

Base de données défaillance

COORDONNATEUR : H. NIANDOU

AUTEURS : A. TALON, D. BREYSSE, H. NIANDOU, L. PEYRAS, R. HAROUMI.

Table des matières

Objectifs	7
Introduction	9
I - Généralités – REX.	11
A. Différentes sortes de REX.....	11
B. Méthodologie des "études de cas" de défaillances de structures.....	12
C. Exemples de cas classiques ayant entraîné des modifications des règlements et des comportements des constructeurs.....	14
D. Quelques considérations générales sur le comportement des systèmes...	15
E. Les DSC, "déficits systémiques cindynogènes".....	15
F. PROBLÈMES - CLÉS EN CONCEPTION DES OUVRAGES.....	15
G. Classification des accidents de structures. Base de données, base de connaissances.....	17
II - Défaillances de ponts	21
A. Tay bridge, estuaire, Ecosse, Grande-Bretagne - 28 décembre 1879.....	21
1. Synthèse des faits.....	21
2. Analyse des faits.....	21
3. Iconographie (photographies, dessins, films...) - Le Tay bridge avant - après :.....	22
4. Leçons retirées – conséquences :.....	27
B. Hyatt Regency Walkway, Kansas City, Missouri, Etats-Unis - 17 juillet 1981.....	28
1. Synthèse des faits.....	28
2. Analyse des faits.....	28
3. Iconographie (photographies, dessins, films...).....	29
4. Leçons retirées – conséquences.....	31
C. Hintze Ribeiro, sur le Douro, Portugal, "Pont de fer", entre Entre-Os-Rios et Castelo de Paiva - 4 mars 2001.....	32
1. Synthèse des faits.....	32
2. Analyse des faits.....	32
3. Iconographie (photographies, dessins, films...).....	33
4. Leçons retirées – conséquences.....	33
D. Viaduc de la Concorde, à Laval (Canada) - 30 septembre 2006.....	34
1. Synthèse des faits.....	34
2. Analyse des faits.....	34

3. Iconographie (photographies, dessins, films).....	35
4. Leçons retirées – conséquences.....	36
E. I 35W Minneapolis (EU) - 1er aout 2007.....	36
1. Synthèse des faits.....	36
2. Analyse des faits.....	37
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	37
4. Leçons retirées – conséquences.....	38
5. Responsabilités.....	40
III - Défaillances de tunnels	41
A. Gerrards Cross, "Tesco tunnel", Buckinghamshire, Grande-Bretagne - 30 juin 2005	41
1. Synthèse des faits.....	41
2. Analyse des faits.....	41
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	41
4. Leçons retirées – conséquences.....	43
IV - Défaillances de bâtiments	45
A. Ronan Point, Canning Town, Londres,tour de 22 étages, Grande-Bretagne -16 mai 1968.....	45
1. Synthèse des faits.....	45
2. Analyse des faits.....	45
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	46
4. Leçons retirées – conséquences.....	48
B. Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, Centre nautique - 16 février 2004.....	53
1. Synthèse des faits.....	53
2. Analyse des faits.....	53
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	54
4. Leçons retirées – conséquences.....	57
V - Défaillance de barrages, digues et retenues	59
A. Défaillance du barrage de Malpasset.....	59
1. Synthèse des faits (CIGB, 74).....	59
2. Analyse des faits (CIGB, 74).....	60
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	61
4. Leçons retirées - conséquences (CIGB, 74).....	69
B. Défaillance du barrage de Bouzey.....	69
1. Synthèse des faits (CIGB, 74).....	69
2. Analyse des faits (CIGB, 74).....	70
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	70
4. Leçons retirées - conséquences (CIGB, 74).....	76
C. Défaillance du barrage de Tigra.....	77
1. Synthèse des faits (CIGB, 74).....	77
2. Analyse des faits (CIGB, 74).....	78
3. Iconographie (photographies, dessins, films.....)	78
4. Leçons retirées - conséquences (CIGB, 74).....	79
Conclusion	81
Glossaire	83
Bibliographie	85
Index	87



Objectifs



L'intérêt de collecter toutes les informations relatives aux défaillances de structures est essentiellement pédagogique. On apprend davantage au travers d'expériences malheureuses que par les réalisations à succès, surtout pour celui qui est à l'origine de la faute, s'il y en a une. Celui qui est à l'origine d'une faute ayant entraîné une défaillance a évidemment tendance à cacher son erreur, pour protéger son image ou celle de la société qui l'emploie. Or l'intérêt général est de faire partager le savoir au plus grand nombre, pour accroître leurs connaissances.

Le premier objectif de la capitalisation de l'expérience est de constituer une bibliothèque de "cas" (on parle alors d'"études de cas") relatant de manière critique l'expérience acquise par l'intermédiaire de différents cas particuliers de défaillances, quelles que soient leur origine. Mises en forme par des experts, ces études de cas permettent la construction de "bases de données"

Le deuxième objectif, finalement le plus important, est de transmettre au plus grand nombre l'expérience ainsi recueillie. Le résultat est ainsi d'accroître la compétence des acteurs. Les acteurs concernés qui sont désireux de mettre à jour leurs connaissances, soit isolément soit en groupe forment une communauté d'"apprenants". Les moyens de la diffusion des connaissances sont les conférences, les publications, les congrès, les stages de perfectionnement des acteurs intervenant dans les divers types de constructions, et bien, sûr Internet.

Introduction

Pour mémoriser les circonstances de **défaillances** de structures du passé (capitalisation), il faut recueillir toutes les informations possibles permettant la compréhension de chacun de ces accidents. Cette recherche d'informations s'apparente à une enquête policière où le plus petit indice peut contribuer à la reconstitution du scénario de la défaillance. Le recueil et l'analyse critique des éléments d'information mis bout à bout constituent le **retour d'expérience (REX)**.

Descriptif rapide des cas retenus :

- **1879 – Tay Bridge (GB)** : effondrement d'un pont métallique au passage d'un train, sous l'effet du vent (responsabilité du concepteur, manque de contrôle, mauvaise qualité des matériaux, problèmes d'inspection).
- **1895 – Barrage de Bouzey, Belfort (France)** : la rupture du barrage poids en maçonnerie de Bouzey due aux pressions internes et à des sous-pressions.
- **1917 – Barrage de Tigra (Inde)** : la rupture du barrage poids en maçonnerie de Tigra due à une faille par éboulement sur un plan de stratification.
- **1940 – Pont de Tacoma (USA)** : effondrement d'un pont suspendu, sous l'effet du vent. Couplage aéroélastique, illustrant des limites dues au déficit de connaissance sur des ouvrages innovants.
- **1959 – Barrage de Malpasset, Département du Var sur la rivière Reyran (France)** : la rupture du barrage voûte de Malpasset due à des sous-pressions.
- **1968 – Ronan Point (GB)** : effondrement d'une partie de tour d'habitation, suite à une explosion (illustration du manque de robustesse + effets d'une construction rapide, à faible coût, conséquences sur les règlements).
- **1981 – Hyatt Regency, Kansas City (USA)** : rupture d'une passerelle sous le poids de la foule, causé par un défaut de conception d'assemblage, dû au manque de communication entre les constructeurs, et au manque de contrôle (responsabilité, changements de conception, contrôle).
- **1992 – Furiani, Bastia (France)** : effondrement d'une tribune métallique de stade. Illustration des effets d'un contrôle insuffisant sur une structure provisoire.
- **2001 – WTC (USA)** : effondrement des tours jumelles, consécutif à leur percution par des avions provoquant un gigantesque incendie.
- **2001 – Pont Hintze Ribeiro (Portugal)** : rupture d'un pont métallique au passage d'un autocar. Illustre le problème des ouvrages vieillissants, mal entretenus (corrosion), conséquences politiques.
- **2003 – Auguste Perret (France)** : effondrement dans une cour d'école provoquée par la rupture d'un tunnel.
- **2004 – Transvaal Park, Moscou (Russie)** : effondrement d'une coupole en béton armé. Problème de conception (structure sans redondance, de calcul et poids probable du contexte politico-économique, neige).
- **2005 – Tunnel de Gerrards Cross (GB)** : effondrement d'un tunnel en coque souple construit en tranchée, causé par un défaut de phasage de remblaiement (phasage de travaux mal adapté, impacts sociaux, conséquences économiques).

-
- **2006 - Viaduc de la Concorde, à Laval (Canada).**
 - **2007 - I 35W Minneapolis (EU).**



Généralités – REX.

Différentes sortes de REX	11
Méthodologie des "études de cas" de défaillances de structures	12
Exemples de cas classiques ayant entraîné des modifications des règlements et des comportements des constructeurs.	14
Quelques considérations générales sur le comportement des systèmes.	15
Les DSC, "déficits systémiques cindynogènes".	15
PROBLÈMES - CLÉS EN CONCEPTION DES OUVRAGES.	15
Classification des accidents de structures. Base de données, base de connaissances.	17

A. Différentes sortes de REX

Au total, suivant le point de vue d'où l'on se place, on peut identifier une dizaine de manières de retours d'expérience : phénoménologique, ergonomique, organisationnel, intuitif et pragmatique, audit patrimonial, missions flash à chaud (type AFPS), enquêtes judiciaires, résultats et rapports de commissions d'enquêtes ad hoc, retour d'expériences à caractère économique (assurances).

- **Intuitif et pragmatique** : Analyse des faits fondée sur les causes primaires, celles qui semblent s'imposer à l'évidence.
- **Audit patrimonial** : État des lieux d'un patrimoine immobilier, en vue de planifier un programme de réparation ou d'inspections préventives.
- **Missions flash** : Envoi d'une équipe de spécialistes sur les lieux d'une catastrophe, afin de relever les circonstances et causes des effondrements, par exemple suite à un séisme, comme le pratique systématiquement l'AFPS, missionnée par le Ministère de l'écologie et du développement durable.
- **Enquêtes judiciaires** : Enquêtes déclenchées par la justice suite à un accident ayant occasionné des victimes ou des dégâts notables.
- **Rapports de commissions ad hoc** : Enquêtes particulières ayant nécessité la constitution d'une commission d'experts, après un accident majeur comme l'incendie du tunnel du Mont-Blanc, ou l'effondrement du terminal 2E de l'aérodrome Charles de Gaulle.
- **Analyse de la gestion de crise** : Examen du déroulement d'un événement majeur, analyse du comportement et des réactions du public, des

propriétaires d'installations et de la réactivité des autorités et services publics dans le traitement de l'événement (« crise »).

Par exemple à l'occasion des tempêtes de 1999, d'inondations, du blocage des automobilistes sur une autoroute après de sévères chutes de neige.

- **Ingénierie forensique** : Critiques en profondeur d'accidents passés, majeurs ou représentatifs, à la lumière de l'état des connaissances actuelles ou passées, avec un réexamen des documents d'expertise et judiciaires rendus disponibles avec l'ancienneté des événements.
- **Analyses économiques** : Études statistiques de collections de rapports d'expertises techniques, des coûts des accidents à la collectivité et aux compagnies d'assurances. Études qui vont conditionner le réajustement des primes d'assurances.

B. Méthodologie des "études de cas" de défaillances de structures

Les cases sont remplies dans la mesure où les données correspondantes sont disponibles et/ou pertinentes.

Item	Description et Commentaires
	Origine de l'événement: naturel ou accident humain Particularités, matériaux, système constructif (brevets?) Traditionnel ou innovant (avis technique?). Hypothèses. Risques acceptés
1	Indique le temps de latence de l'accident, donne aussi une idée sur les progrès réalisés depuis
2	Propriétaire ou gestionnaire. Hypothèses imposées. Utilisateur
3	Autorité en charge de l'ouvrage
4	Circonstances (résumé)
5	Date, heure, signes avant-coureurs, alerte, si possible chronologie, témoignages.
6	Victimes, désordres Incidence sur les fonctions vitales de la région, du pays Etat des infrastructures, réseaux de communication, moyens d'évacuation Efficacité des services de l'état
7	Historique des incidents antérieurs et des suites données à ces incidents (exemple: incendies dans les tunnels, déformations anormales, glissement de terrain)
8	Présence de signes avant-coureurs Attribution des marchés, procédures. Répartition des tâches Coordination, surveillance. Problèmes d'interfaces entre concepteurs exécutants, client; circulation de l'information.
9	Existence de problèmes lors de la conception/exécution Suites judiciaires Existence d'expertises Responsabilités
10	Causes Principale secondaires Problèmes techniques (ex: flambement, poinçonnement, etc.) Investigations géotechniques Erreur humaine (conception, exécution, absence de contrôle) superposition d'erreurs Facteur inconnu lors de la conception
11	Reconstitution du scénario de défaillance Evènement déclencheur Existence d'un effet domino Facteurs aggravants
12	Problèmes éthiques ou déontologiques Compétence des responsables, conflits d'intérêts Un aspect important, souvent occulté, à mettre en relief avec toutes les précautions d'usage
13	Remèdes apportés
14	Solutions techniques
15	Synthèse, Leçons à retenir
16	Sources Articles, photos, rapports. Disponibilité. Bibliographie

Tableau 1 : Exemple de formulaire de recueil de données d'accidents.

Le traitement de l'information concernant les cas étudiés doit être effectué avec prudence, surtout si le dossier n'est pas clos et jugé.

Il est clair que suivant le type d'aléa (séisme, inondation, glissement de terrain, écoulement d'immeuble, etc.), les manifestations du sinistre ne sont pas les mêmes. Les dommages subis par les structures lors d'un tremblement de terre sont souvent typiques du déficit de sécurité de l'élément qui atteint le premier sa limite. Pour caractériser ces défaillances, il faut disposer de témoignages et de documents photographiques, connaître la configuration du bâtiment avant son écoulement, les hypothèses adoptées lors de sa conception. Comparer avec les bases de données existantes.

Le traitement post-accident (réparation, démolition, reconstruction, mesures de surveillance) fait partie des données à recueillir. On pourra aussi s'intéresser aussi aux mesures prises pour le confortement d'ouvrages (ou de sites) devenus

dangereux (par exemple travaux de confortement de la tour de Pise ou pour traiter l'enfoncement de la ville de Venise, Basilique Saint-François à Assise, etc.).

C. Exemples de cas classiques ayant entraîné des modifications des règlements et des comportements des constructeurs.

Pont d'Angers, 1850	Après l'écrasement 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 de l'aérodynamique des ponts suspendus
Incendie du 5/7, St Laurent du Pont	Modification de la législation incendie en France.
Séisme d'Orléansville, Algérie, 1954	Premier règlement parasismique français AS55, applicable à l'Algérie.
Écrasement 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 "progressive collapse" dans les règlements anglais et américains
Incendie du tunnel du Mont-Blanc, 1999	Revision de la sécurité de l'ensemble des tunnels français, et modification de la réglementation
Tempêtes de décembre 1999 en France	Retours d'expérience, sur le comportement des bâtiments scolaires (Éducation Nationale) et sur la remise en état des lignes électriques (EdF).
Écrasement des tours jumelles du WTC, New-york, 2001	Révision des règles de construction portant notamment sur la résistance au feu et les capacités d'évacuation. Accentuation des recommandations de "robustesse", définie (incomplètement) comme le fait d'éviter un endommagement disproportionné par rapport à l'agression initiale.

Tableau 2 : Exemples de cas classiques ayant entraîné des modifications des règlements et des comportements des constructeurs.

D. Quelques considérations générales sur le comportement des systèmes.

Les structures constituent des systèmes mécaniques composés d'éléments physiques assemblés en vue de répondre à une fonction pratique. La conception de ces systèmes et leur dimensionnement sont le résultat d'études réalisées par des individus compétents. Ces individus sont des membres d'une organisation (société d'études, entreprise) qui constitue un système, non plus mécanique, mais humain cette fois. Ces deux systèmes forment conjointement un système socio-technique composé d'éléments inertes et d'hommes en principe compétents mais qui sont faillibles. Les organisations évoluent dans un environnement global (marché, environnement naturel, actualité du marché du travail) et les individus sont soumis au stress (délais d'études, coûts) imposé par le marché et leur hiérarchie. Le management des organisations, responsable de l'affectation des ressources relatives à un projet donné, peut être à l'origine de dysfonctionnements dans l'organisation.

Or, il se trouve que dans un très grand nombre de cas, les expertises invoquent une erreur humaine. Ces erreurs très diverses proviennent presque toujours de la politique du management au sein des organisations.

E. Les DSC, "déficits systémiques cindynogènes".

La science des dangers étant dénommée "**cindynique**", les déficits systémiques porteurs de dangers ont été répertoriés par les cindyniciens^o:

- **DSC1 : Culture d'infaillibilité.**
- **DSC2 : Culture de simplisme.**
- **DSC3 : Culture de non-communication.**
- **DSC4 : Culture nombriliste.**
- **DSC5 : Subordination des fonctions de gestion du risque aux fonctions de production.**
- **DSC6 : Dilution des responsabilités. Non-explication des tâches de gestion des risques.**
- **DSC7 : Absence d'un système de retour d'expérience.**
- **DSC8 : Absence d'une méthode cindynique dans l'organisation.**
- **DSC9 : Absence d'un programme de formation aux cindyniques adapté à chaque catégorie de personnel.**
- **DSC10 : Absence de planification des situations de crise.**

F. PROBLÈMES - CLÉS EN CONCEPTION DES OUVRAGES.

Les défaillances sont dans leur grande majorité dues à des erreurs humaines; quel que soit le type de structure, quel que soit le phénomène déclencheur de la défaillance. C'est ce qui apparaît après analyse des événements, reconstitution du ou des scénarios de rupture.

Ces erreurs (qui peuvent être multiples sur un même projet) sont le fait d'un ou plusieurs des acteurs du projet, de la maîtrise d'ouvrage à l'exploitant en passant

bien sûr par l'exécution.

La réalisation d'un projet de construction (ou d'un aménagement) se présente comme une somme de processus dont certains sont séquentiels tandis que d'autres se déroulent en parallèle. C'est dire que l'on a affaire à un système. Ce système peut être représenté par un diagramme hiérarchisé décrivant les étapes successives du projet à partir du moment où celui-ci est déterminé.

La phase la plus importante et la plus critique est celle de la conception, puisqu'elle est située à la racine de l'arborescence. C'est à cette étape que sont faits les choix les plus déterminants de la construction : choix des formes, des volumes, des matériaux, des techniques d'exécution. Sans oublier le choix du site, qui peut favoriser ou handicaper le projet, du fait du sol, des conditions climatiques, de l'exposition aux aléas naturels. Souvent le site est imposé en raison de contraintes budgétaires, politiques ou géographiques et les concepteurs n'ont qu'à s'en accommoder.

Les concepteurs forment l'équipe de maîtrise d'œuvre que le maître d'ouvrage a sélectionnée pour cette tâche. Cette équipe a pour mission d'établir le dossier qui sera présenté aux entreprises en vue du choix des exécutants par le maître d'ouvrage suivant les conseils du maître d'œuvre. Autour de l'architecte, on trouve l'ingénieur de structures et les différents spécialistes des fonctions telles que climatisation, distribution de fluides, acoustique, ergonomie, et autres spécialistes en fonction de la nature du bâtiment projeté.

Lors de la conception, tous les choix stratégiques sont faits. Les formes, les trames de l'ossature, les matériaux sont fixés. Ces éléments vont conditionner pour une large part les modes d'exécution.

Il est évident que la première des qualités de la maîtrise d'œuvre doit être sa compétence. Chaque membre de l'équipe doit être qualifié pour la part qu'il aura à accomplir. Ce choix est du ressort et de la responsabilité du maître d'ouvrage et c'est l'avenir de son projet qu'il met en jeu.

L'arbre générique "matériau-structure" de Denys Breysse (Clermont-Ferrand 25/10/05) met en relief le rôle des acteurs, l'importance des contrôles. Tous les losanges situent les phases de contrôle, ou les points d'arrêt du projet. Ce sont des procédures qui pour être systématisées devraient être intégrées dans un **plan d'assurance qualité (PAQ)** propre au projet. A posteriori, il est très difficile de savoir si ces procédures ont bien été appliquées et s'il y a eu une communication efficace entre les membres de l'équipe de conception, sauf si l'on peut en retrouver une trace écrite.

L'application de procédures préalablement codifiées (réception des documents utiles, transmission des dessins) conduit à la traçabilité des événements dans la chaîne.

