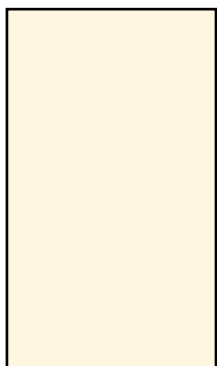


Défaillance et retour d'expérience en génie civil

Comment mieux tirer parti des ACCIDENTS DE STRUCTURES

par Denys Breysse et René Harouimi



La défaillance décrit, d'une manière générale, l'incapacité d'un système, ou d'une partie d'un système, à fonctionner comme attendu. Dans le contexte de la sécurité des constructions, les exigences fondamentales sont définies par la réglementation européenne (règles Eurocodes) : elles portent sur la capacité structurelle (résistance à l'effondrement), sur la non déformabilité, sur des fonctions complémentaires (étanchéité, confort, esthétique...) et sur la durabilité. Parfois la défaillance résulte de circonstances exceptionnelles (solllicitations d'intensité très élevée), parfois elle résulte de défauts de conception ou de construction. Dans d'autres cas, des défauts d'entretien sont en cause.

Certaines défaillances ont eu un écho particulier, soit qu'elles aient affecté des ouvrages exceptionnels (les tours du *World Trade Center*, le terminal E de Roissy, le pont sur la Tay, le pont de Tacoma, le *Silver Bridge*...), soit qu'elles aient eu un impact exceptionnel (les barrages de Malpasset ou de Vajont). La défaillance peut aussi simplement correspondre à la violation des conditions de service, sans qu'il y ait nécessairement de victimes. Ainsi, les défaillances quasi-simultanées des passerelles Solférino à Paris et du Millenium à Londres, ou l'effondrement de la cour de l'école Auguste-Perret à Paris en février 2003, à la verticale d'un tunnel du Meteor, ont interpellé la communauté du génie civil.

Défaillance, forensique, retour d'expérience, risques majeurs

D. Breysse enseigne à l'Université Bordeaux I (GHYMAC, CDGA) et **R. Harouimi** est expert génie civil au CNISF

L'UTILISATION des études de cas (*case studies* en anglais) a une longue histoire dans le monde anglo-saxon. Il existe une abondante littérature sur ce sujet. Au moins depuis la rupture du pont de Tacoma (États-unis, 7 novembre 1940), des générations d'étudiants en génie civil ont vu le film de l'écroulement du pont. Les études de cas profitent également aux professionnels, non seulement parce qu'elles enrichissent l'expérience technique, mais aussi parce qu'elles attirent l'attention sur les conséquences éthiques et judiciaires, sur la jurisprudence qui découle de ces accidents. On est parfois surpris de voir qu'un principe élémentaire de la mécanique a été ignoré ou bafoué. Les « rétro-analyses » (*back-analysis*) consistent à recalculer une structure après défaillance, pour cerner les erreurs qui ont été commises, comme le choix de paramètres ou d'hypothèses inadaptés.

Classification et typologie : la recherche d'un ordre sous-jacent

Les causes primaires des catastrophes en ingénierie sont généralement attribuées à :

- des conditions extrêmes de sollicitations ou des aléas environnementaux ;
- des défauts des matériaux ;
- des défauts de conception, dont certains sont le résultat de pratiques non éthiques ;
- des facteurs humains, comprenant à la fois les aspects éthiques et accidentels.

Le plus souvent, une combinaison de ces raisons permet d'expliquer les accidents. Il y a différentes manières de classer et d'analyser les causes d'accidents. On citera la classification intuitive, la classification par acteurs et celle qui résulte d'une analyse des causes.

La classification intuitive repose sur une analyse implicite des accidents, qui permet de les regrouper en catégories présentant une certaine cohérence. Ainsi, on peut classer les causes selon qu'elles résultent :

- d'une surestimation des capacités ou d'une sous-estimation des grandeurs prises en compte pour le calcul (actions exercées, résistances des matériaux...);
- de l'occurrence de dangers « aléatoires » non pris en compte lors

