPOSITION

Riche de l'expérience et du succès des précédentes éditions de 2002 et 2006, la Conférence "MATERIAUX" revient en 2010 et se tiendra à la Cité Internationale des Congrès de **Nantes** du **18 au 22 octobre 2010**.

**Plus de 1600 participants**, spécialistes des matériaux, issus de l'université, de la recherche et de l'industrie, sont attendus dans l'ouest pour ce rendez-vous incontournable.

Comme en 2006, la **Société Française du Vide (SFV)** a été mandatée pour l'organisation de l'exposition. Forte de son expérience pour ce type d'événements, elle met à votre disposition son savoir-faire pour organiser **cette exposition de 3 jours sur 2 500 m<sup>2</sup>**. Face à l'augmentation significative du nombre d'exposants entre les deux dernières éditions, plus de 60 stands seront proposés.

**Véritable carrefour d'échanges** lors de la Conférence, l'**exposition sera ouverte largement et gratuitement au public et se tiendra au centre des colloques** qui seront proposés et dont les différents thèmes sont décrits dans cette première annonce. Vous aurez également la possibilité d'organiser des ateliers pour effectuer des **présentations industrielles ciblées de 40 minutes**, au cours desquelles vous pourrez présenter votre savoir-faire et/ou vos produits à un public identifié.

Votre société est spécialiste des matériaux et des techniques connexes ? Venez saisir toutes les opportunités que cette manifestation unique vous offre pour découvrir des produits innovants et pour établir de nouveaux contacts dans le domaine de la Recherche ou dans le milieu industriel, tout en vous informant sur les dernières tendances du marché.

### Demandez votre dossier d'information à SFV

Contact : Gweltaz HIREL

SFV - 119, rue du Renard - 75004 Paris  
gweltaz.hirel@vide.org - www.vide.org  
Tél. : 01.53.01.90.30 - Fax. : 01.42.78.63.20

## PREMIÈRE ANNONCE



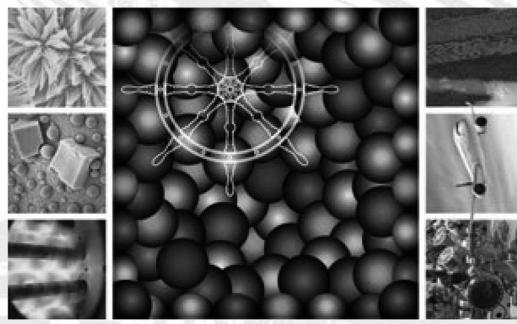
FÉDÉRATION  
FRANÇAISE  
DES MATERIAUX

Conception/Réalisation INSEEC - Avril 2009 - © AIRBUS S.A.S 2006 - Computer rendering by Ifixion - HCSM - © CNRS photothèque : Stéphane BECHU, Didier COL, David ZITOUN, LAS - Pascal PARISELLE

# 2010

## 18 - 22 OCTOBRE

# MATERIAU



# MATÉRIAUX 2010

18 - 22 OCTOBRE à Nantes, fait suite aux conférences MATÉRIAUX qui se sont tenues à Tours et à Dijon, respectivement en 2002 et 2006. Co-organisés par plus de vingt sociétés savantes, ces rassemblements ont été des opportunités de rencontres entre acteurs nationaux jouant des rôles dans des domaines très variés de la science des matériaux. La participation massive (plus de 1 600 congressistes à Dijon) et la satisfaction de la très grande majorité des participants ont largement démontré l'intérêt que présentaient ces manifestations pour la communauté française des matériaux. **Les conférences MATÉRIAUX permettent d'identifier au plan national les thématiques fortes, depuis la conception et la fonctionnalisation de matériaux jusqu'aux applications innovantes, en passant par les caractérisations multi-échelles et les modélisations numériques.**