Le plan d'assurance qualité peut être prévu dans les cahiers des charges qui s'appliquent à chaque acteur. C'est le maître d'ouvrage(MO) ou l'AMO (assistance à MO), ou à défaut la maîtrise d'œuvre qui imposeront cette procédure. Elle n'est pas obligatoire, sauf peut-être pour certains marchés publics. On n'oubliera pas que la "certification ISO" est une procédure extrêmement coûteuse, qui ne peut être exigée des petits bureaux d'études et des PME.. Mais l'assurance qualité n'implique pas nécessairement la certification.

A défaut de PAQ obligatoire, les acteurs sont renvoyés à leurs codes d'éthique respectifs.

C'est pourquoi chez les anglo-saxons, les cas de défaillances de structures sont souvent rangés sous l'étiquette "problèmes éthiques". Il faut rappeler que chez eux, la pratique du génie civil est soumise à des conditions beaucoup plus contraignantes qu'en France. Cela n'est quand même pas suffisant pour éviter les accidents.) Les procédures à appliquer, variables suivant l'importance du projet, peuvent être intégrées dans un recueil de recommandations, un manuel

d'assurance-qualité, ou un code bonnes pratiques, spécifiques à chaque acteur.

Processus, ressources, compétences.

Reprenant la définition de J.L. Tarondeau : le processus « est un ensemble d'activités organisées en réseau, de manière séquentielle ou parallèle, combinant et mettant en œuvre de multiples ressources, des capacités et des compétences, pour produire un résultat ou output ayant de la valeur pour un client externe ».

La conception en génie civil est bien un problème d'affectation de compétences.

« Combiner des ressources utilement dans les processus exige des compétences. La compétence est définie comme aptitude à combiner des ressources pour mettre en œuvre une activité ou un processus d'action déterminé ».

Le danger le plus grand est celui de la rupture fragile, donc à éviter à tout prix, puisqu'il entraîne des ruptures brutales, sans signaux avertisseurs préalables. (voir matériaux sans réserve de résistance en plasticité, aciers ayant un faible allongement à rupture, composés de fibres de carbone- nécessitant un fort coefficient de sécurité).

Éléments sensibles et points qui requièrent une attention particulière :

- Fondations (portance, tassement, présence d'eau, etc.).
- Éléments porteurs, éléments de transfert.
- Contreventements, et transfert en fondation.
- Examen des éléments soumis à des actions cycliques (fatigue, séisme).
- Nœuds d'assemblages, joints de dilatation et de rupture.
- Interfaces (sol-structure, ossature-couverture, éléments coupe-feu).
- Prise en compte de la dégradation dans le temps (béton, appuis, joints, corrosion).
- Vérification des situations transitoires, cours travaux.
- Établissement des documents d'exécution.
- Appuis, ancrages, enrobage, précontrainte.
- Conformité des interfaces avec les hypothèses de l'étude.
- La production des plans est un autre point sensible du projet.
- Transmission de l'ingénieur au dessinateur-projeteur (ou DAO).
- Vérification des dessins (autocontrôle interne).
- Modifications (veiller à la traçabilité, mise à jours des plans corrélés).
- Transmission des dessins modifiés aux autres acteurs et notamment contrôle externe.
- Lisibilité des plans, dessins suffisamment explicites pour l'entreprise...
- Incidence sur le stress, les délais.

G. Classification des accidents de structures. Base de données, base de connaissances.

Il y a un grand nombre de possibilités de classement, et par conséquent difficulté de trouver un mode pertinent de regrouper et présenter l'expérience accumulée. Dans un module précédent on a pu voir d'autres manières, notamment en fonction des acteurs du projet.

Dans un premier temps au moins, il s'agit de regrouper les leçons tirées des études de cas pour servir de matériel didactique.

Ce qui est le plus directement parlant: le type d'ouvrage, et en quoi il est fait.

Ensuite, quelle est la situation en apparence évidente qui a pu déclencher le sinistre ?

Deux ou trois paramètres paraissent suffisamment caractéristiques pour se prêter à une représentation plane (matricielle) simple :

- Type de structure.
- Type de matériau et environnement.

Le matériau de base de la structure peut d'ailleurs être qualifié d'**environnement interne**, par opposition aux variables environnementales externes.

La morphologie, la fonctionnalité, le matériau de base d'un ouvrage, son environnement jouent un rôle particulier dans la conception et la vie des ouvrages. C'est d'abord à partir de catégories simples que l'on pourra rechercher des invariants. Il n'y a pas beaucoup de points communs entre une digue en terre et un gratte-ciel, si ce n'est par les fondations et le rôle de l'eau. Il y a peut-être plus de points communs entre une grande couverture métallique et une structure métallique, du fait du métal, de la corrosion, de la fatigue, de la fiabilité des assemblages. Au moins dans un premier temps, le classement par catégories d'ouvrages peut être plus pratique, et le classement facilité par quelques mots-clés complémentaires pour caractériser au mieux une structure accidentée donnée.

Matériau	Matériau « environnement interne »						Environnement externe		
	Béton	Acier	composite	Maçonnerie	Précontraint	Bois etc.	Sols et Géotechnique	En rapport avec l'eau	Phénomène naturel
Structure									
Bâtiment d'habitation/bureaux									
Bâtiments d'activités									
Bâtiments industriels									
Couvertures									
Ponts									
Structures à câbles									
Coques, Réservoirs									
Structures maritimes									
Travaux routiers									
Soutèrrements									
Digues, barrages									
Tunnels									
Travaux souterrains									
Autres									

Tableau 3 : Représentation plane (matricielle) simple.

On peut faire quelques remarques complémentaires sur la nature des accidents répertoriés que l'on peut reclasser :

1. Accidents en rapport avec le sol et avec l'eau.

2. Ouvrages en béton, accidents en relation avec un procédé de préfabrication.
3. Ouvrages en acier, accidents en rapport avec les propriétés des structures en acier : sensibilité aux déformations, au flambement, à la fatigue, à la corrosion...
4. Accidents dus à une erreur de principe de modélisation, particulièrement dans les grandes structures spatiales et couvertures en acier.
5. Accidents éthiques et organisationnels (fraudes, pressions sur les délais, etc.).



Complément

www.scoss.org.uk¹

*American Society of Civil Engineers (ASCE)*²

http://www.cedip.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/ftech10_cle2954c9.pdf³

Bouvier, A., *Management et sciences cognitives*, PUF, 2004.

Tarondeau, J.Cl., *Le management des savoirs*, PUF, 1998.

Simon, H.A., *Les sciences de l'artificiel*, Gallimard, 2004.

Bordères C., Panisse G., *capitaliser une expérience*, Fiche CEDIP N°10,1999.

1 - <http://www.scoss.org.uk/>

2 - <http://www.ascetcfe.org/>

3 - http://www.cedip.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/ftech10_cle2954c9.pdf

Défaillances de ponts



Tay bridge, estuaire, Ecosse, Grande-Bretagne - 28 décembre 1879.	21
Hyatt Regency Walkway, Kansas City, Missouri, Etats-Unis - 17 juillet 1981.	28
Hintze Ribeiro, sur le Douro, Portugal, "Pont de fer", entre Entre-Os-Rios et Castelo de Paiva - 4 mars 2001.	32
Viaduc de la Concorde, à Laval (Canada) - 30 septembre 2006.	34
I 35W Minneapolis (EU) - 1er aout 2007.	36

A. Tay bridge, estuaire, Ecosse, Grande-Bretagne - 28 décembre 1879.

1. Synthèse des faits

Conçu par l'ingénieur architecte Thomas Bouch, le pont ferroviaire du Tay est inauguré le 26 septembre 1877 sur la ligne Edimbourg-Dundee. Il est alors le plus long pont du monde, avec 85 travées. La portion centrale de l'ouvrage était constituée de 13 travées de 60 mètres de portée à 27 mètres au-dessus des eaux. Le 28 décembre 1879, une forte tempête s'abattit sur l'Écosse avec des vents de force 10 à 11 sur l'échelle de Beaufort, provoquant l'effondrement du pont sur sa partie centrale lors de la traversée d'un train, faisant environ 75 victimes bloquées dans la structure du pont échouée.

Dès le lendemain, on put mesurer l'ampleur des dégâts. Toute la charpente des hautes poutres avait disparu. Les poutres entre les piles 28 et 41 étaient tombées dans le Tay, faisant le train prisonnier de la charpente détruite.

2. Analyse des faits

Plusieurs causes ont été évoquées, ayant pu causer, seules ou en conjonction, l'effondrement : des défauts de conception et de réalisation, l'effet du vent, le passage du train. Dans les 13 travées de la partie centrale de l'ouvrage, le train circulait entre les poutres porteuses, contrairement aux travées latérales où le train roulait sur les poutres porteuses, de manière à ménager un tirant d'air plus grand pour le passage des bateaux. Dans cette partie, la charpente constituant les « high girders » offrait une plus grande surface au vent, d'où une vulnérabilité plus élevée.

Les colonnes en fer supportant ces travées étaient de médiocre qualité et les assemblages défectueux n'avaient pas fait l'objet d'une inspection assez sévère (charge de rupture mesurée de 200 kN au lieu des 600 kN attendus). L'enquête conclut que le pont avait été « mal conçu, mal construit et mal entretenu ». Elle révéla que les défauts s'étaient développés au cours de l'exploitation et que les assemblages des barres de contreventement avaient un jeu, qui rendait le contreventement sans effet.

Le vent a induit des contraintes dans la structure, et des déformations horizontales et verticales (balancement). Le pont avait été conçu pour une pression de vent de 100 kPa, sans doute inférieure à celle dont il aurait fallu tenir compte dans l'environnement sévère de l'estuaire.

Sir Thomas Bouch fut considéré comme responsable pour ne pas avoir pris en compte des efforts de vent suffisants. Le « vent de calcul » était très inférieur au vent soufflant pendant la tempête. De même, la résistance réelle des contreventements était inférieure à la résistance de calcul (la déformation horizontale de la charpente a provoqué l'arrachement des fixations).

D'autres causes ont été invoquées (vitesse excessive du convoi, qui aurait pu dérailler et heurter la structure, ou fatigue causée par la répétition des charges), mais elles n'ont probablement pas été à l'origine de la catastrophe.

3. Iconographie (photographies, dessins, films...) - Le Tay bridge avant - après :



Figure 1.1 : Le Tay bridge avant.

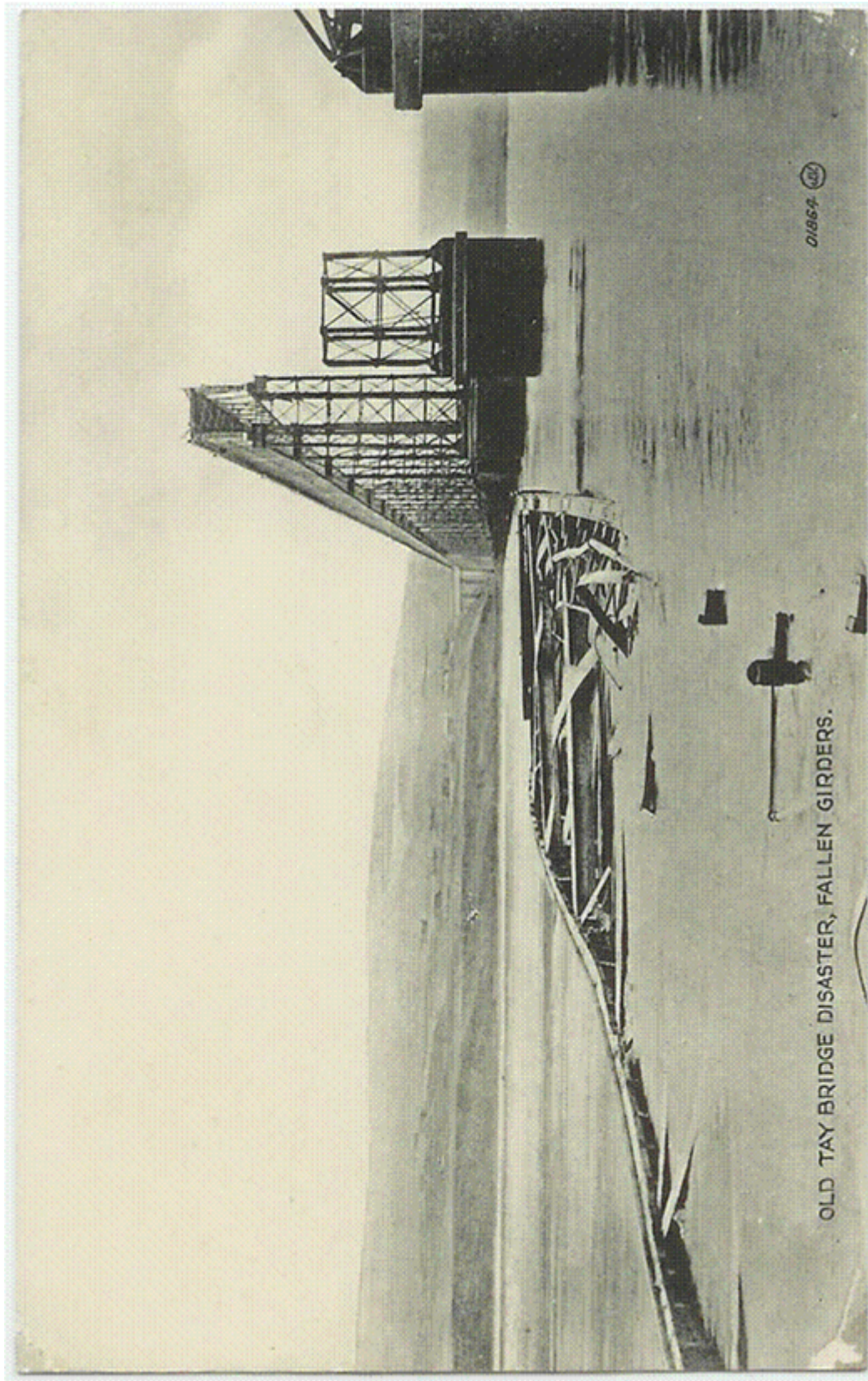


Figure 1.2a : Le Tay bridge après.

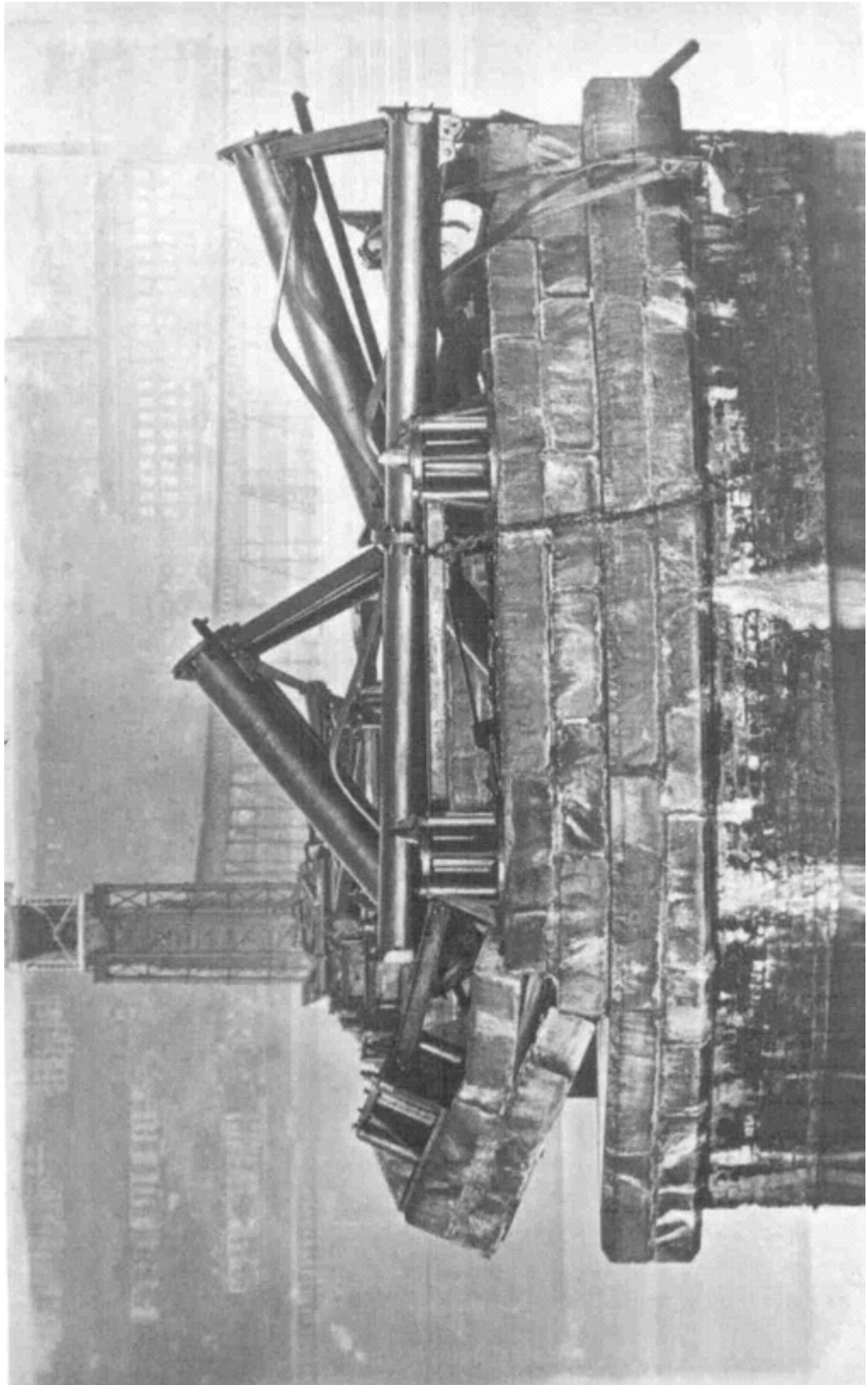


Figure 1.2b : Le Tay bridge après.

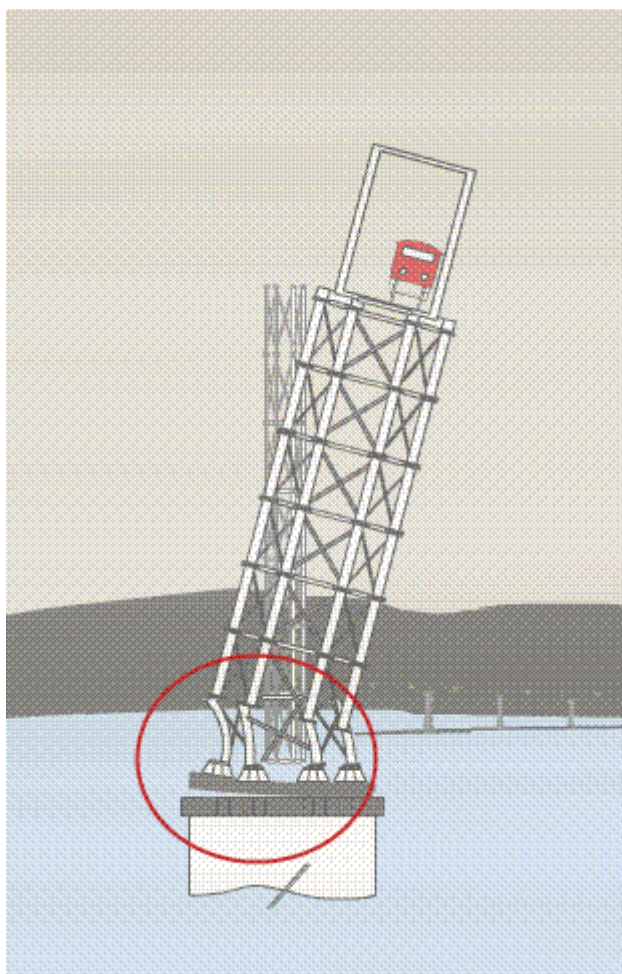


Figure 1.3a :Illustration des effets du vent sur la charpente.

