



HAL
open science

Simulation expérimentale du risque

Minh-Phong Luong

► **To cite this version:**

Minh-Phong Luong. Simulation expérimentale du risque. Risque et Génie civil, Nov 2000, Paris, France. pp.77-106. hal-00114460

HAL Id: hal-00114460

<https://hal.science/hal-00114460>

Submitted on 19 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Simulation expérimentale du risque

Minh-Phong Luong

CNRS UMR 7649
Laboratoire de Mécanique des Solides
Ecole Polytechnique
91128 Palaiseau Cedex
mpluong@hotmail.com

RÉSUMÉ. Cet Atelier a pour but de présenter quelques méthodologies capables de fournir des informations réalistes en vue d'une évaluation quantitative de la vulnérabilité des ouvrages de génie civil face aux risques de dysfonctionnement, de dommage ou de destruction. Cette synthèse résume les diverses contributions et réflexions du groupe de travail en insistant plus particulièrement sur la problématique du risque décrit, l'approche expérimentale proposée, les résultats obtenus sur des exemples précis et les perspectives.

ABSTRACT. This workshop aims to list some methodologies capable to provide realistic data in order to evaluate quantitatively the vulnerability of civil engineering works that face to risks of malfunctioning, damage and destruction. The text summarises diverse contributions and viewpoints of the working group, underlining particularly the described risk assessment, the proposed experimental approach, the obtained results on case studies, and the concluding remarks.

MOTS-CLÉS : bâti existant, étude de cas, expérimentation en centrifugeuse, explosions souterraines, migration des polluants, prototype en vraie grandeur, table vibrante, test vibratoire.

KEY WORDS: case history, centrifuge testing, existing building, full-scale prototype, impulse testing, pollution migration, shaking table, underground explosions.

1. Introduction

En interaction avec les méthodes numériques prédictives de dimensionnement et d'évaluation quantitative du comportement mécanique des ouvrages de génie civil sous aléas de service, les techniques physiques de simulation expérimentale de leur réponse rhéologique face aux chargements imposés et de leur performance mécanique vis à vis du risque d'endommagement, d'instabilité et de rupture sont extrêmement utiles pour obtenir des données physiques réalistes et utilisables pour le contrôle d'intégrité, la prévention du risque et la gestion des dommages. En effet, l'analyse expérimentale par simulation des mécanismes et phénomènes physiques générateurs de risque, ainsi que l'examen du comportement mécanique des structures de génie civil, offrent des informations pertinentes permettant d'évaluer le niveau de risque, de définir les modalités d'action pour le réduire, de développer des méthodes réalistes de calcul des structures susceptibles d'être soumises à des sollicitations accidentelles sévères et surtout d'élaborer des outils d'aide à la décision.

2. Approche par simulation expérimentale

Dans la pratique, une simulation expérimentale de comportement mécanique ou *modèle rhéologique* est toujours considérée comme une représentation physique simplifiée de la réelle tenue mécanique. Elle permet cependant de suivre de manière plus commode l'évolution de la réponse rhéologique aux sollicitations imposées avec le temps et les sollicitations. Elle s'impose de plus en plus dans tous les domaines théoriques et appliqués comme une méthode incontournable d'expérimentation et de validation. Le modèle rhéologique trouve son application naturelle en géomécanique et en génie civil pour éviter trop d'expérimentations complexes, coûteuses ou dangereuses, et surtout trop longues pour une équipe d'expérimentateurs. A défaut d'un modèle prédictif, un modèle cognitif, c'est à dire porteur de connaissances, est toujours d'un grand intérêt ; les meilleures leçons s'obtiennent de l'expérience...

... usus est optimus magister ...

Pour réaliser une similitude rhéologique correcte avec une fidélité suffisante [MAN 62] [LUO 85], il faut impérativement examiner *toutes* les conditions de similitude découlant de *toutes* les équations qui régissent les phénomènes étudiés :

- Equations de conservation exprimant les lois générales de la dynamique des milieux déformables,
- Equations rhéologiques traduisant les relations de comportement des matériaux en présence,
- Valeurs initiales et données au contour précisant les conditions aux limites dans le temps et dans l'espace.

Une simulation correcte nécessite une bonne cohérence à la fois mécanique (continuité de la matière, équilibre local des sollicitations, conservation de l'énergie, i.e. respect du 1^{er} principe de la thermodynamique), rhéologique (même réponse

comportementale, mêmes phénomènes dissipatifs, mêmes lois d'évolution, i.e. respect du 2^{ème} principe de la thermodynamique) et de site (mêmes contrastes de site, mêmes lois d'interface, mêmes lois d'évolution aux interfaces, i.e. respect de l'interaction site-structure).

Une question reste toujours ouverte : Que faire quand les conditions de similitude ne sont pas complètement remplies ? Une réponse logique est de recourir à l'expérimentation en *vraie grandeur* sur prototype. Beaucoup d'industries (automobiles, avions, bateaux, etc.) l'utilisent *in fine* pour valider leur produit. En génie civil on instrumente fréquemment les ouvrages de référence. Néanmoins, dans une certaine mesure, on peut tourner la difficulté en se contentant d'une :

— Similitude *partielle*, mais rigoureuse, lorsqu'il y a le choix du niveau d'un paramètre neutre, comme par exemple, le niveau de la pression si la surface libre est horizontale pour un liquide pesant et s'il n'y a pas de cavitation,

— Similitude *élargie* avec des effets de distorsion sur la similitude aisément évaluables qu'il faut accepter pour avoir des données expérimentales mesurables,

— Similitude *approchée* plus discutable si certaines conditions de similitude ne sont pas respectées.

L'expérimentation sur modèles réduits est basée sur la possibilité de changer les trois échelles des *longueurs*, des *temps* et des *forces de masse*, sans que soient modifiées les équations qui décrivent un phénomène mécanique soumis à l'investigation. Cette propriété est appelée homogénéité des équations [STG 85]. En adoptant la notation de Mandel [MAN 62], l'échelle de similitude u^* reliant une grandeur u_p du *prototype* à la grandeur correspondante u_m de la *maquette* s'écrit :

$$u^* = u_m / u_p$$

Les conditions de similitude se traduisent par des relations entre les rapports u^* relatifs aux différentes grandeurs caractéristiques de la structure et du modèle, qui interviennent de façon significative dans les sollicitations de risque simulées et dans la réponse comportementale observée. Ces relations s'obtiennent par analyse dimensionnelle de *toutes* les équations régissant *tous* les phénomènes physiques concernés. Ces relations de similitude se réduisent dans certains cas particuliers à des nombres adimensionnels, appelés *π -numbers* dans les publications anglo-saxonnes [SCH 77].

Dans ce texte, sont successivement présentés quelques exemples de méthodologies utilisées sur une large gamme d'échelles de simulation, capables de fournir des informations pertinentes et utilisables en étude de faisabilité, en avant-projet, en outil de dimensionnement et en données de validation.

3. Similitude rhéologique à très faible échelle des longueurs

Lorsque le risque est identifié, l'expérimentation en similitude rhéologique permet d'acquérir des connaissances paramétriques détaillées et approfondies pour mieux appréhender le déclenchement des phénomènes de risque, leurs mécanismes, leur propagation et leurs effets [LUO 93].

Dès 1869 Edouard Phillips [PHI 69], professeur de mécanique à l'Ecole Centrale et à l'Ecole Polytechnique, définit la similitude en macrogravité dans le cadre de la mécanique des milieux déformables pour indiquer dans quel cas les corps déformés restent semblables. Il proposait d'appliquer, dans les avant-projets de faisabilité, cette technique de similitude à des maquettes de structure de génie civil :

— au $1/50^e$ pour le pont tubulaire Britannia, sur le détroit de Menai, dont la longueur totale, en quatre travées inégales, est de 430 m. Une maquette de 38 kg suffit pour représenter la masse du tube entier de 4 740 tonnes.

— au $1/20^e$ et au $1/50^e$ pour le pont de Conway.

