

---

# Proposition d'une approche de modélisation et de diagnostic du comportement des barrages

Ismail Fakhfakh <sup>1,2</sup> – Corinne Curt <sup>1</sup> – Marc Le Goc <sup>2</sup> – Lucile Torrès <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cemagref – Groupe de Recherche Ouvrages Hydrauliques – 3275 Route de Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix-en-Provence Cedex 5 – France

<sup>2</sup> LSIS – Avenue Escadrille Normandie-Niemen – 13397 Marseille Cedex 20 – France

ismail.fakhfakh@cemagref.fr

---

*RÉSUMÉ.* Cet article présente le développement d'une méthode de diagnostic basée sur une approche multi-modèles pour le diagnostic du comportement des barrages. Trois modèles sont décrits : un modèle structurel, un modèle comportemental et un modèle fonctionnel. Le contexte particulier des barrages et notamment le fait que les modèles numériques sont peu nombreux nous a amenés à proposer un modèle structurel et un modèle comportemental originaux. La définition d'un modèle structurel unique pour l'ensemble des composants reposant sur un faible nombre de variables permet de concilier efficacité calculatoire et du diagnostic. Le diagnostic restitue plusieurs éléments : les composants, process et phénomènes impliqués mais également une identification des causes et une analyse des mécanismes au cours du temps.

*ABSTRACT.* This article presents the development of a diagnostic method for dam behaviour. This method is based on multimodeling reasoning. Three models are described: a structural model, a behavioural model and a functional model. The scarcity of numerical models leads us to propose original structural and behavioural models. A single structural model relying on few variables is defined for all the components. It allows a computing efficiency along with a reliable diagnosis. The diagnosis produces several elements: the components, processes and phenomena involved in the faulty behaviour, an identification of the causes of the faulty behaviour and an analysis of mechanisms through time.

*MOTS-CLÉS:* barrage – diagnostic – approche multi-modèles

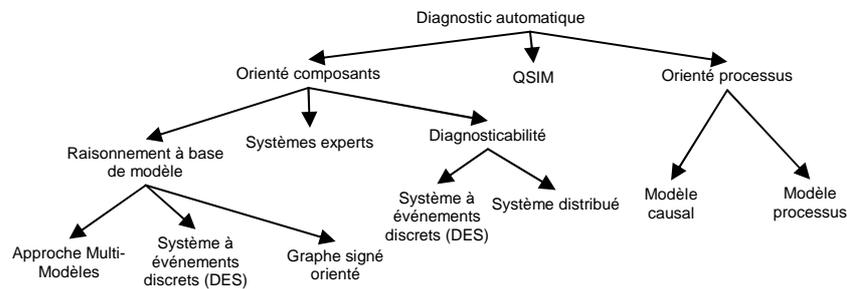
*KEYWORDS:* dam – diagnosis – multimodeling reasoning

---

## 1. Introduction

Le vieillissement des structures de génie civil et certains accidents ayant pu avoir des conséquences économiques et humaines dramatiques ont fait de la maîtrise de la sécurité une des préoccupations majeures des exploitants, des propriétaires et des concepteurs depuis les années 1960. Le diagnostic, qui vise à identifier les causes d'un comportement dégradé ou défaillant, représente un moyen pour contribuer au contrôle de la sécurité du barrage. Actuellement, cette tâche est principalement réalisée par des ingénieurs qui analysent le barrage au cours de revues. De nombreuses communications parues dans les congrès de la CIGB (Commission Internationale des Grands Barrages) portent d'ailleurs sur le diagnostic mené sur des barrages par approche experte. Ces travaux ne constituent pas une démarche générale. Il est alors intéressant de proposer des méthodes et outils d'aide à la décision pour le diagnostic des barrages. Ces outils sont également un moyen de capitaliser les connaissances et de les transférer à des ingénieurs nouvellement amenés à conduire des revues d'ouvrages, afin d'accélérer leur formation. Des algorithmes de diagnostic des barrages ont été proposés récemment pour les barrages poids (Farinha *et al.*, 2005). Les travaux présentés dans cet article traitent du diagnostic du comportement des barrages en remblai.

