

Rapport
d'activité
1988

MECANIQUE
DES
SOLIDES

ECOLE POLYTECHNIQUE

En 1794, à l'instigation de Gaspard MONGE et de Lazare CARNOT, la Convention crée, en pleine période révolutionnaire, l'Ecole Polytechnique destinée « à former des ingénieurs en tous genres, à rétablir l'enseignement des sciences exactes et à donner une haute formation scientifique à des jeunes gens, soit pour être employés par le Gouvernement aux travaux de la République, soit pour reporter dans leur foyer l'instruction qu'ils auront reçue et y prodiguer les connaissances utiles ».

Dans un environnement aujourd'hui bien différent notre mission demeure ; le monde a changé et de si considérable façon que notre tâche est plus vaste et plus complexe.

L'Ecole Polytechnique c'est environ sept cent cinquante élèves présents à Palaiseau, plus de deux cents enseignants, près de neuf cents chercheurs, ingénieurs ou techniciens dans les laboratoires, environ cinq cents militaires et civils se consacrant à la formation des élèves et à la marche générale de l'établissement.

De cette longue tradition nous avons hérité deux principes qui guident notre action :

- l'excellence à rechercher sans cesse,
- la pluridisciplinarité pour rester ouvert aux formes multiples du savoir.

Maurice BERNARD
Directeur de l'Enseignement
et de la Recherche

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLIDES

Laboratoire commun à l'Ecole Polytechnique, l'Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris,
l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Directeur : **Pierre HABIB**

Professeur à l'ENGRF

Laboratoire associé au CNRS

URA 317

Téléphone : (33) (1) 60 19 41 29

SOMMAIRE

PERSONNEL DE RECHERCHE	2
EXPOSE GENERAL	4
EXPOSE ANALYTIQUE	8
I - ETUDES A CARACTERE THEORIQUE	8
II - COMPORTEMENT DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES	11
III - MECANIQUE DES ROCHES	16
IV - MECANIQUE DES SOLS	23
PUBLICATIONS	26
REVUES SCIENTIFIQUES	26
COMMUNICATIONS A DES CONGRES	28
THESES	32
LIVRES	33
BREVETS	33

EP - MMS - RA - - 1988

PERSONNEL DE RECHERCHE

CHERCHEURS

Pierre	HABIB	Professeur (X45) - Docteur ès-Sciences, Directeur du Laboratoire.
Jean	SALENÇON	Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées (X59), Docteur ès-Sciences, Professeur à l'ENPC et à l'X, Président du Comité de Direction du LMS, Membre de l'Académie des Sciences.
Pierre	BEREST	Ingénieur en Chef des Mines (X70), Maître de Conférences à l'X et à l'ENPC, détaché au LMS, Directeur de Recherche.
Huy Duong	BUI	Ingénieur Civil ENSM Paris (X57), Docteur ès-Sciences, Détaché EDF, Directeur de Recherche, Correspondant de l'Académie des Sciences.
Ky	DANG VAN	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences, Ingénieur CNRS, Maître de Conférences à l'ENPC, Directeur de Recherche.
Quoc Son	NGUYEN	Ingénieur Civil ENPC (X64), Docteur ès-Sciences, Maître de Conférences à l'X et à l'ENPC, Directeur de Recherche CNRS.
Joseph	ZARKA	Docteur ès-Sciences (X62), Directeur de Recherche CNRS.
Karim Samir	ABOURA AKEL	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ENPC. Ingénieur Génie Civil de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth (Liban), Doctorat ENPC.
Armelle Behrooz	ANTHOINE BAZARGAN-SABET	Ingénieur Civil ENPC, Docteur-Ingénieur, Chargée de recherche CNRS. Docteur-Ingénieur en Energétique de l'ENSAM de Paris.
Nicolas	BEAUDE	X71, Docteur Université Paris VI.
Jean	BERGUES	Licencié ès-Sciences, Diplômé du CHEBAB.
Marc	BONNET	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ENPC, Chargé de recherches CNRS.
Patrick	de BUHAN	Ingénieur des Ponts et Chaussées (X71), Docteur ès-Sciences, Professeur à l'ENPC.
Jean-Pierre	CHARPENTIER	Ingénieur CNAM.
Micheline	CHAYE-d'ALBISSIN	Directeur de Recherche CNRS, (détachée de TOAE).
Joël	FRELAT	Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS, Attaché de Travaux Expérimentaux à l'X.
Gérard	GARY	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences (X66), Ingénieur CNRS, Chef des Travaux Expérimentaux de Mécanique à l'X.
Mehdi	GHOREYCHI	Ingénieur des Mines de la Faculté d'Ingénierie de Téhéran (Iran), Docteur-Ingénieur de l'Ecole des Mines de Nancy.
François	GILBERT	Ingénieur ENSMP, Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS.
Joseph	GRIL	Ingénieur GREF (X78), Docteur Université Paris VI, détaché au LMS.
Serge	KRUCH	DEA Génie Mécanique, Docteur Université Paris VI.
Jean-Baptiste	LEBLOND	Ingénieur des Mines, Ancien Elève de l'ENS (Ulm), Docteur ès-Sciences, Maître de Conférences à l'X.
Benjamin	LORET	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS .
Minh Phong	LUONG	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences, Directeur de Recherche CNRS.
Yves	MEZIERE	Docteur ès-Sciences, Ingénieur CNRS.
Pirouz	NAVIDI-KASMAI	Ingénieur ENTPE, Docteur Ingénieur.
Minh Duc	NGUYEN	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences.
Yannis	PAPADOPOULOS	Ingénieur de l'Ecole Polytechnique de Thessalonique (Grèce), Docteur ENPC.
Gilles	ROUSSET	Ingénieur des Ponts et Chaussées (X78), Docteur ENPC.
Mustapha	SABIR	Ingénieur en Génie Mécanique UTC, DEA Mécanique, Docteur ENSMP.
Nicolas	SCHMITT	Agrégé Génie Civil, Docteur Université Paris VI.
Larbi	SIAD	Ingénieur ETP, Docteur ENPC.

Claude	STOLZ	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS.
Michel	TERRIEN	Ingénieur ENSM de Saint-Etienne.
Amos	ZELIKSON	M. Sc. Université de Jérusalem, Senior Lecturer Technion Haifa, Docteur ès-Sciences.

STAGIAIRES

Nabil	ABOU EZZI	Ingénieur Civil de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth (Liban), Stagiaire ENPC.
Bijan	BORHANI ALAMDARI	Ingénieur UTC de Compiègne, Boursier DGRST.
Djaffar	BOUSSAA	Ingénieur Ecole Centrale de Lyon, Boursier ENSMP.
Sahbi	BRAHAM	Ingénieur TP, DEA Mécanique et Matériaux, Stagiaire Ministère Recherches
Denise	BUBLITZ	DEA Mécanique, Boursière ENPC.
Issam	CHARARA	Ingénieur Civil ENPC.
Xavier	CHATEAU	Agrégé de Mécanique, Stagiaire USINOR.
François	CORBETTA	Ingénieur Science et Technologie Paris VI, DEA Mécanique Appliquée à la Construction, Boursier ENSM.
André	DEPERROIS	X85, CIFRE Peugeot.
Irène	DJERAN	Ingénieur Civil (Athènes), Boursière du Gouvernement Grec.
André	GIRAUD	Etudiant Paris VI, Stagiaire Armines.
Jean-Michel	HABLOT	Ingénieur INSA, CIFRE Peugeot.
Ouahid	HARIRECHE	Ingénieur TP, DEA Mécanique Appliquée à la Construction, Boursier du Gouvernement Algérien.
Eric	HETUIN	Ingénieur IST Paris VI, Stagiaire.
Joël	KICHENIN	X85, CIFRE Michelin.
Sangho	LEE	Maîtrise d'Architecture (Séoul), Boursier du Gouv. Français.
Samir	MAGHOUS	Ingénieur ENTPE, DEA Mécanique, Boursier ENPC.
Hubert	MAIGRE	X83, Boursier Ecole Polytechnique.
Habibou	MAITOURNAM	Ingénieur Civil ENPC, Boursier ENPC.
Richard	NAJCHAUS	DEA Génie Civil, Boursier DGRST.
Calvin	NGUEDJIO FOUPEPE	Ingénieur Ecole Nat. Sup. Polyt. de Yaoundé, DEA Génie Mécanique, Boursier du Gouvernement Camerounais.
Gilles	PERRIN	Ingénieur, Détaché FRAMATOME.
Ahmad	POUYA	Ingénieur Civil ENPC, Boursier ENPC.
Rachel-Marie	PRADEILLES	Ingénieur de l'Armement, (X85), Stagiaire DGA.

VISITEURS

S.	FUJATANI	Professeur à l'Université d'Hiroshima (Japon).
Rafaële	LENAIN	Ingénieur ENSG Nancy.
Morteza	MEHRABADI	Université Tulane, Nouvelle Orléans, Associate Professor.
Y.	MURAKANI	Professeur à l'Université de Kyushu (Japon).
Jacky	ROMAN	Ingénieur ENSMIM Nancy.
Alberto	TALIERCIO	Politecnico di Milano.
Nicolas	TRIANAFYLLIDIS	Université du Michigan, Associate Professor.

INGENIEURS, TECHNICIENS, ADMINISTRATIFS

Raymond	BARRE	Patrick	FREVILLE	Mina	RATNI
Laurence	BERTHIER	Vincent	de GREEF	Brigitte	TERRIEN
Gilbert	BOURON	Barbara	KLOSOWICZ-BULIK	Daniel	THEVAL
René	CAILLEUX	Yves	LE BRAS	Pierre	VALLI
Denise	CHASSAING	Patrice	LEMATRE	Marie-Annick	WALLERAND
Marc	DAO	Gilbert	PERGEAUX	Jean-Claude	ZAKARIAN
Jean-Claude	EYTARD	Liliane	QUERU		

EXPOSE GENERAL

L'axe principal de la recherche au Laboratoire de Mécanique des Solides en 1988 a été l'application de la théorie de la plasticité à l'étude de la déformation et la rupture des solides et des structures. Cette activité correspond à une continuité dans les domaines d'intervention mais à un changement dans la démarche. Au cours des dernières années en effet beaucoup de choses se sont modifiées en France et notre manière de travailler a dû s'y adapter. Il y a plusieurs raisons à cette évolution.