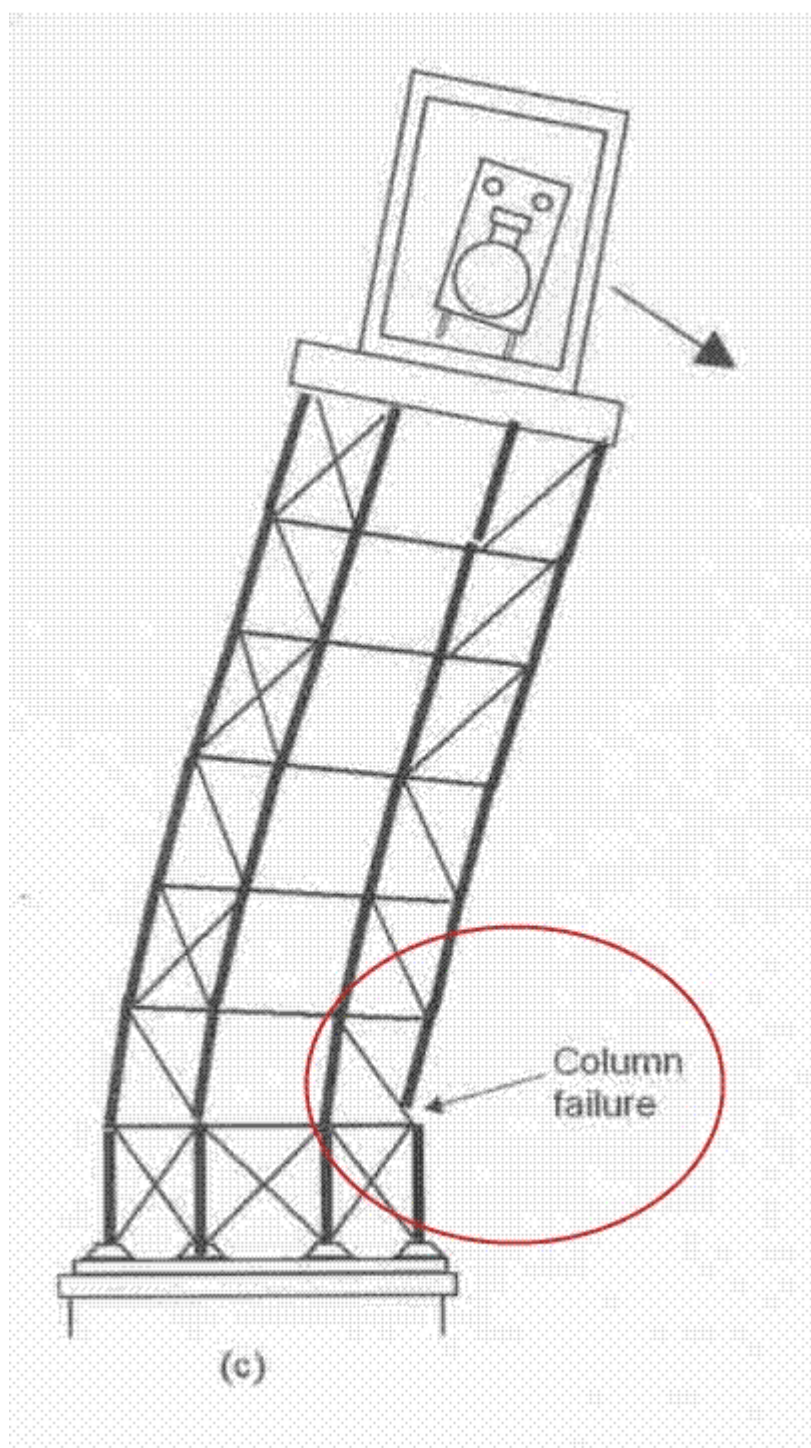


Figure 1.3b : Illustration des effets du vent sur la charpente.

4. Leçons retirées – conséquences :

L'effondrement du pont, ouvert depuis peu, a créé un choc dans la profession victorienne de technologie et a été largement commenté dans la presse de l'époque. L'enquête détruisit la réputation de Sir Thomas Bouch qui mourut moins d'un an plus tard : « Pour ces défauts à la fois dans la conception, la construction et la maintenance, Sir Thomas Bouch est à, selon notre opinion, blâmer. Pour les erreurs de conception il est entièrement responsable ».

Il a conduit à une remise en cause des règles de conception des ponts ferroviaires,

de la prise en compte des effets du vent (pour tenir compte des efforts exercés sur le convoi). La construction du First of Forth prendra en compte des pressions 6 fois supérieures.

Le pont fut reconstruit en 1882 et implanté à 60 pieds en amont du premier ouvrage. Beaucoup de poutres du premier ouvrage ont été réutilisées pour le deuxième. Les bases des piles du premier ouvrage ont été conservées, à titre de témoignage de la catastrophe.



Complément

Martin T. J & MacLeod I. A. The Tay rail bridge disaster - A reappraisal based on modern analysis methods, Proc. Instn Civ. Engrs, 1995 ,108, 77-83.

Sites consultés le 6 juillet 2008 :

<http://www.taybridgedisaster.co.uk>⁴

<http://www.technologystudent.com/struct1/taybrd1.htm>⁵

http://en.wikipedia.org/wiki/Tay_Rail_Bridge⁶

B. Hyatt Regency Walkway, Kansas City, Missouri, Etats-Unis - 17 juillet 1981.

1. Synthèse des faits

L'Hyatt Regency est un hôtel imposant, en service depuis juillet 1980. C'est le 17 juillet 1981 que se produit la plus importante défaillance technique de ce type dans l'histoire des États-Unis.

2000 personnes étaient présentes sur le site, et on dénombre 114 morts et 200 blessés. L'effondrement est dû à un changement de conception du système soutenant les passerelles. Les ingénieurs incriminés (Duncan et Gillum) seront jugés responsables de négligence professionnelle.

L'Hyatt Regency dispose d'un atrium central surplombé par des promenades piétonnes.

L'accident du 17 juillet 1981 est historique, du fait du nombre de morts et des causes de cette tragédie.

En effet, lors d'une compétition de danse organisé par une radio locale sur l'atrium de l'hôtel, à 19h, on assiste à l'effondrement de la quatrième promenade, directement sur l'atrium.

2000 personnes étaient présentes sur le site, et on dénombre 114 morts et 200 blessés

2. Analyse des faits

La première hypothèse émise fut celle d'un phénomène de résonance, phénomène dû aux personnes dansant sur les passerelles, mais la cause mise en évidence après expertise était en fait très simple, l'effondrement est dû à un changement de conception du système soutenant les passerelles par le maître d'ouvrage. En janvier et février 1979, le fabricant des systèmes de suspension des passerelles a modifié leur conception pour simplifier la tâche d'assemblage. Chacun des caissons en acier

4 - <http://www.taybridgedisaster.co.uk>

5 - <http://www.technologystudent.com/struct1/taybrd1.htm>

6 - http://en.wikipedia.org/wiki/Tay_Rail_Bridge

constituant les passerelles devait être traversé de part en part par 6 tiges en acier. Le système modifié comptait 12 tiges : 6 accrochant la passerelle vers le haut, et 6 soutenant la passerelle inférieure. Il s'exerçait donc un double effort, avec un cisaillement important entre les deux tiges. Le fabricant a assuré sous serment avoir transmis l'information au bureau d'études, qui a dénié l'avoir reçue.

Il faut également noter que si il n'y avait pas eu de changement de conception, l'ouvrage aurait quand même violé le code du bâtiment de Kansas City. Les tiges prévues au départ n'auraient supporté qu'une pression de 248 MPa au lieu de 413MPa (soit seulement 60% de la charge maximum). Une solution aurait été l'ajout d'une rondelle afin de répartir l'effort (car dans cette configuration initiale, les écrous seraient passés au travers de la passerelle tôt ou tard).

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)

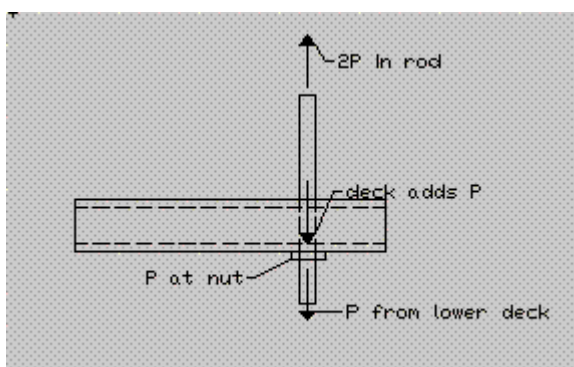


Figure 3.1a : Hyatt Regency Walkway, Schéma RDM.

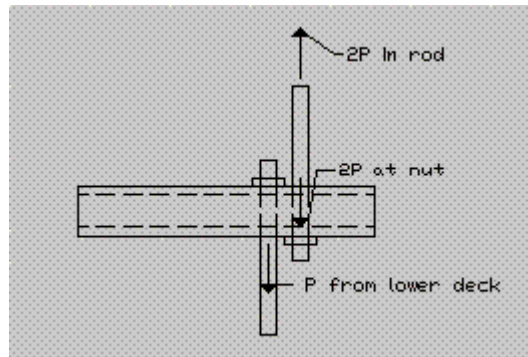


Figure 3.1b : Hyatt Regency Walkway, Schéma RDM.

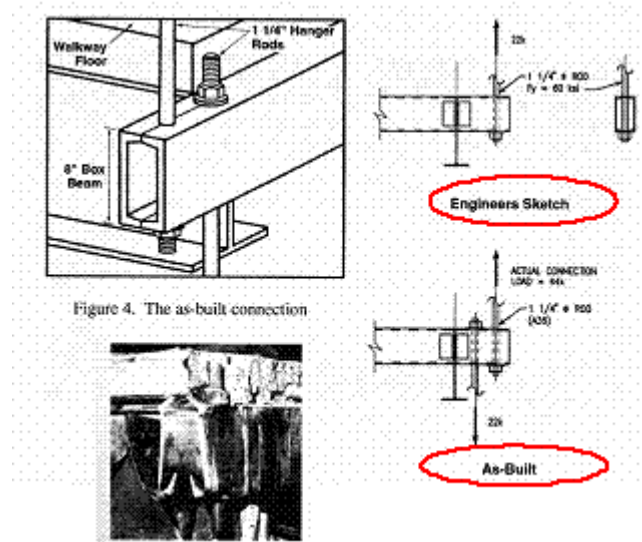


Figure 3.1c : Hyatt Regency Walkway, Schéma RDM.



Figure 3.2a : Hyatt Regency Walkway, après.



Figure 3.2b : Hyatt Regency Walkway, après.

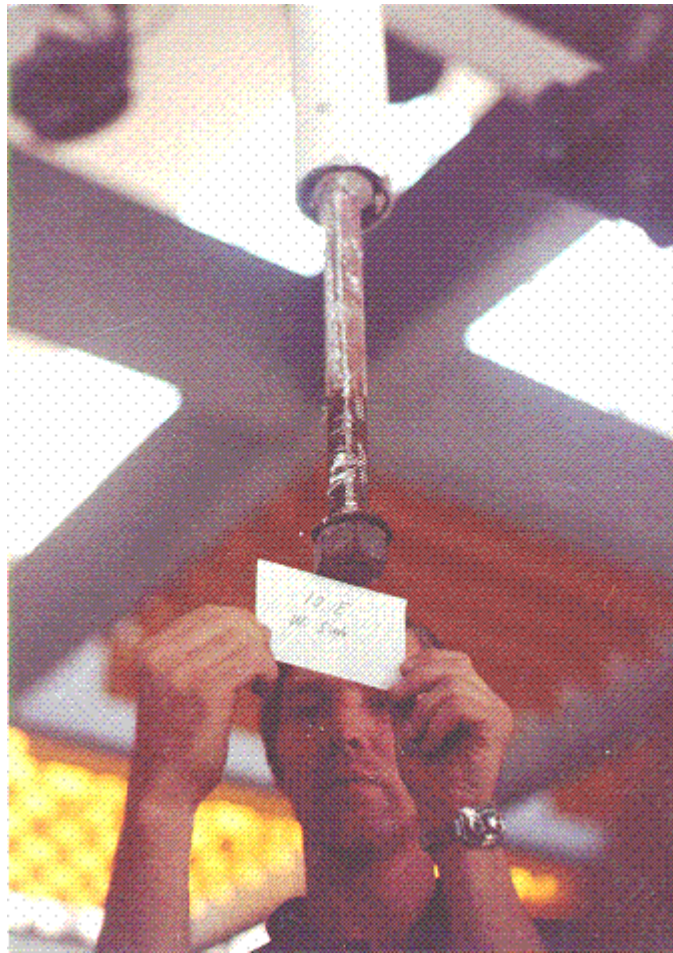


Figure 3.3 : Hyatt Regency Walkway, essai sur matériau.

4. Leçons retirées – conséquences

Cette catastrophe a mis en évidence le problème du manque de procédure lors d'éventuels changements de conception, lors des chantiers. Il faudrait à chaque fois signaler le changement, vérifier sa validité, et avoir l'approbation de l'ingénieur chargé de l'enregistrement du projet.

Dans cette affaire, la responsabilité du maître d'ouvrage a été mise en cause : celui-ci n'a pas vérifié la qualité de son changement de liaison, et n'a fait aucun calcul de vérification. Les responsables (Duncan et Gillum) se sont vus retirer leur permis professionnel et ont subi des sanctions pénales. Plusieurs des compagnies impliquées ont fait faillite.

Cette affaire a marqué les esprits, vu le nombre très important de victimes. Il s'agit véritablement d'un cas de négligence professionnelle. Ce cas a soulevé la question de la responsabilité morale et pénale des ingénieurs, l'éthique technologique. Ceux-ci sont tenus de vérifier autant de fois qu'il le faut leurs calculs, afin de garantir la sécurité des usagers.



Complément

Delatte Norbet, Failure case studies and ethics in engineering mechanics courses, J. of Professional Issues in Engineering Education and Practice, juillet 1997.

Sites consultés le 8 juillet 2008

<http://www.me.utexas.edu/~me179/topics/lessons/case2articles/case2article2.htm>

⁷
<http://ethics.tamu.edu/ethics/hyatt/hyatt1.htm>⁸

C. Hintze Ribeiro, sur le Douro, Portugal, "Pont de fer", entre Entre-Os-Rios et Castelo de Paiva - 4 mars 2001.

1. Synthèse des faits

L'effondrement d'un pont à 21 h 10 a entraîné un autocar transportant 67 passagers et trois voitures dans les eaux du fleuve Douro, dans la région de Porto. Les trois véhicules ont été projetés 50 mètres plus bas, faisant 59 victimes.

Le pont de 200 mètres de portée se composait de six piles maçonnées soutenant un tablier métallique, avec des travées de 50 mètres. Au moment de la catastrophe, le fleuve était en crue et les piles du pont, âgées de 116 ans, n'ont pas résisté. C'est le phénomène d'affouillement qui a entraîné la chute de ce pont.

« Une structure datant de 1886 et des routes... comme on n'en voudrait pas en Bosnie après les bombardements de l'OTAN » tels sont les propos tenus par des habitants du village voisin. Les gens de la région avaient toujours peur de traverser ce pont car tout le monde connaissait son état de délabrement et de vétusté. Le maire avait averti le gouvernement de cet état. Deux mois avant la catastrophe, des habitants avaient bloqué les routes, demandant la construction d'un nouveau pont.

2. Analyse des faits

Dans un encart de la presse française, après l'accident, on pouvait lire que c'est un accident rare en Europe « car les normes de sécurité y sont très strictes »... à croire que le Portugal n'est pas en Europe. Le Portugal est-il victime d'un développement à deux vitesses ? Oui si on lit les propos d'un habitant de Castelo de Paiva : « Le littoral où se trouve la grande majorité de la population et en conséquence la plupart des électeurs, a eu droit à de belles autoroutes et à de belles infrastructures. Mais l'intérieur du pays a été complètement oublié ».

La vétusté de l'ouvrage est la cause majeure de la catastrophe. L'érosion minant les bases du pilier apparaît comme la raison principale de l'effondrement. L'affouillement a été aggravé par les extractions de sable (illégales mais tolérées pendant 20 ans) et la construction de barrages en amont et en aval du fleuve qui ont modifié le lit et le régime d'écoulement des eaux. L'excavation avait été interdite à moins de 10km en amont du fleuve depuis deux ans. Mais des indices d'extractions récentes dans le fleuve en amont du pont ont pu être observées après l'accident.

Le débit du fleuve avait également considérablement augmenté les semaines précédentes, du fait des fortes pluies. Cette combinaison de modification du régime hydraulique du fleuve et de la crue est susceptible d'avoir augmenté le risque d'affouillement. L'ingénieur Antonio Ferreira de Araujo indique que le pilier qui s'est effondré a été construit sur du sable pendant des conditions de basses eaux. Des pieux de bois auraient été employés en fondation de la pile, mais ils n'atteignaient probablement pas la roche en place.

7 - <http://www.me.utexas.edu/~me179/topics/lessons/case2articles/case2article2.html>

8 - <http://ethics.tamu.edu/ethics/hyatt/hyatt1.htm>

Le maire de Castelo de Paiva, Paulo Teixeira ajoute « Quand ce pont a été construit en 1886, il a été conçu pour porter des animaux. Au moment de la catastrophe, il supportait un trafic quotidien de 1.300 véhicules. Cela montre clairement que nos infrastructures portugaises ressemblent plus à celles du tiers monde qu'à celles de l'Europe».

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)



Figure 4.1a : Hintze Ribeiro, sur le Douro, Portugal, "Pont de fer", après.

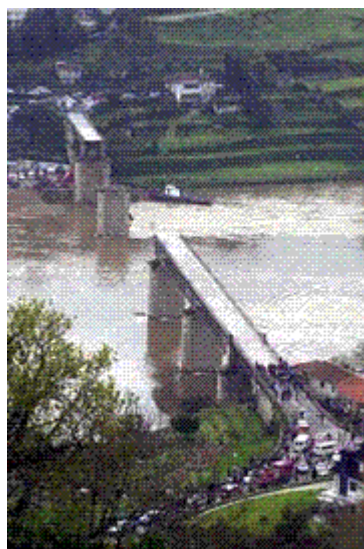


Figure 4.1b : Hintze Ribeiro, sur le Douro, Portugal, "Pont de fer", après.

4. Leçons retirées – conséquences

Des conséquences politiques

Le gouvernement portugais a décrété deux jours de deuil national. Cet accident a pris une ampleur nationale entraînant la démission quasi-immédiate du ministre des Travaux publics, Jorge Coelho. Selon les autorités locales, qui avaient à plusieurs reprises alerté les pouvoirs publics, cette catastrophe était prévisible compte tenu de la vétusté de ce pont et de sa fréquentation : environ 1 800 véhicules le traversaient quotidiennement. Le maire, Paulo Teixeira aurait averti depuis longtemps le gouvernement du danger qu'il représentait pour toute la population et les touristes, dans une région où les infrastructures routières sont en retard.

Lorsque le Premier Ministre s'est rendu sur les lieux, il a été accueilli au milieu des larmes aux cris de « Assassin ! » par les gens du village. Le président du parti social-démocrate (PDS centre droit), chef de file de l'opposition parlementaire a fustigé "le manque de responsabilité" de l'équipe Antonio Guterres critiquée pour son amateurisme.

La semaine suivante, des douzaines de ponts ont été fermés dans tout le Portugal pour procéder à des réparations immédiates. En mai 2001, le Conseil des Ministres a décidé d'une procédure exceptionnelle pour une reconstruction rapide (décret-LO172 A/2001 du 28 mai 2001) d'un ouvrage assurant une liaison essentielle. Le nouveau pont a été achevé en mai 2002, pour un coût de 6,65 millions d'euros. En 2002 des sommes ont été dégagées pour procéder à l'évaluation détaillée des conditions de sécurité de 354 ouvrages d'art dans tout le pays.

Les familles des victimes ont reçu une indemnisation de 50 000 euros. Un procès s'est tenu en avril 2006, pour juger 4 techniciens du service des Routes, pour manquement aux règles techniques, ayant provoqué des victimes et deux responsables de l'extraction du sable. Le procès n'a pas conclu à leur responsabilité et n'a condamné personne. 7 ans après les faits, les familles des victimes ont renoncé à obtenir une condamnation symbolique de l'Etat.



Complément

Sites consultés le 6 juillet 2008

http://en.wikipedia.org/wiki/Hintze_Ribeiro_disaster⁹

http://www.icivilengineer.com/Failure_Watch/Portugal_Bridge/¹⁰

<http://dossiers.publico.pt/noticia.aspx?idCanal=335&id=1321449>¹¹

D. Viaduc de la Concorde, à Laval (Canada) - 30 septembre 2006.

1. Synthèse des faits

Dans la matinée du samedi 30 septembre 2006, un automobiliste circulant sur une voie sous le pont heurte des débris de béton au droit du pont; il téléphone pour signaler ce fait à la mairie de Laval. Un peu plus tard un autre automobiliste empruntant le viaduc remarque une "démarcation" sur le sol et téléphone aux services de police. Quelques minutes plus tard, vers 12h30, une moitié du pont s'effondrait subitement sur la route en contrebas. L'accident qui a causé 5 morts et six blessés a d'autant plus choqué la population qu'en 2000 déjà à Laval, à quelques kilomètres de là, un autre pont, le Viaduc du "Souvenir", s'était effondré en cours de construction.