Une réflexion sur les essais géotechniques réalisés et réalisables en centrifugeuse conduirait à l'établissement d'une méthodologie basée sur la conception des modèles réduits en similitude rhéologique, c'est à dire reproduisant d'une manière réaliste le comportement sollicitation/déformation des géomatériaux. Une première question se pose aux candidats concepteurs de modèles géotechniques centrifugés : *Qu'apporte la simulation en centrifugeuse à l'étude du comportement rhéologique des ouvrages géotechniques ?*

L'intérêt de cette technique, en mécanique des sols, est bien évidemment de pouvoir simuler de façon fidèle sur modèle à une échelle réduite choisie, le comportement d'un sol, au même niveau de contrainte (e. g. échelle des contraintes $\sigma^* = 1$), sollicité par la réalisation d'un ouvrage ou un événement naturel (remblai, excavation, fondation, ouvrage souterrain, glissement de terrain, écoulement d'eau, etc.). Cette simulation est rendue possible grâce au respect de certaines conditions de similitude entre modèle ou *maquette* et ouvrage réel ou *prototype*, en particulier celles relatives aux forces de masse, ou poids propres des matériaux en présence, qui sont déterminantes dans ce type de problèmes [LUO 85].

3.1. Simulation des phénomènes géologiques

La centrifugation sur des machines de grand rayon, de l'ordre de quelques mètres à une dizaine de mètres, est une méthode d'essai qui permet d'imprimer une accélération contrôlée (représentant une gravité artificielle) à un matériel ou une maquette embarquée généralement sur le plateau d'une nacelle pivotante qui prend un angle de vol en fonctionnement tel que l'accélération appliquée sera toujours perpendiculaire au plateau.

Une échelle des longueurs de $\lambda^* = 10^{-7}$ utilisée à 100 g (g étant la gravité terrestre) a permis de représenter les mécanismes de la collision Inde-Asie qui s'était produit depuis l'ère tertiaire il y a environ 40 millions d'années [PEL 88]. La relation de similitude $\sigma^* = \rho^* g^* \lambda^*$ donne pour une échelle des masses ρ^* voisine de l'unité une échelle des contraintes de l'ordre de 10^{-5} . Cette étude a contribué à mieux appréhender la complexité de la sismicité actuelle de la Chine [PEL 87], à mieux localiser les zones sismiques actives et à mieux gérer ces catastrophes naturelles potentielles.

En stockage souterrain des hydrocarbures ou éventuellement des déchets radioactifs, la montée d'un dôme de sel à partir d'une couche sédimentaire de sel a été représentée avec une échelle des longueurs de $\lambda^* = 10^{-5}$ utilisée à 100 g [ZEL 88]. Cette étude a permis d'explorer des mécanismes de déformations géologiques afin d'estimer la faisabilité, la stabilité et la sécurité des installations de stockage souterrain en formations salifères.



Figure 1. La grande centrifugeuse SILAT du CEA-DAM Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine.

3.2. Explosions souterraines

Les explosions enterrées peuvent survenir dans des situations volontaires (creusement de tunnel ou de galeries), accidentelles (dépôt et stockage d'explosifs ou de mélanges détonants), malveillantes (terrorisme) ou dans les cas extrêmes des conflits militaires. Indépendamment des causes, le problème de l'effet sur les structures se pose dans tous les cas et ici encore plus que dans le cas des explosions aériennes la difficulté et le coût des essais de validation des modèles à l'échelle 1, sont évidemment cruciaux [DUT 99]. La simulation en centrifugeuse est capable de reproduire raisonnablement les interactions sol-structure [Contribution de Dutheil] avec des signaux tout à fait similaires en durée (impulsion, durée de choc) et en amplitude (pic de vitesse, d'accélération, etc.).

3.3. *Simulateur sismique*

Pour simuler un séisme à l'échelle un, il faudrait pouvoir générer de fortes explosions et mesurer leurs effets sur les structures. C'est une méthode onéreuse et de mise en œuvre extrêmement délicate et risquée.

De tels essais ont été réalisés en centrifugeuse [LUO 93] avec une méthode originale sur la centrifugeuse du CEA/CESTA. On y génère en vol à 100 g, c'est à dire avec une échelle des longueurs $\lambda^* = 10^{-2}$, sur une période d'une quinzaine de secondes, une dizaine d'impulsions au moyen d'explosifs (charges de un à cinq grammes). Les explosions sont déclenchées dans une chambre fermée, fixée en flanc de conteneur. L'impulsion est transmise au sol à éprouver au travers d'une membrane souple. En général la masse de la maquette est de l'ordre de sept cent cinquante kilogrammes et l'accélération d'épreuve de l'ordre de 100 g [Contribution de Rivière & Luong].

De tels essais permettent d'étudier les phénomènes de liquéfaction des sols, d'assises des bâtiments et de fondations d'ouvrages d'art en fonction de la nature du sol de fondation. C'est aussi un moyen expérimental pratiquement indispensable pour vérifier et valider des dispositifs d'isolation vibratoire ou *fusibles géotechniques* [LUO 94].

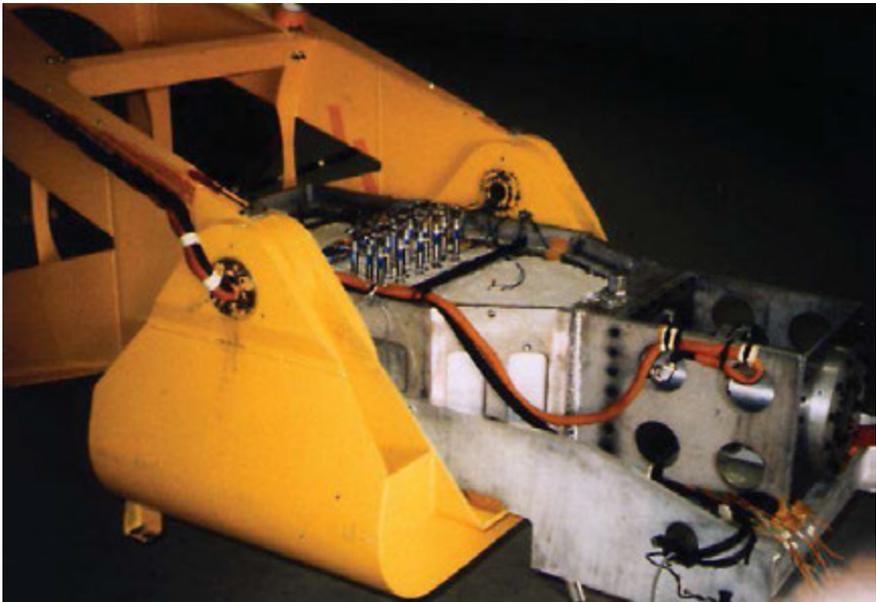


Figure 2. *Fusible géotechnique simulé en centrifugeuse pour adoucir les ondes sismiques créées par le générateur sismique à explosion séquentielle du CESTA.*

3.4. Plate-forme pétrolière en haute mer

Plusieurs plates-formes pétrolières à embase-poids ont été mises en place depuis les années 1970 en mer du Nord, pour la production et/ou le stockage des hydrocarbures par des profondeurs de 70 m à plus de 150 m. L'embase de ces structures, constituée généralement d'un caisson de 100 à 140 m de diamètre ou de côté, d'une surface au sol de 8 000 à 12 000 m² environ, est le plus souvent munie de bèches de géométrie et de dimensions très variables suivant la nature et la résistance au cisaillement des sols superficiels. Le poids déjaugé de ces plates-formes est compris entre 2 GN et 3,5 GN et la contrainte moyenne, supposée uniforme, au sol varie de 0,25 à 0,35 MPa. Sous l'action incessante de la houle, ces structures induisent des contraintes cycliques dans le sol de fondation dont les conséquences sur la stabilité demeurent mal connues. La principale difficulté du problème réside probablement dans la détermination de l'influence de l'histoire des chargements, de différentes amplitudes, l'application aux sols du principe de superposition ne pouvant être a priori retenue.



Figure 3. Plate-forme pétrolière en haute mer soumise à la houle.