Différentes approches de diagnostic ont été développées (cf. Figure 1) :



**Figure 1.** *Approches de diagnostic*

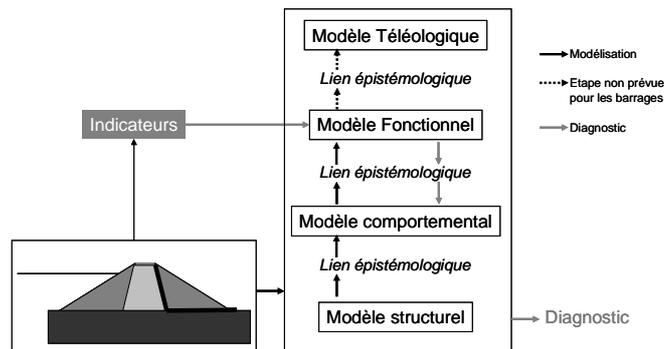
Nous avons choisi de mener nos recherches en utilisant une approche basée sur les modèles. Or, le comportement d'un barrage est complexe : un ensemble de processus dynamiques plus ou moins dépendants tels que le colmatage, l'érosion interne ou le glissement, qui ont des origines diverses et souvent multiples peuvent conduire à des dégradations (CIGB, 1994). Il est donc nécessaire de fournir une méthode de modélisation appropriée c'est-à-dire réalisée à une granularité pertinente et adaptée à la tâche de diagnostic. Des travaux ont été menés dans la communauté de l'intelligence artificielle sur les approches de modélisation multi-modèles convenant à la réalisation de différentes tâches dont celle de diagnostic (Chittaro *et*

*al.*, 1993 ; Chittaro *et al.*, 1998). Nous proposons dans cet article une déclinaison de ces méthodes au cas du diagnostic du comportement des barrages en remblai.

## 2. Approches multi-modèles

Les approches multi-modèles reposent sur l'exploitation de toutes les connaissances disponibles sur le système à modéliser en vue de réaliser la tâche de diagnostic. Quatre types représentatifs de la connaissance sont distingués (Chittaro *et al.*, 1993) et sont représentés par quatre modèles (cf. Figure 2) :

- Le modèle structurel, focalisé sur la topologie physique du système, décrit quelles parties le constituent et comment elles sont interconnectées ;
- Le modèle comportemental décrit comment les composants interagissent entre eux à travers des relations faisant intervenir des quantités physiques ;
- Le modèle fonctionnel a pour but de décrire comment les comportements de composants individuels contribuent à la réalisation du but assigné par le concepteur au système ;
- Le modèle téléologique spécifie les buts assignés à un système par son concepteur.



**Figure 2.** Démarches de modélisation et de diagnostic proposées pour les barrages

Ces différents modèles sont liés les uns aux autres par des liens épistémologiques (cf. Figure 2) qui permettent de passer d'un niveau d'agrégation à un autre ou encore de la connaissance fonctionnelle à la connaissance comportementale et structurelle.

## 3. Application de l'approche multi-modèles au cas des barrages

Les modèles structurel, comportemental et fonctionnel sont décrits pour l'application de la méthode multi-modèles aux barrages. Le modèle téléologique ne

sera pas détaillé car la démarche de diagnostic est initiée au niveau du modèle fonctionnel et « descend » vers le modèle comportemental. Nous rappelons simplement que le rôle du barrage est défini par « maintenir l'eau dans la retenue en toute sécurité ».

### 3.1. Modèle structurel

Nous avons montré que le remblai dans sa globalité ainsi que chacun des composants pris individuellement pouvaient être modélisés sous la forme d'un composant générique unique (Le Goc *et al.*, 2008 ; Masse *et al.*, 2008). Ce composant est défini comme un tube de longueur finie, bouché en partie basse par un bouchon perméable. Ce tube contient une colonne d'eau dont le volume est  $V(t)$  et admet deux sorties : un débit contrôlé (drain)  $Q_s(t)$  et un débit non contrôlé (fuites)  $Q_f(t)$ . Cette structure matérialise les flux d'eau au travers des différents composants. Certains de ces flux, anormaux, sont à l'origine d'un comportement anormal, voire dangereux, du barrage. Le modèle structurel complet est composé des différents composants connectés par les variables.