Très rapidement, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) déclenchait une enquête publique et étendait ses vérifications à tous les ponts de structure analogue à celle du pont de la Concorde, 2200 ouvrages étant par ailleurs considérés comme dégradés.

2. Analyse des faits

Le tablier, de largeur 25 mètres, se composait de 20 poutres-caissons

9 - http://en.wikipedia.org/wiki/Hintze_Ribeiro_disaster

10 - http://www.icivilengineer.com/Failure_Watch/Portugal_Bridge/

11 - <http://dossiers.publico.pt/noticia.aspx?idCanal=335&id=1321449>

préfabriquées et précontraintes, solidarisées par la dalle de béton coulée en place. Ce tablier constituait la travée centrale du pont, de portée 27m50. Cette travée reposait à chaque extrémité sur un corbeau, muni d'un appareil d'appui. Ce corbeau se situait en bout d'une partie de la dalle épaisse en console par rapport au mur d'appui formant culée. Comme toujours, il s'est trouvé des ingénieurs pour déclarer que cet accident était totalement imprévisible (tout en reconnaissant que les infrastructures routières sont dans un état lamentable) car une inspection en 2005 n'avait révélé aucune anomalie.

3. Iconographie (photographies, dessins, films)



Figure 5.1 : Vue du pont effondré.



Figure 5.2 : Détail d'une expérience réalisée en laboratoire. (Rupture en bout de console).

4. Leçons retirées – conséquences

Très peu de temps après l'accident, le MTQ annonçait la fermeture du Viaduc de Blois, puis même sa démolition complète du fait que ce pont avait été construit en même temps, avec les mêmes participants, et dans les mêmes conditions.

On a d'abord pensé mettre en cause le corbeau, du fait que c'est un élément délicat qui nécessite la précision dans la mise en place des armatures, que c'est un endroit difficile à entretenir et à inspecter, et soumis à l'attaque des sels de déverglaçage.

La commission comportait trois personnes désignées comme "commissaires" et responsables de l'ensemble du rapport établi selon les règles applicables aux enquêtes publiques. Ce rapport (2) a été publié le 15 octobre 2007. Il indique que l'effondrement est dû à des causes multiples dont aucune prise isolément n'était de nature à entraîner l'effondrement.

Selon ce rapport, le corbeau d'appui n'est pas à mettre en cause. Cependant ce

type d'appui est proscrit au Québec depuis une vingtaine d'années.

La cause principale vient essentiellement d'une mauvaise conception de la dalle en porte à faux. Celle-ci ne comportait aucune armature transversale pour reprendre l'effort tranchant. La disposition des aciers principaux supérieurs était défectueuse, et le béton n'était pas de qualité suffisante pour résister aux cycles gel-dégel. Au total les consoles n'avaient pas une capacité portante suffisante. Des essais à la rupture de la console "telle que construite", (en s'appuyant sur les dispositions d'armatures relevées sur les fragments retirés des décombres) ont conforté cette hypothèse (voir fig 2, supra, la configuration de rupture).

Par ailleurs, le rapport pointe les insuffisances de l'administration du MTQ en matière de :

- Ambiance de travail dans les services
- Négligences dans la gestion d'ouvrages à risques
- Négligences dans l'application des normes en vigueur
- Inspections périodiques insuffisantes (temps alloués insuffisants)

Ces facteurs "organisationnels" se retrouvent souvent dans ce type d'accident, aux États-Unis également et sont de nature à favoriser l'apparition des causes physiques de défaillance des ouvrages.



Complément

Le dossier de presse du site "Canoe" de Montreal¹² (accédé le 23/06/08)

http://www.cevc.gouv.qc.ca/UserFiles/File/Rapport/rapport_fr.pdf¹³ (en français)

SCOSS, BRIEFING NOTE¹⁴ The partial collapse of the 'de la Concorde' overpass bridge: Laval, Canada

E. I 35W Minneapolis (EU) - 1er aout 2007.

1. Synthèse des faits

Événement, situation, description ouvrage, contexte

Le 1er août 2007 vers 18h05, heure locale, le pont autoroutier « Interstate I-35W » sur le fleuve Mississippi au nord de Minneapolis (Minnesota) s'est subitement effondré. Environ 139 mètres de la travée centrale sont tombés dans le fleuve, 33 mètres plus bas et d'une profondeur de 4m60 à cet endroit. Les travées d'accès se sont aussi effondrées à la suite. Le tablier (en béton) du pont, dont la structure porteuse est constituée par des fermes métalliques (en acier à haute résistance faiblement alliés "HSLA"), représente une longueur de 305m pour une longueur totale (avec les accès) de 579 mètres. Environ 110 véhicules se trouvaient sur la portion effondrée du tablier et 17 voitures sont tombées dans l'eau. Un certain nombre de véhicules sont restés en place sur les parties effondrées. Au total l'accident a fait 13 morts et 145 blessés.

2. Analyse des faits

Compléments contexte, causes probables, etc/ Commentaires autres

L'accident a provoqué la stupeur dans le public. Le maire de Minneapolis a déclaré

12 - <http://lcn.canoe.ca/lcn/dossiers/archives/2006/10/20061001-091755.html>

13 - http://www.cevc.gouv.qc.ca/UserFiles/File/Rapport/rapport_fr.pdf

14 - <http://www.scoss.org.uk/publications/rtf/SC08%20009%20-%20de%20la%20Concorde%20briefing%20note%20-%20February%2008.pdf>

sur les lieux:" Maintenant beaucoup de gens dans cette ville regardent les ponts avec un œil soupçonneux. Et ils ont raison. Il est inexcusable que les gens au volant de leur voiture dans une métropole américaine aient besoin de réfléchir aux risques d'effondrement du pont".(NYT 3 aout 2007).

Un professeur émérite de l'université de Minneapolis, le Dr Ted Galambos affirmait que la probabilité d'un tel accident était de un sur un milliard, ...et pourtant c'était arrivé. Le tablier en béton était en cours de réfection, et quatre voies de circulation sur huit étaient neutralisées; mais toutes sortes de matériaux et de matériel étaient entreposés sur la partie en travaux. Tous les experts et professionnels évaluaient de leur côté tous les facteurs de risques qui avaient pu conduire au désastre: fatigue, corrosion, inspections et entretien défectueux, assemblages, piles. La presse détaillait les points sensibles du pont. Voir par exemple le graphique interactif du New York Times, Réf. (3), ou les documents de USA Today, Réf (4)

A l'inventaire national des ponts, le pont de Minneapolis était classé comme **structurellement déficient** (comme environ un sur huit des 600 000 ponts du pays), "critique à la rupture" en raison du manque de redondance au cheminement des contraintes. Cela veut dire que la ruine d'un seul élément du pont aurait entraîné l'effondrement de toute la structure. Cela ne signifiait en principe pas un danger immédiat, puisque les inspections régulières de l'ouvrage n'avaient révélé aucun défaut, y compris l'examen subaquatique des piles. Son remplacement était prévu pour 2020.

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)



Figure 6.1 : Vue de la structure du pont.

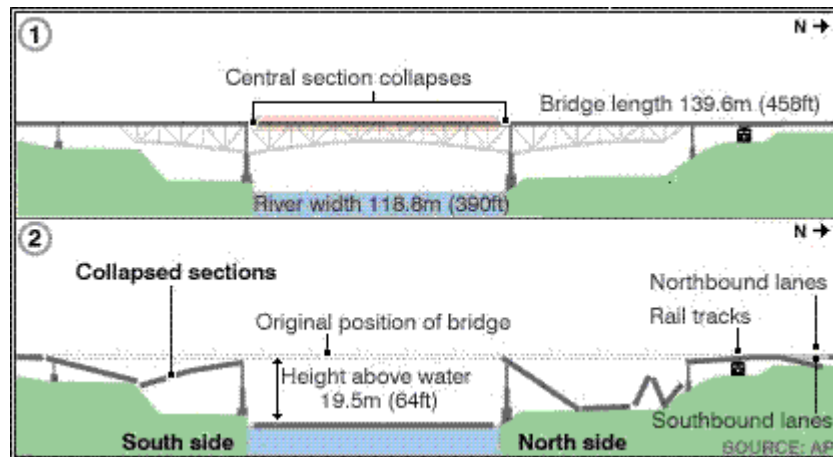


Figure 6.2 : Schémas du pont avant et après effondrement.

4. Leçons retirées – conséquences

L'émotion dans le pays a été très vive. Les administrations locales (Etat de Minnesota) et fédérales (NTSB, FHWA) ont réagi très vite et ont ouvert des enquêtes sur les ponts du même type (465 ponts à fermes métalliques dans tout le pays suivant la FHWA, 750 d'après le New York Times dont 470 particulièrement vulnérables) et d'une manière générale sur les méthodes de conception et d'inspection des ponts.

Une nouvelle réglementation était prête depuis 7 ans (préparée par l'administration Clinton), prévue pour être obligatoire en octobre 2007. Les demandes d'inspection de l'administration fédérale se sont étendues à tous les ponts du pays et notamment à plus de 70000 ponts classés comme "structurellement déficients". Dans l'Etat de Missouri, un pont a été fermé sine die par précaution.

D'une manière générale, on pense que les modes d'inspection des ponts doivent être revus et que la compétence actuelle des inspecteurs est insuffisante pour des examens très pointus.

Bien entendu le pont de Minneapolis a fait l'objet de vérifications attentives. On a rouvert les dossiers pour établir la chronologie des événements significatifs de l'histoire du pont depuis le début du projet : conception, calculs, rénovations antérieures, résultats d'inspections, signes avant-coureurs de défaillance.

La conception remonte aux années 60 et la construction s'est étendue de 1964 à 1967. Depuis sa construction, le pont a subi au moins deux rénovations majeures, en 1977 et en 1998. A l'occasion de ces rénovations, l'épaisseur du tablier en béton est passée de 16,5 cm à 21,6 cm. Ces modifications ont augmenté significativement le poids global de la structure. Par ailleurs, dans les années 90, selon le Washington Post, des fissures de fatigue dans les travées d'accès avaient été réparées, mais un rapport de 2001 avait déterminé que de telles fissures ne pourraient se développer dans la travée centrale dans les prochaines années.

Dès le 8 août 2007, avant que l'on ait remonté des éléments de goussets fracturés, mais seulement par l'examen des calculs et dessins du projet initial, les enquêteurs du NTSB assistés par la FHWA avaient pu mettre en cause l'insuffisance probable des goussets d'assemblage des fermes.

Le 11 janvier 2008, le NTSB publiait un rapport détaillé comportant le détail des calculs de goussets établi selon ses propres hypothèses (Les archives de calcul des goussets du projet initial du bureau d'études n'ont pas été retrouvées).

Ce rapport met en évidence le sous-dimensionnement des goussets ainsi que le non-respect des spécifications de l'administration, particulièrement le renforcement par raidisseurs des parties de goussets de grande longueur libre). A la suite de ce

rapport, le 15 janvier, le NTSB émettait une note de recommandations de sécurité relative au calcul des goussets pour servir à la vérification de ponts du même type.

Cette note est présentée comme un rapport d'étape, qui ne préjuge pas des causes de l'effondrement du pont, ni de ce que sont les facteurs qui ont influé cet effondrement. L'enquête se poursuit. En outre, le Gouverneur Pawlenty a missionné un cabinet d'expertise réputé dans ce genre d'enquêtes, le bureau WJE and Associates. En février 2008, le Sénat du Minnesota a démis de ses fonctions le chef du département des transports du Minnesota, qui reste vice-gouverneur (élue) du Minnesota.



Complément

http://www.nytimes.com/2007/08/09/us/09bridge.html?_r=1&adxnnl=1&oref=slogin&adxnnlx=1210757081-KLHGM8j5vH6VCIBNCbl6yg¹⁵

<http://www.cnn.com/CNN/Programs/anderson.cooper.360/blog/2007/08/expert-collapse-was-one-in-billion.html>¹⁶

¹⁷ http://www.nytimes.com/ref/us/20070803_BRIDGE_GRAPHIC.html#step1¹⁸
(graphique interactif).

<http://www.usatoday.com/news/graphics/bridge-collapse/flash.htm>¹⁹

http://www.nts.gov/Recs/letters/2008/H08_1_Design_Adequacy_Report.pdf²⁰

http://www.nts.gov/Recs/letters/2008/H08_1.pdf²¹ Recommandations découlant du rapport Ref (5) FHWA : Federal Highway Administration NTSB : National Transportation Safety Bureau.

5. Responsabilités

Il sera difficile de déterminer les responsabilités dans un cas où de nombreux participants sont intervenus depuis la mise en route du projet.

Diverses modifications du pont ont eu lieu et même si des calculs de vérification ont eu lieu, ils ne concernaient que les structures principales du pont, les programmes utilisés ne tenant pas compte des goussets, qui étaient déjà sous-dimensionnés au départ. Encore une fois on pourra dire que ce sont des détails qui sont à l'origine de l'accident. Certains inspecteurs ont déclaré se souvenir notamment du cas des ponts sur le Mianus (rupture d'une pièce de suspension) et de celui de Schoharie Creek (pas de vérification subaquatique pour visualiser l'affouillement des piles). Il faut cependant souligner que les vérificateurs estiment qu'il est encore trop tôt pour décider quelle est la cause déterminante. Le rapport final pourrait être déposé à fin 2008.

On a noté que les inspections réglementaires réalisées n'ont pas donné lieu à des alertes de sécurité. Cependant le maire de Minneapolis, Mr. Rybak, a déclaré au cours d'une interview qu'il était profondément troublé par les différents signaux avertisseurs produits par les différentes inspections au fil du temps. "C'est trop tard pour les victimes de Minneapolis a-t-il ajouté, " ce sera encore trop tard pour d'autres, si on ne prend pas au sérieux les avis concernant le délabrement de notre infrastructure dont beaucoup parlent depuis un certain temps". Il faisait là allusion aux avertissements répétés depuis au moins 2005 relativement à l'état des infrastructures aux Etats-Unis, et pas seulement des ponts, lancés par l'association

15 - http://www.nytimes.com/2007/08/09/us/09bridge.html?_r=1&adxnnl=1&oref=slogin&adxnnlx=1210757081-KLHGM8j5vH6VCIBNCbl6yg

16 - <http://www.cnn.com/CNN/Programs/anderson.cooper.360/blog/2007/08/expert-collapse-was-one-in-billion.html>

17 - http://www.nytimes.com/ref/us/20070803_BRIDGE_GRAPHIC.html#step1

18 - http://www.nytimes.com/ref/us/20070803_BRIDGE_GRAPHIC.html#step1

19 - <http://www.usatoday.com/news/graphics/bridge-collapse/flash.htm>

20 - http://www.nts.gov/Recs/letters/2008/H08_1_Design_Adequacy_Report.pdf

21 - http://www.nts.gov/Recs/letters/2008/H08_1.pdf

des ingénieurs civils américains (ASCE)." Un des grands atouts des Etats-Unis est son infrastructure, mais si vous ne l'entretenez pas, elle se détériore" a déclaré Patrick Natale, directeur exécutif de l'ASCE.

Aucune action judiciaire n'est en cours actuellement. Le gouverneur Tim Pawlenty a fait voter une aide de 38 millions de dollars pour les victimes de l'accident, soit au moins 400 000\$ par victime ou ayant droit. Ceux qui accepteront cette transaction perdent le droit de se retourner contre l'Etat de Minnesota, mais non de poursuivre des tiers. L'Etat de Minnesota ne reconnaît par la aucune responsabilité et se réserve le droit de se retourner en justice contre les sociétés privées une fois que la cause de l'accident aura été établie et l'implication des sociétés privées définies.

Défaillances de tunnels



Gerrards Cross, "Tesco tunnel", Buckinghamshire, Grande-Bretagne - 30 juin 2005 . 41

A. Gerrards Cross, "Tesco tunnel", Buckinghamshire, Grande-Bretagne - 30 juin 2005 .

1. Synthèse des faits

Un tunnel de 320 mètres de long est construit au-dessus d'une ligne ferroviaire entre Londres et Birmingham (Chiltern Line), afin de permettre l'extension d'un hypermarché Tesco. Le principe de construction est celui d'une voûte en éléments en béton armé préfabriqués, assemblés au-dessus de la voie ferrée. La voûte est ensuite recouverte d'un remplissage, pour lequel ont été utilisées des granulats à base de cendres d'incinération. Trois des 16 tronçons de la structure se sont soudainement effondrés à Gerrards Cross, le 30 juin 2005, obstruant la voie ferrée, quelques minutes après le passage d'un train.

L'accident se produisit en pleine période d'agitation entre la société Tesco et des citoyens protestant contre ce projet d'extension qui a un énorme impact sur leur communauté. Le permis de construire le tunnel avait été refusé en 1997, puis accepté après appel en 1998. La structure métallique du supermarché était installée lorsque l'accident s'est produit.

2. Analyse des faits

La technique de construction est éprouvée et a déjà été employée à de nombreuses reprises. La flexibilité de la conception permet jusqu'à 200 millimètres de mouvement vertical.

La principale cause de l'accident viendrait du non respect de l'ordre de chargement dans le recouvrement de la voûte. En effet, pour maintenir l'équilibre du système, l'espace de chaque côté de la structure du tunnel doit être rempli avant que le toit soit couvert. Or dans la section d'effondrement, le matériel de remplissage a été placé sur le tunnel avec un appui insuffisant sur les côtés, provoquant l'instabilité de l'ouvrage.

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)

Nicholson D., Guy Gorton.



Figure 8.1 : "Tesco tunnel".

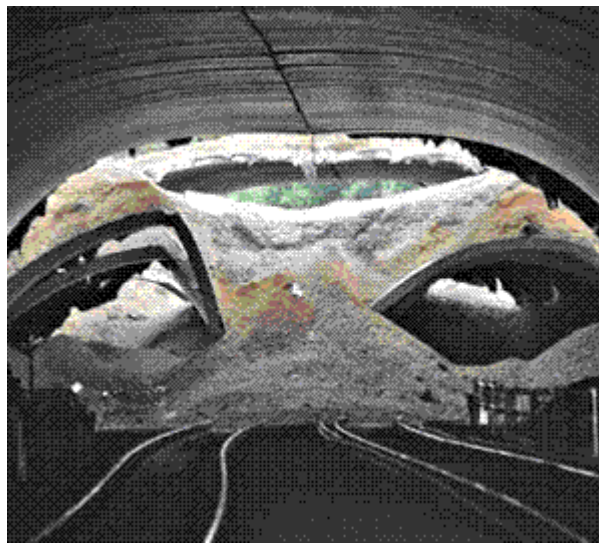


Figure 8.2a : "Tesco tunnel", après.



Figure 8.2b : "Tesco tunnel", après.



Figure 8.2c : "Tesco tunnel", après.

4. Leçons retirées – conséquences

Les segments endommagés ont été retirés et les sections intactes de part et d'autre de l'effondrement ont également été enlevées (de même pour le matériau de remplissage), pour des raisons de sécurité. Sept semaines après l'effondrement et après avoir enlevé 15 000 tonnes de matériaux de remblai, les experts ont procédé à une inspection détaillée de l'ouvrage, concluant qu'il était sain et que la ligne pouvait être rouverte. Un système de surveillance par laser a été installé pour détecter des déplacements éventuels de la voûte.

Les pertes de la compagnie Laing exploitant la ligne ferroviaire sont estimées à 30 millions de livres. Elle se retourne vers Tesco, jugé responsable des sept semaines d'interruption de la ligne, et de la perte de fréquentation que cela a entraîné. Les

pertes de la compagnie Tesco sont estimées à 35 millions de livres, et l'ouverture du supermarché est reportée à 2010.

L'enquête a été confiée au HSE, qui n'a pas encore fait connaître ses conclusions en juillet 2008.

Les riverains s'inquiètent aussi du fait que sur le chantier arrêté subsiste du matériau de remblai, faisant craindre des conséquences pour leur santé et pour l'environnement, mais celui-ci est parfaitement légal.