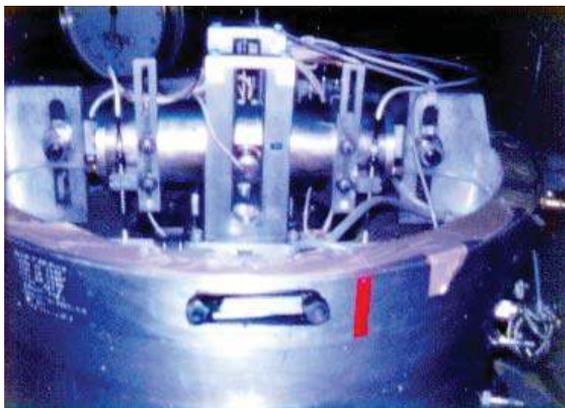


Figure 4. Simulation en centrifugeuse des actions de la houle.

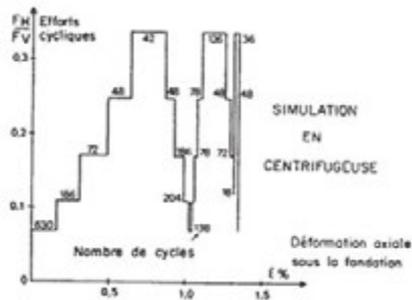


Figure 5. *Sévère tempête simulée en centrifugeuse.*

Les déplacements verticaux et horizontaux de la maquette de la plate-forme sont mesurés à l'aide des capteurs de déplacement. Extrapolés à une structure de diamètre $B = 100$ m, on constate que les déplacements cycliques prévisibles de l'ordre de quelques centimètres sont tout à fait comparables à ceux obtenus par d'autres expérimentateurs dans des conditions de sols différents. Ces modèles de fondations marines réalisés en similitude rhéologique constituent une technique très intéressante pour l'étude de la stabilité des fondations de structures à embase-poids, en permettant notamment une analyse approfondie des principaux paramètres du problème [LUO 90]. Cette expérimentation sera facilement transposable à d'autres types de structures marines et en particulier aux corps morts de grandes dimensions, sollicités verticalement : corps morts prévus pour la fixation des plates-formes à câbles tendus, embase de colonnes oscillantes.

3.5. Pile de pont à hauban en zone sismique

La conception des grands ouvrages de Génie Civil fait souvent appel à des concepts nouveaux qui n'ont pas reçu la validation de l'expérience. Le pont de Rion Antirion, projeté par GEFYRA/DUMEZ-GTM, est destiné à franchir le golfe de Corinthe près de Patras. La partie principale, haubanée à travées multiples, longue de 2.290 m, est constituée de trois travées centrales de 560 m et de deux travées d'extrémité de 305 m. Cet ouvrage est situé dans un environnement exceptionnel, caractérisé par une profondeur d'eau de 65 m avec des sols de fondation en dépôts alluvionnaires de qualité médiocre et soumis à une sismicité élevée, l'accélération au niveau du fond de mer étant estimée à 0,48 g.

Parmi les moyens expérimentaux les mieux adaptés, les essais en centrifugeuse occupent une place privilégiée de par la richesse des informations qu'ils sont susceptibles de fournir. C'est ainsi qu'une maquette de pile de pont (Fig. 6) a été réalisée avec un nouveau type de renforcement de sols de fondations [PEC 98].



Figure 6. *Simulation en centrifugeuse du comportement d'une pile de pont sur sol renforcé.*

Une maquette de 1 tonne à une échelle $\lambda^* = 1/100^{\circ}$ (1 cm équivaut à 1 m) soumise à 100 g (100 fois l'accélération de la pesanteur) se comporte comme un spécimen à l'échelle 1 de 1 million de tonnes à l'accélération g. Les essais menés jusqu'à la rupture permettent d'appréhender les mécanismes de stabilité et de ruine des fondations renforcées (Fig. 7).



Figure 7. *Mécanisme de déformation de la fondation renforcée d'une pile de pont après essai à la rupture.*

3.6. Merlon de protection contre la chute des blocs rocheux

Le 1^{er} Mai 1977, un éboulement rocheux a provoqué des dommages spectaculaires à certains ouvrages de génie civil dans les Alpes françaises. En 1985 la construction d'une voie routière express traversant ce site a motivé la recherche d'une protection contre un accident de ce type.

En l'absence de toute méthode de dimensionnement fiable d'un merlon prévu pour stopper ces blocs rocheux, une étude sur modèle réduit a été menée en centrifugeuse [LEP 88] avec des objectifs opérationnels clairs :

- vérifier que l'ouvrage projeté pouvait arrêter les éboulements rocheux,
- estimer l'amplitude des ondes engendrées dans le sol par l'impact des blocs.

L'expérimentation en centrifugeuse a permis de répondre aux questions formulées :

- le dimensionnement du merlon doit permettre d'arrêter les blocs rocheux,
- les vitesses particulières mesurées en aval du merlon ont été exploitées pour déterminer les actions à prendre en compte pour le dimensionnement de la voûte d'un tunnel émergeant dans cette zone.

4. Simulation à très faible échelle des temps

Pour la simulation des problèmes évoluant dans la durée, la réduction en temps d'épreuve correspond au carré du nombre de g pour les problèmes de diffusion et du nombre de g pour les problèmes dynamiques. Ainsi estimer à plusieurs décennies l'impact de polluants pouvant migrer dans les sols, simuler des diffusions atmosphériques nocives, étudier des écoulements d'eau, sont autant d'applications envisageables sur des maquettes en centrifugation. Cette voie expérimentale sert au recalage des modèles théoriques et numériques de représentation de ces mêmes phénomènes à risque. A 100 g par exemple, un essai de *neuf heures* correspond à un phénomène de diffusion pendant *dix ans*. A titre d'exemple, pour suivre la diffusion et la migration de polluants dans le sol sur une durée de plusieurs millénaires, l'US Corps of Engineers prépare la mise en service d'une centrifugeuse capable d'un modèle d'une masse de deux tonnes soumis à 350 g ; ce qui correspond à *14 années* de vieillissement par *heure* de rotation (c'est à dire un *millénaire* tous les *trois jours*).

5. Similitude rhéologique à faible échelle des longueurs

Lorsque le poids propre n'est pas un paramètre prépondérant, l'expérimentation en laboratoire avec des matériaux équivalents donne des résultats utiles sans la sophistication exigée par la centrifugation des modèles.

5.1. Protection de pile de pont

En mai 1980, un navire de 39.000 tonnes percuta une pile des ponts jumelés de Sunshine Skyway dans la Tampa Bay en Floride causant 33 victimes et 20 millions de dollars US de dégâts. Que faut-il faire pour protéger une pile de pont qui présente des risques de collision avec des navires de l'ordre de 80.000 tonnes se déplaçant à 15 nœuds ?

Il a été envisagé d'entourer la pile de pont d'un talus de sable suffisamment dimensionné pour résister et encaisser les chocs d'un navire affecté d'une panne de barre, sans trop l'abîmer. L'objet a été d'étudier la faisabilité d'un tel système de protection. L'étude de la protection contre d'éventuels chocs de navire a été réalisée en laboratoire par des essais sur modèles réduits. Les résultats expérimentaux obtenus ont donné une évaluation à la fois qualitative et quantitative de l'influence des différents paramètres caractérisant le navire et le massif de protection de la pile de pont [LUO 83].

5.2. Expérimentation sur table vibrante

Les murs porteurs à faible taux de ferrailage sont particulièrement répandus en France. Malgré le bon comportement de ce type de structures, observé lors de séismes passés, les codes de dimensionnement comme l'EC8 risquent de les pénaliser.

Dans le cadre d'un programme de recherche français CAMUS, des maquettes à l'échelle $\lambda^* = 1/3$ formées de deux murs parallèles en béton armé sans ouverture et reliés par 6 planchers carrés (Fig. 8), ont été testées sur la table Azalée du CEA [Contribution de Chaudat et al.]. Les 5 planchers supérieurs supportent des masses additionnelles en béton et acier afin d'obtenir une contrainte normale similaire à celle rencontrée dans la plupart des bâtiments à murs porteurs (soit une compression de 1,6 MPa à la base du mur).

Deux maquettes d'une masse de 36 tonnes chacune ont été dimensionnées pour avoir un mode de fonctionnement à plusieurs étages. La configuration d'essai a ensuite été reprise pour une maquette supplémentaire ayant les mêmes conditions aux limites dans le cadre des programmes ECOEST II et ICONS financés par la Commission Européenne. Cette nouvelle maquette présente le même moment capable à la base que la première maquette CAMUS I, mais dimensionnée par ailleurs en suivant les recommandations de l'EC8 avec une rotule plastique à la base. Lors de ces essais, les maquettes ont subi des niveaux d'endommagement élevés avec fissuration du béton et rupture des aciers. De plus, deux de ces maquettes ont fait l'objet d'essais intermédiaires pour lesquels des signaux du type séisme proche ont été utilisés alors que tous les autres essais ont été effectués avec le signal artificiel Nice.