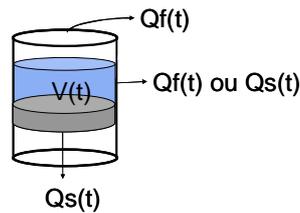


Figure 3. Composant générique pour les barrages

### 3.2. Modèle comportemental

Si le modèle structurel des composants est unique, leur comportement est différent. Nous avons toutefois classifié les différents composants en 3 catégories :

- « Tuyaux » constitués des drains, conduite en charge, galerie et évacuateur de crues ;
- « Composants structuraux » constitués du remblai amont, remblai aval, fondation amont et fondation aval ;
- « Etanchéités » qui sont normalement accolées au système de drainage : noyau ou masque amont et système d'étanchéité fondation.

Dans l'approche multi-modèle classique, le modèle comportemental est basé sur des équations physiques. Nous avons défini dans le cas des barrages un modèle comportemental original du fait que les modèles numériques sont peu nombreux.

Les variables définies plus haut peuvent prendre un certain nombre de valeurs  $V(t) = \{0, 1, 2\}$ ,  $Q_s(t) = \{0, 1, 2\}$  et  $Q_f(t) = \{0, 1\}$ . Pour  $V(t)$  et  $Q_s(t)$  :

- la valeur 0 correspond à une valeur inférieure à la valeur attendue. Par exemple, la hauteur d'eau dans le remblai mesurée par piézométrie (conditions constantes) est inférieure à la hauteur d'eau attendue ;
- la valeur 1 correspond aux valeurs de consigne ;
- la valeur 2 correspond à une valeur supérieure à la valeur attendue. Par exemple, le débit de drainage est supérieur au débit attendu.

Pour  $Q_f(t)$  :

- la valeur 1 correspond à une absence de fuite d'eau ;
- la valeur 2 correspond à la présence d'une fuite d'eau.

Chittaro et al. (1998) signalent, à partir d'une analyse de la littérature, qu'une expression des valeurs des variables sous la forme de déviations par rapport à une situation normale procure le meilleur compromis entre la complétude du diagnostic et la simplicité des calculs.

Nous avons défini le modèle comportemental en définissant un vecteur d'état  $X(t) = \{X_i(t)\} = \{V(t), Q_s(t), Q_f(t)\}$  (Le Goc *et al.*, 2008 ; Masse *et al.*, 2008). Les valeurs  $X_i(t)$  sont définies en tenant compte des combinaisons de variables physiquement possibles pour chaque type de composants définis. Par exemple, pour le cas des tuyaux, 12 états physiquement possibles ont été identifiés sur les 18 ( $3 \times 3 \times 2$ ) états théoriquement possibles (cf. Tableau 1).

Etats	V(t)	Qs(t)	Qf(t)	Rôle fonctionnel
X0	0	0	1	C
X1	1	0	1	C
X2	2	0	1	C
X4	1	1	1	C
X5	2	1	1	C
X8	2	2	1	R
X9	0	0	2	B
X10	1	0	2	B
X11	2	0	2	B
X13	1	1	2	C
X14	2	1	2	C
X17	2	2	2	R

**Tableau 1.** Etats possibles des tuyaux et rôles fonctionnels associés (C : Conduite, R : Réservoir, B : Barrière)

Le passage d'un état à l'autre se produit par l'occurrence d'un événement  $e_i$  qui correspond au changement de valeur d'une variable.

Le modèle comportemental peut alors être tracé (cf. Figure 4).

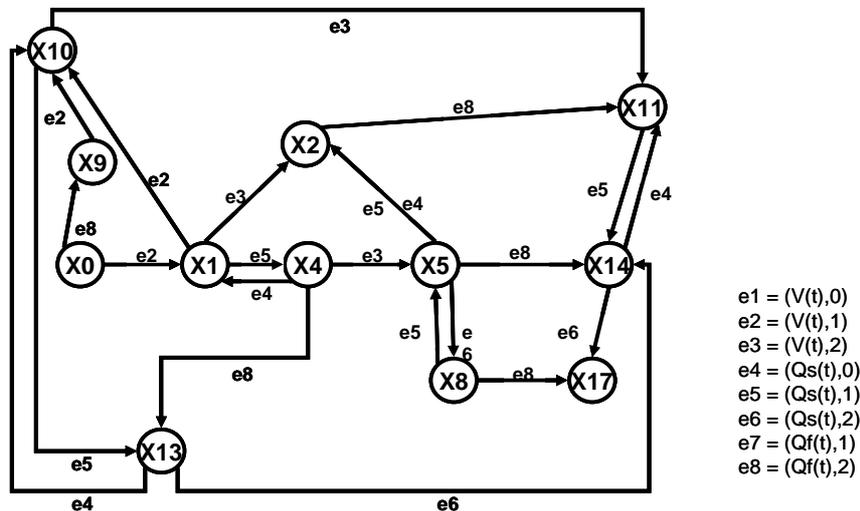


Figure 4. Modèle comportemental générique – Cas des « Tuyaux »