- Le paysage de la recherche fondamentale a été singulièrement perturbé au cours des années précédentes avec des conduites par "stop and go" qui au niveau des laboratoires sont difficiles à gérer. Il est tout à fait indispensable à l'heure actuelle que la recherche fondamentale soit soutenue par le monde industriel. Cette orientation, devant laquelle le LMS a eu indiscutablement une attitude de pionnier dès sa création en 1961, est depuis quelques années et actuellement encore très fortement encouragée par l'Etat, que ce soit au Ministère de la Recherche et de la Technologie avec les "Clubs d'Utilisateurs" soutenus par le CNRS ou au Ministère de l'Education Nationale avec les pôles FIRTECH et leur "Conseil de perfectionnement" destinés à favoriser le passage des travaux de recherches vers l'industrie. Mais cette attention plus particulière donnée aux applications ne doit pas faire perdre le sens d'une recherche à long terme dont la finalité reste, bien sûr, d'être un jour utilisée ou utilisable, mais ne doit pas perdre son caractère fondamental. Ainsi le LMS en 1988 est resté en contact, contractuellement, avec le tissu industriel français intéressé par la Mécanique : EDF, GDF, Framatome, SNCF, UNIMETAL, CEA, IPSN, ANDRA, REGIENOV, P.S.A., Michelin, SAGEM, SNECMA, CNES, MATRA, IRSID, IFP, LCPC, BRGM, MDPA, etc. ainsi que des PME, tout en gardant des liens étroits avec les organismes d'Etat gérant la recherche : Ministère de la Recherche et de la Technologie, DAEI du Ministère de l'Equipeement, Ministère de l'Industrie, Ministère de l'Education Nationale.

- La conjoncture industrielle a connu en 1988 une embellie. Cela a permis à certaines industries qui luttait durement contre la concurrence de reprendre un peu de souffle et de rechercher des contacts auprès des laboratoires et centres de recherches. Cela se reconnaît par exemple au développement des contrats CIFRE qui nous ont paru actuellement plus faciles à négocier du côté industriel qu'auparavant, et cela montre la volonté de certaines grandes entreprises de former par la recherche un petit pourcentage de leurs futurs cadres. Nous avons proposé des thèmes de recherche à des industriels et des industriels nous ont posé les leurs. Le LMS s'est trouvé ainsi enrichi par des problèmes venus de la pratique et pour lesquels un effort de recherche fondamentale est indispensable.

- Le développement du calcul scientifique sur ordinateur. Depuis plusieurs années les dépenses liées au calcul numérique n'ont cessé de croître dans les laboratoires et centres de recherches. Le soutien du CNRS par l'intermédiaire du CIRCE a été et est encore tout à fait essentiel, mais le développement de l'informatique locale est devenu pratiquement obligatoire en particulier parce que les Docteurs qui nous quitteront pour exercer un métier d'Ingénieur n'auront pas toujours de grands ordinateurs à leur disposition mais plus vraisemblablement des micro-ordinateurs ou peut-être des réseaux. Sur ces matériels (et sur les logiciels, car on achète de plus en plus de logiciels) nous ne bénéficions plus, ou à peine, de tarifs de faveur comme ceux du CIRCE et de plus il faut assurer une maintenance coûteuse. Avec les budgets insuffisants de la tutelle il est donc indispensable de trouver par ailleurs des financements, ce qui se traduit par le fait que nous devons utiliser aussi ces matériels pour des problèmes industriels. On peut citer par exemple un problème qui nous a été posé récemment, celui de l'optimisation de la forme d'une pièce tournant à grande vitesse et donc soumise à des forces centrifuges importantes : il ne suffit plus alors de disposer des ordinateurs, ni des programmes de calcul correspondants, ni des techniques expérimentales pour la détermination du comportement des matériaux, mais il faut aussi être capable de répondre rapidement et précisément à une question d'autant plus difficile que sa formulation initiale n'était pas toujours parfaite et cela tout en parlant le même langage que les industriels.

En 1988 les effectifs du LMS ont été en légère augmentation : 66 chercheurs ont travaillé au laboratoire en comptant les thésards qui nous ont quittés en septembre et ceux qui sont entrés en octobre. Au 31 décembre l'effectif était de 56 chercheurs, soit un total de 76 personnes dont 12 techniciens, 1 dessinateur, 5 secrétaires, 1 informaticienne et 1 électronicien. Le réseau d'ordinateurs Apollo, commun avec le Centre de Mathématiques Appliquées, commencé l'an dernier s'est agrandi en 1988 avec maintenant 14 appareils et un calculateur vectoriel parallèle Alliant y a été intégré en fin d'année ; le LMS dispose en propre de 7 machines et d'un serveur de disques. La puissance de calcul ainsi obtenue permet presque toujours de faire face aux problèmes posés par le développement et la démocratisation du calcul numérique d'une part et d'autre part par le développement de logiciels qui tiennent compte de structures de plus en plus complexes ou de comportement de plus en plus sophistiqués.

Dans le domaine de la diffusion il faut signaler que P. de Bujan a organisé, conjointement avec R. Nova du Politecnico di Milano et J.P. Gourc de l'I.R.I.G.M. le colloque Euromech 232 sur les "Aspects Mécaniques du Renforcement des Sols" qui s'est déroulé à Chamrousse du 18 au 22 avril 1988, et qu'un cours a été organisé à St Rémy lès Chevreuse par J. Zarka, assisté par J. Frelat, G. Inglebert et P. Navidi Kasmai, du 6 au 10 juin 1988 pour présenter une "Méthode Simplifiée d'Analyse des Structures". Le programme pédagogique sur micro-ordinateur a été étendu par P. Navidi Kasmai cette année, à cette occasion, de façon à faire disparaître certaines limitations dues à la taille des mémoires des micro-ordinateurs utilisés. Des ingénieurs en provenance des écoles (ENSAM) ou de l'industrie (GDF, Stein Industrie, ISMCM, etc.) ont participé à ce cours d'une semaine.

A l'occasion du Congrès International de Mécanique Théorique et Appliquée qui s'est tenu cette année en France (Grenoble, 21-27 août 1988) le LMS était représenté par une très forte délégation.

PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ANNEE 1988

La recherche en 1988 s'est développée dans de nouveaux domaines par exemple pour de nouveaux matériaux (bois, matériaux composites) ou avec de nouvelles techniques (thermographie). Mais on peut tenter de grouper les principaux résultats autour des cinq grands thèmes fédérateurs suivants :

-1- BIFURCATION ET STABILITE

Il s'agit de l'étude générale de stabilité et de bifurcation des systèmes mécaniques réversibles (structures élastiques) ou irréversibles (structures élastoplastiques, rupture, endommagement). La caractérisation des états critiques, la détermination du comportement postcritique sont les principaux problèmes examinés. Ce thème conduit à l'élaboration de nombreux programmes de calcul pour la propagation des fissures, pour le flambage des coques élastoplastiques. En particulier, les problèmes de stabilité rencontrés dans les processus d'emboutissage (structures anélastiques sous contact unilatéral avec frottement) ont été étudiés en 1988.

-2- MECANIQUE DES ROCHES

Les problèmes thermomécaniques théoriques et expérimentaux pour la détermination des propriétés rhéologiques des matériaux (sel, argile, granite), liés aux structures souterraines de stockage des matériaux radioactifs et d'hydrocarbures, ont été examinés en 1988. En particulier trois essais in situ ont été effectués, à Mol en Belgique, en Alsace dans une mine de potasse et à Etrez dans l'Ain. Les deux premiers essais étaient des expériences de très longue durée (supérieure à l'année) avec télétransmission interactive des mesures depuis le site jusqu'au laboratoire, pour l'étude d'un soutènement à convergence contrôlée dans un cas, des effets liés au chauffage dans l'autre cas. A Etrez il s'agissait de déterminer le module d'élasticité du sol en place dans un volume extrêmement grand de façon à étudier un massif plutôt qu'un échantillon. Cet essai a été fait en collaboration avec l'Institut de Physique du Globe.

-3- ENDOMMAGEMENT ET FATIGUE

L'amorçage et la propagation de fissures de fatigue dans des conditions de sollicitations multiaxiales ont été étudiés. L'approche proposée pour le premier phénomène repose sur l'évaluation des grandeurs microscopiques, contraintes, déformations, etc. en fonction des grandeurs macroscopiques. L'extension du critère d'endurance de Dang Van au domaine de la fatigue polycyclique a été faite. D'autre part le critère d'endurance a été appliqué avec succès à de nouvelles structures industrielles, notamment au cours de travaux d'option à l'Ecole Polytechnique. Les essais réalisés sur structure ont confirmé les prévisions du modèle. La propagation des fissures induites dans le champignon des rails a été simulée avec succès. Le modèle thermomécanique qui a été mis au point explique les principales caractéristiques de la fissuration dite "par tâche ovale". Des résultats intéressants ont été obtenus par ailleurs en Mécanique de la Rupture, notamment pour la propagation d'une fissure en situation tridimensionnelle.

-4- SYSTEMES EXPERTS - INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Dans de nombreux problèmes, il n'y a pas d'expert capable d'indiquer les règles nécessaires à leur solution. C'est pourquoi, à partir d'une base d'expériences décrites par des paramètres numériques ou multivalués, un algorithme performant a été mis au point et permet de déduire des règles et de les exprimer en clair.

De nombreuses applications en diagnostic, en contrôle non destructif, en calculs de structures... sont actuellement en cours.

-5- MECANIQUE DES SOLS

Pour le calcul des ouvrages en terre renforcée un logiciel conversationnel destiné au dimensionnement de diverses structures a été mis au point. Le principe est celui du calcul à la rupture et l'utilisation de ce logiciel est possible en réseau ou sur micro-ordinateurs. Il permet d'étudier l'influence des renforcements pour des ouvrages soumis au poids propre ainsi qu'à des surcharges concentrées ou réparties. Des développements théoriques pour le calcul à la rupture, fondés sur la méthode d'homogénéisation ont été menés à bien et trouvent des applications pour les matériaux composites à fibres longues.

Des fondations précontraintes à partir d'ancrages battus verticalement dans le sol ont été réalisées pour des pylônes électriques après que des études sur maquettes en centrifugeuse en aient montré l'intérêt. Des essais de lâcher sur ouvrages réels ont été effectués pour vérifier leur intégrité. Les vibrations propres de l'ouvrage, mesurées par des accéléromètres placés à différentes altitudes ont montré que le comportement du pylône restait dans le domaine élastique linéaire et par conséquent devait être considéré comme satisfaisant.

Dans le domaine du transfert des connaissances et de la valorisation de la recherche les efforts ont été faits pour les logiciels et pour les inventions. G. Gary a mis au point en 1987 un logiciel d'acquisition de données permettant la gestion sur de très longues durées d'un banc d'essais multi-expériences. Ce logiciel a été complété par d'autres permettant la gestion automatique des expériences courantes. L'ensemble, commercialisé avec l'aide de l'ANVAR, a trouvé un acquéreur dans l'industrie (Centre Technique du Cuir à Lyon).

J. Zarka et un groupe d'auteurs (G. Inglebert, J. Frelat, P. Navidi-Kasmai) ont rédigé un ouvrage de synthèse sur les travaux effectués au LMS sur une nouvelle approche du calcul élastoplastique des structures, qui paraîtra en 1989 chez Martinus Nijhoff Publishers (Amsterdam).

En 1988 des chercheurs du LMS ont été associés à de nombreux enseignements, à l'Ecole Polytechnique pour le cours de Mécanique et pour les Travaux Expérimentaux, à l'ENPC, à l'ENSM Paris, à l'ENGREF, à l'ENSTA, à l'ESE, à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), à l'Université de Villetaneuse (Paris XIII), à l'Université Technique de Compiègne, à l'Université de Lille en France et à l'étranger au Politecnico di Milano et à l'ENIT à Tunis.