Complément

Nicholson D., Human impacts of ground engineering – geotechnical design risk and safety on construction sites, Geotechnet-ARUP, 14 nov. 2005

Sites consultés le 6 juillet 2008

<http://www.meadwaypark.co.uk/TescoTunnelBackground/>²² (Guy Gorton website)

http://www.rmtbristolrail.org.uk/archives/tunnel_collapse_gerardsx.jpg²³

<http://www.theyworkforyou.com/whall/?id=2007-01-23b.433.1&s=representation>²⁴
(débat au Parlement 23/1/2007)

22 - <http://www.meadwaypark.co.uk/TescoTunnelBackground/>

23 - http://www.rmtbristolrail.org.uk/archives/tunnel_collapse_gerardsx.jpg

24 - <http://www.theyworkforyou.com/whall/?id=2007-01-23b.433.1&s=representation>

Défaillances de bâtiments

IV

Ronan Point, Canning Town, Londres, tour de 22 étages, Grande-Bretagne -16 mai 1968.	45
Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, Centre nautique - 16 février 2004.	53

A. Ronan Point, Canning Town, Londres, tour de 22 étages, Grande-Bretagne -16 mai 1968.

1. Synthèse des faits

Le 16 mai 1968 à 5h45, Miss Hodge, résidente du 18ème étage de la Tour de Ronan Point, ne détecte pas la fuite de gaz de sa cuisinière et brûle une allumette pour chauffer sa bouilloire. L'explosion qui s'ensuit souffle le mur extérieur de la cuisine ainsi que le mur porteur du salon, déstabilisant les étages supérieurs qui s'effondrent, comme un jeu de dominos, sur les étages inférieurs. Le salon et la moitié de la chambre de Miss Hodge sont emportés et se retrouvent 18 étages plus bas.

Une partie de la tour s'effondre entièrement, provoquant la mort dans leur sommeil de quatre de ses résidents, l'autre restant en place. 17 personnes sont blessées. Quant à Miss Hodge elle s'en tire avec quelques brûlures au second degré, un gros choc émotionnel mais aucune blessure grave. La tour fut reconstruite, réoccupée quelques mois après, puis démolie en 1986, suite à l'apparition de dangereuses fissures.

Les enquêtes montrèrent que l'effondrement a été déclenché par la fuite de gaz mais révélèrent qu'il a véritablement été causé par un défaut au niveau des joints de construction. La démolition étage après étage en 1986 dans une procédure inverse de celle de sa construction, a confirmé les preuves de défauts conceptuels du mode de construction.

2. Analyse des faits

Une équipe d'investigation fut mise en place par le gouvernement britannique pour étudier les causes de cet effondrement. L'explosion est à première vue la cause de l'effondrement, mais en fait il n'est que l'élément déclencheur et révélateur de défauts sous-jacents.

L'explosion était de faible intensité, générant une pression inférieure à 70 kPa. La tour a été construite dans les années 1960, selon un système de préfabrication

béton armé (dit de Larsen-Nielsen), adapté à une construction rapide et à faible coût.

L'étude a montré qu'une pression de moins de 20 kPa était suffisante pour faire glisser horizontalement les murs de façades et les faire tomber. Si l'explosion s'était produite à un étage inférieur, le poids de la structure aurait été suffisant pour que le frottement entre les planchers et les voiles empêche le glissement des parois et la catastrophe aurait pu être évitée.

La défaillance résulte donc d'une conjonction de causes relatives à la conception, notamment :

- le fait qu'il n'y ait pas eu d'armature en acier solidarissant les panneaux en béton armé,
- que les joints entre murs et sols n'aient pas été conçus d'une manière continue et enfin qu'ils n'aient pas été remplis de mortier, contribuant ainsi à la faible résistance au frottement.

De forts vents et/ou un incendie auraient aussi pu causer un effondrement en chaîne.

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)

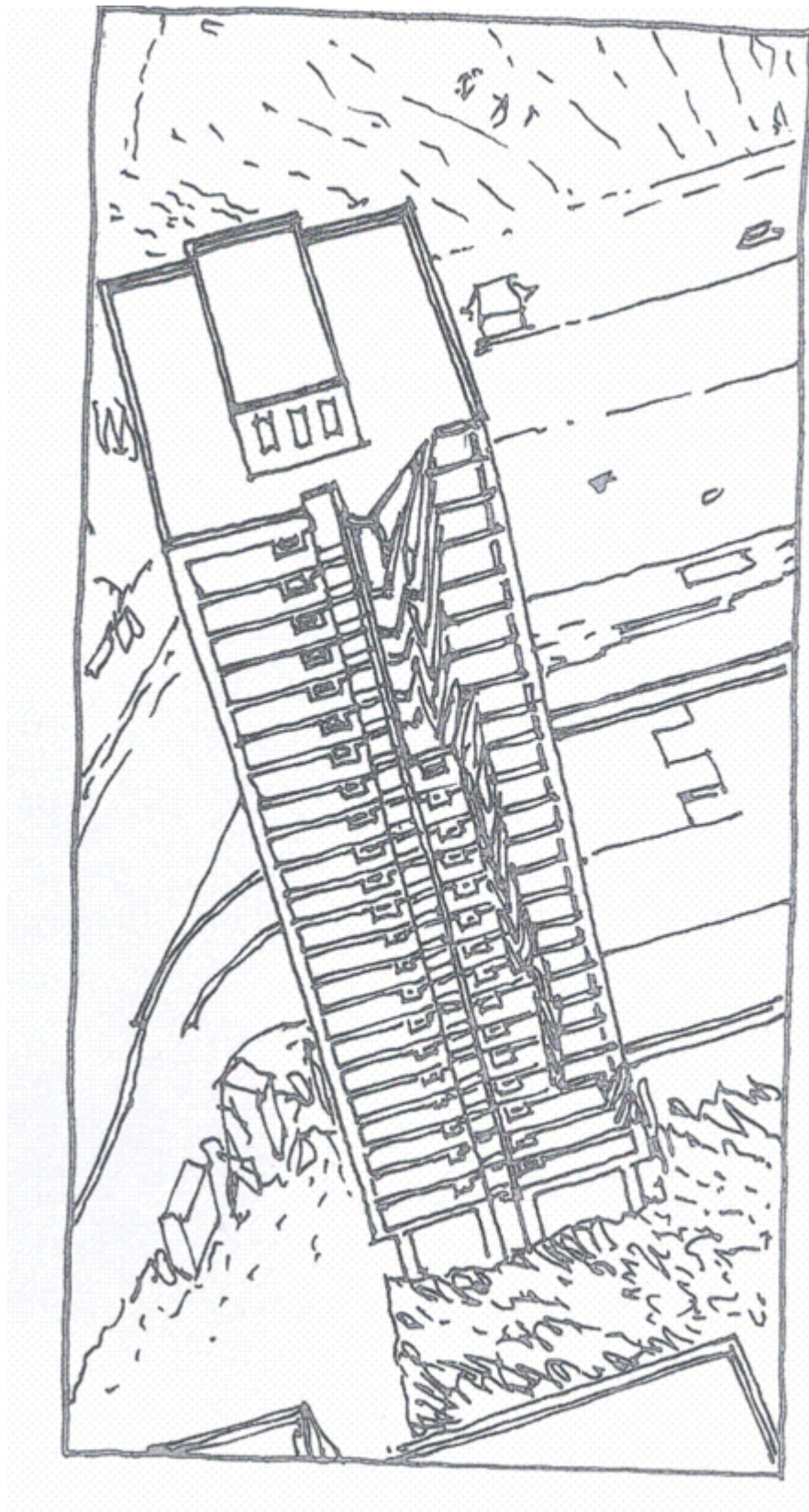


Figure 9.1a : Ronan Point, Canning Town, Londres, après.

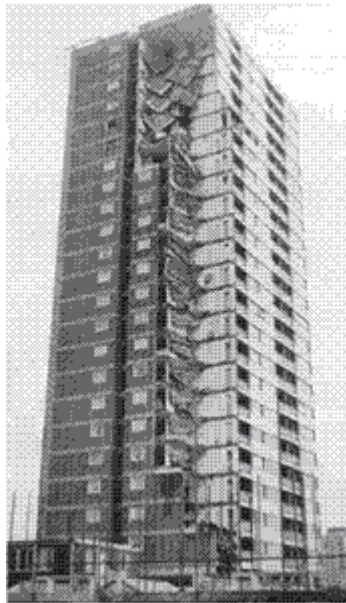


Figure 9.1b : Ronan Point, Canning Town, Londres, après.

4. Leçons retirées – conséquences

L'effondrement a mis en exergue le problème du manque de conscience professionnelle et de la négligence humaine dans le contexte économique plus global, celui des années soixante : où il fallait construire rapidement et à faible coût. Les nombreux essais faits les années suivantes sur le bâtiment ont confirmé la mauvaise qualité de construction (en particulier des joints) et sa faible capacité structurale et ont conduit à le démolir en 1986.

Cet événement a été à l'origine plusieurs mesures positives :

- une réévaluation des règles de construction en terme de sécurité et de chargement exceptionnel, et ce dans le monde entier. Il a souligné l'importance de la continuité dans les joints de construction. Ainsi les règles britanniques (BS8110) considèrent que les liaisons sont « généralement suffisantes » pour prévenir la rupture progressive,
- la prise en compte de la prévention contre l'effondrement progressif, en multipliant les mécanismes ayant les mêmes effets, de manière à ce que si l'un d'entre eux cesse d'assurer sa fonction, les autres prennent la relève (notions de « redondance » ou de « robustesse » structurelle). Ainsi un amendement a été introduit dans les règles de construction britanniques en 1970, imposant qu'après un événement ayant détruit une partie de sa structure, un bâtiment de plus de 4 étages doit rester debout, même avec un coefficient de sécurité réduit. Les Etats-Unis ont ensuite introduit le même type de critère dans leurs règlements,
- l'acceptation de l'existence du risque dû à une explosion, jusqu'alors écarté.



Complément

Rouse et Delatte, Lessons from the Progressive Collapse of the Ronan Point Apartment Tower, Proceedings of the 3rd ASCE Forensics Congress, October 19 - 21, 2003, San Diego, California.

Jonathan G M Wood, Failures from Hazards - a Short Review, IABSE Henderson Colloquium, Cambridge, July 2004.

Sites consultés le 7 juillet 2008-07-06

http://www.eng.uab.edu/cee/faculty/ndelatte/case_studies_project/Ronan%20Poin

t.htm²⁵

http://en.wikipedia.org/wiki/Ronan_Point²⁶

B. Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, Centre nautique - 16 février 2004.

1. Synthèse des faits

Le Transvaal Park est un centre nautique avec des bassins reproduisant une ambiance des mers chaudes. Construit en 2002, il a été reconnu comme « le meilleur projet d'investissement et de construction de l'année ». Le 16 février 2004, la voûte en béton supportant une couverture en verre et chargée par la neige s'effondre brutalement, faisant 28 victimes. Le travail des sauveteurs est d'autant plus difficile que la température extérieure est très basse et les victimes sont en tenue de bain.

Dès les premiers jours les autorités décident de suspendre les licences des architectes Sergei Kiselev & Partners et de l'entreprise de construction turque Kocak Insaat Ltd.

Outre le poids de la neige, on soupçonne que la forte différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'ouvrage a induit des déformations que la structure n'a pu supporter. Les calculs numériques montrent que les hypothèses de calcul linéaire géométrique ne sont pas valides dans le cas d'une coque surbaissée comme celle du Transvaal Park et que la coque était instable du fait de sa conception.

2. Analyse des faits

La défaillance résulte probablement d'une conjonction de causes, relatives à la fois à la conception et à la modélisation. Les médias soupçonnent le rôle de la corruption, qui atteint tous les chantiers moscovites, depuis la délivrance des permis jusqu'à la qualité des matériaux mis en œuvre. Le contexte de la construction en Russie conduit à abaisser les exigences et à livrer aussi vite que possible les ouvrages aux promoteurs.

La surcharge de neige est à première vue la cause de l'effondrement, mais on met aussi en cause la qualité des fondations, ou des défauts de conception (incapacité à accommoder le différentiel thermique entre intérieur et extérieur et génération de fortes contraintes) et des défauts de maintenance. En fait l'enquête s'oriente principalement vers trois causes possibles : un défaut de conception, une mauvaise qualité des matériaux, ou une explosion d'origine terroriste. L'architecte défend cette dernière théorie, rapidement écarté par l'enquête (des images pouvant venir appuyer cette thèse ont été confisquées par le FSB et les experts n'ont pu les exploiter, certains observateurs ont émis l'idée que les autorités ont écarté cette hypothèse pour ne pas affoler la population).

Des scientifiques incriminent aussi le modèle de calcul : alors que la courbe charge-flèche a été calculée avec un modèle linéaire, de fortes non linéarités géométriques résultent du caractère très surbaissé de la voûte. Elle présente une instabilité de type cloquage pour des chargements de l'ordre des actions climatiques réglementaires.

La conclusion des experts met hors de cause la qualité des fondations aussi bien

25 - http://www.eng.uab.edu/cee/faculty/ndelatte/case_studies_project/Ronan%20Point.htm

26 - http://en.wikipedia.org/wiki/Ronan_Point

que les travaux de construction de l'entreprise turque (la qualité du béton est conforme). La conception architecturale de la coque est mise en cause, sans qu'il ait été possible de prouver des erreurs de la part du spécialiste reconnu qu'est Kancheli..

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)



Figure 10.1 : Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, après.

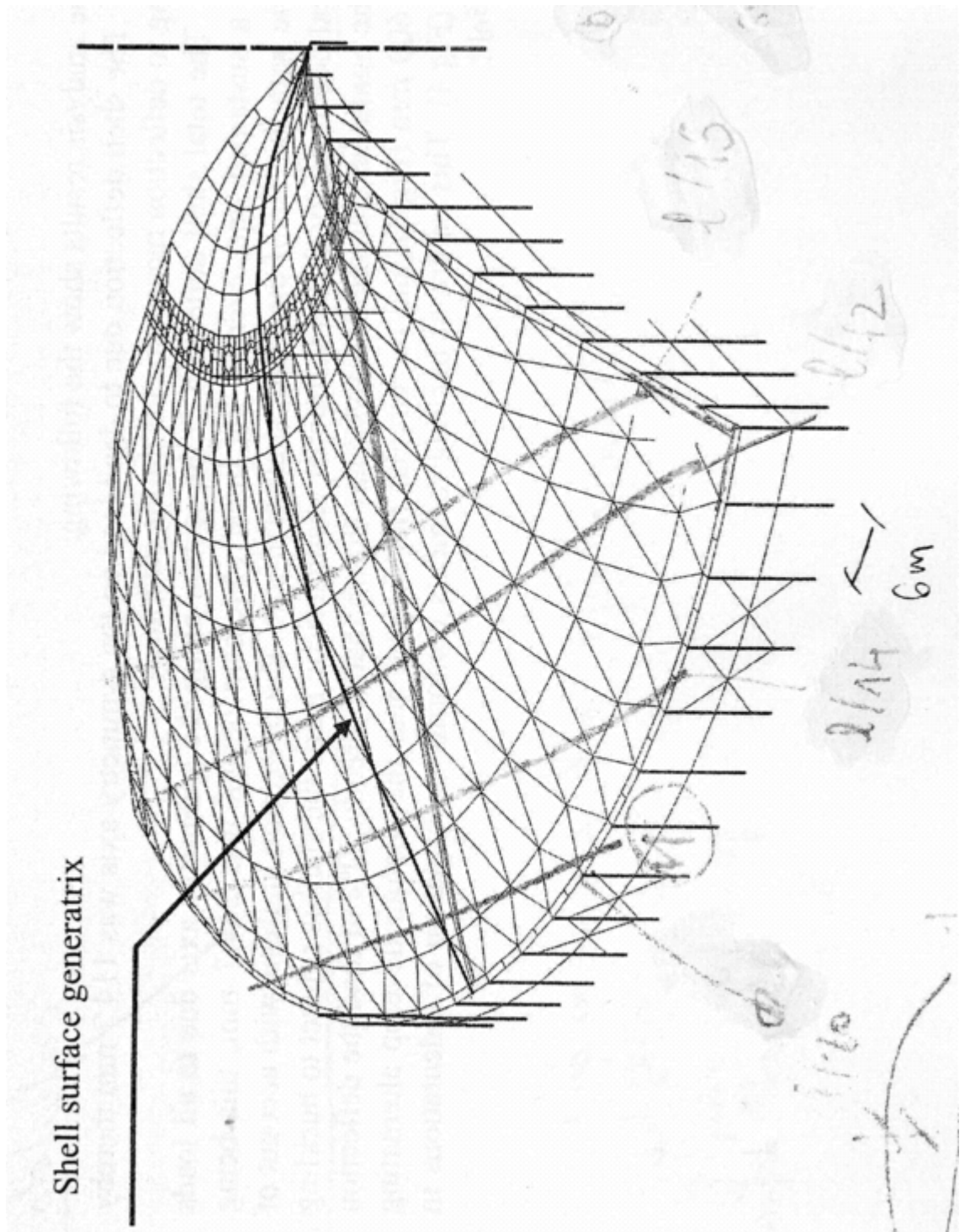


Figure 10.2a : Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, modélisation.

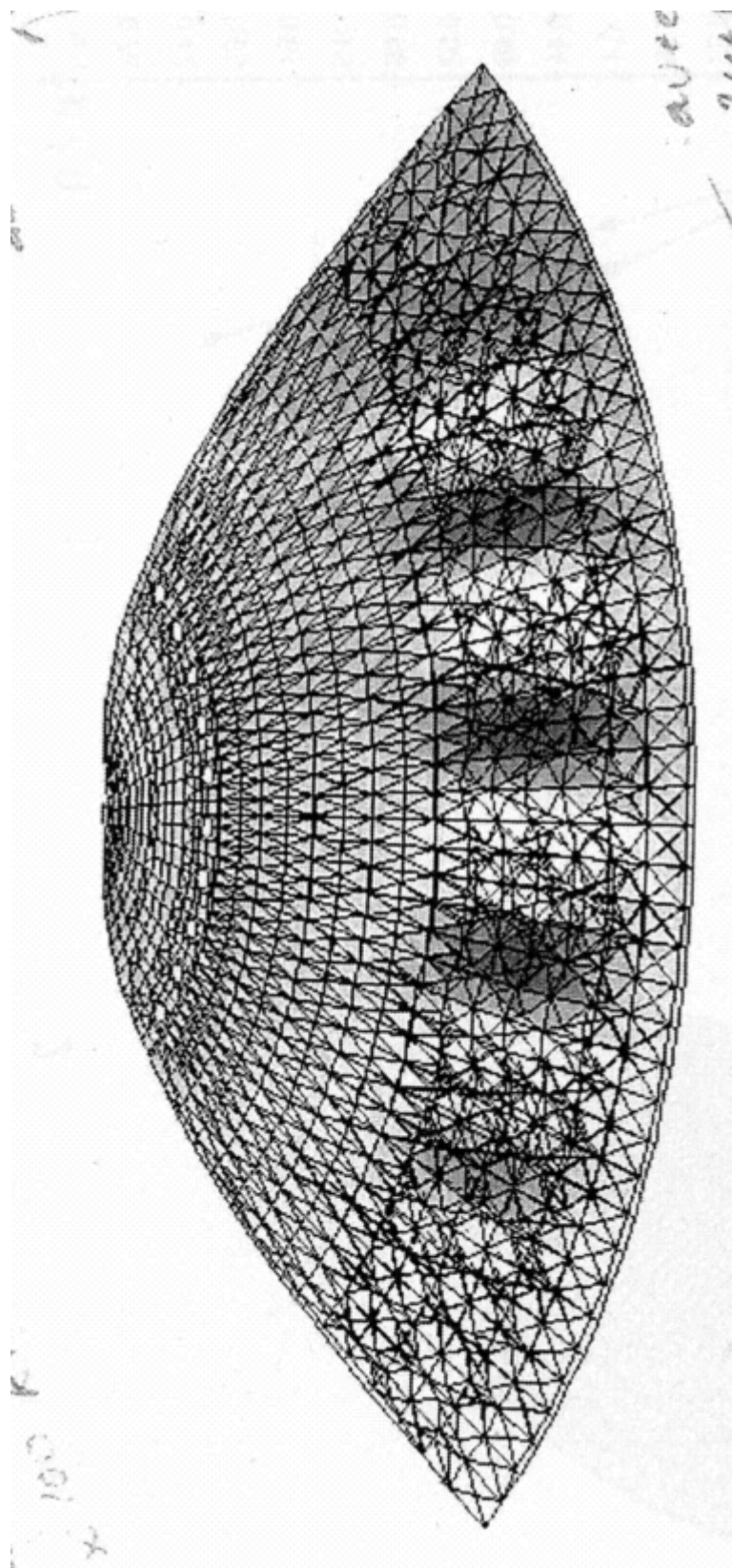


Figure 10.2b : Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, modélisation.