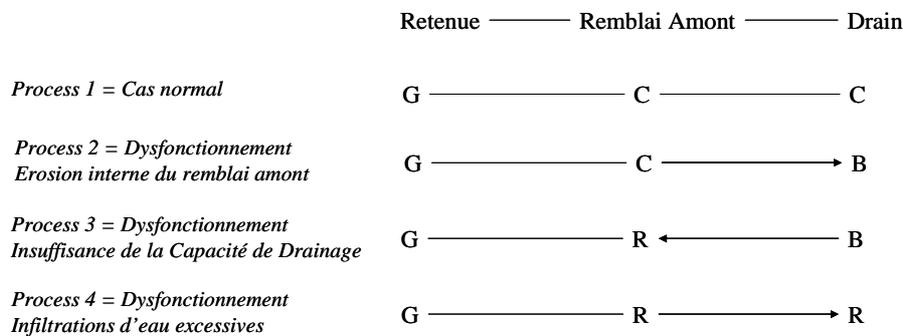
### 3.3 Modèle fonctionnel

Le modèle fonctionnel, tel que défini au sens de (Chittaro *et al.*, 1993), comporte un modèle des rôles fonctionnels, un modèle des process et un modèle des phénomènes.

Le rôle fonctionnel d'un composant est une interprétation de son comportement ayant pour but de caractériser comment le composant contribue à la réalisation de la structure de flux à laquelle il prend part. Les travaux de Chittaro ont permis de lister des rôles fonctionnels génériques : générateurs, conduites, barrières et réservoirs. Il est important de noter qu'au cours du temps, un composant peut changer de rôle fonctionnel si son fonctionnement est dégradé ou défaillant. Nous avons déterminé les rôles fonctionnels joués par chaque type de composants et pour chacun des états définis. Par exemple, pour les tuyaux, le rôle fonctionnel attendu est celui d'une Conduite mais en cas de dysfonctionnement, ils peuvent avoir un rôle de Barrière (par exemple si le débit de drainage est faible par rapport au débit attendu) ou de Réservoir (par exemple si le débit de drainage est élevé par rapport au débit attendu) (cf. Tableau 1).

Les process sont établis en reliant les rôles fonctionnels entre eux pour former un graphe appelé réseau des rôles fonctionnels. Sur l'exemple de la Figure 5, sont représentés 3 composants : la retenue a un rôle de générateur, le remblai amont et le drain ont un rôle de conduite en conditions de fonctionnement normal. Le premier

cas de dysfonctionnement présenté sur la Figure 5 est une érosion interne du remblai amont qui entraîne un colmatage du drain : celui-ci passe du rôle initial de conduite à celui de barrière. Le deuxième cas de dysfonctionnement est une transformation du rôle du remblai amont qui devient un réservoir sous l'influence du drain colmaté qui agit comme une barrière. Le troisième cas correspond à un problème d'étanchéité : si la fonction d'étanchéité n'est plus remplie correctement, le remblai amont va se comporter comme un réservoir et le drain également puisque le débit est supérieur au débit attendu. Il est donc possible de définir les différents process physiques affectant le barrage par le couplage des composants interprétés sous l'angle de leurs rôles fonctionnels.



**Figure 5.** Extrait du réseau des rôles fonctionnels pour les barrages

Onze process ont été définis : Infiltrations d'eau excessives, Insuffisance de la capacité de drainage, Déformation/fissuration, Érosion interne, Glissement, Glissement plan, Dissolution, Débourrage, Tassement, Sous-pressions et Érosion externe.