En 1988 plusieurs chercheurs du LMS ont fait des stages de longue durée hors du laboratoire. B. Loret a passé 3 mois à l'Université de Princeton (Civil Engineering). G. Gilbert a passé 7 mois à l'Institut de Physique du Globe à Strasbourg. C. Stolz a été détaché aux avions Marcel Dassault-Breguet Aviation comme conseiller scientifique chargé des problèmes d'endommagement et de mécanique de la rupture. Enfin deux stagiaires de DEA de Mécanique Appliquée à la Construction (UPMC-ENPC) ont été accueillis au LMS : E. Greuel et H. Colina.

En 1988 de nombreux visiteurs étrangers sont venus au Laboratoire de Mécanique des Solides et il faut signaler plus particulièrement l'accueil de :

- M. Mehrabadi, Professeur Associé à l'Université Tulane (La Nouvelle Orléans), spécialiste de la micromécanique des milieux granulaires ;
- N. Triantafyllidis, Professeur Associé à l'Université du Michigan, spécialiste des instabilités ;
- Y. Murakami, Professeur à l'Université de Kyushu, spécialiste de la Mécanique de la Rupture ;
- S. Fujatani, Professeur à l'Université d'Hiroshima, spécialiste de la Mécanique de la Rupture ;
- A. Talierecio, étudiant en Doctorat du Politecnico di Milano (calcul à la rupture) ;
- Souad Ben Romdhane, stagiaire du DEA de Mécanique Appliquée de l'ENIT (Tunis).

Deux chercheurs ont quitté le LMS à la fin de l'année 1988 : il s'agit de J.B. Leblond qui a été nommé Professeur de Mécanique à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et de B. Loret qui a été nommé Professeur de Génie Civil Numérique à l'Université de Grenoble.

En 1988 plusieurs chercheurs du LMS ont été particulièrement distingués :

- J. Salençon a été élu Membre de l'Académie des Sciences
- Q.S. Nguyen a reçu la Médaille d'Argent du CNRS (Section 10)
- M. Amestoy a reçu le Prix Fourneyron de l'Académie des Sciences
- G. Rousset a reçu le Prix de l'Association Française des Travaux en Souterrain
- J. Zarka a reçu le Prix du Transfert Technologique attribué lors du Colloque FEMCAD 1988
- K. Dang Van a reçu la Médaille LETORT de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

EXPOSE ANALYTIQUE

I - ETUDES A CARACTERE THEORIQUE

1 - Stabilité et Bifurcation

L'analyse théorique et numérique des problèmes de stabilité et de bifurcation des structures élastiques ou élasto-plastiques est poursuivie par S. Akel, Y. Mézière, Q.S. Nguyen et C. Stolz.

Pour un contrat CIFRE en liaison avec Sollac (Usinor) concernant la modélisation théorique et numérique d'un procédé d'emboutissage des tôles minces, le flambage par bifurcation des structures élastiques ou élasto-plastiques avec contact unilatéral a été étudié par S. Akel, X. Chateau et Q.S. Nguyen. La présence d'inégalités traduisant les liaisons unilatérales dans les équations conduit à des analyses intermédiaires entre les théories de stabilité élastique et élasto-plastique. La méthode de développement asymptotique est toujours applicable pour les études de stabilité, de bifurcation et d'analyse post-bifurcation. Au moins pour des systèmes discrets, cette méthode conduit à une formulation générale des critères de stabilité et de non bifurcation comme en plasticité. Le cas des systèmes continus est plus complexe, la propagation des zones de contact est dans ce cas la principale source de difficulté. Des exemples simples ont été discutés afin de mieux comprendre le comportement de ces systèmes lors d'un chargement lent.

Le flambage des structures élastiques et élasto-plastiques en mode multiple a été discuté par Y. Mézière et N. Triantafyllidis. L'objectif a été de présenter les principaux résultats connus d'une façon simple et rigoureuse, tout en restant compréhensible pour les mécaniciens. Ce travail qui prolonge en particulier la thèse de Y. Mézière soutenue en 1987, est basé essentiellement sur la méthode de Liapounov-Schmidt. Il permet de comprendre facilement la distinction entre les points limites et les points de bifurcation, le décompte et la détermination de différentes branches possibles après la bifurcation.

Le flambage plastique d'une poutre a été examiné par Chambolle dans le cadre de son stage de DEA. L'objectif est la détermination analytique de la branche bifurquée lorsque le chargement correspond à la valeur critique de Karmann (perte de stabilité du trajet trivial). Ce travail complète des études antérieures dues en particulier à Hutchinson sur la poutre élastoplastique.

Le flambage élasto-plastique des coques minces de révolution a été discuté par S. Akel et X. Chateau au double point de vue théorique et numérique. Un programme de calcul par éléments finis spécifique au problème du flambage, compatible avec les structures d'entrées et sorties de CADSAF a été mis au point sur Apollo dans le cadre des études pour EDF et Sollac. Les possibilités du programme ont été illustrées dans de nombreux exemples.

2 - Elasto-Visco-Plasticité Dynamique - Calcul par Eléments Finis de la Localisation des Déformations

La simulation numérique des phénomènes de localisation après l'instant de bifurcation reste un problème largement ouvert. Lors de sollicitations quasi-statiques, les méthodes de résolution habituelles utilisées pour des problèmes elliptiques ne sont pas toujours applicables : cela provient de la nature même du phénomène qui correspond à un changement de régime des équations différentielles gouvernant l'équilibre.

Des tentatives utilisant les modes propres de la matrice de rigidité globale ont été développées par B. Loret ; elles ne sont cependant pas satisfaisantes car elles ne font aucune mention d'une caractéristique essentielle de la localisation des déformations : la largeur de la bande dans laquelle celles-ci se concentrent.

Il est clair qu'aucune notion de longueur n'apparaît dans les équations constitutives des matériaux élasto-plastiques. En conséquence, dans un calcul par éléments finis sur de tels matériaux, la largeur de la bande de localisation sera induite par le maillage, un effet tout à fait indésirable. Une solution physiquement très satisfaisante à cette question consiste à considérer des matériaux non-locaux : l'inconvénient de cette approche réside dans les difficultés posées par ce type de matériaux dans la simulation numérique par éléments finis.

Pour des sollicitations dynamiques, une solution consiste à étudier un matériau élasto-visco-plastique dont le comportement pour des sollicitations très lentes est celui d'un matériau élasto-plastique sous-jacent donné. Les équations d'équilibre dynamique restent hyperboliques, le phénomène de localisation des déformations n'apparaît plus comme une bifurcation mais comme une accumulation de déformations dans des bandes dont la largeur est fixée par le produit de la vitesse de propagation de certaines ondes élastiques par le temps de relaxation du matériau élasto-visco-plastique. Dans une telle analyse, la largeur de la bande de localisation fixe une contrainte sur la finesse du maillage. Aucune imperfection artificielle n'est nécessaire. Par contre, pour des sollicitations quasi-statiques, la largeur de la bande est déterminée par la géométrie de l'imperfection, cette fois nécessaire.

Ce travail a été effectué en collaboration avec J.H. Prévost de l'Université de Princeton.

3 - Dynamique

C. Stolz a étudié la dynamique des phénomènes de chocs dans les structures anélastiques. En introduisant le formalisme de Lagrange et de Hamilton, C. Stolz a établi des équations générales valables pour la dynamique des solides anélastiques. L'application de ce formalisme a permis de généraliser la notion de fonction génératrice de choc utilisée en mécanique des fluides. Cette fonction permet d'étudier la structure de chocs et leur stabilité.

4 - Comportement des Milieux Polyphasiques

Le travail de recherche sur le comportement des milieux polyphasiques, mené par F. Gilbert, a été poursuivi en suivant les orientations de sa thèse d'Etat soutenue en 1987.

L'étude des modèles de type Biot a progressé en direction d'une approche plus concrète, en liaison en particulier avec les travaux de O. Coussy du LCPC. Les problèmes d'objectivité ont été clarifiés pour les lois de filtration dynamique.

Les liens entre les méthodes de changement d'échelle et la théorie de la percolation ont été abordés. F. Gilbert a commencé à étudier plusieurs modèles de prévision de la perméabilité en régime statique de roches fissurées à partir de leurs caractéristiques morphologiques.

Par ailleurs, F. Gilbert a obtenu des résultats concernant les caractères généraux du coefficient de perméabilité en régime dynamique. A partir d'une analyse fine des conditions d'écoulement en régime harmonique et de l'utilisation des méthodes de changement d'échelle, il a pu montrer que la dépendance en fonction de la fréquence d'excitation n'était pas quelconque mais faisait intervenir un petit nombre de paramètres, dont certains sont liés à la notion de facteur de formation. Les notions dégagées sont utiles pour l'étude des problèmes de pompage harmonique et de propagation d'ondes à travers les milieux poreux saturés.

5 - Problèmes Inverses en Mécanique des Solides

M. Bonnet a commencé son travail sur les problèmes inverses en mécanique et en acoustique par une participation à l'inversion des mesures microgravimétriques de la pyramide de Khéops. Cette étude, effectuée en relation avec Electricité de France et la Compagnie de Prospection Géophysique Française, a été l'occasion de faire fonctionner l'approche probabiliste des problèmes inverses proposée par A. Tarantola sur un cas concret. D'autre part l'examen de méthodes de modélisation applicables aux problèmes inverses ont amené à mettre en évidence sur un code d'éléments finis les graves perturbations créées par une petite perturbation d'un maillage initialement régulier sur le calcul numérique de la propagation d'une onde élastique, ainsi que le prévoit l'étude théorique de A. Bamberger, G. Chavent et P. Lailly. M. Bonnet a aussi validé et perfectionné les programmes ASTRID (élastodynamique et acoustique linéaire 3D par équations intégrales) et TRIFIS (rupture élastique 3D par équations intégrales).

6 - Systèmes Experts par Apprentissage

Le groupe de travail dirigé par J. Zarka pour cette étude rassemble J.M. Hablot et M. Terrien du Laboratoire de Mécanique des Solides et M. Sebag et M. Schoenauer du Centre de Mathématiques Appliquées.

L'acquisition et la mise en forme des connaissances nécessaires dans les systèmes experts classiques sont des obstacles souvent infranchissables. L'expert dans de nombreux problèmes qui concernent la Mécanique (contrôles non destructifs, surveillance des machines, diagnostics, calculs en élastoplasticité...) n'est souvent pas disponible. Dans d'autres cas il se fie à "son expérience" pour traiter un problème par analogie avec des cas antérieurs : il lui est impossible d'exprimer cette expérience.

Dans les systèmes experts par apprentissage, à partir d'une base d'exemples, raisonnablement suffisants et représentatifs où l'on a identifié les conclusions, l'ordinateur génère une base de règles qui permet ensuite de prédire les cas inconnus.

Des algorithmes mathématiques ont été mis au point pour traiter les expériences définies à partir de données numériques ou de type multivalué. Les premiers résultats ont montré que les règles obtenues sont plus fiables que celles proposées dans des méthodes classiques. Actuellement des applications concrètes sont considérées en reconnaissance de défauts et en maillage automatique pour les calculs élastoplastiques.