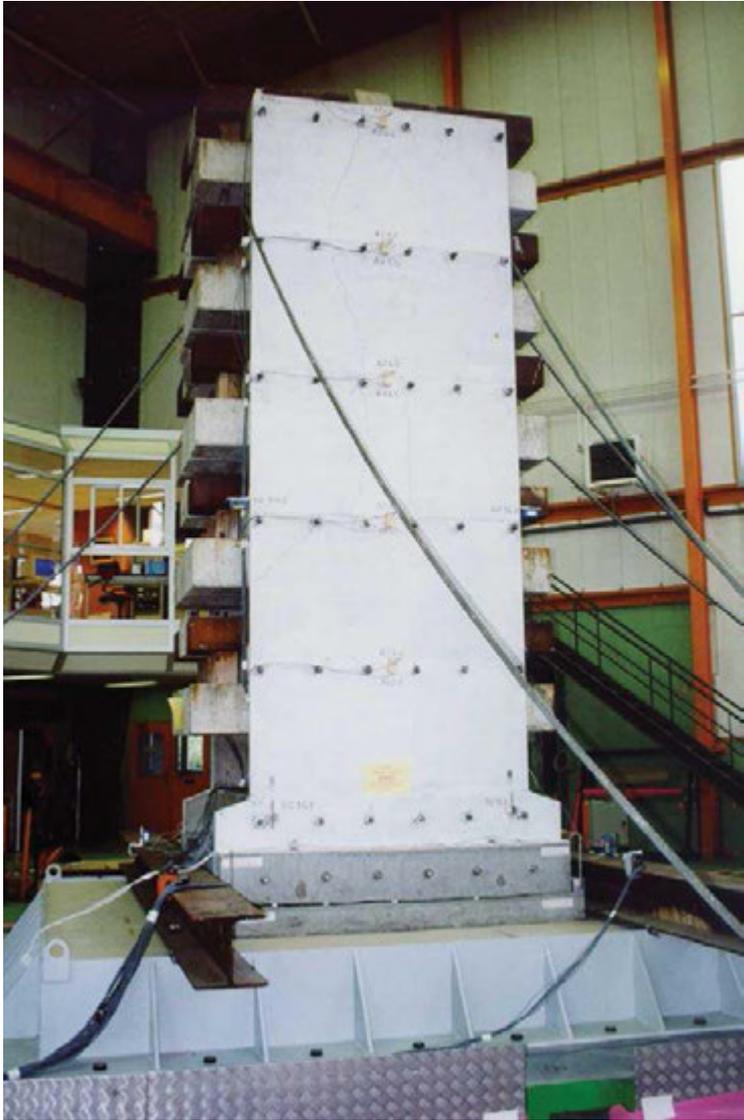


Figure 8. *Maquette à l'échelle $\lambda^* = 1/3$ d'une structure à murs porteurs en béton armé (CAMUS IV) sur la table vibrante Azalée du CEA Saclay.*

L'utilisation de la thermographie infrarouge différentielle a permis de détecter les différents mécanismes de dissipation prévus lors du dimensionnement de ces maquettes d'essais [LUO 00].

5.3. Ancrages à forte capacité de tenue

L'importance de l'ancrage pour la sécurité d'un bateau, d'un navire est évidente et ce problème prend une dimension nouvelle en géotechnique pétrolière marine. La fixation des structures flottantes destinées à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures en haute mer nécessite la réalisation des points d'ancrage à forte capacité de tenue (Fig. 9).

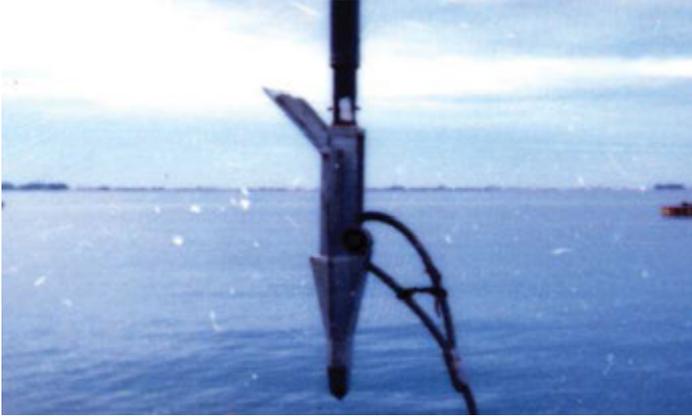


Figure 9. *Système d'ancrage à forte capacité de tenue.*

Chaque ligne d'ancrage, fortement sollicitée du fait de l'action des éléments (houle, vents, courants,...) sur la structure, transmet au point d'ancrage des efforts pouvant être très importants :

— horizontaux (ancres funiculaires) de 1 MN à 2 MN (100 T à 200 T) dans le cas des engins d'exploration, et pouvant aller jusqu'à 4 MN (400 T) pour certaines structures de production.

— verticaux de 1 MN à 3 MN (100 T à 300 T) pour la fixation des conduites de subsurface, et de quelques milliers de T pour les plates-formes à câbles tendus.

Un empirisme de plusieurs siècles a permis d'améliorer les formes des ancres marines classiques. Ce n'est que récemment que le recours à l'expérimentation (Amirauté Britannique, CNEXO, IFP, API, etc.) est devenu systématique pour analyser le comportement mécanique et la cinématique des ancres : pénétration, stabilité et étude comparative des modèles existants [BOW 94].

La qualification du Bureau Veritas parue en 1975 montre que l'efficacité (rapport de la tenue sur le poids de l'ancre) diminue de 70 à 6 lorsque le poids passe de 120 N à 350 kN. Ceci montre à l'évidence qu'il y a un effet d'échelle très significatif [LUO 80], d'où l'intérêt des essais en vraie grandeur.

6. Expérimentation en vraie grandeur

L'expérimentation en vraie grandeur supprime une forte part d'inconnu concernant le comportement rhéologique des matériaux en présence, les éventuels effets d'échelle de toute nature plus ou moins apparents, le couplage de différents mécanismes en jeu, etc.

6.1. Expérimentation sur des buses métalliques pour franchissement d'autoroute

Le comportement mécanique des buses métalliques enterrées sous remblais d'autoroutiers (Fig. 10) dépend de l'interaction mécanique entre la structure flexible en contact le sol environnant déformable sous les conditions de charges et sollicitations subies au cours des phases de leur construction et aussi lorsqu'elles sont en service [LUO 81].



Figure 10. Buse métallique effondrée lors de sa construction sous une autoroute.

Une expérimentation en vraie grandeur a été effectuée sur 3 buses circulaires de 2,50 m de diamètre : l'une est de conception classique, les deux autres comportent soit un, soit deux dispositifs contractables devant permettre de reporter dans le sol environnant une partie des contraintes normalement supportées par l'ouvrage. Le chantier expérimental de Dourdan (Fig. 11) illustre l'intérêt des fondations profilées en berceau et souligne les conséquences d'une installation sur fondation plate et du mauvais remplissage sous les reins de la buse, qui en est généralement la conséquence [BAU 85].



Figure 11. *Expérimentation en vraie grandeur des buses métalliques sous fort recouvrement.*

6.2. Effondrement localisé sous remblais ferroviaires ou routiers

Des cavités, de diamètres dépassant parfois 5 m, peuvent se former sous des remblais et entraîner des effondrements de surface avec parfois des décrochements localisés entraînant un risque important pour la circulation de surface. En plaçant des géosynthétiques à la base du remblai, on a pu limiter les effets de surface de la formation de la cavité. Une expérience en vraie grandeur a été entreprise à Eure sur la base ferroviaire du TGV [Contribution de Gourc et al.].