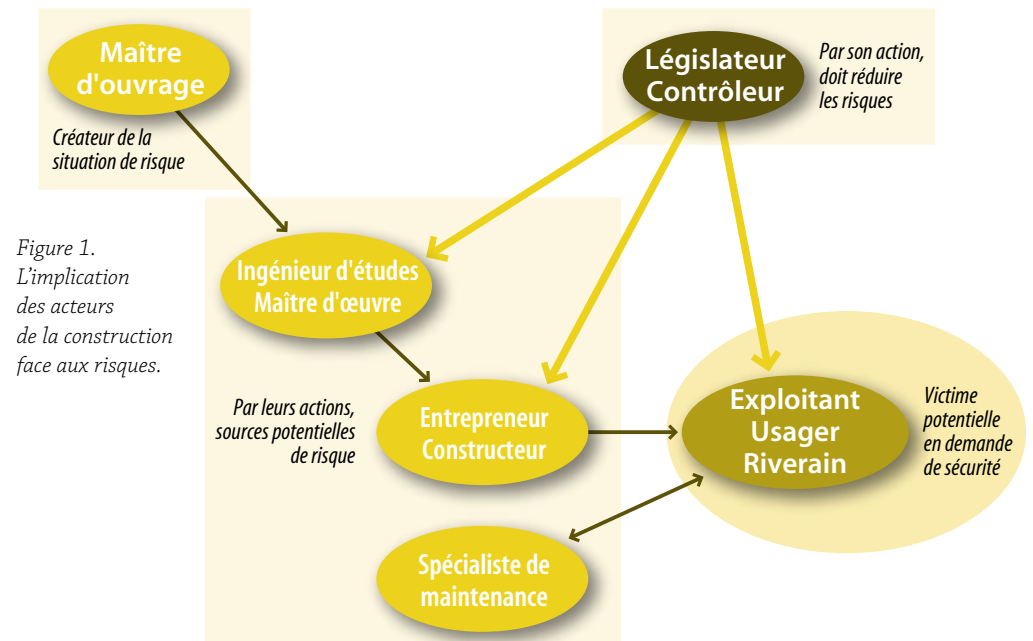


Figure 1. L'implication des acteurs de la construction face aux risques.

de la conception : incendie, explosions (accidents, sabotage...), crues, chocs d'un véhicule, séisme, etc. ;

- de fautes humaines lors de la conception ou de l'exécution.

L'examen de la littérature concernant les accidents montre que, dans la grande majorité des cas, les insuffisances constatées résultent d'erreurs ou de séries d'erreurs produites par les acteurs ayant participé à la réalisation de l'ouvrage, depuis le début jusqu'à l'exploitation, et éventuellement sa déconstruction (figure 1). Chacun des acteurs contribue au risque.

Une étude portant sur 800 cas de défaillances de structures¹ a permis d'établir que les causes viennent principalement de l'ignorance, de la négligence ou du manque d'attention, suivis de l'insuffisance des connaissances et de la sous-estimation des influences (cf. figure 2).

Levy et Salvadori² ont analysé finement les raisons d'une vingtaine de défaillances d'ouvrages. Ils remarquent que la pression du temps et de l'argent sont souvent la cause des défaillances de structures. Après avoir souligné une fois de plus, exemples à l'appui, que presque tous les effondrements sont dus à des erreurs humaines, ils expriment leur scepticisme que les progrès techniques puissent seuls garantir une réduction des effondrements ; ils pourraient même augmenter. Leurs derniers mots sont : « *Seule une meilleure prise de conscience de nos responsabilités humaines et sociales peut conduire à la construction d'ouvrages plus sûrs.* »

Quelles exploitations possibles en prévention ?

Chaque accident est singulier, puisqu'il résulte de la conjonction de plusieurs causes qui, combinées, ont conduit à la défaillance. La comparaison entre accidents permet d'identifier des traits communs, d'établir des invariants, voire une typologie qui peut, elle aussi, être exploitée à des fins pédagogiques ou pour améliorer les méthodes de conception. Ce type de démarche requiert cependant des moyens d'analyse plus élaborés et la constitution d'un paradigme à partir duquel les spécialistes pourront progresser.

Certaines défaillances, soit par leur nature catastrophique qui a marqué l'opinion ou les pouvoirs publics, soit parce qu'elles conduisent les spécialistes (architectes et ingénieurs, concepteurs ou constructeurs) à s'interroger sur leurs pratiques, ont été à l'origine de modifications dans les méthodes et

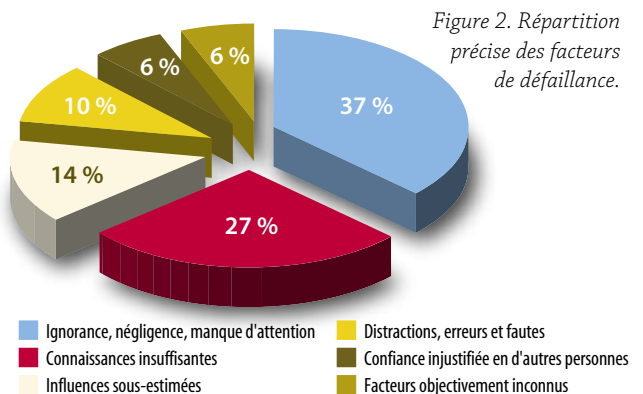


Figure 2. Répartition précise des facteurs de défaillance.