M. Terrien a continué l'étude du classement automatique à l'aide de logiciels statistiques et de programmes mis au point par M. Sebag et M. Schoenauer. Des bases de trois types ont été utilisées : booléennes, multivaluées et numériques. Des programmes de pré-traitement et de post-traitement ont été développés pour le classement de signaux. Des modifications de l'algorithme de Cook et Craig ont permis de généraliser le classement à un nombre de classes supérieur à 2. Le classement de sinusoides noyées dans un bruit blanc a montré une nette supériorité de cet algorithme sur les méthodes statistiques. Le pré-traitement a de surcroît amélioré notablement le classement et a permis d'éliminer des signaux n'appartenant pas à la base d'apprentissage, ce que ne peuvent faire les méthodes classiques.

Pour le calcul des structures élasto-plastiques il n'existe pas de règles permettant de trouver une discrétisation optimale pour une structure respectant une erreur donnée ; on ne peut donc utiliser un système expert classique. J.M. Hablot a étudié la faisabilité d'un système expert par apprentissage capable de proposer de telles discrétisations. Plusieurs voies peuvent être explorées : utilisation d'une base d'exemples, recherche de règles empiriques de maillage optimal.

La construction des exemples nécessite des solutions exactes que l'on obtient par une méthode inverse. Un élément de la base d'exemples est composé d'une géométrie, d'un matériau, d'un chargement ; il y correspond les discrétisations choisies et les erreurs associées. Le maillage peut avoir été choisi arbitrairement ou respecter une règle empirique.

Le traitement de ces exemples nécessite leur représentation sous une forme exploitable par le système expert. On regroupe tout d'abord les exemples de géométrie quasi-identiques ; l'application industrielle de ces classements peut être tentée par technologie de groupe. J.M. Hablot étudie actuellement le codage des chargements par des champs de contraintes équivalentes calculées à faible coût sur la structure supposée élastique.

Le test des règles empiriques s'effectue ainsi : on construit une suite de maillages respectant ces règles ; une règle sera "la plus efficace" si la courbe "erreur en fonction du nombre de degrés de liberté " décroît plus vite que pour d'autres suites de maillages obtenues arbitrairement ou par les autres règles. Enfin on cherche des règles à partir du traitement de la base d'exemples par le système expert.

Les outils informatiques permettant ces calculs sont en majeure partie opérationnels.

7 - Méthodes de Calcul : Amélioration de la Méthode Simplifiée.

A la suite de l'amélioration du filtrage des chargements dynamiques, S.H. Lee a proposé une nouvelle méthode simplifiée d'analyse dynamique qui permet d'évaluer les états maximaux et limites de structures élasto-plastiques. Les applications numériques de cette nouvelle approche aux structures tri-dimensionnelles montrent qu'elle est beaucoup plus rapide que le calcul incrémental pas-à-pas classique (100 fois plus rapide) et que la précision du résultat de calcul est très satisfaisante. Dans ce travail, S.H. Lee a donné les formules analytiques complètes pour la détermination de l'état maximal et de l'état limite d'un système élasto-plastique à un degré de liberté soumis à des chargements dynamiques. Elles sont très efficaces pour les études paramétriques de la réponse dynamique d'un système élasto-plastique.

L'amélioration de la méthode simplifiée pour le calcul dynamique des structures a été poursuivie par P. Navidi Kasmai dans le cadre d'un contrat MRES en collaboration avec la Société Géodynamique et Structure. Deux études supplémentaires ont été effectuées ; la première pour un chargement dynamique monotone (enceinte en béton soumise à une explosion), la deuxième pour un chargement quasi-statique cyclique dû à la houle. Pour cette dernière étude, la méthode simplifiée a été utilisée avec deux nouveautés, d'abord pour la prise en compte de la géométrie des structures mixtes (poutres - milieux continus 3D), ensuite pour la définition d'un algorithme permettant de faire intervenir la pression isotrope dans le critère de plasticité.

8 - Méthodes de Calcul : Algorithme en Elasto-Plasticité

Le calcul de l'écoulement élasto-plastique en transformation finie et en régime stationnaire a fait l'objet de la thèse de K. Aboura. Ce travail effectué dans le cadre du GRECO "Calcul des Structures" a pour but d'étendre les résultats antérieurs obtenus au LMS sur les problèmes d'écoulement plastique stationnaire, pour prendre en compte de grandes déformations plastiques rencontrées dans certains problèmes de formage des métaux. Les méthodes de calcul proposées s'inspirent des algorithmes de calcul des fluides non newtoniens.

9 - Méthodes de Calcul : Informatique

Le laboratoire s'étant doté d'un réseau de stations de travail Apollo, J. Frelat et B. Klosowicz ont adapté un certain nombre de programmes existants pour les besoins communs et ont intégré dans le réseau un ordinateur vectoriel parallèle, commun au LMS et au Centre de Mathématiques Appliquées. Un effort important a été fait pour mieux utiliser les possibilités graphiques de ces machines. Pas encore totalement "transparentes" pour l'utilisateur moyen, un certain nombre de procédures graphiques adaptées à nos programmes sont déjà opérationnelles. La structuration du groupe de travail "calcul numérique" doit permettre de proposer rapidement des "produits finis".

II - COMPORTEMENT DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES

1 - Comportement des Matériaux Composites

S. Kruch et Q.S. Nguyen ont poursuivi l'analyse du comportement macroscopique des composites SiC/SiC en liaison avec la SEP dans le cadre d'un contrat DRET. Le comportement visqueux macroscopique a été théoriquement discuté comme fonction de la viscosité des constituants par la méthode d'homogénéisation dans la thèse de S. Kruch. Le comportement visqueux réel est expérimentalement exploré par l'étude des modules complexes due à S. Kruch et M.P. Luong. Le problème de l'adaptation locale de la déformation plastique et de l'endommagement a été abordé par S. Kruch et Q.S. Nguyen par des calculs théoriques et numériques en vue des études de ruptures de composites périodiques.

P. de Buhan et A. Taliercio (étudiant italien en Doctorat au Politecnico di Milano) ont poursuivi l'application de la méthode d'homogénéisation à l'étude de la résistance des matériaux composites à fibres longues. Ils ont abouti à la formulation explicite d'un critère de résistance macroscopique applicable à des matériaux composites renforcés par plusieurs directions de fibres. L'introduction d'une condition de résistance traduisant la décohésion entre les fibres et la matrice a permis de modifier le critère ainsi obtenu et de rendre parfaitement compte des résultats expérimentaux, une fois identifiés à partir d'essais simples les paramètres de résistance à introduire dans le modèle théorique. La possibilité est ainsi offerte de mettre au point des méthodes de dimensionnement à la rupture de pièces ou de structures en matériaux composites.

P. de Buhan et S. Maghous ont entamé une étude visant à déterminer le critère de résistance macroscopique d'un matériau hétérogène à structure périodique, à partir de la solution d'un problème de calcul à la rupture défini sur la cellule de base représentative du matériau. Un certain nombre de résultats ont été obtenus par voie analytique dans des cas simples (cellules bidimensionnelles trouées, chargements symétriques). La recherche est actuellement orientée vers la mise au point d'une méthode numérique permettant la détermination systématique du convexe de résistance macroscopique de tels matériaux. Son principe est fondé sur l'utilisation de l'approche cinématique du calcul à la rupture après décomposition en séries de type "Fourier" des champs de vitesses utilisés définis sur la cellule de base. Une première phase ayant démontré la faisabilité de la méthode dans le cas unidimensionnel, son extension au cas bidimensionnel est en cours. Une première application de cette méthode à l'étude des matériaux poreux est envisagée.

2 - Mécanique de la Rupture

H. Maigre et Q.S. Nguyen ont poursuivi la détermination de la réponse asymptotique en fond de fissure en rupture ductile. La présence éventuelle de surfaces de discontinuité (ondes de choc en dynamique ou en quasi-statique lorsque le matériau est élastique parfaitement plastique) a conduit à

une étude plus approfondie des restrictions thermodynamiques lors du franchissement d'une surface de discontinuité. Une estimation originale a été obtenue, basée sur la notion de structure interne de l'onde de choc. Elle permet de mieux comprendre l'hypothèse des trajets radiaux souvent admise dans les études antérieures (due à Mandel par exemple).

Q.S. Nguyen et C. Stolz ont poursuivi leur étude de stabilité et de bifurcation de la propagation d'un système de fissures en rupture fragile. La méthode proposée concernant le calcul des dérivées secondes de l'énergie en termes d'intégrales indépendantes de contour a été mise en oeuvre numérique en collaboration avec G. Debruyne (MMN, Etudes et Recherches EDF). Des exemples simples, calculés par la méthode des éléments finis, ont montré clairement le caractère opérationnel des formules proposées, au même titre que l'intégrale J pour le calcul de la dérivée première. Cette méthode fait actuellement l'objet des études concertées avec le CEA (DEMT, A. Combescure et Suo) qui développe des calculs comparables en suivant la méthode de Destuynder.

H.D. Bui a étudié le problème de la propagation de fissure dans un matériau élasto-plastique et obtenu la solution asymptotique explicite exacte pour le mode III et la loi de Norton. La zone plastique se trouve dans $x_1 > 0$ et la zone de décharge élastique dans $x_1 < 0$.

Prolongeant l'étude menée au cours des années antérieures du trajet de propagation des fissures par rupture fragile en situation plane, J.B. Leblond a entrepris l'étude du trajet de propagation d'une fissure en situation tridimensionnelle, sous l'effet de chargements quelconques (modes I + II + III).

La première étape de cette étude a pour but d'établir la forme du développement des contraintes au voisinage du front d'une fissure tridimensionnelle de forme quelconque, jusqu'au 3ème terme (proportionnel à \sqrt{r}). Ce travail a constitué le sujet d'option d'un élève de l'X de 3ème année, Olivier Tortai. La méthode employée consiste à établir les équations vérifiées par les contraintes dans un système de coordonnées curvilignes adapté à la géométrie (courbe) de la fissure et de son front. La résolution de ces équations grâce à des techniques de fonctions complexes permet de calculer les contraintes dans le plan orthogonal au front de fissure. Les résultats obtenus font apparaître l'influence, sur le 3ème terme du développement des contraintes, des courbures de la fissure et de son front ainsi que de la dérivée des facteurs d'intensité le long du front.

La deuxième étape, qui n'est pas encore totalement achevée, a consisté à étudier la variation des facteurs d'intensité lors de l'avancement du front de fissure. Cette étude est essentiellement fondée sur une extension au cas tridimensionnel des "raisonnements d'universalité" établis les années précédentes dans le cas bidimensionnel. On obtient la dérivée des facteurs d'intensité par rapport au temps en fonction de divers paramètres, notamment l'angle éventuel de branchement, la nouvelle courbure prise par la fissure, la vitesse d'avance de front. Les deux premiers paramètres apparaissent sous forme "universelle" (c'est-à-dire valable quels que soient la géométrie et le chargement) ; le troisième apparaît sous forme d'une intégrale (en valeur principale) sur tout le front de fissure, qui n'a pas d'expression universelle (elle dépend de la géométrie).