6.3. Expérimentation sur bâti existant

Les bâtiments « modernes » des années 55-75 représentent environ le tiers des logements en France. Un programme expérimental sur bâtiments désaffectés avant et en cours de démolition a été entrepris [Contribution de Boutin et al.] avec trois méthodes vibratoires : enregistrements du bruit de fond mécanique (très simple à mettre en oeuvre), mise en vibration par un excitateur à balourds et mesures sous chocs générés volontairement par un engin de chantier. Les résultats obtenus en fonction de transferts empiriques (paramètres modaux, premières fréquences et déformées dans chaque direction, amortissement) sont cohérents malgré les différences importantes sur le type de sollicitation, leur niveau et leur condition d'application. En outre ils ont permis d'effectuer des calculs réalistes sur des structures existantes mal connues, en couplant la modélisation et les données expérimentales.

L'approche expérimentale adoptée a supprimé une forte part d'inconnu : outre l'obtention des caractéristiques modales, ces expériences ont été très instructives quant à l'interaction structure-sol et les effets d'éléments non structurels, phénomènes qu'il est essentiel d'intégrer pour une vision réaliste du comportement aux séismes.

6.4. Interaction sol-structure sur un bâtiment HLM en banlieue nord de Paris

Construit en 1957, l'ensemble du bâtiment a semblé présenter une stabilité relativement paisible jusqu'en 1976. Lors des travaux de construction d'un collecteur principal d'eaux pluviales, un puits de pompage a été foncé dans le voisinage proche. Les rapports des travaux ont noté :

- une très forte arrivée d'eau dans la couche marno-calcaire de Saint-Ouen $30 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ soit $8,33 \text{ l.s}^{-1}$, et de l'eau chargée de gypse ($1,3 \text{ kg.m}^{-3}$)
- un abaissement de la nappe phréatique (2 à 3 m par rapport à la normale suivant les endroits et 2 m sous l'immeuble).



Figure 12. *Fissures alarmantes apparues sur l'immeuble sinistré.*

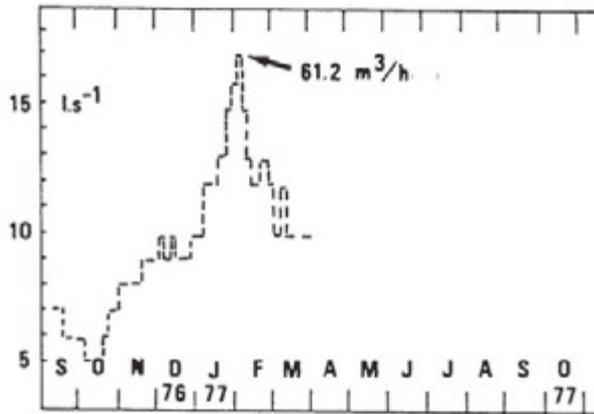


Figure 13. Débit constaté lors des opérations de pompage.

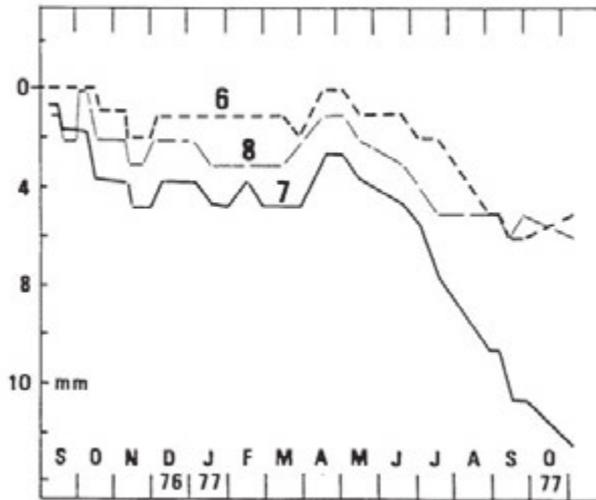


Figure 14. Mouvements enregistrés par les repères installés sur l'immeuble sinistré.

Une pétition des occupants de l'immeuble datée du 31-08-76 souligna la gravité des fissures apparues sur toute la hauteur de l'immeuble et attesta que l'apparition des fissures est postérieure au début du pompage (Fig. 12). Le 28-10-76, le Bureau Veritas a constaté que l'immeuble s'est fendu en deux au droit de la cage d'escalier ouest laquelle forme en plan un étranglement de moindre résistance. A travers cette cage et visible sur toute la hauteur de l'une et l'autre de ses deux façades se présente

un coup de sabre très important (5 cm de largeur en haut et quelques mm de largeur en bas). A l'intérieur les marches de l'escalier se déboîtent et des plâtras commencent à tomber. L'arrêt de péril, qui a été pris à la fin de l'été, est justifié car il y avait un danger effectif d'effondrement. La cinématique du mouvement du bâtiment sinistré a été décelée grâce à au nivellement des repères de stabilité installés sur les façades avec une précision de ± 1 à 2 mm. La corrélation entre les opérations de pompage (Fig. 13) et les tassements observés (Fig. 14) a été établie par une analyse détaillée des données géotechniques du site [FEU 64] [JOU 76] sur lequel a été construit le bâtiment [LUO 89].

6.5. Silo métallique de stockage

Le stockage en silo des produits granulaires en vrac génère toute une classe inhabituelle de problèmes de rupture à la fois structurale (pliage, flambage, fissuration, voire fendage et effondrement des parois, etc.) et fonctionnelle (formation des voûtes, des cavités, de cheminée ou de noyau au sein du matériau ensilé, etc. et surtout difficulté, voire impossibilité d'extraire le produit stocké). Les estimations des efforts et des pressions sur les parois du silo sont souvent incertaines, hasardeuses et/ou généralement basées sur des notions trop simplificatrices, parfois peu évidentes, vu la très grande diversité des matériaux en vrac à ensiler.



Figure 15. Complexe de stockage céréalier en silos métalliques de 150.000 tonnes.

Le complexe de stockage céréalier (Fig. 15) en considération est constitué de 10 cellules métalliques de section carrée 12,50 m \times 12,50 m et de hauteur 16 m. Les parois verticales sont en tôles nervurées assemblées par des profilés : soudés avec un bardage extérieur. Elles sont dotées d'un système anti-déversement des parois à l'aide des tirants intérieurs de diamètre 32 mm de paroi à paroi. Ces derniers sont situés dans des plans horizontaux répartis à des intervalles variables sur la hauteur de 16 m. Dans chacun de ces plans, on trouve deux tirants : un long de 7 m et un court de 3,50 m constituant respectivement l'hypoténuse des triangles isocèles de 5 m et 2,50 m de côté. Chaque tirant est boulonné à ses extrémités sur une platine soudée sur la paroi.

Des désordres ont été observés dès les premiers essais de remplissage des cellules par du riz paddy en grain long non décortiqué. Lorsque le riz paddy est stocké pour la première fois, le taux d'humidité est de 20 à 22 %. Les cellules sont

alors ventilées, par insufflation d'air par le bas, pour évacuer les gaz qui ont tendance à se former et ainsi pour éviter la fermentation. Il s'agit d'une conservation temporaire de quelques jours, après lesquels le riz paddy est repris pour être passé dans un séchoir. Après ce traitement, le riz paddy revient avec une humidité entre 14 et 17 % et il est de nouveau stocké et ventilé selon le traitement subi : produit humide, sec, ventilé ou non.

Le sinistre s'était manifesté par un phénomène de déformation des parois extérieures qui se creusent vers l'intérieur. Le creux observé à l'extérieur du bardage est de l'ordre de 13 cm. Les désordres secondaires issus de la déformation ont été la rupture des cordons de soudure (Fig. 16) rassemblant les : verticaux des différents panneaux formant la paroi (cinq panneaux de 2,50 m de large chacun).

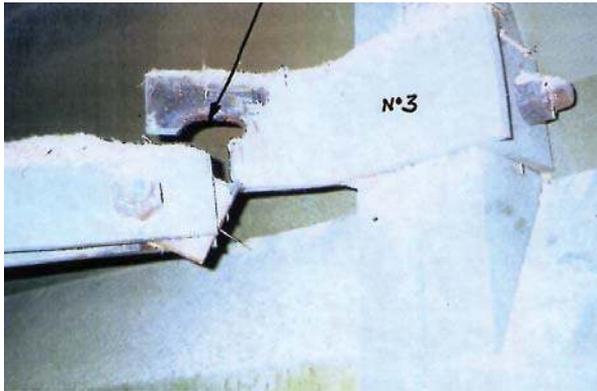


Figure 16. Rupture des cordons de soudures assurant le système anti-déversement des parois.