1. Matousek et Schneider, 1976. 2. Levy et Salvadori, 1992.

les approches, y compris sur le plan des règlements. L'analyse approfondie des raisons de la défaillance permet alors, en cernant les causes et en tirant les leçons de cette analyse, de réduire la probabilité d'occurrence future d'une défaillance semblable.

Le tableau ci-contre rassemble quelques cas illustres qui ont été à l'origine de telles réflexions.

L'ingénierie forensique, une nouvelle discipline ?

L'ingénierie forensique est une discipline récente, qui s'est rapidement développée ces dernières années, particulièrement sur le continent nord-américain, pour des raisons plus juridiques que techniques : il s'agit d'estimer le degré de responsabilité de chaque intervenant dans l'acte de construire.

Le vocable « forensique », forgé sur le mot latin *forum*, traduit lui-même cette composante juridique : le *forum* était l'espace public où l'on discutait des choses communes. Le *forensic engineering*, ou « ingénierie forensique » (le terme anglo-saxon renvoie des dizaines de milliers de références en génie civil sur un moteur de recherche, quand son équivalent français ne rencontre encore que très peu d'écho) peut donc être traduit comme une « médecine légiste » : il s'agit de conduire une ingénierie à rebours, *post mortem* (de l'ouvrage), pour reconstruire l'enchaînement logique de causes et de faits qui ont conduit à la défaillance finale et attribuer

les responsabilités. Ainsi est née une nouvelle espèce d'ingénieur, qui relève autant du détective que de la planche à dessin, le *forensic engineer*, qui a désormais ses revues et ses conférences techniques³. Certains⁴ considèrent ainsi que l'ingénierie forensique est à la croisée de l'analyse des structures et du droit.

L'événement fondateur de l'ingénierie forensique est sans doute l'effondrement spectaculaire de la passerelle dans le hall du *Hyatt Regency* à Kansas City, en 1981 (114 victimes et plus de 200 blessés). La passerelle suspendue par des tiges métalliques s'est brusquement effondrée sur les danseurs qui se trouvaient dans le hall, précipitant aussi de nombreuses personnes dans le vide. L'expertise des causes révéla deux défauts majeurs de conception : les suspentes des passerelles avaient

une résistance 40 % plus faible que celle initialement prévue sur les plans, le dessin des assemblages avait été modifié, conduisant à des efforts deux fois plus élevés sans que les calculs aient été refaits. Un manque de coordination entre les divers intervenants du projet expliquait ces déficiences dans la réalisation de la structure⁵. L'attribution des responsabilités lors du procès a conduit au retrait de la licence de deux ingénieurs, ce qui, au pays de la libre entreprise, est une sanction exceptionnelle.

Aujourd'hui, tous les pays développés commencent à aborder les défaillances sous l'angle de l'ingénierie forensique, qu'il s'agisse de définir des responsabilités ou tout simplement de mieux comprendre les causes des accidents⁶.

Répercussions de catastrophes sur la réglementation et la pratique.

Pont d'Angers, 1850	Après l'écroulement du pont au passage d'une troupe marchant au pas cadencé, on a fait rompre le pas des troupes à pied
Pont de Tacoma, États-unis, 1940	Approfondissement du comportement aérodynamique des ponts suspendus
Incendie du 5/7, Saint-Laurent-du-Pont, 1970	Modification de la législation incendie en France
Séisme d'Orléansville, Algérie, 1954	Établissement du premier règlement parasismique français AS55, applicable à l'Algérie
Écroulement des réfrigérants de Ferrybridge (GB, 1965)	Reconnaissance du fait que le groupement de tours modifie les effets du vent
Immeuble d'habitation de Ronan Point, Londres, 1967	Déclenchement des études sur la robustesse et introduction du <i>progressive collapse</i> dans les règlements anglais et américains
Incendie du tunnel du mont Blanc, 1999	Révision de la sécurité de l'ensemble des tunnels français, et modification de la réglementation