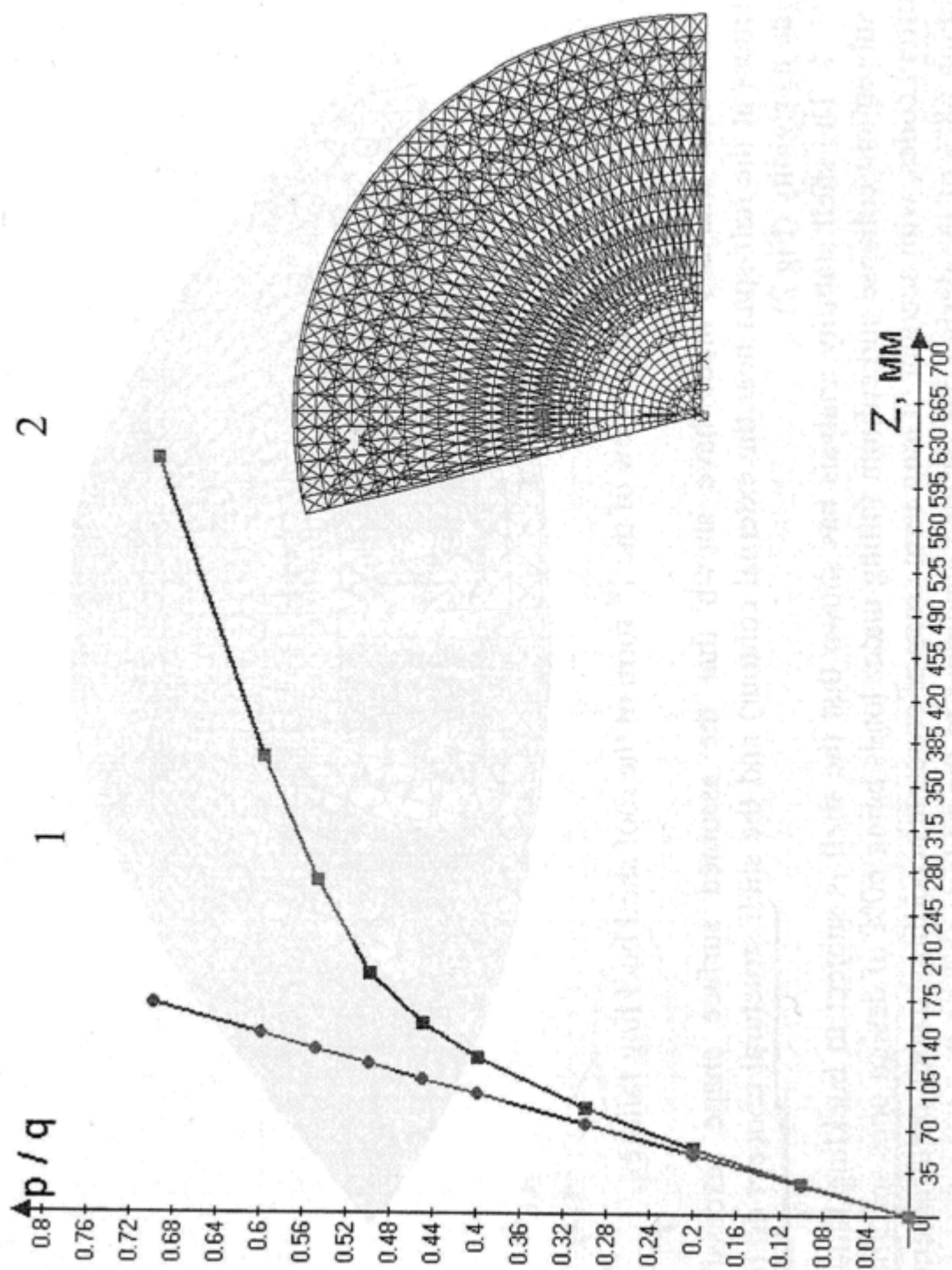


Figure 10.2c : Transvaal Park, Yasenevo, Moscou, Russie, modélisation.

4. Leçons retirées – conséquences

Le Président Poutine a adressé ses condoléances aux victimes, promettant la punition des coupables. L'investigation criminelle est déclenchée après la catastrophe. Le contexte politique semble avoir largement influencé le déroulement de l'enquête, voire ses conclusions. Elle établit au bout de 20 mois que l'architecte

en chef Nodar Kancheli et le responsable de l'administration moscovite en charge du projet, Analtoly Voronin, sont responsables de la tragédie.

L'effondrement a été causé par une série d'erreurs de conception et de calculs qui n'ont pas permis de respecter les règles de sécurité. L'architecte a nié toute responsabilité, accusant les constructeurs d'avoir substitué des matériaux moins performants aux matériaux prévus. Après un complément d'enquête, le procureur a décidé de clore le dossier et de prononcer une amnistie pour l'architecte, en raison du centième anniversaire de la Douma. Kancheli a accepté cette amnistie en s'engageant à ne pas chercher dans le futur à être innocenté.

Une catastrophe de même nature s'est produite le 25 février 2006 à Moscou, quand un marché couvert en béton armé conçu par le même architecte (N. Kancheli) s'est effondré sous le poids de la neige, faisant 60 victimes.



Complément

Shugaev, Sokolov, 2005, Conférence RILEM, Moscou.

Ostrovky S., O'Flynn K., Mystery surrounds probe of Transvaal tragedy, The Moscow Time, 24 mars 2004.

Sites consultés le 6 juillet 2008

http://en.wikipedia.org/wiki/Transvaal_Park²⁷

<http://en.rian.ru/russia/20060905/53516041.html>²⁸ (Agence Novosti).

http://www.kommersant.com/doc.asp?id_doc=459880²⁹

27 - http://en.wikipedia.org/wiki/Transvaal_Park

28 - <http://en.rian.ru/russia/20060905/53516041.html>

29 - http://www.kommersant.com/doc.asp?id_doc=459880

Défaillance de barrages, digues et retenues



V

Défaillance du barrage de Malpasset	59
Défaillance du barrage de Bouzey	69
Défaillance du barrage de Tigra	77

A. Défaillance du barrage de Malpasset

Le barrage de Malpasset a été construit dans le département du Var sur la rivière Reyran en France.

Ce barrage s'est rompu le 2 décembre 1959

1. Synthèse des faits (CIGB, 74)

Le projet et la forme de la voûte mince de Malpasset étaient très classiques. Il s'est achevé en 1954. Il avait 66 m de haut au couronnement, une longueur en crête de 222m et 48 000 m³ de béton furent utilisés à sa construction. Ses deux parements étaient à double courbure, et la rive gauche s'appuyait sur une culée poids d'environ 10 m de haut, protégée de la pression d'eau par un mur poids construit en amont.

Le volume d'excavations rocheuses atteignit 17 000 m³ et pendant les injections pour le voile étanche, les absorptions furent minimales, ce qui montrait une très faible perméabilité du rocher.

Le 2 décembre 1959, un peu après 21h, le barrage de Malpasset fut emporté : le niveau d'eau était alors très voisin de la crête du déversoir.

Il n'y a pas eu de témoins oculaires de l'accident sauf le gardien qui était chez lui, 1 500 m à l'aval et entendit plusieurs craquements et un vent violent. Une vague énorme balaya la vallée. Les parcs laissés par la vague montrèrent que l'eau s'échappa d'un seul coup de toute la hauteur du barrage. Les enregistrements dans les postes donnèrent le moment exact auquel les lignes électriques traversant la vallée furent emportées.

Pratiquement toute la voûte s'effaça en un instant, seules demeurèrent la partie droite du barrage et la partie centrale. Sur la rive gauche, le barrage fut complètement détruit et une grande cavité en forme de dièdre apparaissait dans le rocher. Ses deux faces presque perpendiculaires plongeaient à 45° ; la face amont du dièdre était en pente de l'amont vers l'aval et atteignait le niveau naturel du terrain à peu de distance du pied amont du barrage. La face aval coïncidait avec une faille. L'arête du dièdre montait le long de l'appui presque parallèlement à la

fondation du barrage (largeur du dièdre, environ 40 m, profondeur 30 m, volume approché 40 000 m³).

L'appui se déplaça de 2 mètres horizontalement sans mouvement vertical appréciable. Le pied de la partie conservée du barrage sur la rive droite et dans la partie centrale subit une rotation en bloc autour de l'extrémité de la rive droite avec un déplacement maximal de 80 cm, sans rupture de la structure.

Dans les morceaux de béton et de rocher de fondation de la partie détruite du barrage, qui furent balayés à plusieurs centaines de mètres de l'aval, l'adhérence entre le béton et le rocher était parfaite.

Le tapis aval et l'ouvrage de vidange furent complètement emportés et le rocher fut dénudé de toute végétation à l'aval, jusqu'à la cote 100 près du barrage et 80 plus loin, là où la vallée s'élargit.

2. Analyse des faits (CIGB, 74)

La rupture de Malpasset fut le résultat d'une combinaison imprévue de causes dont certaines n'avaient pas été envisagées précédemment.

Le site de Malpasset avait deux caractéristiques particulières. La première était une faille étanche, plongeant sous le barrage de l'aval vers l'amont, avec un angle de 45°. A une profondeur comprise entre 15 et 17 m, cette faille traversait la vallée presque perpendiculairement. Le deuxième caractère dangereux était constitué par un grand nombre de surfaces de glissement potentielles non détectables (structure de foliation), plongeant de l'amont vers l'aval presque parallèlement à la tangente à la voûte près de l'appui rive gauche.

Même si ces caractéristiques avaient été connues au stade des études, on ne les aurait pas considérées comme dangereuses. En fait, les différentes surfaces plongeaient dans des directions telles que les forces normalement prises en compte (poussée de la voûte et poids) avaient tendance à stabiliser le dièdre de rocher constitué par la faille, et n'importe quelle surface de glissement amont. De ce fait, on peut affirmer avec force qu'il n'y avait aucun risque de glissement du barrage, ni dans les fondations supérieures, ni dans le bas si l'on se réfère au sens du mot glissement, c'est-à-dire mouvement vers le bas.

Les forces généralement prises en compte et celles qu'on considère moins souvent ne firent apparaître aucun danger lors des calculs du projet de quelque façon qu'on les combine. Mais ce n'est pas le cas si l'on prend en compte la sous-pression provoquée par l'eau du réservoir lorsqu'elle agit verticalement sur la fondation rocheuse profonde dans une structure foliée. Du fait de la surface importante sur laquelle cette sous-pression agit, la force est capable d'atteindre une valeur suffisante pour soulever le barrage et le dièdre qui le supporte. C'est en fait ce qui est arrivé comme on peut le voir à la suite d'inspections sur le site après la rupture.

Une sous-pression dangereuse d'une telle importance se produit seulement dans le cas où deux propriétés du rocher sont associées. On les décrit ci-dessous. La seconde est assez rare et caractéristique du gneiss.

La première est la faiblesse du rocher due à de nombreuses surfaces de glissement potentielles dont on a parlé plus haut. Comme ces surfaces étaient presque parallèles à la tangente à la voûte près de l'appui rive gauche, les forces du barrage (poussée de la voûte due à la pression de la voûte et poids propre) au lieu de se disperser dans la fondation comme le veut la théorie de l'élasticité dans un milieu homogène, restaient concentrées jusqu'à une grande profondeur, dans un prisme d'épaisseur constante, provoquant des efforts de compression élevés.

La deuxième est le comportement du gneiss : modérément imperméable dans des conditions normales, il devient complètement imperméable lorsqu'il est comprimé. C'est ainsi que le taux de perméabilité est divisé par cent ou plus sous l'effet de la compression d'un barrage. Cette imperméabilité agit comme un écran imperméable

dans la fondation contre laquelle vient buter les infiltrations en provenance du réservoir. Il faut alors supporter une pression hydrostatique correspondant au niveau du réservoir.

Sous l'effet de cette pression et du fait de la faible cohésion entre les surfaces de glissement potentielles, la fondation s'était légèrement déplacée vers l'aval, provoquant une fissure (ouverture dans la foliation) dans laquelle la sous-pression put se manifester à cause de l'imperméabilité de la faille aval. Comme celle-ci et la fissure amont délimitaient un dièdre rocheux dans la fondation, ce bloc, et avec lui le barrage, furent soulevés violemment par la sous-pression comme si la fondation avait explosé.

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)

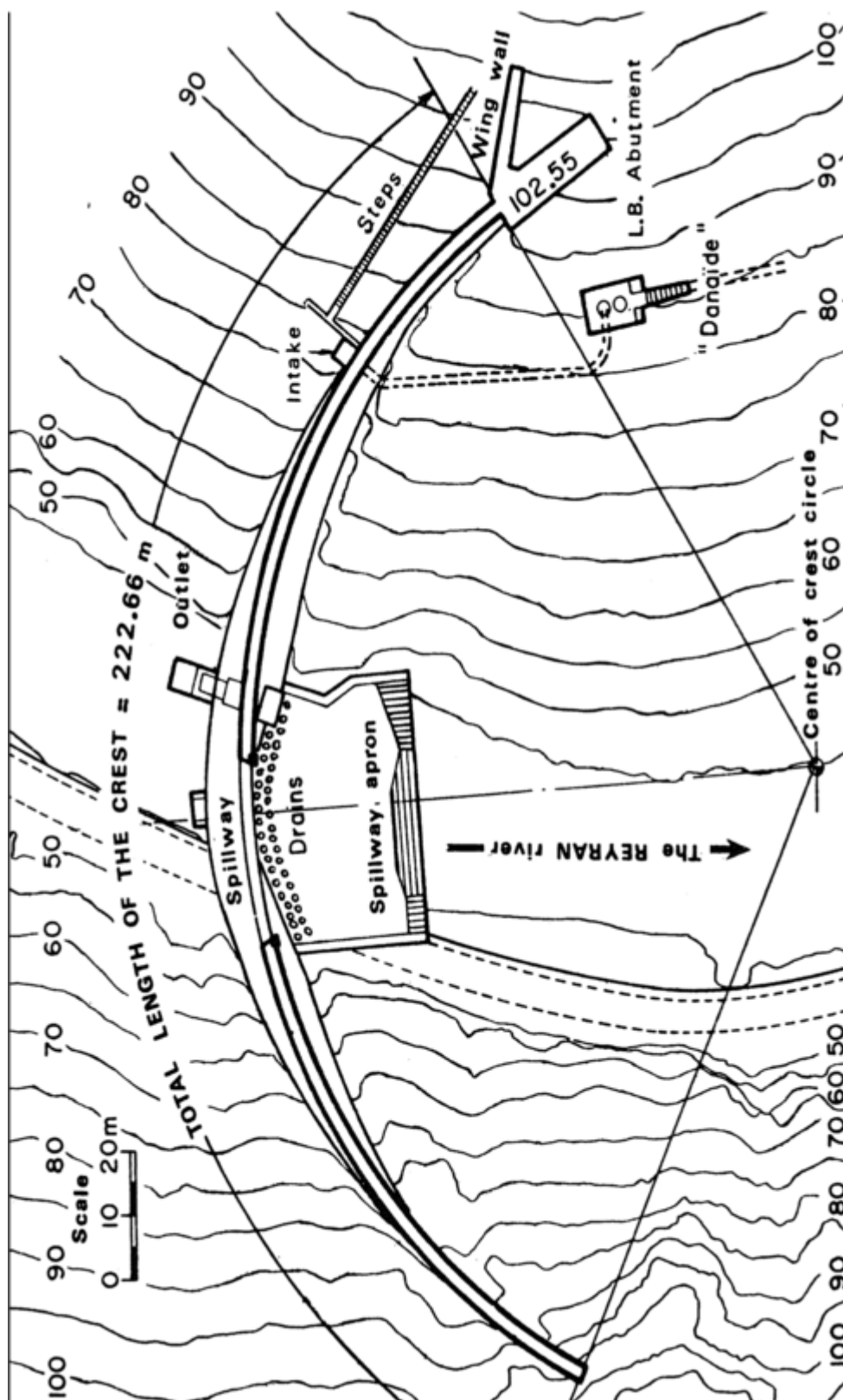


Figure 1 : Vue générale du barrage (CIGB, 74)

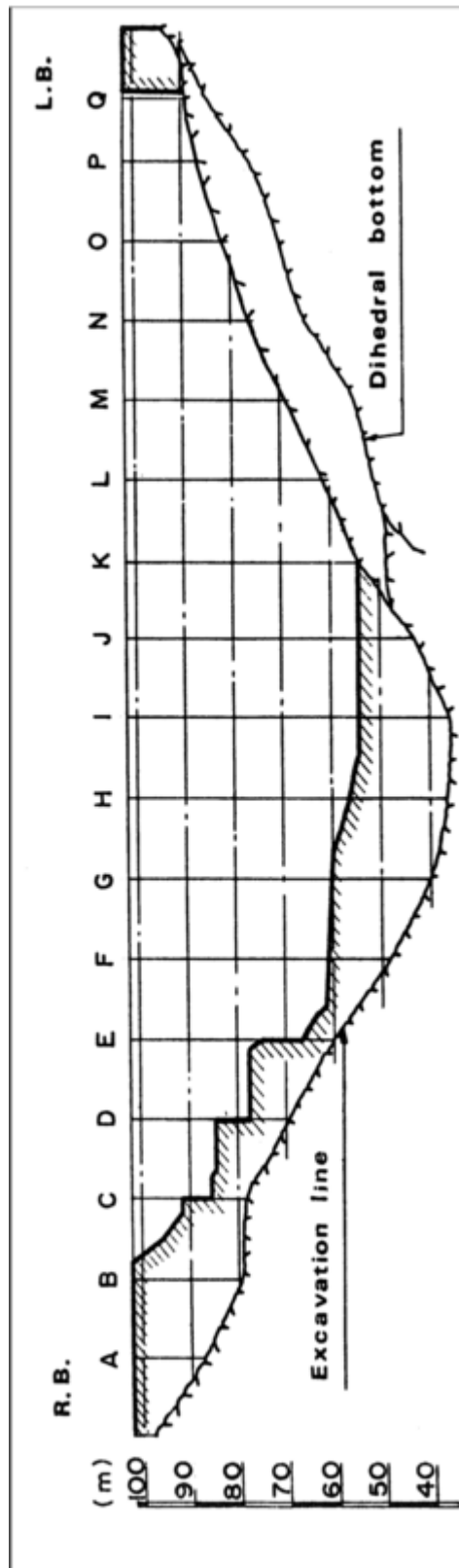


Figure 2 : Elévation aval après l'accident (CIGB, 74)