Les mesures de la déformée des parois au niveau $H = 8$ m effectuées trois ans après la mise en service du complexe de stockage ont donné des valeurs inattendues et inhabituelles (Fig. 17) :

- une rentrée $d = 175$ mm pour la cellule N° 4 remplie à 90 %,
- une rentrée $d = 95$ mm pour la cellule N° 8 remplie à 100 %,
- une rentrée $d = 40$ mm pour la cellule N° 3 vide, équipée de trois tirants-boutons ($\varnothing 139^7$) de remplacement effectué l'année précédente.

En profil sur la hauteur des cellules N° 4 et N° 6, les mesures à 9 m de hauteur ont donné des rentrées maximales respectivement d'environ 115 mm (à 100 % de remplissage) et 68 mm (à 50 % de remplissage).

MESURE DE LA DÉFORMÉE
DES PAROIS . 10 MARS 1993
EFFECTUÉE à H = + 8m .



VENTILATEURS

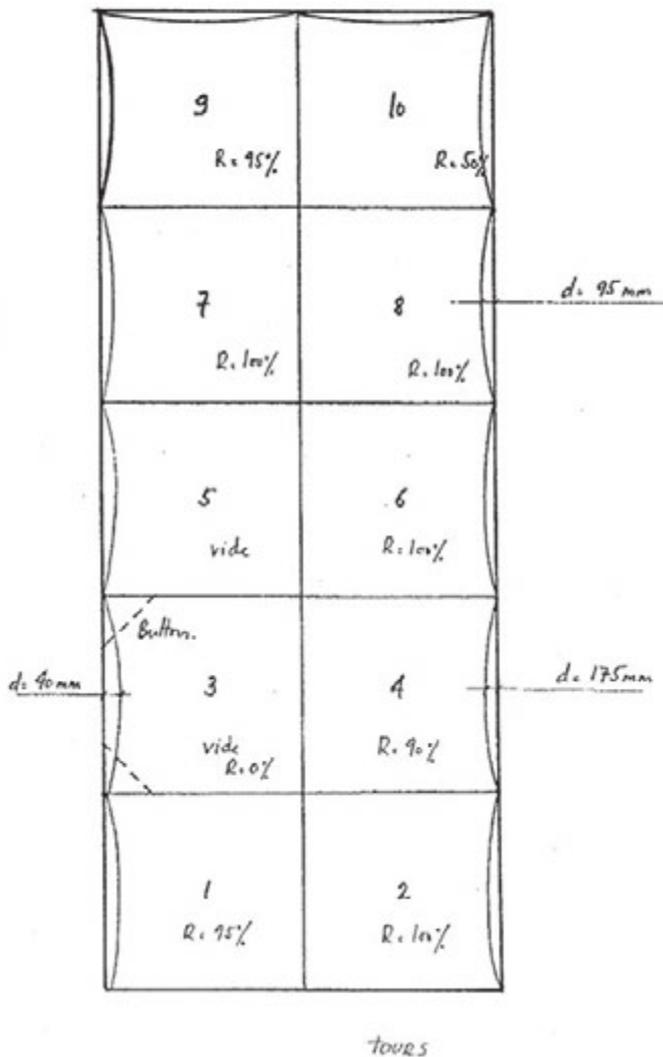


Figure 17. Déformée des parois mesurée sur le complexe de stockage céréalier en service.

L'expertise a montré que l'historique du sinistre a fourni des résultats très intéressants d'une *simulation* involontaire et insoupçonnée du *risque* de dommages subi par le silo métallique céréalier. En effet une étude du comportement du matériau ensilé (riz paddy long) a montré que ce riz brut non décortiqué présente un pseudo coefficient de Poisson pratiquement nul sous faible contrainte déviatorique. Cette caractéristique est très différente de celle du même riz décortiqué !

6.5. Test vibratoires des structures élancées

La tempête au lendemain de Noël 1999 a soufflé à 180 km/h. Pour le seul département de la Charente-Maritime, 30 pylônes à haute tension, 600 poteaux à moyenne tension, en mal d'assise et privant d'électricité 335.000 abonnés, doivent être relevés sur 300 kilomètres de lignes (Fig. 18).



Figure 18. Pylône à haute tension en mal d'assise après la tempête du 25 décembre 1999.

En effet les supports aériens, généralement sous forme de structures élancées en nombre rapidement croissant, sont soumis aux charges de service de plus en plus importantes qui requièrent pour leur dimensionnement une grande sévérité pas toujours compatibles avec des reconnaissances géotechniques souvent incomplètes des sites choisis et pour leur maintenance en service un contrôle non destructible régulier et fiable.

Une technique vibratoire non destructive par lâcher (Fig. 19) a permis d'enregistrer la signature des pylônes électriques [LUO 92] reposant sur différents types de fondations. L'utilité de la technique du lâcher repose sur le fait qu'au moment du lâcher, l'énergie est distribuée continûment dans le domaine fréquentiel. Ainsi toutes les résonances sont excitées dans la gamme fréquentielle utile. Les principaux modes de vibration (flexion, torsion et pilonnement du pylône) sont mis en évidence. Leur amplitude est évidemment fonction du point d'application de l'excitation sur la structure et de son intensité. L'apparition d'une non linéarité en fondation ou ailleurs dans le pylône (par exemple des boulons mal serrés [THO 94]) se traduit immédiatement par un changement de propriétés des noyaux de Volterra et par la perte de la proportionnalité entre l'amplitude d'un mode et l'excitation.

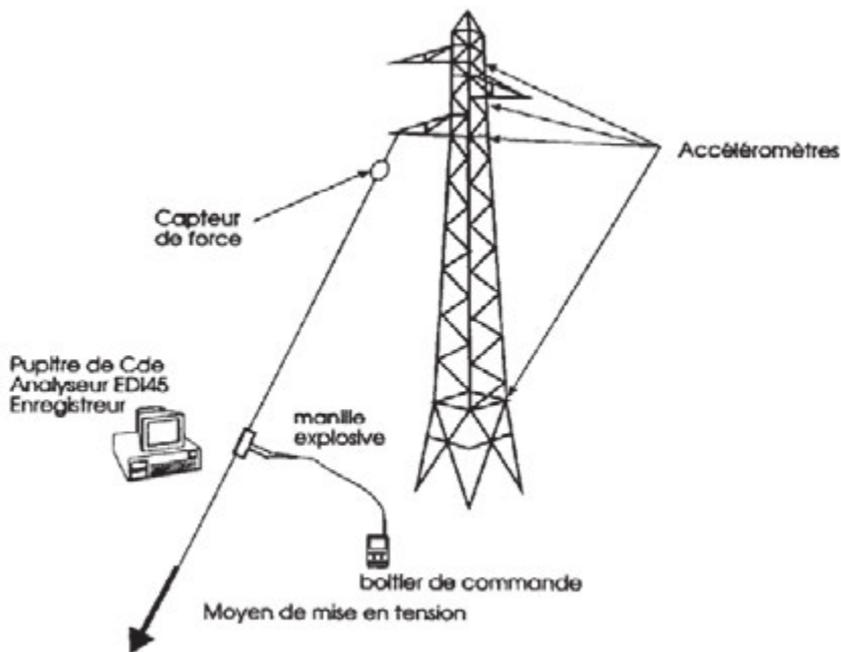


Figure 19. Test vibratoire sur les pylônes électriques.

Ce test facile et commode à effectuer permet de comparer les pylônes entre eux ainsi que leurs différents types de fondations ; et cela permet aussi de suivre l'évolution d'un même pylône en fonction du temps. Les résultats obtenus ont montré que le spectre des vibrations conserve pratiquement ses principales caractéristiques malgré la présence des fils électriques sur le pylône. Ce qui est particulièrement intéressant pour le maître d'ouvrage, puisqu'il n'a pas besoin de faire désarmer le pylône pour réaliser le test (Fig. 20).