Exploitation pédagogique illustrative

LA PÉDAGOGIE PAR L'ÉCHEC peut être fort utile. Si aux États-unis, plusieurs projets se sont développés dans cette optique⁷, en France, les travaux de Nancy constituent un exemple pratiquement unique à ce jour : des dossiers de défaillances relatives aux barrages font l'objet d'études approfondies et du développement de produits multimédias à visées pédagogiques⁸. En France, une action entreprise depuis le début de 2006 dans le cadre du GIS MRGenCi (Maîtrise des risques en génie civil), avec le soutien du consortium UNIT (Université numérique et

technologie de l'information) s'inscrit aussi dans ce cadre (<http://www.u-bordeaux1.fr/mrgenci/>).

Le professeur Norbert Delatte, à l'Université d'Alabama⁹, a développé une base de données d'études de cas à des fins pédagogiques. Il a associé celles faites sous sa direction par les étudiants, aux causes primaires des cas traités. Dans le cas (fréquent) de causes multiples, les cas peuvent être classés dans plusieurs catégories différentes et servir d'illustration pour plusieurs points du cours. ■

3. Rens et al, 2000, Raikar, 2001, Chabaneix et Paulin, 2004.

4. Barrentine, 2000.

5. Moncarz et Taylor, 2000.

6. Shugaev et Sokolov, 2005.

7. Delatte, 2000, Rens et Knott, 2000.

8. Harouimi et Masrouri, 2004.

9. Delatte, 2000.

Du cas par cas à une approche plus globale

L'exemple du terminal E de Roissy

Le terminal E de Roissy a fait l'objet d'études détaillées après son effondrement. Dans le rapport de la commission d'enquête administrative, rendu public le 15 février 2005, Jean Berthier diagnostique quatre faiblesses principales, qui ont causé l'effondrement du 23 mai 2004 :

- le positionnement des butons. Ces étais métalliques cylindriques étaient trop profondément enfoncés dans le béton ;
- une insuffisance de ferrailage ; cette déficience du béton armé a occasionné des fissures importantes dans la voûte ;
- un « *manque de redondance mécanique* », c'est-à-dire de possibilité de transfert de pressions ou d'efforts vers d'autres zones en cas de défaillance locale ;
- une faible résistance de la poutre sablière. Celle-ci a été perforée tous les 4 mètres pour faire passer les gaines de ventilation.

Aux yeux de la commission, le processus de l'effondrement d'une structure, dont la réserve de résistance initiale était faible, s'explique entre autres par :

- une lente évolution de la structure sous l'effet de ses déformations différées liées au fluage du béton qui, tout en étant normales dans un ouvrage en béton, ont accru les contraintes en certains points sensibles ;
- l'action des effets thermiques cycliques qui ont accru progressivement sa fissuration initiale.

Le rapport précisait aussi que, pour de telles structures, le contrôle technique devrait s'appuyer plus systématiquement, comme pour les ouvrages d'art, sur une modélisation indépendante de celle de l'entreprise, qui permette d'en recouper les résultats. Enfin, la commission suggérait des inspections régulières de l'évolution structurelle et s'interrogeait sur le « *juste niveau d'approfondissement et de rémunération des différentes catégories d'études d'une part et du contrôle technique d'autre part* ». Elle

proposait enfin qu'une réflexion puisse s'engager sur ces questions avec tous les professionnels concernés.