Le troisième niveau du modèle fonctionnel est le modèle des phénomènes qui est construit à partir des modèles de process. Les phénomènes correspondent dans le cas des barrages aux modes de rupture et de dégradation tels que l'érosion interne dans le remblai (Process Infiltrations d'eau excessives  $\oplus$  Process Insuffisance capacité drainage  $\oplus$  Process Erosion interne Remblai Aval), le glissement du remblai et de la fondation... Les phénomènes peuvent être constitués d'un seul process.

#### 4. Diagnostic du comportement des barrages

Dans le cas du diagnostic des barrages, 2 résultats sont attendus :

- la description des composants en termes de rôles fonctionnels, les process et les phénomènes en cours ;

- une analyse dans le temps pour déterminer l'enchaînement des mécanismes qui ont conduit aux dégradations observées avec identification de la ou des causes possibles des dégradations des différents composants.

Dans notre approche, l'entrée du diagnostic est le modèle fonctionnel.

#### 4.1. Composant, process et phénomènes

La détermination du rôle fonctionnel des composants, à un instant donné, est faite en utilisant des indicateurs (Curt *et al.*, 2010). Les indicateurs permettent de représenter de manière robuste l'ensemble des mesures et observations visuelles utilisées par un expert lors de l'analyse d'un barrage. Les indicateurs sont évalués par les experts sur une échelle de 0 (Excellent) à 10 (Inacceptable). Par exemple, deux indicateurs permettent de qualifier le rôle fonctionnel du drain : l'indicateur « Augmentation du Débit/Débit par rapport à la capacité drainante » va déterminer si le drain est dans un rôle de Conduite ou de Réservoir et l'indicateur « Diminution du débit » s'il est dans celui de Conduite ou de Barrière (cf. Figure 6).

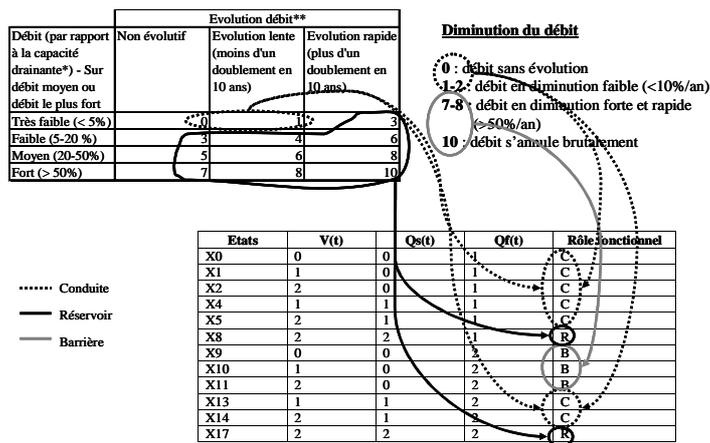


Figure 6. Indicateur « Diminution du débit » et lien avec les rôles fonctionnels

L'identification du rôle fonctionnel de Barrière pour le drain du remblai (par exemple, l'indicateur « Diminution du débit » est évalué à 7 par l'expert) permet de déterminer qu'un process de type 3 (cf. Figure 5) est en cours. Le rôle des autres composants est déterminé de la même manière lorsqu'un indicateur permet de déterminer les rôles et si les données sont disponibles. Sinon, les relations d'influence tracées pour définir les process permettent de déterminer les rôles fonctionnels joués par les autres composants. Cette double assignation des rôles fonctionnels (à partir des indicateurs, par le réseau de rôles fonctionnels) peut

permettre de vérifier la cohérence des informations. A partir des process actifs, il est possible de définir les phénomènes en cours. Ainsi, si le process « Insuffisance de la capacité de drainage » est actif, les phénomènes d'érosion interne dans le remblai et de glissement du remblai sont actifs.

#### **4.2. Analyse au cours du temps et identification des origines des dégradations**

Il est important de connaître l'enchaînement des mécanismes dans le temps. Le modèle comportemental peut aider pour cette analyse. A partir de l'état actuel, il est possible de définir l'ensemble des chemins passés possibles sur le modèle comportemental. Certains de ces états pourront être éliminés si l'on dispose de données permettant d'évaluer les valeurs prises par les indicateurs pertinents dans le passé. Dans la majorité des cas, on ne disposera pas de l'ensemble des données permettant de déterminer pour chaque composant les différents chemins. Par contre, le réseau des rôles fonctionnels pourra permettre là encore d'affiner cette analyse.