Figure 20. *Test du lâcher sur les pylônes électriques.*

6.6. Surveillance des barrages

Un barrage est un ouvrage unique, avec ses caractéristiques propres, comme tous les grandes ouvrages de génie civil. Il ne peut être testé en vraie grandeur qu'au moment de la mise en service, d'où l'extrême importance du bon suivi de l'ouvrage dès sa réception, puis tout au long de son exploitation. L'inspection, l'auscultation et la surveillance des barrages contribuent de façon importante à la sécurité publique [Contributions de Bonelli et de Mériaux].

7. Les essais dangereux

La prévention des dangers issus des techniques industrielles doit se situer le plus en amont possible au niveau de l'acceptabilité des risques. L'expérience permet de savoir si au départ un risque est acceptable ou non.

7.1. Epandage des gaz inflammables et explosibles

La rareté des accidents concernant des installations fixes de Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) est un argument en faveur de son utilisation. Cependant si la probabilité d'occurrence d'un tel accident est faible, le risque n'en est pas pour autant négligeable en raison des quantités importantes de produit inflammable qui

pourraient être mises en cause lors de la rupture d'une canalisation par exemple. Pour apprécier ces risques, une simulation expérimentale s'impose [CAU 93]. Les résultats expérimentaux des tests (Fig. 21) avec inflammation (dynamique des phénomènes mis en jeu, tenue au feu des matériaux composites, etc.) ont précisé le domaine d'efficacité de certaines mesures de protection (soupape, arrosage, rideaux de fluide, ignifugation).



Figure 21. *Gestion et maîtrise des risques d'incendie.*

7.2. Explosions en phase gazeuse

L'approche expérimentale s'appuie sur l'analyse des explosions réellement survenues [LAN 93]. De l'énergie d'allumage et de la nature du mélange combustible dépend la nature du régime explosif : la détonation ou la déflagration.

— La *détonation* nécessite un amorçage à fort apport d'énergie comme par exemple celui d'une charge d'explosif condensé. La propagation de la détonation résulte alors du couplage de la zone de réaction et d'un front de choc. Elle s'effectue dans un milieu initialement au repos, avec une célérité supersonique de l'ordre de 1800 ms^{-1} , dans le cas des mélanges sphériques air-hydrocarbure en milieu libre. L'énergie exothermique de la combustion est le moteur de cette onde qui, ainsi auto-entretenu, se déplace à vitesse constante. Les mélanges gazeux doivent être très réactifs pour que les cinétiques soient suffisamment rapides. La détonation cesse à la limite de la charge gazeuse initiale. La fin de l'explosion correspond à la fin de la libération d'énergie chimique. Une onde de choc simple, quasi sphérique, d'une amplitude de l'ordre de 1,7 MPa dans le cas des mélanges air-hydrocarbure en milieu, y chemine avec une célérité s'atténuant vers celle du son. Cette onde de choc aérienne est une discontinuité de pression (Fig. 22).

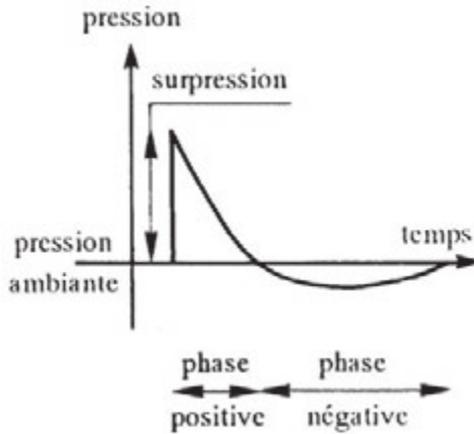


Figure 22. Régime de détonation.

— Le régime le plus vraisemblable lors des explosions réelles, puisqu’il s’obtient à partir d’une source d’inflammation de faible énergie, s’apparente à la *déflagration*. Un front de flamme sphérique divergent, centré sur le point d’allumage, parcourt la charge combustible avec une célérité spatiale caractéristique, subsonique par rapport au milieu situé immédiatement en amont de l’onde de combustion. La propagation de la flamme s’accompagne d’une mise en mouvement du milieu frais, due à l’expansion volumique des gaz frais transformés en gaz brûlés. La déflagration agit sur l’environnement comme un piston dont la vitesse spatiale dépend de la célérité de la flamme et de la dilatation subie par les gaz frais. Ce piston provoque une variation de pression (Fig. 23).

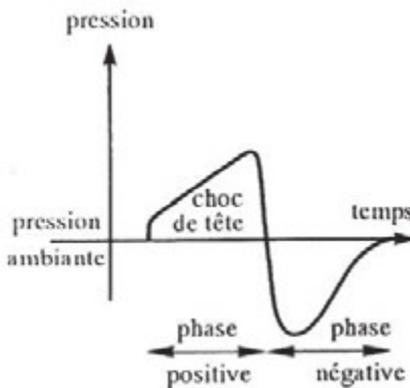


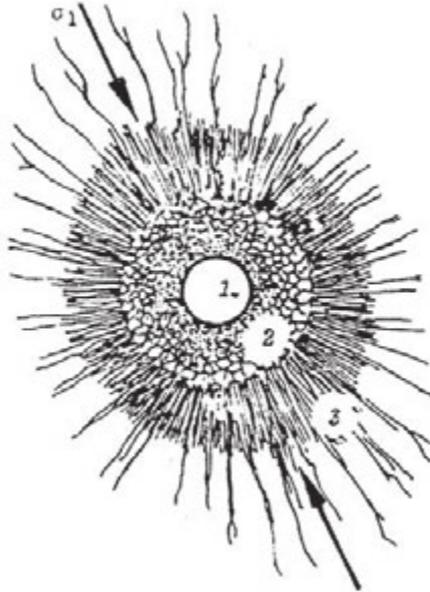
Figure 23. Régime de déflagration.

7.3. Tir foration et minage adouci

Le creusement des puits ou des galeries en milieux rocheux est de plus en plus réalisé à l'explosif. La nature des terrains peut être très diverse : granit, grès, etc., voire les calcaires jusqu'aux marnes en passant par les marnes calcaires et les argilites. Les principales opérations sont par exemple :

- foration par volées de 2,50 m de profondeur forées à 2,80 m à l'aide de marteaux perforateurs à main fixés sur un gabarit,
- tir par volées chargées d'explosif adapté à la nature du terrain rencontré lors de la perforation,
- soutènement mis en place après évacuation des fumées et gaz résiduels.

Pour minimiser la zone fracturée autour du creusement, il est indispensable de tenir compte des données expérimentales pour dresser le plan de tir en minage adouci (smooth blasting), en accord avec le mécanisme de la fragmentation par explosif (Fig. 24).



σ_1 contrainte principale majeure

1. Trou de forage

2. Zone pulvérisée

Fracture radiale privilégiée par la direction de σ_1

Figure 24. Fragmentation de la roche induite par un tir à l'explosif placé dans un trou de forage.

8. Participation à l'Atelier N° 16

L'Atelier *Simulation expérimentale du risque en Génie Civil* s'est donné pour but une approche physique du risque qui présente l'avantage de la diversité extrême à la fois des thèmes et des moyens utilisés, du plus simple au plus sophistiqué. Il intéresse plusieurs sociétés membres du G2C en couvrant un spectre large et interdisciplinaire. Il a permis des échanges fructueux en faisant connaître par exemple les spécificités et les possibilités d'application des équipements exceptionnels, ou l'intérêt des techniques d'analyse innovantes. Ainsi l'Atelier a pu mener une réflexion commune entre spécialistes, à la fois plus ciblée et plus originale, comprenant état de l'art et pratiques actuelles, insuffisances et dysfonctionnements, propositions d'actions ou de travaux.