Émergence d'une démarche scientifique originale

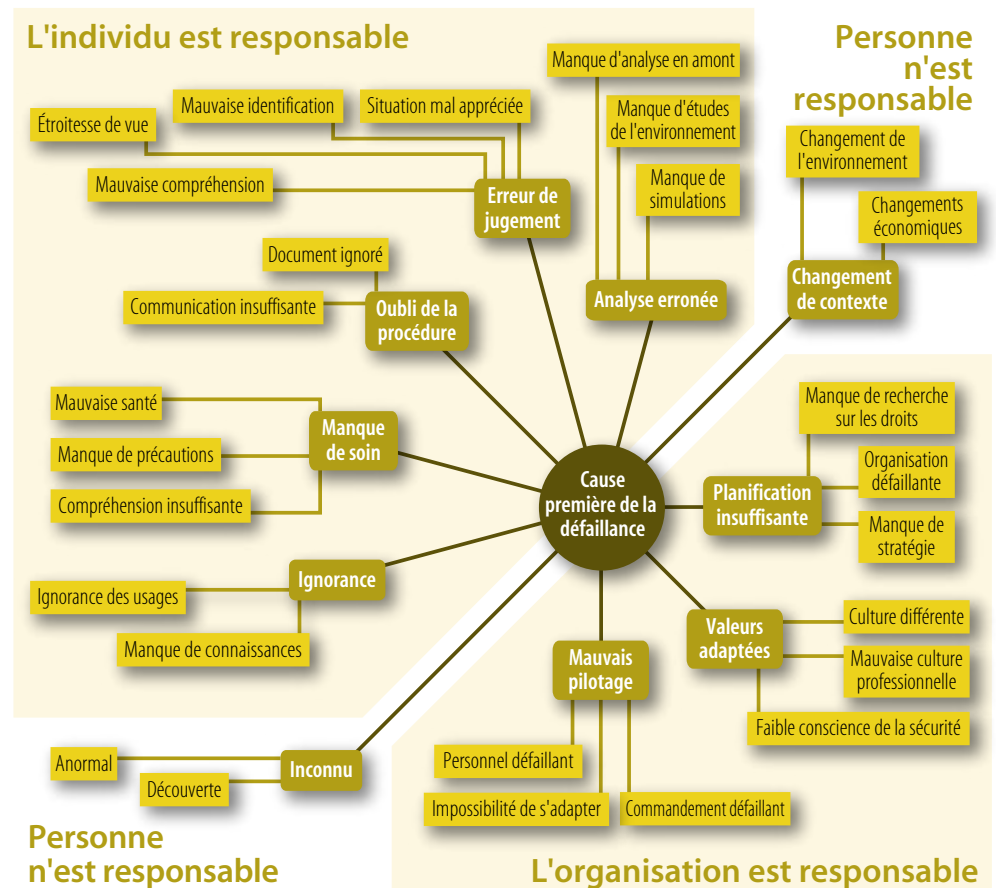
Il est légitime de s'interroger sur l'opportunité et la possibilité de développer une approche scientifique propre, relevant de l'analyse systémique, qui permette d'élaborer des outils adaptés aux études d'ingénierie forensique. Des travaux de recherche à l'Université de Birmingham (Alabama, USA) ont été financés récemment par la NSF, reposant sur le présupposé du retour d'expérience après défaillance. Le projet, intitulé « Utilisation des études de cas de défaillances et de problèmes d'éthique pour les formateurs en ingénierie », s'est achevé sous la forme d'un séminaire coorganisé avec l'ASCE, association au sein de laquelle un *Technical Committee on Forensic Engineering* a été mis en place¹⁰.

La question est : « *Est-il possible de développer des modèles cohérents et utiles à caractère générique, à partir de l'analyse de cas individuels, nombreux mais toujours particuliers ?* ». La difficulté est de passer d'une approche descriptive, de type « naturaliste » à une approche générique, à visée plus large. Si l'établissement des schémas génériques n'est pas aisé, c'est cependant le fondement même de l'approche scientifique : identifier des invariants, des enchaînements logiques... à partir desquels on pourra tirer des lois à caractère général, déterministe (ce qui serait étonnant) ou statistique.

Potentialités et limites

Les scénarios basés sur les mandalas causes-actions-défaillances sont cependant exprimés avec des termes génériques trop vagues pour le génie civil. Par exemple, les défauts organisationnels, difficiles à formuler de façon imagée (« *mauvais pilotage* » recouvre

Figure 3. Un exemple de mandala : celui des causes (d'après Hatamura)



10. Harouimi et Masroui, 2004.

un nombre important de nuances), doivent être analysés avec beaucoup plus de finesse et nourris d'une dimension technique plus approfondie. Dans la base de données japonaise¹¹, le même enchaînement cause-action-défaillance permet de décrire aussi bien le retard des trains, un conflit social ou encore une panne d'électricité. La finesse de description doit être adaptée au périmètre traité.

Évidemment, à l'intérieur d'une même catégorie, par exemple les ouvrages de soutènement, il doit être possible d'identifier des scénarios génériques plus précis et de les décrire avec des vocables spécifiques du génie civil. La classification pour le codage des cas dans la base de données reposera sur un lexique disciplinaire, qui permettra une utilisation plus intuitive en phase d'exploitation.