La tâche de diagnostic vise enfin à définir l'ensemble des causes possibles pour chaque process puis à déduire, par élimination des causes non pertinentes, les causes réputées possibles pour le cas traité. Différentes causes peuvent expliquer le changement de rôles fonctionnels d'un composant : pour le cas particulier du drain, une diminution du débit peut par exemple s'expliquer par un collecteur cassé, un drain colmaté, une étanchéité qui s'améliore du fait de dépôts de la retenue ou encore une source qui serait captée, détournée, tarie. Les causes non pertinentes sont identifiées par les indicateurs : par exemple, il a pu être observé par l'indicateur « Etat du collecteur » qu'aucun collecteur n'était cassé. Les causes réputées possibles relèvent de deux grands types : les causes réelles du process et les causes non pertinentes mais qu'il n'est pas possible d'éliminer car l'information n'est pas disponible (l'augmentation de dépôts dans la retenue dans la retenue n'est ni confirmée ni infirmée). L'analyse dans le temps et le réseau des rôles fonctionnels va permettre d'affiner l'identification des causes. Ainsi, si on a relevé qu'un process de type 2 s'était produit, on peut supposer que le colmatage du drain provient d'une érosion interne du remblai amont. Il s'agit alors d'analyser si cette hypothèse est vérifiée :

- les matériaux du remblai amont sont-ils sensibles à l'érosion interne ? La réponse à cette question est apportée par les indicateurs « Autofiltration du remblai – nature des matériaux et granulométrie » et « Mise en œuvre – Compactage/Scarification » ;
- les règles de filtre ont-elles été respectées pour la réalisation du drain ? Cette question est vérifiée par 2 indicateurs (« Présence de filtre » et « Respect des règles de filtre vis-à-vis de la fonctions de drainage »).

Ainsi, l'utilisation d'indicateurs va ensuite permettre de définir plus précisément quelles sont les causes de la dégradation apportées par chaque composant incriminé.

## 5. Conclusion

Cet article propose le développement d'une méthode de diagnostic basée sur une approche multi-modèles pour le diagnostic du comportement des barrages. Le contexte particulier des barrages et notamment le fait que les modèles numériques sont peu nombreux nous a amenés à proposer un modèle structurel et un modèle comportemental originaux. La définition d'un modèle structurel unique pour l'ensemble des composants reposant sur un faible nombre de variables permet de concilier efficacité calculatoire et du diagnostic. Le diagnostic restitue plusieurs éléments : les composants, process et phénomènes impliqués mais également une identification des causes et une analyse des mécanismes au cours du temps. Les perspectives du travail portent sur l'implémentation de l'algorithme de diagnostic avant application à des cas simplifiés puis réels. Ces travaux pourront ensuite être étendus aux autres types de barrages.

## 6. Remerciements

Ces travaux sont cofinancés par la Région PACA et l'Union européenne (Fonds européen de développement régional).

## 7. Bibliographie

- Chittaro L., Guida G., Tasso C., Toppiano E., « Functional and teleological knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning About Physical Systems: A case Study in Diagnosis », *IEEE Transactions on systems*, vol. 23, 1993, 1718-1743.
- Chittaro L., Guida G., Amruth A., « Reasoning about functions and its applications to engineering », *Artificial intelligence in Engineering*, vol. 12, 1998, 331-336.
- CIGB, Bulletin 93 – Ageing of dams and appurtenant works – Review and recommendations. CIGB, 1994, 235 pages.
- Curt C., Peyras L., Boissier D., « A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance », *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 25, 2010, 171-183.
- Farinha F., Portela E., Domingues C., Sousa L., « Knowledge-based systems in civil engineering: three cases studies». *Advances in Engineering Software*, 36, 2005, pp. 729-739.
- Le Goc M., Masse E., Curt C., « Modeling Processes from Timed Observations», *3rd International Conference on Software and Data Technologies (ICSoft 2008)*, Porto, Portugal, 5-8 July 2008.
- Masse E., Curt C., Le Goc M., Tourment R., « Modélisation du comportement d'un barrage en remblai par approche multi modèles», *XXVIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Nancy, 04-06/06/2008.