Combinant enfin l'expression de la dérivée des facteurs d'intensité par rapport au temps avec un critère de propagation approprié, on obtient des équations donnant les paramètres qui caractérisent le trajet de propagation : angle de branchement, courbure, vitesse d'avance du front. Ainsi, en mode I + III, on trouve que l'angle de branchement est nul et que les déterminations de la courbure et de la vitesse du front sont découplées, celle de ce dernier nécessitant la résolution d'une équation intégrale. L'étude de certains cas particuliers simples à partir des travaux de Rice et Gao montre que si le front de fissure est fini, la solution de cette équation intégrale est généralement unique ; il n'en est pas de même si le front est infini. Ainsi, la propagation en mode I d'une fissure en forme de fente infinie présente une bifurcation, le front de fissure initialement rectiligne commençant à "onduler" dans le plan de fissure.

Le problème théorique de la détermination du facteur d'intensité des contraintes dynamiques à partir des grandeurs mécaniques accessibles expérimentalement a été posé depuis longtemps. Alors que le même problème en quasi-statique a une solution bien connue des expérimentateurs -méthode de la variation de raideur- l'absence de solution en dynamique a causé des difficultés dans les analyses des essais de rupture dynamique.

H.D. Bui et H. Maigre ont résolu le problème de l'identification de K_I en rupture dynamique. A partir des grandeurs observables que sont les forces surfaciques et les déplacements aux points d'application de ces forces, une méthode exacte a été trouvée permettant de calculer le facteur dynamique $K_I(t)$ en mode symétrique, ou plus généralement de découpler les modes I et II dans le cas général. Le facteur K_I est déterminé en fonction des données par des équations de convolution du type $A * K_I = B$ ou $K_I * K_I = C$. Les tests numériques de validation de la méthode ont été menés avec succès à l'aide de solutions analytiques disponibles.

3 - Plasticité et Fatigue des Métaux

N. Beaudé a achevé l'étude du comportement de super alliages monocristallins. Pour décrire le comportement du monocristal en grandes déformations, il a utilisé une approche basée sur la Mécanique des milieux continus standards généralisés qui permet d'étendre la loi de Schmid en transformation finie. Dans cette modélisation, les champs de vitesse considérés sont continus et le glissement complètement localisé est donc par nature exclu, sauf dans le cas de la bifurcation élasto-plastique pour laquelle la déformation plastique peut être concentrée dans une bande de très faible épaisseur.

L'étude théorique de l'amorçage des fissures de fatigue dans le régime polycyclique à partir de l'approche basée sur un passage macroscopique-microscopique proposée initialement par K. Dang Van a été poursuivie par Y. Papadopoulos et K. Dang Van. Pour les problèmes de cumul des dommages sous sollicitations multiaxiales variables, Y. Papadopoulos a proposé un concept de trajet de charge équivalent.

Dans le domaine de l'endurance, de nouvelles applications des critères de fatigue développés au laboratoire par ces deux auteurs ont été effectuées. Ainsi dans le cadre des stages d'options des élèves de l'Ecole Polytechnique, la tenue des atterrisseurs d'avions tels que AIRBUS, FALCON Jet ou RAFALE a été vérifiée avec ces critères. De même des composants de structures automobiles ont été calculés à la fatigue et vérifiés sur banc : les prévisions des points "critiques" ont été satisfaisantes.

Afin de pouvoir transposer les résultats d'essais de laboratoire aux calculs de structures off-shore, C. Nguedjio a proposé un modèle d'initiation de fissure basé sur une analyse de la déformation.

La fatigue plastique à très courte durée de vie a été abordée par D. Boussaa et K. Dang Van. Cette nouvelle étude s'inscrit dans la perspective d'une évaluation des risques de rupture des composants électro-nucléaires soumis à des séismes de grande intensité.

L'étude du phénomène de rupture des rails par taches ovales a été poursuivie par K. Dang Van et H. Maitournam. Il s'agit d'un phénomène de propagation de fissures sous les sollicitations très complexes créés par le passage des roues en présence de contraintes résiduelles et de contraintes thermiques. Un modèle complet de prévision est maintenant disponible qui permet de retrouver les principales caractéristiques de ce mode de ruine des rails. C'est à notre connaissance le seul modèle permettant d'expliquer quantitativement ces ruptures qui ont été très étudiées ces dernières années.

4 - Effets d'Ecrouissage et d'Interactions entre Cavités en Rupture Ductile.

G. Perrin, ingénieur-élève des Mines en stage de longue durée au LMS, a entrepris avec J.B. Leblond l'étude de certains problèmes en rupture ductile.

Le premier problème concerne l'introduction des effets d'écrouissage dans les modèles de rupture ductile, notamment celui, devenu maintenant classique, de Gurson. Ces modèles définissent le critère d'écoulement macroscopique d'un matériau contenant des cavités, et contiennent notamment des expressions des contraintes d'écoulement en chargement purement déviatorique et purement hydrostatique. L'hypothèse nouvelle est que l'effet de l'écrouissage est le même sur ces deux contraintes d'écoulement. La considération d'un cas particulier a permis de montrer que cette hypothèse n'est pas satisfaisante, la contrainte d'écoulement en chargement hydrostatique étant beaucoup plus sensible aux effets d'écrouissage, et de proposer un autre modèle que l'on espère plus réaliste. Ce modèle est en cours de validation grâce à des calculs numériques effectués au Centre de Calcul de Framatome.

Le second problème concerne les effets d'interaction entre cavités. G. Perrin et J.B. Leblond l'ont abordé en considérant un cas particulier typique pour lequel une solution analytique complète a été obtenue : celui d'une sphère creuse soumise à un chargement hydrostatique, la matrice étant constituée d'un matériau contenant des petites cavités finement dispersées et obéissant au critère de Gurson-Tvergaard. Ce calcul est susceptible de deux applications intéressantes. La première consiste à comparer la contrainte d'écoulement (en chargement hydrostatique), qui dépend de la porosité f de la matrice poreuse et de celle, f' , due à la grosse cavité centrale, à celle d'un matériau contenant des cavités de tailles identiques et de porosité $f + f'$. La différence est trouvée faible, ce qui constitue une validation des modèles du type Gurson qui ne considèrent qu'une seule population de cavités supposées identiques, la porosité utilisée étant la porosité totale. La seconde consiste à déterminer par une méthode "self-consistent" le paramètre empirique q introduit par Tvergaard dans le modèle de Gurson pour tenir compte des interactions entre cavités. Pour ce faire, on évalue la contrainte d'écoulement en chargement hydrostatique d'un matériau de porosité $f + df$ en isolant par la pensée une cavité définissant une porosité df et en remplaçant le milieu environnant, de porosité f , par un milieu homogénéisé de Gurson-Tvergaard ; puis on exige la coïncidence de cette contrainte d'écoulement et de celle d'un milieu de Gurson-Tvergaard de porosité $f + df$. Cette procédure impose la valeur de q , que l'on trouve égale à $\frac{4}{3} \approx 1,47$, valeur à rapprocher de celle déterminée par Tvergaard à partir de simulations numériques de réseaux périodiques de cavités, soit $q = 1,5$.

5 - Etude du Grenailage

J. Frelat et S. Braham (Stagiaire de recherches Renault) ont étudié le galetage des vilebrequins. Cette étude s'inscrit dans la continuation de celle du grenailage (modèle de Frelat-Zarka).

Les difficultés de généralisation du modèle de grenailage proviennent de deux aspects géométriques ; le galetage est un traitement des gorges de vilebrequins, et donc une modélisation analytique directe n'est plus possible, et, surtout, ce problème tridimensionnel ne peut être judicieusement traité que de manière bidimensionnelle, alors que le grenailage pouvait se ramener à une étude monodimensionnelle.

Les premiers résultats obtenus ont montré que certaines conditions industriellement mises en oeuvre risquaient de ne pas fournir les résultats souhaités (contraintes résiduelles de compression importantes dans toutes les directions en surface).

Cette étude est poursuivie pour examiner divers facteurs : forme du galet, pression de galetage, géométrie de la gorge, dans le but de prédire l'amélioration apportée par ce traitement sur la durée de vie des vilebrequins.

J. Frelat et P. Ballard (X84, Boursier CIFRE-Peugeot SA et Laboratoire Utilisation des Lasers Intenses LULI Ecole Polytechnique) ont modélisé l'effet d'une impulsion de pression surfacique, de très courte durée, inférieure à 300 nano-s, et de très fort niveau (de l'ordre de 1000 à 10 000 MPa), sur une pièce métallique pour représenter le grenailage par laser mis au point au LULI.

Le but de cette modélisation est de prédire le champ des contraintes résiduelles obtenu par cette technique expérimentale et de les comparer aux mesures faites à l'ENSAM Paris.

Une modélisation uniaxiale de la propagation de l'onde élasto-plastique dans la pièce cible a été développée et comparée à des prévisions numériques. Elle a permis de comprendre le mécanisme d'atténuation de l'amplitude de l'onde, et ainsi, de prévoir le niveau des contraintes résiduelles engendrées et d'obtenir une évaluation de la profondeur affectée plastiquement. Cette dernière est un peu sur-évaluée et impose une prise en compte des effets viscoplastiques.

Les effets bidimensionnels seront prochainement étudiés, et la modélisation complétée pour mieux prendre en considération le comportement des matériaux des cibles à ces vitesses de sollicitations. La détermination des meilleures conditions de traitement pour un gain substantiel en fatigue sous sollicitations de service est un but industriel important.

6 - Comportement Mécanique du Bois

Le travail de modélisation du couplage hygro-mécanique à partir de la microstructure du bois a été poursuivi par J. Gril.

La matière ligneuse contient pour moitié environ des filaments celluliques appelés microfibrilles. Celles-ci sont disposées en hélicoïdes le long des parois cellulaires et de ce fait sont orientées d'un certain angle par rapport à la direction longitudinale des fibres. Dans le modèle uniaxial précédent, la matière était représentée comme l'assemblage en parallèle de deux phases, les microfibrilles élastiques d'une part et la matrice visco-élastique d'autre part. L'extension multiaxiale faite par J. Gril permet maintenant d'utiliser directement le paramètre "angle des microfibrilles" dont il a pu mettre en valeur le rôle essentiel. Il semble dorénavant établi que, dans le sens des fibres tout au moins, le comportement visco-élastique du bois (qu'il s'agisse de vibrations acoustiques ou d'effet mécano-sorptif) est déterminé en première approximation par deux paramètres : d'une part la densité, qui donne la quantité de matière, et d'autre part l'angle moyen des microfibrilles, qui définit l'anisotropie locale.

Concernant le couplage hygro-mécanique proprement dit, un progrès a été apporté à la formulation du "seuil mécano-sorptif", qui jusqu'ici se limitait au "dépassement de l'humidité maximale depuis le début de la charge" dans le cas de l'essai de fluage (charge constante). La formulation proposée, en terme de contraintes bloquées, s'applique à un chargement hygro-mécanique quelconque. Elle a donné lieu à l'élaboration d'une représentation analogique dénommée "attelage d'hygro-verrous" rendant bien compte des phénomènes observés.