Les associations à l'origine de MATÉRIAUX 2002 ont fondé la **Fédération Française des Matériaux** (FFM - [www.ffmateriaux.org](http://www.ffmateriaux.org)) qui regroupe actuellement 26 associations concernées par les matériaux. La FFM a pour mission de favoriser leur coopération pour **renforcer la connaissance et l'image des matériaux et en assurer la promotion**. Preuve des synergies existant entre les associations, tous les thèmes des colloques constituant la Conférence sont portés par plusieurs d'entre elles. Comme les précédentes éditions, **MATÉRIAUX 2010** se veut une occasion privilégiée de **rencontres et d'échanges** conviviaux entre participants d'horizons divers. Une **exposition** importante, dont l'accès sera gratuit pour mieux ouvrir la manifestation sur l'extérieur, sera associée à la conférence. L'objectif de la Conférence est de faire le point sur les **principales préoccupations actuelles de la science des matériaux**, qui on retrouve dans les titres des différents colloques et les mots-clés associés. L'analyse, la synthèse, la fonctionnalisation, la caractérisation expérimentale, la modélisation, l'assemblage, la mise en œuvre et la durabilité des matériaux les plus divers (polymères, céramiques, verres, métaux, matériaux carbones et composites...) seront abordés sous des angles très variés. Parmi les principaux **secteurs d'activités** dans lesquels les matériaux auront un rôle capital à jouer, on peut citer la production et le stockage de l'**énergie**, les **transports** et l'**habitat**. Dans un contexte de développement durable ou les préoccupations relatives au **respect de l'environnement** et de la **santé** humaine seront omniprésentes, on imagine aisément que les défis à relever seront de taille !

Reservez dès maintenant la semaine du 18 au 22 octobre 2010 pour venir à Nantes : ensemble, comme pour les précédentes éditions, faisons de MATÉRIAUX 2010 une grande fête scientifique des matériaux !

Jérôme CREPIN, Coordinateur du Comité Thématisé  
Michel BOUSSUGE, Président du Comité de Pilotage

## SOCIÉTÉS ORGANISATRICES

AVEC LE SOUTIEN DE :	
	Université de Nantes
	Nantes Métropole
	Conseil Général de Loire Atlantique
	Conseil Régional Pays de la Loire
	Pôle EMC2
	Groupe Français d'Etudes et d'Applications des Polymères
	Groupe Français de Mécanique des Matériaux
	Association pour les Matériaux Composites
	Association Titane
	Centre Français de l'Antiorosion
	Confédération Française pour les essais non-destructifs
	Association pour la promotion des études du comportement dynamique des matériaux
	Société Française de Métaux et de Matériaux
	Société Française de Génie des Procédés
	Société Française de Génierie de la Métallurgie et de Matériaux
	Fédération Française pour les sciences de la Chimie
	Groupe Français des Argiles
	Groupe Français de la Céramique
	Société Française du Vide
	Groupe Français de Croissance Cristalline
	Groupe Français d'Etude des Carbones
SÉCRÉTARIAT	
	Pascale BRIDOU BUFFET
<b>FFC</b> - 28, rue Saint-Dominique - 75007 PARIS	
Tél. : 33 (0)1 53 59 02 18	
Fax : 33 (0)1 45 55 40 33	
pascale.bridou@wanadoo.fr	
www.materiaux2010.net	

## AVEC LE SOUTIEN DE :

### CALENDRIER

- **Octobre 2009 :** Diffusion de l'Appel à Communications.
- **15 Février 2010 :** Date limite de soumission des résumés de propositions de communications.
- **Avril 2010 :** Notification aux Auteurs.
- **30 Juin 2010 :**
  - Date limite de réception des textes étendus des communications.
  - Publication du Programme Préliminaire