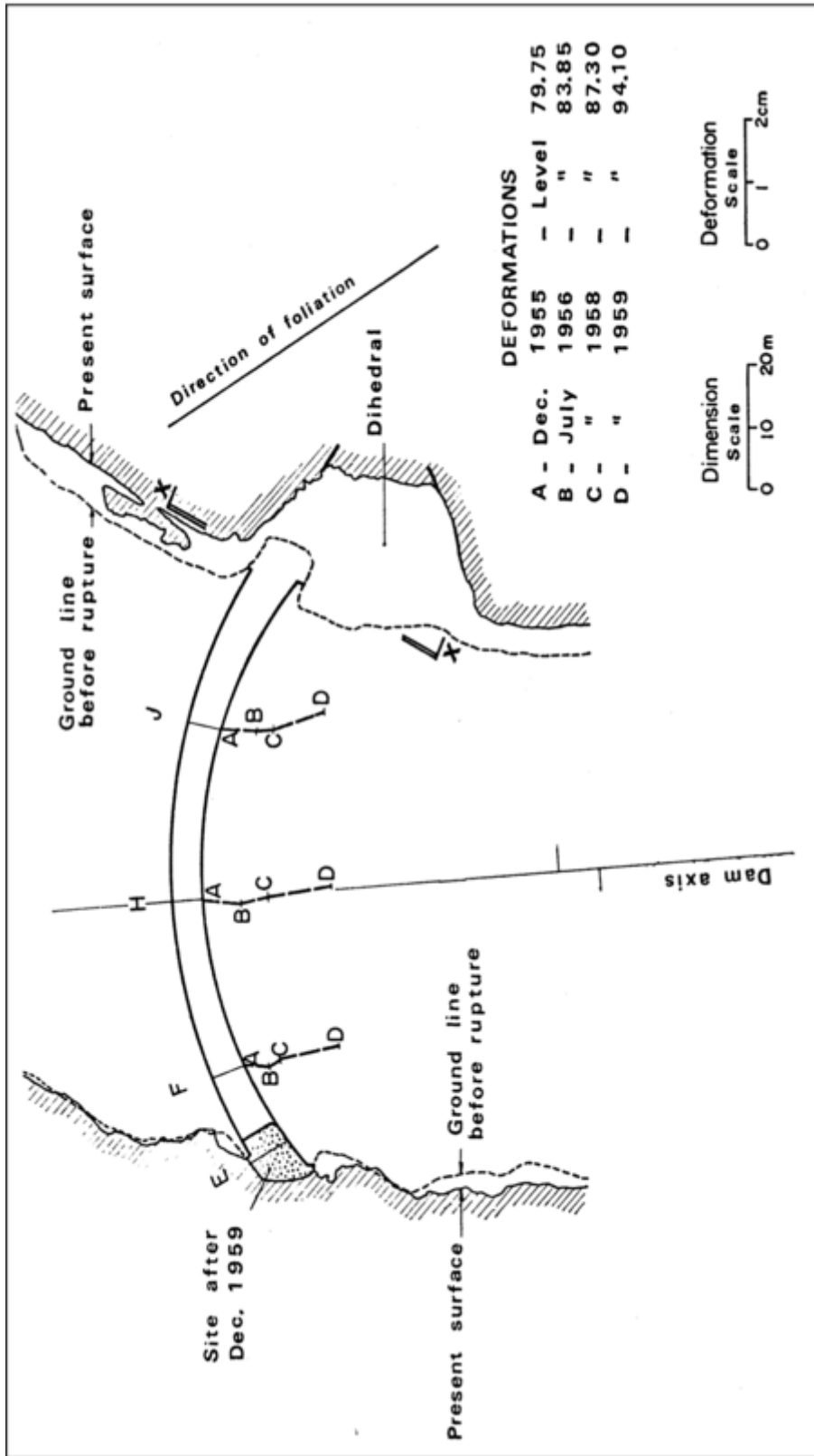


Figure 3 : Coupe horizontale à la cote 65 (CIGB, 74)

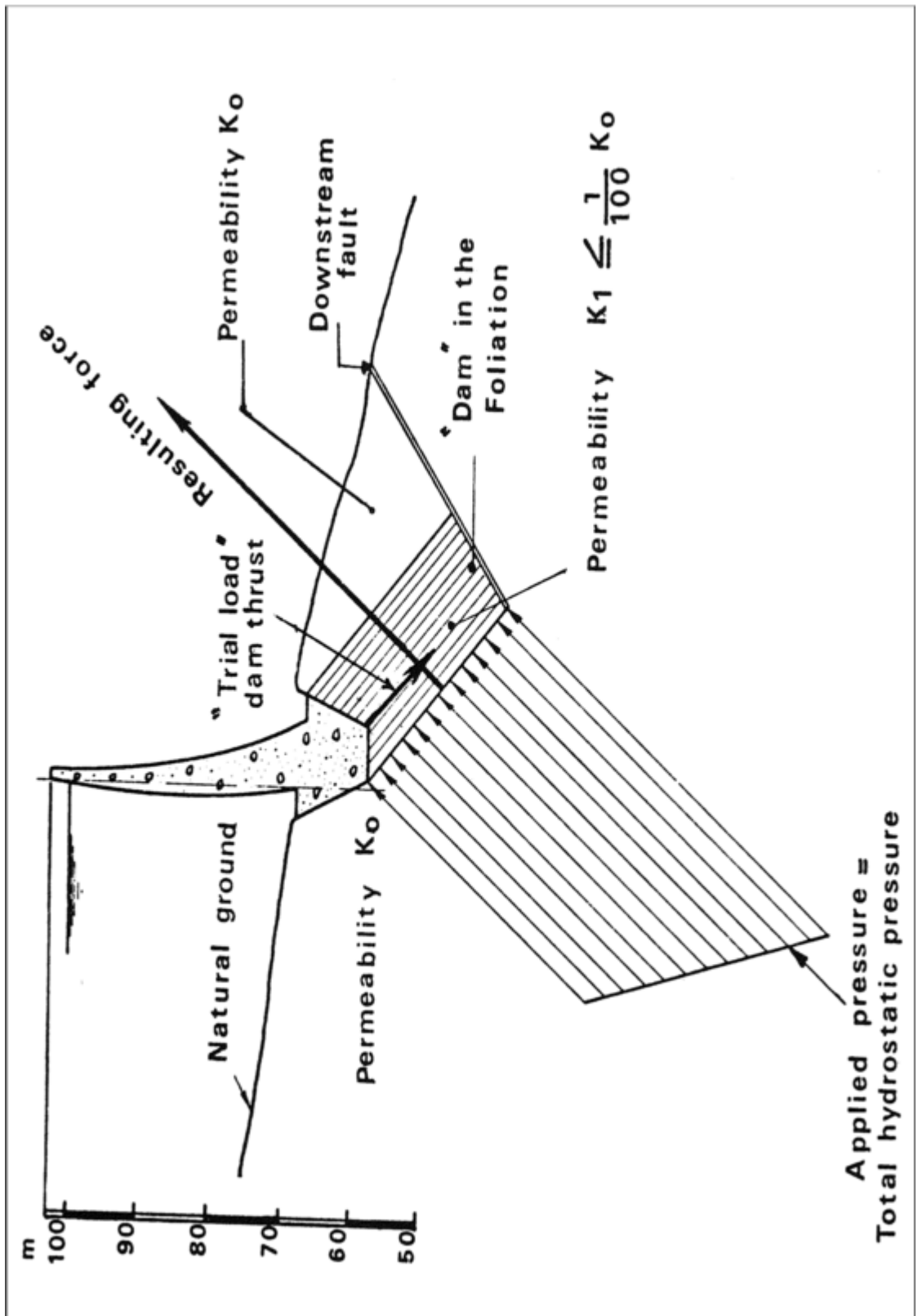
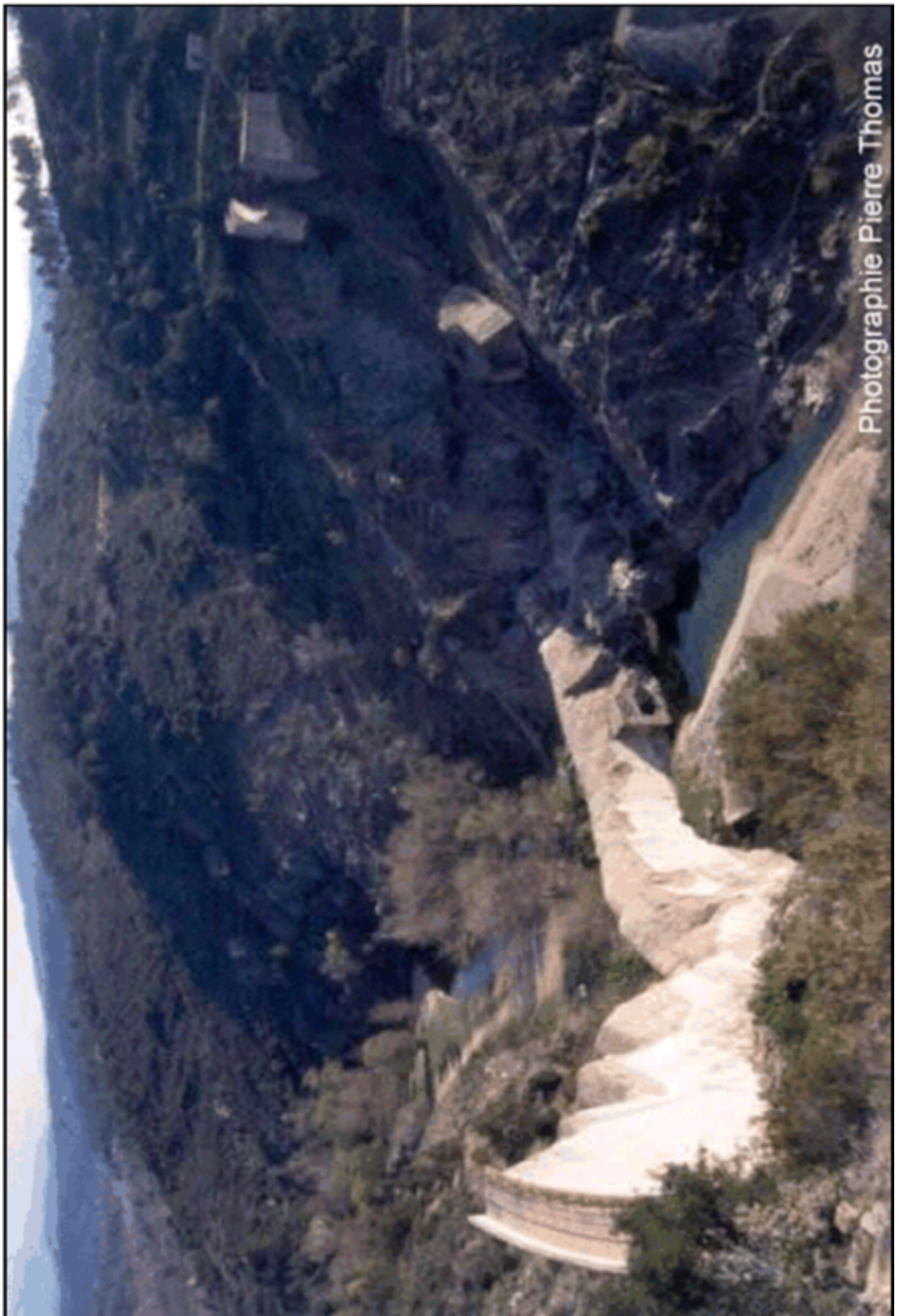


Figure 4 : Coupe transversale (CIGB, 74)



Figure 5 : Avant et après rupture (Bruehl, 02)



Photographie Pierre Thomas

Figure 6 : Vue rive gauche (Thomas, 99)



Figure 7 : Vue rive droite (Thomas, 99)

4. Leçons retirées - conséquences (CIGB, 74)

Dans de telles conditions, il aurait été inutile de construire un rideau d'injection amont pendant la construction, et il aurait fallu, pour qu'il soit efficace, forer des drains dirigés vers l'amont, ce qui se pratique fréquemment depuis la rupture de Malpasset.



Complément

CIGB – ICOLD^(CIGB, 74). Leçons tirées des accidents de barrages. Paris : CIGB. 1974.

Bruehl^(Bruehl, 02), F. La catastrophe de Malpasset en 1959 [en ligne]. 2002. Disponible sur : ³⁰

http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm³¹. (Consulté le 18.03.2008).

Thomas^(Thomas, 99), P. Les ruines du barrage de Malpasset (83) [en ligne]. 1999. Disponible sur : ³²

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img55-2003-10-13.xml>³³. (Consulté le 18.03.2008).

B. Défaillance du barrage de Bouzey

Le barrage de Bouzey a été construit près de Belfort en France. Ce barrage s'est rompu en 1895.

1. Synthèse des faits (CIGB, 74)

Le barrage de Bouzey, près de Belfort, achevé en 1980, s'est rompu en 1895, après avoir été victime d'un premier accident en 1884. C'est à l'occasion de la deuxième rupture que l'attention a été attirée pour la première fois sur le problème des pressions internes dans les maçonneries et des sous-pressions sous les fondations des barrages massifs. L'analyse de cet accident a amené Maurice Lévy, dans un mémoire de l'Académie des Sciences (5 août 1895), à mettre en lumière le mécanisme de ces actions jusqu'alors ignorées.

Haut d'une vingtaine de mètres, et construit en maçonnerie, le barrage était fondé sur les assises supérieures de l'étage du grès bigarré, terrain assez fissuré et poreux.

Les couches étant sensiblement horizontales et sans cohésion à la surface, il avait fallu descendre un mur de garde jusqu'à 6 et 10 mètres de profondeur.

Le remplissage du réservoir commença en novembre 1881, un an environ après l'achèvement des maçonneries.

Quand le plan d'eau atteignit la cote 362 environ, on vit apparaître à l'aval du barrage, dans le terrain, des sources dont le débit, d'abord d'environ 50 litres par seconde, s'accrut jusqu'à 75 litres lorsque le plan d'eau se fut élevé aux environs de la cote 364,50.

Le 14 mars 1884, une partie du barrage sur une longueur de 135 mètres se déplaça

30 - http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm

31 - http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm

32 - <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img55-2003-10-13.xml>

33 - <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img55-2003-10-13.xml>

brusquement vers l'aval et le débit des sources, qui était resté stationnaire augmenta jusqu'à 230 litres par seconde. Le plan d'eau avait alors atteint pour la première fois la cote 368,80, soit 2,70 m au-dessous du niveau maximal prévu.

Le barrage s'était déplacé vers l'aval, en se séparant du mur de garde et sans aucun tassement vertical. Le couronnement primitivement rectiligne avait pris la forme d'une ligne brisée avec une flèche maximale de 0,34 m. Une fracture horizontale à la base de l'ouvrage régnait sur une longueur de 93 mètres.

Le sol de fondation était broyé et disloqué sur 2 à 3 mètres d'épaisseur sous le barrage. On y trouva deux crevasses, qui donnaient passage à des fuites, ainsi que des dépôts d'argile de forme lenticulaire de quelques millimètres d'épaisseur. En amont du mur de garde et en contrebas de ses fondations, on trouva des couches tendres, fissurées et perméables.

Le réservoir ne fut pas vidé immédiatement après cet accident et l'eau y fut maintenue pendant près d'une année au niveau qu'elle avait à cette époque. Aucun mouvement nouveau ne se produisit pendant ce laps de temps et le débit des sources se maintint aux environs de 200 litres.

De 1888 à 1889, le barrage fut consolidé par un épaissement aval buté contre le sol. Un solin en maçonnerie fut construit en amont sur toute la longueur de la fissure et recouvert d'un massif d'argile corroyée de 3 mètres d'épaisseur au moins. On procéda alors de nouveau au remplissage, qui dura trois ans.

Aucune anomalie ne fut constatée jusqu'au 27 avril 1895 à 5h15 du matin, heure où le barrage se rompit brusquement. Le niveau de l'eau était alors à la cote de 371,40.

Le barrage fut emporté dans sa partie centrale sur une hauteur moyenne de 10,50 m et sur une longueur de 170 m.

Le seuil de la brèche sur le parement amont présentait, à part quelques dentelures, une allure horizontale bien caractérisée, sauf en un point où la brèche s'approfondissait d'environ 2,50 m.

Dans le sens transversal, le fond de la brèche était horizontal ou peu incliné sur une longueur de 3,50 m à partir de l'amont et plongeait ensuite brusquement vers l'aval.

Près du parement aval, il existait de nombreuses traces d'écrasement et de cisaillement.

Les fondations n'avaient pas bougé et les maçonneries étaient en très bon état.

2. Analyse des faits (CIGB, 74)

Les deux accidents successifs de Bouzey ont été produits par la sous-pression, mais avec l'intervention de deux mécanismes différents.

En 1884, le déplacement du barrage a été provoqué par la sous-pression de l'eau au contact des maçonneries et de la fondation perméable ; l'équilibre statique de l'ensemble de l'ouvrage a été détruit jusqu'à ce que le massif de maçonnerie eût retrouvé une butée à l'aval.

En 1895, la rupture a été au contraire provoquée par la pression interne de l'eau à l'intérieur même de la maçonnerie et c'est à cause de l'insuffisance d'épaisseur du profil que les effets de cette pression ont pu aboutir à la rupture.

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)

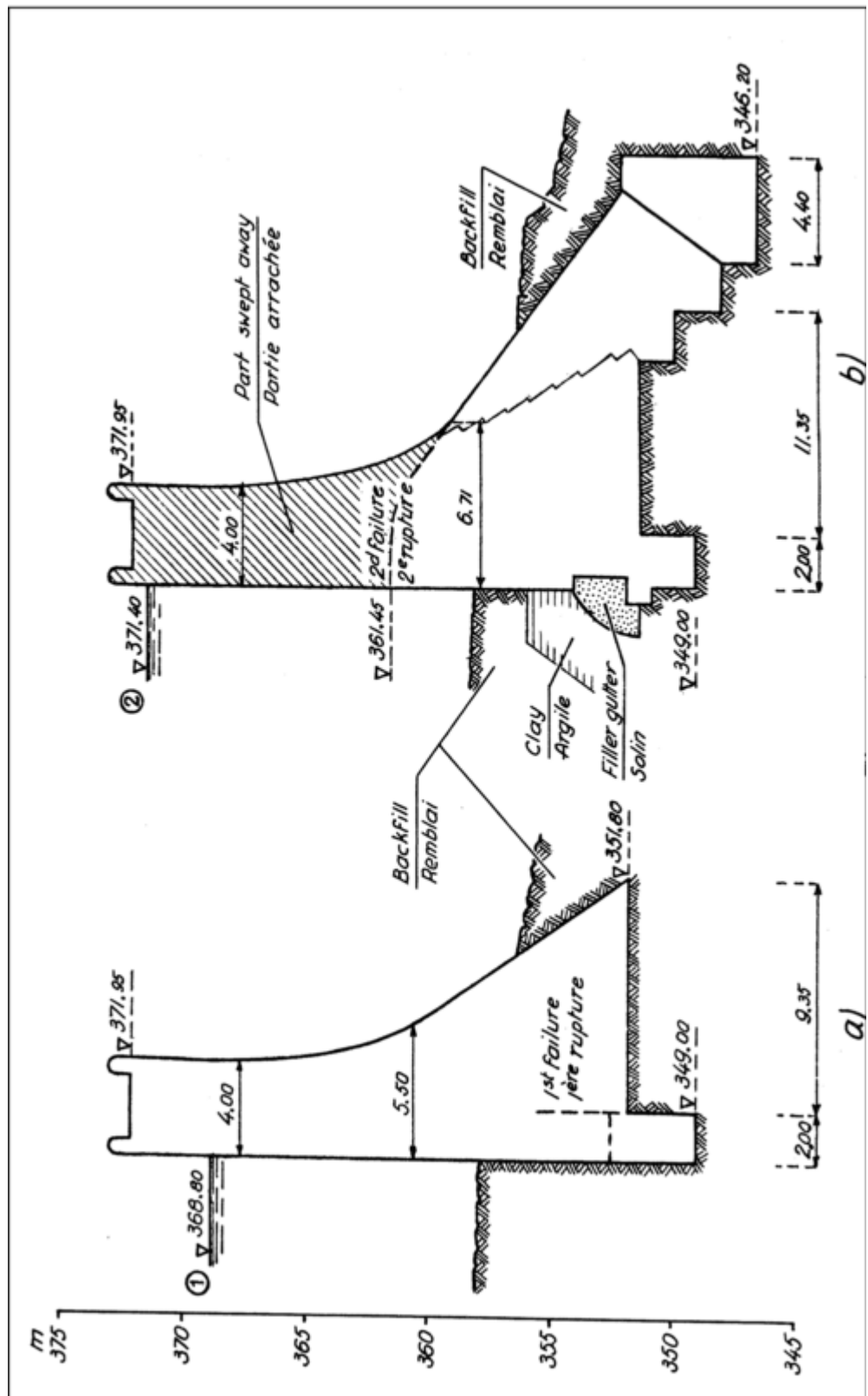


Figure 1 : Coupes du barrage de Bouzey - a) - coupe au moment de la première rupture en 1884 - b) - coupe au moment de la deuxième rupture en 1895 (CIGB, 74)



Figure 2 : Rupture du barrage de Bouzey (Prim.net, 07)



Figure 3 : Rupture du barrage de Bouzey (Prim.net, 07)