Le LMS est impliqué dans les activités du G.S. "Rhéologie du Bois" du CNRS et à ce titre travaille en concertation avec d'autres équipes françaises (CTBA, CTFT, Universités de Bordeaux, Montpellier, Nancy, etc.). D'autre part la collaboration avec le Wood Research Institute (Université de Kyoto, Japon) est poursuivie, notamment sur le thème de l'amélioration du matériau par traitements physico-chimiques, ainsi que le contact avec D. Hunt (South Bank Polytechnic, Londres).

7 - Thermographie Infrarouge

M.P. Luong, assisté par J.C Eytard, a utilisé la thermovision infrarouge pour caractériser certain assemblage en matériau composite. Ainsi la défaillance de la liaison entre fibre et matrice peut être mise en évidence et cette technique permet d'évaluer l'état d'endommagement de matériaux composites sous charge et de délimiter le domaine d'utilisation. De la même façon la thermographie infrarouge a été utilisée pour déceler les phénomènes thermomécaniques qui se manifestent dans le matériau bois lorsqu'il est soumis à des cisaillements. Elle permet également de détecter les concentrations de contraintes dans des assemblages en bois et surtout au droit des connecteurs, mais aussi pour des structures composites comme des skis.

Pour l'auscultation non destructive de structures en matériaux composites, une technique de visualisation automatique de défauts, fondée sur la thermographie infrarouge et l'analyse de Fourier, est en cours de mise au point par G. Gary en utilisant un montage expérimental original.

Pour analyser le comportement à la rupture des géomembranes, le CEMAGREF a mis au point un essai d'éclatométrie qui consiste à appliquer une pression sur une géomembrane reposant sur une ouverture circulaire. La membrane se déforme alors en calotte sphérique et est soumise à une traction double. La thermographie infrarouge, appliquée à cet essai, permet de mettre en évidence la distribution des contraintes sur la membrane lors de la mise en charge. L'avantage de cette technique qui repose sur la détection de la dissipation intrinsèque sous forme de chaleur générée par des déformations plastiques est de n'exiger aucun contact avec la géomembrane en cours d'essai.

Enfin, une thermovision infrarouge a été effectuée sur une vanne type Daphné déclassée (DCAN Toulon) pour étudier la faisabilité de l'auscultation des microfuites ou des microfissures traversantes.

A la demande de la Division "Propulsion à Poudre et Composites" de la SEP, une série d'essais de vibrations ont été effectués par M.P. Luong, assisté de J.C. Eytard, sur des barreaux C/SiC. Cette étude faite avec des moyens classiques avait pour but de déterminer le module et l'amortissement équivalents de la courbe contrainte-déformation à différents niveaux de traction moyenne σ en fonction de l'amplitude de déformation à la température ambiante. Le même montage peut être utilisé pour une étude en température (- 50°C à 200°C) pour simuler des conditions d'environnement sévères.

8 - Interaction Fluide-Structure et Stabilité

La réalisation par G. Gary en grandeur nature d'un modèle de gaine de réacteur nucléaire a permis l'étude de la stabilité de sondes d'auscultation soumises à des chargements complexes. La validation de modèles théoriques d'interaction solide-fluide est possible et permet une étude de stabilité. Le modèle expérimental utilisé a été réalisé en collaboration avec Electricité de France.

La solution d'un problème spécifique avait donné lieu au dépôt d'un brevet en 1987. Le travail a été poursuivi en vue d'améliorer les résultats déjà acquis.

III - MECANIQUE DES ROCHES

1 - Structures Souterraines de Stockage de Matériaux Radioactifs en Formation Géologique

A - Le Sel

Afin de compléter et de qualifier les résultats déjà acquis, J.P. Charpentier, assisté de P. Valli, a poursuivi l'étude des caractéristiques différées d'un sel profond de la Bresse (site d'Étrez). L'éventail des essais réalisés à ce jour dans les gammes de contrainte ($\sigma_{MAX} = 20$ MPa) et de température ($T_{MAX} = 200^{\circ}C$) permet d'approcher par des lois phénoménologiques le comportement différé du matériau.

Sur un sel provenant de la mine Amélie des MdPA -où le LMS conduit un important essai in situ- on a également réalisé en laboratoire une caractérisation du fluage en privilégiant les essais multiples (avec paliers de charge ou de température).

Des essais du même type ont été effectués sur un sel gemme très pur de la mine d'Asse en RFA dans le but de caler nos modèles avec ceux proposés principalement par le BGR de Hanovre.

Un nombre important d'essais de fluage effectués au LMS ont été analysés par A. Pouya pour définir le comportement rhéologique du sel. A l'issue de cette analyse une loi de fluage a été formulée pour le sel d'Étrez d'une part et pour le sel des Mines de Potasse d'Alsace (MdPA) d'autre part. La loi adoptée se rapproche du modèle du "Corps de Burgers" en distinguant un fluage transitoire et un fluage stationnaire.

Le sel d'Étrez présente une importante dispersion des résultats de mesures. La loi obtenue représente son comportement moyen et permet de classer les échantillons étudiés suivant leur aptitude au fluage. La comparaison entre cette classification et celle fondée sur les propriétés pétrographiques, définies en collaboration avec les minéralogistes, a permis de mettre en évidence une corrélation entre les propriétés mécaniques et pétrographiques du sel. Ce résultat encourage à continuer dans la même voie et une série d'essais plus spécifiques pour ce genre de comparaison est actuellement envisagée. Cette étude doit conduire à une meilleure définition de la rhéologie du sel en tenant compte de sa pétrographie.

Pour le sel des MdPA qui est moins dispersé, la loi trouvée est utilisée pour l'interprétation des résultats d'un essai in situ en cours effectué dans la mine Amélie en Alsace (convergence d'une galerie ou d'un sondage sous l'effet des charges thermiques). Les premières comparaisons entre les valeurs mesurées et calculées ont été satisfaisantes.

Le comportement rhéologique du sel à grande vitesse de déformation a été étudié par G. Gary. Pour compléter le banc d'essais dynamiques du laboratoire, un logiciel spécifique au traitement du système Hopkinson-Kolsky a été développé en collaboration avec le Professeur Klepaczko de l'Université de Metz. Ce logiciel permet l'analyse complète de l'essai et sa validation. L'ensemble a permis d'étudier le comportement dynamique du sel.

M.D. Nguyen et N. Schmitt ont utilisé le cadre classique de l'endommagement macroscopique homogène selon Katchanov-Lemaître afin de proposer pour le sel gemme un modèle qualitatif simple dans lequel les phénomènes de cristallisation-dissolution sont négligés. En supposant que l'endommagement résulte d'un effet fragile instantané et d'un effet retardé en fonction du chargement, et en considérant un modèle de comportement simplifié pour le matériau (Maxwell), ils

ont illustré l'interaction entre les deux mécanismes d'endommagement sur des exemples de chargement classiques : écrouissage, relaxation, fluage. La dilatance, observée dans les essais rapides, s'explique par un endommagement anisotrope.

Une étude bibliographique a été faite sur la perméabilité qui apparaît comme une conséquence importante de l'endommagement sur les propriétés physiques du matériau. Le sel gemme est en général réputé étanche in situ; il montre, en laboratoire, une perméabilité variable, fonction de l'état de sollicitation, et dont l'interprétation est délicate.

Une étude expérimentale en laboratoire a été entreprise par M. Ghoreychi, à la demande de Gaz de France, pour corrélérer l'atténuation des ultrasons avec la fissuration des échantillons de sel provoquée par des essais de compression simple et par des essais triaxiaux à court terme et à long terme. Un seuil visible d'endommagement est difficilement identifiable pour le sel. La technique ultrasonore présente une efficacité remarquable car une fissuration invisible sur l'échantillon se traduit par une diminution notable de l'amplitude des ondes longitudinales dans le sel.

M. Chayé a effectué, en collaboration avec J.L. Zimmermann (CRPG de Nancy), une étude comparée de la dose de méthane dans les sels laiteux d'Etrez et des Mines de Potasse d'Alsace. Un rapport de synthèse des résultats obtenus est en cours de rédaction. D'autres mesures doivent être effectuées sur des échantillons laiteux d'Etrez de profondeurs différentes.

Des recherches ont été effectuées en collaboration avec le Laboratoire de Minéralogie de l'U.P.M.C. pour repérer l'orientation de cristaux de halite d'Etrez. Différentes méthodes de mesure ont été testées. Finalement avec une plaquette préparée par A. Pouya, on a effectué des diagrammes de Laue par transmission à partir desquels un programme d'ordinateur permet de déterminer l'orientation du cristal.

L'essai in situ pour évaluer l'interaction thermomécanique entre le sel en place et le sel broyé commencé en 1987 dans les Mines de Potasse d'Alsace s'est poursuivi en 1988 et est maintenant dans sa phase finale. On dispose actuellement d'un nombre considérable de données thermomécaniques grâce au logiciel d'acquisition à distance SELTICA conçu par B. Bazargan Sabet et complété par plusieurs logiciels, en particulier un programme de tri rapide avec identification de paramètres, inspiré du système Unix mais appliqué sous MS-DOS et un programme de traitement graphique pour l'exploitation des résultats de l'essai. B. Bazargan Sabet a participé également au dépouillement et à l'interprétation des résultats de l'essai en cours, en collaboration avec M. Ghoreychi et J. Roman.

Pour la recherche sur l'interaction, M. Ghoreychi a introduit la loi rhéologique, proposée par A. Pouya pour le sel, dans le logiciel GEOMEC pour l'interprétation des mesures. Une simulation thermique de l'essai in situ a été faite par M. Ghoreychi et J. Roman en utilisant le logiciel THERM mis au point par M. Ghoreychi. La simulation thermomécanique de l'expérience faite aux MdPA en tenant compte des résultats acquis au laboratoire pour le comportement du sel gemme et pour celui du sel broyé a été faite par M. Ghoreychi. Les résultats du calcul sont en bon accord avec les mesures in situ, ce qui est très encourageant, et complète la réussite de ce vaste programme. Un film de 12 mn a été réalisé par le Service Audiovisuel de l'École Polytechnique.

Comme lors des précédentes années, la comparaison européenne des programmes de calculs financés par la CEE s'est poursuivie en 1988. La phase finale du projet CoSA II, à laquelle a participé M. Ghoreychi, a porté sur le calcul thermomécanique d'une expérience in situ réalisée dans la Mine de Asse en RFA.

Des calculs effectués à la fin de l'année 1987 avaient mis en évidence la nécessité d'une étude locale du voisinage des conteneurs. En effet, les phénomènes thermiques spécifiques tels que la convection et le rayonnement ainsi que la non linéarité du comportement thermique du sel gemme, (décroissance de la conductivité avec la température), posent des problèmes particuliers. Cette étude a été commencée en 1988 suivant deux axes principaux : la simulation numérique, mécanique et thermique des conteneurs (N. Schmitt et M. Ghoreychi) et la conception d'une nouvelle expérimentation aux MdPA (J. Roman, M. Ghoreychi, B. Bazargan Sabet. Elle se poursuivra en 1989.