Une autre réserve provient de ce que la notion de « scénario » est malmenée quand on s'aperçoit que la défaillance est souvent due à un détail d'assemblage ou d'interface, ou à une mauvaise interprétation. Si l'analyse *a posteriori* permet d'identifier de telles causes, de les répertorier et de les intégrer dans les scénarios, la multiplicité des sources potentielles d'erreurs (de détails susceptibles de provoquer la défaillance) ne rend-elle pas illusoire une démarche analytique prédictive qui en requiert le recensement exhaustif ? Ces questions devront être abordées avec lucidité.

Lever un frein en organisant le retour d'expérience

L'organisation du retour d'expérience pose trois questions :

- le recueil des informations (nature des informations à collecter, mode de recueil et de validation, stockage) ;
- l'organisation, l'analyse et l'exploitation de ces informations ;
- la mise à disposition et la diffusion.

Les systèmes de bases de données relationnelles permettent une exploitation *a posteriori*, selon les critères choisis par l'utilisateur. Par exemple, sous réserve que les mots-clés aient été codés au moment de l'introduction des informations, il est très facile de rechercher et d'analyser les « *défaillances résultant de l'accumulation de la neige sur une*

toiture » ou les « *défaillances liées à la fatigue dans les structures métalliques* ».

Le frein majeur n'est hélas pas technique. Il résulte, dans notre culture, de la frilosité qu'ont les professionnels à faire part des accidents ou des situations de quasi-accident. De plus, en cas de procédure judiciaire, on oppose le caractère confidentiel des informations à la demande de communication, en arguant du fait que, tant que le jugement n'est pas définitif, la diffusion des informations n'est pas possible.

Les ingénieurs anglo-saxons ont pourtant su mettre en place, sous l'égide du SCOSS (Comité pour la sécurité des structures), un système de *reporting* qui ménage le souci de confidentialité et celui d'information. Le SCOSS est une entité indépendante mise en place en 1976 en Grande-Bretagne par l'Institut des ingénieurs en génie civil et par l'Institut des ingénieurs en structures, pour maintenir une veille continue sur les questions relatives à la sécurité des structures. Sa fonction première est d'identifier en amont les tendances et les évolutions qui pourraient contribuer à affecter la sécurité des structures.

Il a mis en place la procédure du CROSS (« Rapport confidentiel sur la sécurité structurale ») pour réduire le nombre d'accidents (ou de quasi-accidents) sur les structures et pour en augmenter la fiabilité tout au long de leur durée de vie. La méthode consiste à collecter des rapports confidentiels pour provoquer des réactions (*feedback*) et influencer les changements, tout en reconnaissant que la plupart des projets sont conçus, conduits et développés de manière correcte et sûre.

Conclusions

Nous nous sommes efforcés d'exposer le cadre dans lequel le retour d'expérience sur les défaillances dans le domaine de la construction pourrait servir de fondement à une amélioration de la culture de la sécurité chez l'ensemble des professionnels du secteur. Les premières expériences conduites demeurent timides, mais des efforts ciblés, portant sur des problématiques spécifiques, pourraient être menés, sous l'égide des pouvoirs publics ou d'organisations scientifiques.

L'exploitation à des fins pédagogiques et de formation de telles données est d'ores et déjà possible. Une autre exploitation possible sera, sans nécessairement disposer de statistiques fines, d'identifier des points-clés dans la logique arborescente, dont on aura montré qu'ils contribuent régulièrement à des défaillances.

On pourra ainsi mieux sensibiliser les acteurs (en activité ou en formation) et contribuer à une amélioration des pratiques.

Si le forum romain était le lieu de la chose publique, la défaillance demeure plutôt, en particulier en France, dans le domaine du confidentiel (combien de fois n'entend-on pas : « *La chose n'est pas encore jugée !* » pour justifier de la rétention d'information ?). Nous savons aussi combien il est difficile de conduire des opérations de recherche qui exigent préalablement la constitution d'un corpus de données. Nul doute cependant que la « judiciarisation » d'outre-atlantique nous touchera tôt ou tard. La mise en ligne de rapports d'expertise sur le site du ministère de l'équipement (pour l'effondrement du chantier Meteor en 2003, pour le terminal de Roissy en 2005) constitue à ce titre une nouveauté encourageante et un signal fort. ■

... Le frein majeur résulte, dans notre culture, de la frilosité qu'ont les professionnels à faire part des accidents ou des situations de quasi-accident...



Photo D. Chuaï/groupe Préventique

11. Hatamura, 2006.

Une bibliographie est disponible sur demande à edition@preventique.org.