L'auteur de ce rapport remercie les collègues qui ont participé à l'Atelier N° 16, envoyé un résumé et rédigé un document :

AFPS	C. Boutin, S. Hans, I. Erdin & M. Lorient	Comportement des bâtiments réels et vulnérabilité sismique
AFPS	Th. Chaudat, TH. Morin, J.C. Queval & P. Sollogoub	Le rôle des essais sur tables vibrantes dans le génie parasismique
CFG	J.P. Gourc, P. Villard, H. Giraud, J.C. Blivet, M. Khay, B. Imbert, A. Morbois & Ph. Delmas	Effondrement localisé sous remblai ferroviaire ou routier. Expérience en vraie grandeur
CFMS	J. Garnier	Application de la modélisation physique à la réduction des incertitudes sur le comportement des ouvrages géotechniques
GFR	S. Dutheil, P. Crançon,	Etude de la migration des polluants dans les sols
CFMS	J. Garnier & L. Thorel	
GFR	S. Dutheil	Explosions souterraines en centrifugeuse
GFR	M.P. Luong & J.C. Eytard	Test vibratoire des structures élancées
GFR	J. Rivière & M.P. Luong	Simulation en centrifugeuse des risques sismiques
SHF	S. Bonelli	Surveillance des barrages et interprétation des mesures d'auscultation
SHF	P. Meriaux	Sécurité des barrages

9. Conclusion

Les participants de l'Atelier *Simulation expérimentale du risque* du Colloque ont souhaité que le Groupement Français du Génie Civil œuvre dans le sens d'une large collaboration et d'une concertation constructive entre ses sociétés membres en

organisant un groupe de travail sur ce thème ; ce qui illustrerait son savoir-faire à faire savoir les acquis de connaissances à toute la communauté du génie civil.

10. Bibliographie

- [BAU 85] BAUDE L., « Expérimentation en vraie grandeur de buses métalliques sous haut remblai », *Revue Française de Géotechnique*, n° 30, 1985, p. 19-30, Presses ENPC, Paris.
- [BOW 94] BOWMAN L.E., FOREST J., TAYLOR R.J., SEELIG B., « Pile-driven plate anchors for fleet moorings », *26th Offshore Technology Conference*, May 1994, vol. 1, p. 225-232, Houston, Texas.
- [CAU 93] CAUMONT M., « Les essais dangereux : épandage de gaz inflammables et explosifs », *La Revue des Laboratoires d'essais*, Décembre 1993, n° 37, p. 18-21, ASTE, Paris.
- [DUT 99] DUTHEIL S., LUONG M.P., « Simulation des effets d'une explosion enterrée », *AFPS '99, 5^{ème} Colloque National Génie Parasismique et Réponse Dynamique des Ouvrages*, vol. II, 1999, p. 471-478, ENS Cachan.
- [FEU 64] FEUGUEUR L., « Sur l'origine possible de quelques effondrements de terrain dans la région nord et nord-est de Paris », *C.R. Somm. Soc. Géol. Fr.*, 1964, n° 7, p. 283, Paris.
- [JOU 76] JOURDAN G., « Le sous-sol parisien. Une étude de la répartition géographique du gypse antéludien et les risques engendrés par sa dissolution dans le nord-est de la région parisienne », *Le Moniteur du Bâtiment et des T.P.*, 31 Janvier 1976, p. 10-15.
- [LAN 93] LANNOY A., « Explosions en phase gazeuse : fiabiliser les méthodologies d'estimation », *La Revue des Laboratoires d'essais*, Décembre 1993, n° 37, p. 22-25, ASTE, Paris.
- [LEP 99] LEPERT P., CORTE J.F., « Etude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection », *Centrifugeuse '88*, Balkema 1988, p. 457-463, Rotterdam.
- [LUO 80] LUONG M.P., « Ancre à forte capacité de tenue », *Journée de Géotechnique*, ENTPE, 14 Mai 1980, p. 1-21, Vaulx en Velin.
- [LUO 81] LUONG M.P., « Comportement mécanique des ouvrages placés dans les remblais », *Séminaire Interactions Sol-Structure*, CISCO, 2-4 Juin 1981, CEBTP St Rémy-lès-Chevreuse.
- [LUO 83] LUONG M.P., « Small scale models of bridge pier protection », *IABSE International Association for Bridge and Structural Engineering Colloquium*, May 1983, P.R., vol. 42, p. 303-310, Copenhagen, Denmark.
- [LUO 85] LUONG M.P., « Simulation des forces de masse », *Les moyens expérimentaux au service du Génie Parasismique*, *Annales ITBTP*, 442, Février 1986, p. 111-122.

- [LUO 86] LUONG M.P., « Centrifugal models of piles and pile groups under lateral harmonic excitations and seismic actions », *3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, 20-21 May 1986, LCPC-IFP, Ed. Technip, p. 511-525.
- [LUO 89] LUONG M.P., « Damaging building movements caused by gypsum dissolution in the subsoil », *Case Histories in Structural Failures*, Int. Conf. 20-22 March 1989, Balkema, 1990, p. 503-513.
- [LUO 90] LUONG M.P., « Experimental simulation of geotechnical structures », *Geomaterials : Constitutive Equations and Modelling*, Elsevier Applied Science, 1990, p. 85-100.
- [LUO 92] LUONG M.P., LIU H., MARTIN A., DE PARNY R., « Signature vibratoire des pylônes électriques », *Annales de l'ITBTP*, Série : Théories et Méthodes de Calcul, Février 1992, vol. 324, p. 1-15.
- [LUO 93] LUONG M.P., « Centrifuge testing – A dynamic approach », *Soil dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering*, Balkema, 1993, p. 19-48.
- [LUO 94] LUONG M.P., « Centrifuge simulation of Rayleigh waves in soils using a drop-ball arrangement », *Dynamic Geotechnical Testing II*, ASTM STP 1213, ed. R.J. Ebelhar, V.P. Drnevich & B.L. Kutter, 1994, p. 385-399.
- [LUO 96] LUONG M.P., « Representativeness of laboratory strength testing », *Size-scale effects in the failure mechanisms of materials and structures*, E & FN Spon, ed. A. Carpinteri, p. 155-170.
- [LUO 97] LUONG M.P., « Conception particulière d'un silo métallique de stockage de riz », *Int. Conf. On the Engineering Mechanics Today*, August 1-3, 1997, p. 219-228, Hanoi, Vietnam.
- [LUO 99] LUONG M.P., « Geotechnical fuse using a soil-fibre composite », *15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, 15-20 August 1999, Transactions 15th SMiRT, vol. VIII, Div. K, K03/4, 1999, p. 121-128, Seoul, Korea.
- [LUO 00] LUONG M.P., « Nondestructive evaluation of damage behavior of reinforced concrete structure », *14th Engineering Mechanics Conference EM2000*, ASCE, May 21-24, 2000, The University of Austin, Texas, USA.
- [MAN 62] MANDEL J., « Essais sur modèles réduits en mécanique des terrains. Etude des conditions de similitude », *Revue de l'Industrie Minérale*, vol. 44, n° 9, Sept. 1962, p. 1-10, Paris.
- [PEC 98] PECKER A., « Apport des essais en centrifugeuse au dimensionnement d'une fondation de pont », *Mécanique & Géotechnique*, 1998, p. 143-153, M.P. Luong éditeur, LMS Ecole Polytechnique, Palaiseau.
- [PEL 87] PELTZER G., « Contribution à l'étude de la collision Inde-Asie : 1) Approche expérimentale, équilibre entre épaissement crustal et extrusion latérale, 2) Estimation des déplacements quaternaires sur le bord Nord du Tibet », Thèse de Doctorat ès Sciences, IPG, Université Paris VII, 1987.

- [PEL 88] PELTZER G., GARNIER J., « Experimental approach in a centrifuge of large scale continental tectonics in Asia », *Centrifuge '88*, 1988, p. 563-574, Balkema, Rotterdam.
- [PHI 69] PHILLIPS E., « De l'équilibre des solides élastiques semblables », *Comptes rendus hebdo. Séances Académie des Sciences*, tome 68, Janvier-Juin 1869, p. 75-79, Gauthier-Villars, Paris.
- [SCH 77] SCHURING D.J., *Scale models in engineering – Fundamentals and Applications*, Pergamon Press, Paris, 1977.
- [STG 85] SAINT-GUILHEM R., « Sur les fondements de la similitude physique : le théorème de Federman », *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*, vol. 4, n° 3, 1985, p. 337-356, Paris.
- [THO 94] THOMAS J.J., SEMBLAT J.F., LUONG M.P., « Détection des non linéarités d'endommagement par séries de Volterra », *Journées des Sciences de l'Ingénieur JSI'94 du Réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 5-7 octobre 1994, vol. I, p. 51-57, Presqu'île de Giens.
- [ZEL 88] ZELIKSON A., « The use of large centrifuges for modeling geological instabilities caused by gravity anomalies », *Centrifuge '88*, 1988, p. 575-582, Balkema, Rotterdam.