Trois campagnes de simulation de la formation de dômes de sel sur la centrifugeuse du CESTA ont été effectuées par A. Zelikson, dans le cadre d'un contrat ANDRA-CCE. Les modèles à trois dimensions, réalisés dans une cellule cylindrique de diamètre 0,9 m ont donné des résultats analogues à ceux obtenus antérieurement dans une cellule bidimensionnelle de 0,9 m de haut, pour différentes configurations de couches de terrains. Ces résultats confirment la validité de la modélisation bidimensionnelle, plus facile à réaliser, et qui permet d'obtenir des images vidéo de l'évolution de la structure.

Les mécanismes de déclenchement de la formation de dômes ont été étudiés en détail (surchage sur la surface libre, interface penté, présence de forces horizontales), ainsi que l'influence du rapport hauteur/largeur des couches. Un phénomène de "jet", qui présente certaines similitudes avec la fracturation hydraulique, a été observé dans plusieurs cas. On a pu mettre en évidence une distinction entre évolutions "normales" et "intempestives".

Une étude de faisabilité des modèles centrifugés a été effectuée pour deux autres problèmes liés à l'enfouissement de déchets dans du sel ou dans de l'argile : la stabilité d'un empilement vertical de conteneurs dans un corps susceptible de fluer et la stabilité de cavités réalisées dans une argile dure ; les possibilités de la centrifugeuse du LCPC Nantes sont apparues intéressantes pour ce problème.

P. Habib a réexaminé les conditions de similitude lorsque le comportement des matériaux est radoucissant, par exemple pour les essais en centrifugeuse mais pas uniquement dans ce cas. Il peut apparaître des effets d'échelle, notamment pour les matériaux pulvérulents denses et l'interprétation des résultats obtenus sur des maquettes doit être faite avec prudence.

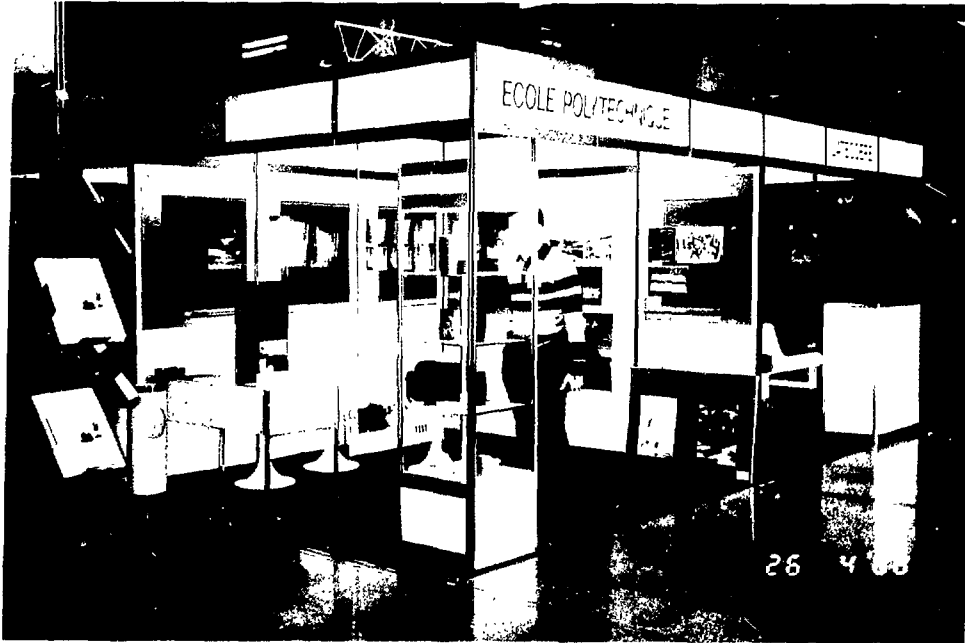
B - L'Argile

1 - Essais de Laboratoire

L'étude du comportement différé des roches argileuses (G. Rousset et R. Lenain assistés par M. Dao et P. Valli) s'est poursuivie en 1988 par la mise en service de 8 nouveaux bâtis hydrauliques de 100 kN, ce qui porte le nombre des unités de fluage à 14.

M. Chayé a poursuivi, en collaboration avec G. Rousset, le parallèle entre les caractéristiques mécaniques, géotechniques, sédimentologiques, minéralogiques, granulométriques, physico-chimiques de sept argiles. Ce travail a pour objectif de rechercher les facteurs susceptibles d'altérer la tenue des roches (par exemple, la teneur en pyrite peut intervenir à partir de teneurs de 0,1 à 0,2%).

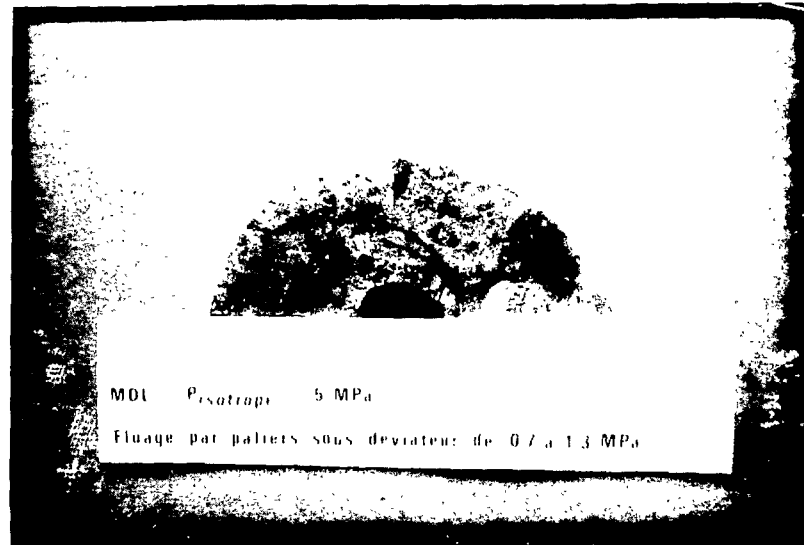
L'adaptation du programme ROCKSUN à l'essai thermo-hydro-mécanique sur sphère d'argile a été achevée par B. Bazargan Sabet. Les premiers résultats de l'essai (G. Rousset et I. Djeran assistés par D. Théval) sont encourageants : ils montrent notamment que les mouvements de l'eau interstitielle dus au gradient thermique sont de faible ampleur, le matériau restant saturé.



Stand de l'Ecole Polytechnique à l'exposition
du Congrès International "Centrifuge 88"

Par ailleurs, les paramètres thermiques de la roche sont donnés par l'essai avec précision. L'adaptation de ROCKSUN à de nouveaux essais a conduit B. Bazargan-Sabet à concevoir le logiciel GALA (Génération Automatique de Logiciels d'Acquisition) qui permet la création d'un programme par l'assemblage de différents modules d'acquisition, de configuration et de visualisation, choisis dans des "bibliothèques" appropriées, en fonction de l'application demandée. Il a aussi étudié un capteur miniaturisé pour la mesure de la teneur en eau, basé sur le principe de la génération de courant dans un milieu électrolytique. Les premiers essais permettent d'espérer la fabrication d'un prototype en 1989.

Le programme d'essai sur tube épais (G. Rousset, R. Lenain, B. Bazargan Sabet assistés par M. Dao et D. Théval) s'est achevé cette année. La machine, conçue avec l'aide de P. Fréville et fabriquée au LMS, a rempli pleinement les objectifs initiaux. En particulier on a montré que l'on pouvait tracer point par point (essais de fluage ou de relaxation par palier) la courbe de convergence à long terme d'une roche visqueuse.



Essai sur tube épais : forme de la rupture

Les mécanismes de rupture sont maintenant bien connus : en-dessous de 8% environ de convergence, il n'y a pas de localisation de la déformation, ni de rupture ; passé ce seuil une rupture macroscopique (surface de glissement en forme de spirale logarithmique) apparaît toujours.

2 - Essais in situ

L'essai de "soutènement à convergence contrôlée" (G. Rousset, D. Bublitz) réalisé à Mol (Belgique) fin 1987 est en cours de suivi et d'interprétation. L'ouvrage (galerie cintrée de 4 m de diamètre) a été conçu comme une application optimisée de la méthode convergence-confinement dans les roches viscoplastiques. En particulier, on a mis en évidence que le "contrôle" des premières phases du chargement (creusement et pose du soutènement) permet d'obtenir une pression de confinement minimale et donc d'optimiser le dimensionnement du soutènement. Le modèle de comportement proposé par G. rousset dans sa thèse permet d'interpréter les résultats de cet essai.

L'extension du modèle analytique étudié par I. Charara, permettant d'évaluer les contraintes engendrées par la congélation artificielle des terrains, au cas du comportement non linéaire des sols gelé et non gelé, a permis de mettre en évidence des situations où se conjuguent un endommagement du sol par la congélation et de fortes contraintes supplémentaires dues au gel. Cela pourrait apporter un élément d'explication à des accidents survenus lors du creusement de puits de mines utilisant la congélation artificielle préalable du sol.

C - Le Granite

L'étude expérimentale de l'influence de l'anisotropie de fissuration induite par un chargement mécanique sur les caractéristiques thermiques du granite d'Auriat a été faite par J. Bergues dans le cadre d'un programme de recherche effectué avec le CEA (IPSN). Il est difficile de déceler l'influence de l'anisotropie du granite après le chargement si les mesures thermiques ne sont pas faites sous contraintes parce que les fissures qui se sont ouvertes au cours du chargement se referment pendant la décharge, ce qui perturbe les observations et engendre une certaine dispersion. Ceci a amené J. Bergues à étudier des échantillons fissurés thermiquement à des taux de fissuration analogues à ceux obtenus sous chargement. Les résultats ont montré que la dilatation thermique augmente avec le taux de fissuration, le module d'Young E restant constant, et que la conductivité thermique λ diminue à partir d'un seuil de fissuration η_1 (porosité de fissure $\eta_1 = 2 \times 10^{-3}$). Ces résultats peuvent être rattachés, à l'aide d'un modèle simplifié de corps fissuré, à ceux d'une éprouvette où le chargement a induit une fissuration anisotrope.

M. Chayé a effectué, en collaboration avec J. Bergues, une étude de la déformabilité thermique d'éprouvettes de granite d'Auriat soumises à différents traitements thermiques. Cette étude a mis en évidence une croissance des coefficients de dilatation lorsque l'on passe des intervalles 20-80°C à 150-200°C. Cette augmentation correspond à un accroissement du volume de la fissuration qui tend à se stabiliser pour un intervalle de température donné, mais peut se développer à nouveau pour une température plus élevée.

M. Chayé a effectué par ailleurs, en collaboration avec Ph. Blanc (URA 319 du CNRS Paris), une étude de la fissuration du granite d'Auriat par examen de lames minces au microscope optique en lumière naturelle et en cathodoluminescence. Cette étude met en évidence l'existence d'une altération et de fissures anciennes qui doivent être prises en considération comme facteurs susceptibles de diminuer la tenue de la roche. Elle permet de préciser le cheminement de la fissuration.

2 - Equilibre des Cavités Souterraines

Le cadre d'analyse de la stabilité des systèmes irréversibles, précisé par Q.S. Nguyen, a été utilisé par P. Berest pour examiner le comportement de tunnels réalisés dans des matériaux élasto-fragiles. On a pu établir que dans un assez grand nombre de cas les solutions à symétrie cylindrique, fréquemment utilisées pour les calculs d'ingénieurs, ne sont ni stables ni uniques.