# RÉALITÉS INDUSTRIELLES

## une série des Annales des Mines

### RÉALITÉS INDUSTRIELLES

NOVEMBRE 2009 • PRIX : 23 €

L'électricité  
solaire et  
les pays de la  
Méditerranée



UNE SÉRIE DES  
**ANNALES DES MINES**  
FONDÉES EN 1794

Editions  
**ESKA**

ISSN 1148-7941  
ISBN 978-2-7472-1621-0  
9 782747 216210

NOVEMBRE 2009  
ISSN 1148.7941  
ISBN 9 2-7472-1621-0

### L'ÉLECTRICITÉ SOLAIRE ET LES PAYS DE LA MÉDITERRANÉE

Éditorial, Pierre Couveinhes

Introduction, Claude Trink

#### I - Des enjeux importants

Le Plan Solaire Méditerranéen, un modèle coopératif entre les deux rives de la Méditerranée, Jean-Michel Charpin et Nasser Kamel

Le Plan Solaire Méditerranéen et l'Union pour la Méditerranée, Antoine-Tristan Mocilnikar

Le Plan Solaire Méditerranéen : la dynamique d'un projet de coopération politique, énergétique et industrielle en Méditerranée et les défis à relever, Philippe Lorec et Christophe Schramm

L'impact du Plan Solaire Méditerranéen sur l'évolution des interconnexions électriques entre les pays du pourtour méditerranéen, François Meslier et Pierre Palat

#### II - La mobilisation de financements significatifs

Le modèle de financement du Plan Solaire Méditerranéen, Michel Laffitte et Florent Massou

Le Plan Solaire Méditerranéen : un symbole du partenariat euro-méditerranéen ? La Banque Européenne d'Investissement au service d'une politique renouvelée de l'énergie, Philippe de Fontaine Vive

L'initiative de la Banque mondiale en faveur d'une montée en puissance des centrales solaires à concentration (CSP), Silvia Pariente-David, Jonathan Walters, Chandra Govindarajalu et Roger Coma Cunill

Le financement de l'électricité renouvelable dans le cadre du Plan Solaire Méditerranéen (PSM), Rima Le Coguic et Christian de Gromard

#### III - Les enjeux industriels

Mais où sont les entreprises françaises de fabrication d'équipements pour la production d'électricité solaire ?, Claude Trink

L'énergie solaire photovoltaïque, Pâris Mouratoglou et Pierre-Guy Théron

Une spécificité française : l'intégration du solaire photovoltaïque au bâti, Henri Triebel Sophia Antipolis Energie Développement : un nouveau type de Centrales Solaires Thermodynamiques, Michel Wohrer

Un nouveau matériau de construction producteur d'énergie - le SiTh, à base de couches minces de silicium (Silicon Thin-Films), Claire Tutenuit et Hugues-Antoine Guinoiseau

Le retour d'un acteur français dans le secteur de la technologie du solaire à concentration, Roger Pujol

#### IV - Les développements à l'étranger

La relance de la production d'électricité « verte » aux Etats-Unis : une rencontre entre Prométhée... et Keynes, Marc Magaud et Daniel Ochoa

Allemagne : un développement fulgurant de l'industrie solaire, que soutiennent des efforts significatifs en matière de recherche, Jean-François Dupuis, Claire Vaille et Nicolas Cluzel

Ce qui est possible en Allemagne pourrait également devenir un succès en France : le développement de Q-Cells, premier producteur mondial de cellules solaires, Markus Wieser et Frank Strümpfel

En Espagne, les énergies renouvelables ont-elles toujours le vent (et le soleil) en poupe ?, Thomas Vial et Guy Molénat

#### V - Les programmes de recherche en France

Un nouvel avenir pour l'industrie photovoltaïque française, Eric Laborde

Les enjeux du développement des technologies photovoltaïques et la création de l'Institut National de l'Energie Solaire, Jean-Pierre Joly

Du low cost à la high-tech : des marges de progrès techniques possibles pour le photovoltaïque, Jean-François Guillemoles

Le dossier a été coordonné par Claude Trink

### 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 novembre 2009 « L'électricité solaire et les pays de la Méditerranée » (ISBN 978-2-7472-1621-0)** 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 .....

# 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 [annalesbtp@gmail.com](mailto:annalesbtp@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 interligne 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 accueille 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.