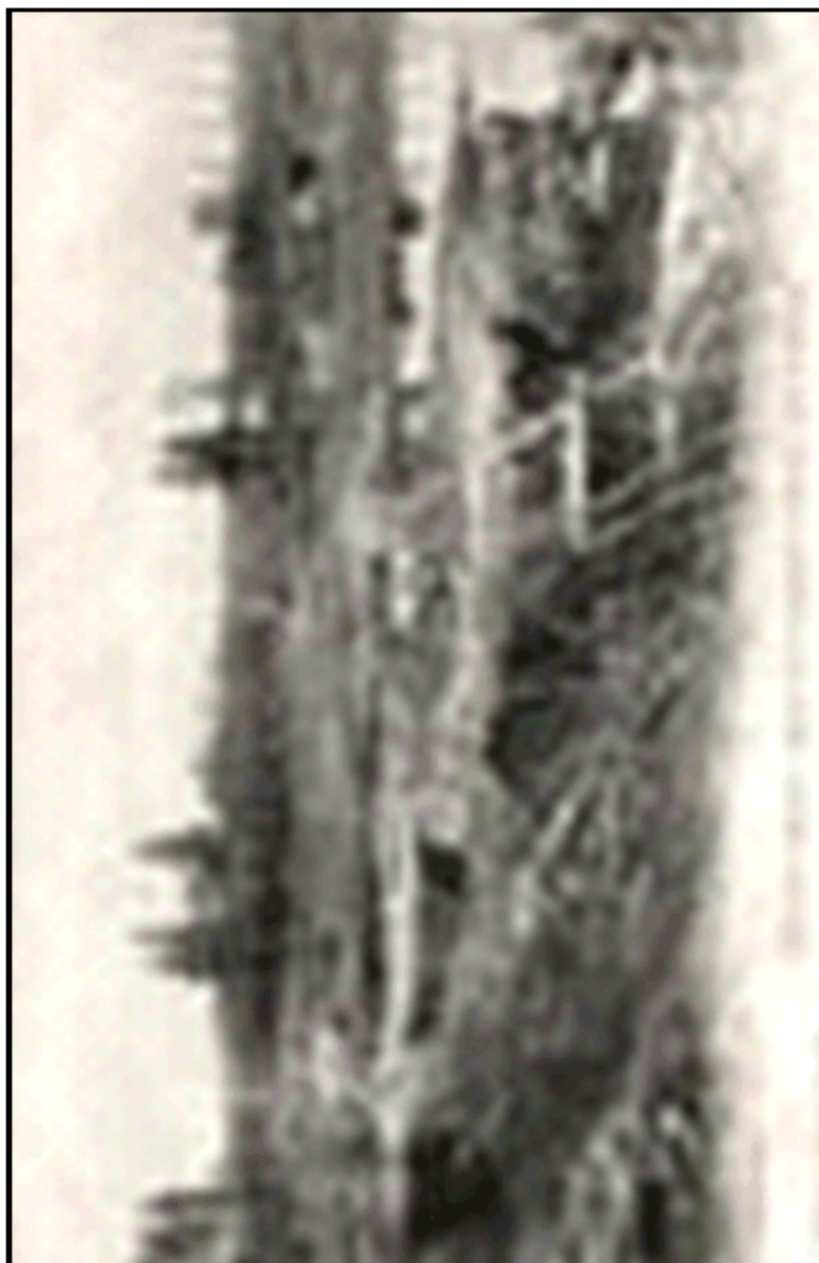


Figure 4 : Rupture du barrage de Bouzey (Prim.net, 07)





Figure 5 : Rupture du barrage de Bouzey (Prim.net, 07)

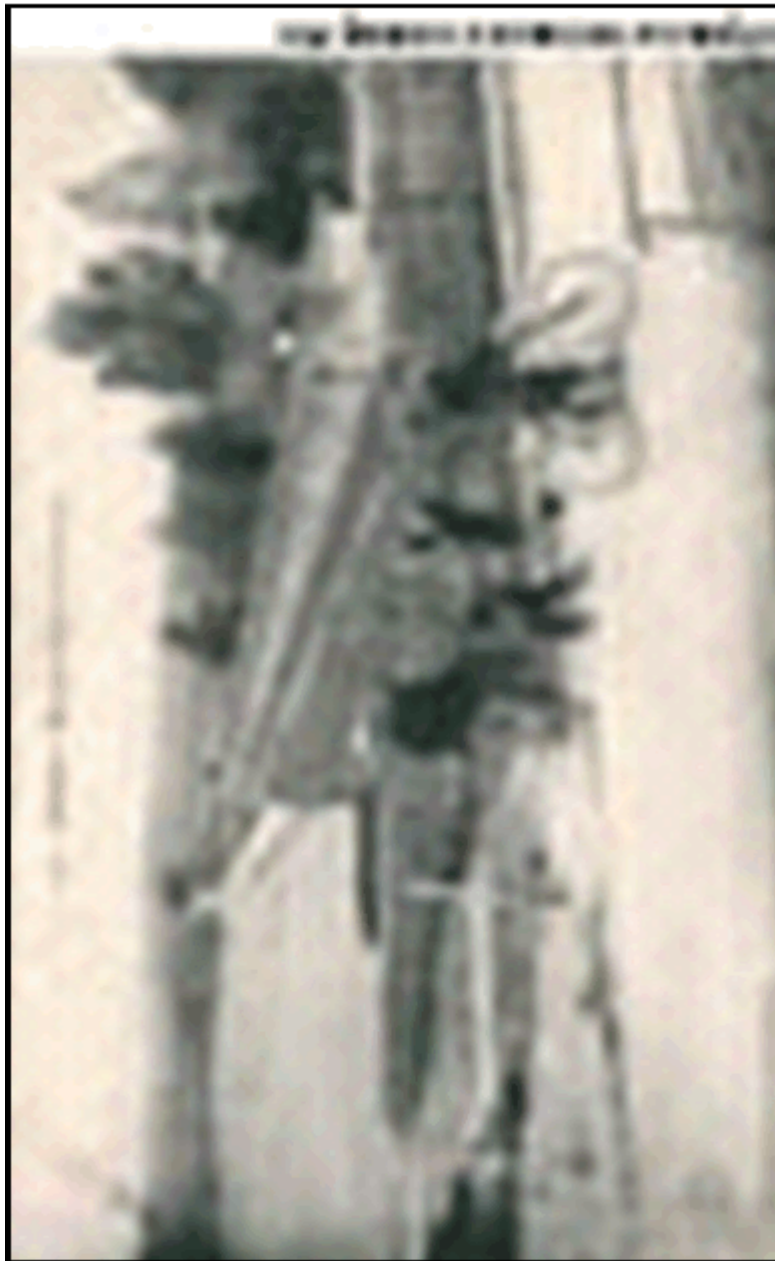


Figure 6 : Rupture du barrage de Bouzey (Prim.net, 07)

4. Leçons retirées - conséquences (CIGB, 74)

Jusqu'à cette époque, l'équilibre statique des barrages poids était calculé en faisant intervenir uniquement le poids et la pression de l'eau sur le parement amont. Le coefficient de sécurité de l'ouvrage était déterminé par référence au taux de compression de la maçonnerie, et par la résistance au glissement sur la fondation. Pendant longtemps, le taux de la contrainte maximale fut maintenu à un chiffre de l'ordre de 6 bars, ce qui donnait des profils épais. Lorsque les progrès réalisés dans la fabrication des liants hydrauliques permirent d'escompter des résistances bien plus élevées, les ingénieurs portèrent la contrainte admissible jusqu'à 8 et 10 bars sans se rendre compte que l'amincissement corrélatif du profil faisait alors apparaître une autre limite de stabilité, résultant de la pression interne de l'eau, dont d'ailleurs ils ne soupçonnaient pas l'existence ou ne mesuraient pas les risques.



Complément

CIGB – ICOLD^(CIGB, 74). Leçons tirées des accidents de barrages. Paris : CIGB. 1974.

Prim.net^(Prim.net, 07). Le risque rupture de barrages [en ligne]. 2007. Disponible sur :
34

http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risque_rupture_barrage/lesevenementshistoriques.htm³⁵. (Consulté le 30.03.2008).

C. Défaillance du barrage de Tigra

Le barrage Tigra a été construit en Inde.

Ce barrage s'est rompu le 4 août 1917.

1. Synthèse des faits (CIGB, 74)

Ce barrage poids en maçonnerie (avec mortier à la chaux) a été érigé près du village Tigra sur la rivière Sank province de Madhya Pradesh en Inde sur du grès stratifié. Il était destiné à l'alimentation en eau de la ville de Gwalior et de sa banlieue proche. Les travaux ont été commencés en 1913 et étaient presque achevés en 1917.

Les caractéristiques principales du barrage sont les suivantes :

- couronnement du barrage en maçonnerie EL 226,15 m. Couronnement du parapet EL 226,76 m ;
- longueur du barrage en maçonnerie 1360 m ;
- déversoir libre, longueur 305 m, seuil EL 225,54 m ;
- fondation la plus basse EL 200 m, hauteur maximum : 26,7 m ;
- hauteur au dessus du lit de la rivière : 24,7 m (lit de la rivière EL 201,46 m).

Comme il s'agissait d'un barrage en maçonnerie, il avait été prévu que le déversement se ferait en des points prédéterminés au moment de la mousson de toutes les années pendant la construction.

- 1913 : 214,6 m le surplus d'eau se déversait par la plus basse brèche à ce niveau ;
- 1914 : 221,02 m le surplus d'eau se déversait par la plus basse brèche à ce niveau ;
- 1915 : 224,03 m pas de déversement ;
- 1916 : 225,30 m pas de déversement ;
- 1917 : 227,00 m niveau juste atteint avant la rupture.

Le déversement a commencé le 31 septembre 1917. Un relevé journalier de différents niveaux du réservoir a donné les valeurs ci-dessous :

- 30.07.1917 : EL 225,00 m ;
- 31.07.1917 : EL 226,50 m déversement ;
- 1.08.1917 : EL 226,25 m ;

34 - http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risque_rupture_barrage/lesevenementshistoriques.htm

35 - http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risque_rupture_barrage/lesevenementshistoriques.htm

- 2.08.1917 : EL 225,86 m ;
- 3.08.1917 : EL 226,02 m ;
- 4.08.1917 : EL 226,10 m à 8h ; EL 227,00 à 15h05, le barrage déverse sur toute sa longueur.

Le 4 août 1917 à 16h, le barrage s'est rompu quand le niveau de l'eau a atteint la cote 227,00 m au moment où la longueur totale du barrage (le déversoir et le reste du barrage) a été submergée. Le débit de crue qui a passé par dessus le barrage a été estimé à 8500 m³/s. Sur une longueur de 400 m, le barrage a été complètement balayé. Deux blocs de maçonnerie principaux restent encore actuellement debout à l'aval du barrage actuel qui l'a remplacé.

2. Analyse des faits (CIGB, 74)

Le barrage a été fondé sur du grès stratifié. La fondation du barrage a été excavée à une profondeur d'environ 0,61 m dans le rocher et les veines exposées dans la largeur de la fondation ont été excavées et remplies de béton.

Les photographies montrent qu'il y a une faille par éboulement sur un plan de stratification, car pour aucun autre type de faille, une aussi énorme masse de maçonnerie n'aurait pu rester debout après la rupture. Les blocs de maçonnerie déplacés montrent uniformément une bonne qualité des matériaux et du travail. Ceci élimine l'hypothèse d'une construction défectueuse.

Le barrage a été reconstruit entièrement en 1929 avec cependant certaines modifications.

Niveau réservoir plein	EL 225,54 m déversoir avec vannes
Niveau maximum de l'eau	
Couronnement du barrage en maçonnerie	EL 225,70 m
Dessus du parapet	EL 226,76 m

Tableau 4 : Tableau 1 : Modifications du barrage en 1929

3. Iconographie (photographies, dessins, films...)

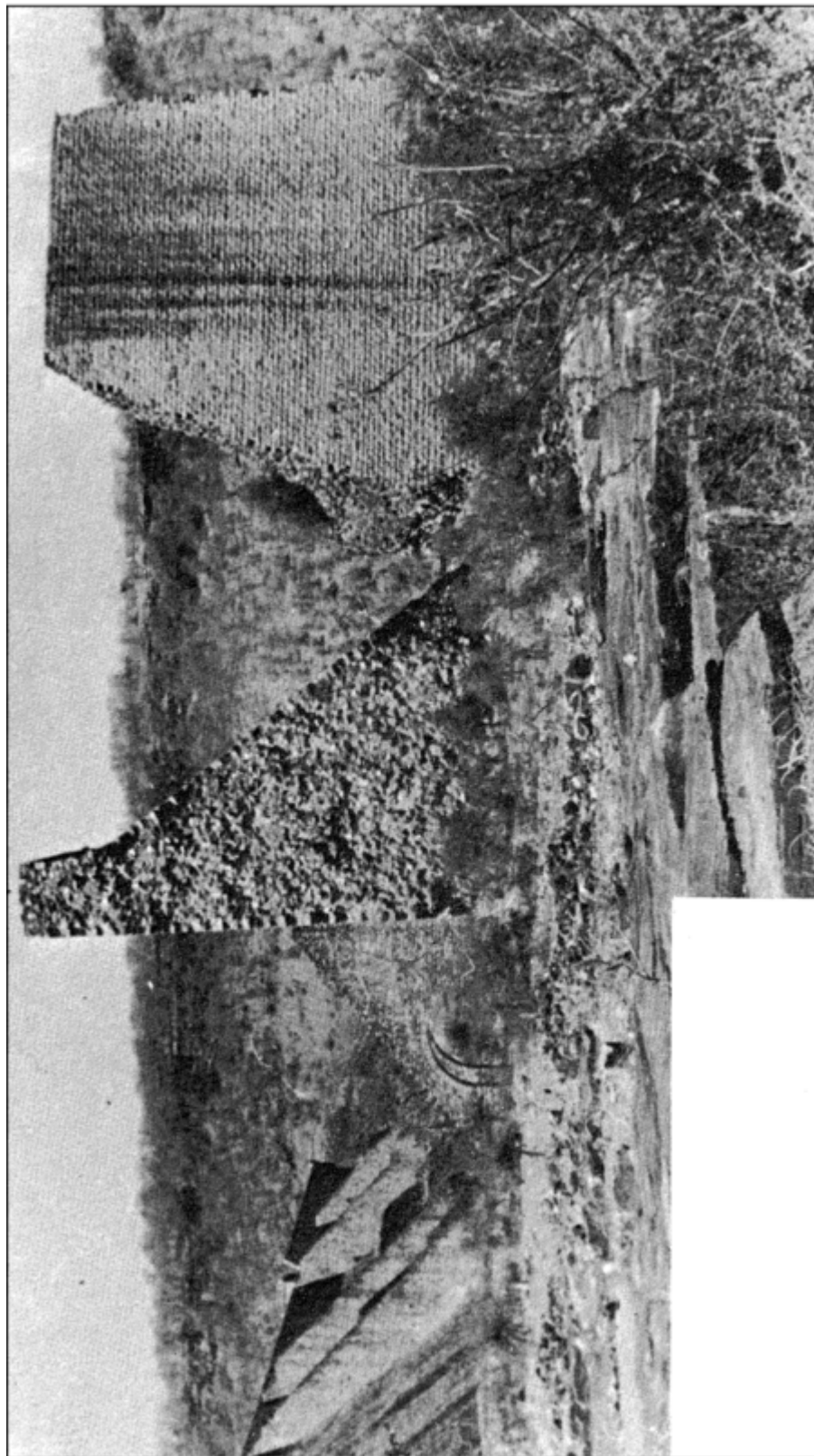


Figure 1 : Rupture du barrage de Tigr (CIGB, 74)

4. Leçons retirées - conséquences (CIGB, 74)

La section du barrage a été pratiquement conservée comme précédemment (face amont verticale, face aval à fruit de 3 sur 1). Mais, un rideau d'argile amont

d'environ 37 m de long et une tranchée parafouille remplie de béton avec un talon d'une hauteur maximum du 1/6 ont été réalisés pendant la reconstruction.



Complément

CIGB - ICOLD^(CIGB, 74). Leçons tirées des accidents de barrages. Paris : CIGB. 1974.

* *

*

Ces trois exemples de défaillance de barrages illustrent l'intérêt indéniable de l'étude de cas de défaillance pour faire évoluer les raisonnements, les modes de dimensionnement, les modes de construction et la associés à ces ouvrages.

Conclusion



Conclusion générale à venir.

Glossaire

Action

Qualifie toute source, tout phénomène pouvant s'exercer sur un ouvrage et y engendrer des sollicitations dont il convient d'analyser les conséquences. Les actions sont les forces, pressions, couples dus aux charges et aux déformations imposées à la construction. On distingue :

- Les actions directes, qui s'appliquent directement sur l'ouvrage : charges permanentes telles que le poids propre et les autres charges fixes, charges d'exploitation (trafic, surcharges sur des planchers)..., charges climatiques (neige et vent), charges sismiques ;
- Les actions indirectes : effets thermiques et de variations de température, précontraintes, déplacements imposés, tassements différentiels d'appuis, étaitements provisoires...

On distingue aussi les actions en fonction de leur variation dans le temps :

- Actions permanentes, par exemple poids propre des structures, équipements fixes et revêtements de chaussée, ainsi que les actions indirectes provoquées par le retrait et des tassements différentiels;
- Actions variables, par exemple les charges d'exploitation sur planchers, poutres et toits de bâtiments, les actions du vent ou les charges de neige;
- Actions accidentelles, par exemple les explosions ou les chocs de véhicules.

Catastrophe

Perturbation profonde du fonctionnement d'une collectivité ou d'une société, causant des pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales de grande ampleur, qui surpasse les capacités de la collectivité ou de la société affectée à les surmonter par ses propres moyens [Ref-TC32].

Coefficient de sécurité (« factor of safety »)

Rapport de la capacité résistante d'un système aux sollicitations calculées par le concepteur, souvent en application de règles établies [Ref-TC32].

Danger, menace (« danger, threat »)

Dans le langage usuel, le danger est ce qui menace ou compromet la sûreté, l'existence d'une personne ou d'une chose (Robert).

L'AFNOR le définit comme une source potentielle de dommages. Pour l'ISO, la menace est une cause potentielle d'un incident non désiré qui peut résulter dans des dommages à un système ou une organisation [ISO/IEC 13335-1:2004] [ISO/IEC 17799:2000].

Défaillance (« failure »)

Altération ou cessation de l'aptitude d'un système, à accomplir sa ou ses fonctions

requis avec les performances définies dans les spécifications techniques (norme AFNOR NF X60-010).

Imprévu

Caractérise un événement qui n'a pas été envisagé.

Risque

Dans le langage courant, le risque est « un danger éventuel plus ou moins prévisible » (Petit Robert, 1996) ou « un danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé » (Petit Larousse, 1997).

Définition scientifique :

- La définition scientifique du risque inclut une double dimension : celle des aléas et celle des pertes, toutes deux probabilisées. En conséquence, un risque se caractérise par deux composantes : le niveau de danger (probabilité d'occurrence d'un événement donné et intensité de l'aléa); et la gravité des effets ou des conséquences de l'événement supposé pouvoir se produire sur les enjeux.

On trouve cependant deux définitions assez différentes dans la normalisation internationale des risques :

1. « la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences » ;
2. « la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité ».

Bibliographie



[(CIGB, 74)]

CIGB – ICOLD. Leçons tirées des accidents de barrages. Paris : CIGB. 1974.

[(Bruel, 02)]

Bruel, F. La catastrophe de Malpasset en 1959 [en ligne]. 2002. Disponible sur : < http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm >. (Consulté le 18.03.2008).

[(Prim.net, 07)]

Prim.net. Le risque rupture de barrages [en ligne]. 2007. Disponible sur : < http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risque_rupture_barrage/lesevenementshistoriques.htm >. (Consulté le 30.03.2008).

[(Thomas, 99)]

Thomas, P. Les ruines du barrage de Malpasset (83) [en ligne]. 1999. Disponible sur : < <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img55-2003-10-13.xml> >. (Consulté le 18.03.2008).

Index



Barrage poids en maçonnerie, sous-pression, barrage voûte, modélisation..... p.10
.....p.10 faille étanche, surface de Vent, contreventement,
Conception, fatigue, glissement, pression interne, maintenance,
corrosion, inspections, sous-pression.... *p.10* assemblages, Béton,
goussets, phasage de Rupture progressive, armatures d'effort tranchant,
travaux, instabilité, robustesse structurale, exécution, erreurs multiples,
conséquences économiques, explosion, qualité de pont à fermes métalliques.
impact social.....p.10 construction, instabilité *p.10*
Neige, corruption, explosion, géométrique, défaut de