L'application du calcul du comportement de trous cylindriques ou sphériques en massif élasto-visco-plastique au problème de la fracture hydraulique a permis de montrer que l'interprétation des résultats d'essais in situ devait être effectuée avec une grande prudence.

P. Berest a imaginé un essai in situ pour mesurer un module d'élasticité équivalent pour l'ensemble des terrains surincombants à une cavité de grand volume. L'essai consiste à mettre sous pression, puis à relâcher, une cavité souterraine et à mesurer des inclinaisons de la surface du sol induite par les variations de pression. E. Hetuin a étudié la solution analytique du problème de l'influence d'une cavité sphérique dans un massif élastique semi-infini. Cette solution a permis de définir un protocole d'essai in situ et l'expérience a été faite en décembre 1988 en collaboration avec Gaz de France et avec l'Institut de Physique du Globe sur le site de stockage de gaz naturel d'Etrez. Les mesures d'inclinaisons doivent être très sensibles. Elles ont été faites avec l'inclinomètre de Blum (IPG) qui permet de mesurer sans difficulté des rotations de 10^{-7} rad (et même beaucoup plus petites encore). Les essais effectués sur le terrain ont montré que des inclinomètres aussi sensibles réagissent à de nombreuses influences extérieures. En particulier on distingue sans difficulté le passage d'une charge mobile alors que la déflexion correspondante est de l'ordre de quelques microns, c'est-à-dire inaccessible à la mesure. Ceci ouvre la voie à une mesure globale du module d'élasticité d'un massif de sol ou de roches. En particulier à Etrez on a ainsi déterminé en surface un module d'élasticité de 200 MPa compatible avec ce que l'on sait par ailleurs d'un tel sol.

M.D. Nguyen a effectué le calcul semi-explicite en symétrie sphérique d'une cavité de stockage pour deux lois de comportement viscoplastiques du massif, l'une avec écrouissage continue (type Lemaître), l'autre avec une loi de type "Burgers" traduisant les deux premières phases du fluage, la phase secondaire étant donnée par une loi de Norton selon le modèle proposé par A. Pouya d'après les essais de laboratoire sur le sel. Le calcul montre la très grande sensibilité des déplacements au rapport du rayon extérieur au rayon intérieur, lorsque les déplacements deviennent importants ; il fournit un moyen pour choisir le dimensionnement du maillage d'un modèle de calcul numérique aux éléments finis pour une cavité souterraine.

Pour une étude demandée par GDF, la méthode simplifiée d'analyse des structures de J. Zarka a été utilisée par P. Navidi Kasmai pour l'étude de la tenue d'une cavité souterraine de stockage de gaz. Le chargement considéré était un délestage cyclique du réservoir. L'approche a consisté à déterminer l'état limite de la structure et à donner des bornes de déplacements en considérant deux types de chargement, rapide et lent. Pour le choix des constantes, des essais de laboratoire ont été effectués permettant d'identifier le comportement cyclique du sel soumis à des chargements rapides.

P. Berest est intervenu à titre de conseil de l'Administration des Mines (Ministère de l'Industrie) dans diverses affaires intéressant la sûreté des stockages souterrains d'hydrocarbures.

3 - Comportement de Différents Matériaux

A - Roches

L'étude expérimentale de la fissuration du grès de Fontainebleau a été poursuivie par J. Bergues, assisté par G. Pergeaux, dans le cadre du GRECO "Rhéologie des Géomatériaux". Elle a été déterminée au cours du chargement par mesure de la variation de volume ε_{VF} et après le chargement par un essai de compressibilité donnant la porosité de fissures η_0 . L'expérience montre que dans le domaine fragile les déformations irréversibles sont dues exclusivement à la propagation des fissures et ce domaine est caractérisé par un rapport constant entre ε_{VF} et η_0 . Ce résultat a été utilisé pour étudier la propagation des fissures dans deux configurations différentes : en essai triaxial classique à confinement constant et en chargement radial. La propagation des fissures dépend du trajet de chargement et influence le comportement mécanique et la rupture du matériau.

M. Chayé a poursuivi, en collaboration avec P. Sirieys (URA 69 du CNRS Grenoble) une étude de la déformabilité thermique des roches. Cette étude porte, d'une part sur les calcaires dont les coefficients de dilatation sont mis en relation avec les contraintes d'origine tectonique ou expérimentale subies par les roches, et d'autre part sur les relations de la déformabilité thermique des monocristaux de calcite et de quartz et de quatre types de roches (granite, calcaires, schistes et charbon) avec leur hétérogénéité et leur anisotropie structurale.

M.P. Luong, assisté par R. Barre, a mis au point trois essais de base pour déterminer la résistance à la rupture de géomatériaux à comportement fragile comme le grès de Fontainebleau, le béton ou les coulis de ciment. Ces trois essais permettent d'examiner les trois modes fondamentaux de la mécanique de la rupture ; à savoir : la traction directe (mode I), le cisaillement direct (mode II), la torsion directe (mode III). L'éprouvette de traction est intéressante car on peut récupérer les parties intérieure et extérieure non abîmée lors de l'essai de traction pour des essais complémentaires de compression simple sur tube et de fendage sur cylindre. Pour cette éprouvette, la matière a été entièrement utilisée pour la caractérisation du matériau. Enfin l'application d'une force contrôlée normale à la surface de rupture en cisaillement direct et en torsion directe permet à la fois d'étudier l'effet de la dilatance au cours de la rupture et de déterminer les courbes intrinsèques suivant les mécanismes de cisaillement en mode II et de torsion en mode III.

Enfin M.P. Luong a utilisé la thermographie infrarouge pour détecter la dissipation intrinsèque du béton et le phénomène de localisation lorsque la sollicitation dépasse le pic de résistance (radoucissement).

B - Béton

M. Terrien a étudié l'effet d'un choc thermique sur un béton réfractaire. L'endommagement induit a été étudié par deux méthodes :

- le comptage en continu de l'émission acoustique produite et la digitalisation d'une partie des événements acoustiques ont permis de suivre la microfissuration après l'application de l'échelon de température (300 degrés). L'analyse spectrale a mis en évidence des événements correspondant à l'amorçage de fissures, comme cela avait été montré dans une étude précédente lors de la création de fissures d'interfaces dans un béton armé. Ces événements se caractérisent par une amplitude importante et surtout, par un aspect temporel et spectral typique que l'on observe avec la source de "Nielsen" (échelon de force ponctuelle).

- une source acoustique a été utilisée avant et après application de l'échelon de température afin de mettre en évidence la microfissuration (méthode par transmission). Il n'a pas été observé de différence significative sur les signaux temporels et sur les spectres, mais l'utilisation d'un logiciel de classification non hiérarchique a montré cependant que les signaux acoustiques avant traversé l'éprouvette après l'essai étaient significativement différents de ceux recueillis avant et ceci confirme l'existence d'un endommagement produit par le choc thermique.

IV - MECANIQUE DES SOLS

1 - Analyse de l'Equilibre des Ouvrages en Sols Renforcés par le Calcul à la Rupture

Ce problème a été envisagé parallèlement selon deux approches complémentaires :

- analyse fondée sur la méthode d'homogénéisation en calcul à la rupture dans laquelle l'ouvrage est considéré comme constitué d'un milieu continu homogène dont le critère de résistance est déterminé à partir de ceux des matériaux constitutifs

- analyse conservant le caractère hétérogène du sol où l'on assimile les inclusions de renforcement (barres, armatures,...) à des milieux continus généralisés.

A - Approches fondées sur la théorie de l'homogénéisation

Dans le prolongement du travail de thèse de L. Siad, P. de Buhan et L. Siad ont étudié l'influence d'une condition de résistance à l'interface sol-inclusion de renforcement sur la tenue des ouvrages en terre armée. La méthode d'homogénéisation en calcul à la rupture a permis d'obtenir une formulation simple d'un critère de résistance macroscopique de la terre armée qui tient compte d'une telle condition d'interface. Deux types d'interfaces ont été plus particulièrement examinés : interfaces de type "Tresca", pour lesquelles la rupture n'apparaît que lorsque la contrainte de cisaillement excède une certaine valeur critique ; interfaces de type "Coulomb" caractérisées par un angle de frottement δ . La théorie montre que, dans ce dernier cas, la condition de résistance à l'interface ne joue aucun rôle tant que δ demeure supérieur à l'angle de frottement interne du sol.

Les calculs effectués avec la méthode d'homogénéisation sur différents ouvrages ont permis de préciser quantitativement l'influence d'un critère d'interface. Ils ont montré que cette influence demeure négligeable en ce qui concerne l'analyse de stabilité d'un mur vertical de soutènement en terre armée, tandis qu'elle se révèle très importante dans le cas du poinçonnement d'un massif semi-infini.

Sous la direction de J. Salençon, H. Colina a considéré le cas d'un matériau bidimensionnel constitué de couches parallèles régies alternativement par les critères de résistance de Coulomb et de Tresca, l'adhérence entre les couches était supposée totale. Ce type de matériau constitue une modélisation plausible pour l'analyse des ouvrages renforcés par colonnes ou tranchées ballastées et, par passage à la limite, permet de rejoindre la modélisation des renforcements par armatures souples. En appliquant la théorie de l'homogénéisation en calcul à la rupture, le critère de résistance "macroscopique" à utiliser pour l'analyse de la stabilité d'un ouvrage sur l'ouvrage homogénéisé associé, a pu être déterminé et construit de façon explicite. On observe que le matériau "macroscopique" homogénéisé est évidemment anisotrope et que sa résistance participe de la cohésion apportée par le matériau de Tresca et du frottement dû au sol de Coulomb ; de plus il apparaît que dans le cadre de cette modélisation bidimensionnelle multicouche le renforcement du sol natif purement cohérent par l'introduction du sol frottant n'est effectif que lorsque la pression moyenne dépasse une valeur critique, alors que pour de faibles pressions moyennes une diminution des capacités de résistance est mise en évidence : ceci montre l'utilité qu'aurait une approche tridimensionnelle pour les renforcements par colonnes ballastées.

B - Approches fondées sur une modélisation mixte

A. Anthoine a poursuivi l'élaboration du logiciel STARS (STabilité et Renforcement des Sols) destiné au dimensionnement et à l'optimisation d'ouvrages en sols renforcés. Le programme est actuellement opérationnel en mode interactif sur micro-ordinateur (640 Ko de RAM) sous système d'exploitation MS-DOS et possédant un écran graphique. STARS est conçu pour les ouvrages de type fouille, talus ou pente, renforcés par des inclusions uni ou bidimensionnelles (armatures de terre armée, clous, géotextiles) et soumis au poids propre du sol ainsi qu'à des surcharges concentrées ou réparties. STARS évalue le coefficient de stabilité de l'ouvrage grâce à l'approche cinématique du calcul à la rupture pour une modélisation mixte du sol renforcé avec prise en compte de l'adhérence à l'interface sol-inclusion. Les notices théorique et technique sont disponibles.

D'autre part, E. Greuel et A. Anthoine ont appliqué le même principe de calcul (méthode cinématique et modélisation mixte) au problème d'une fondation superficielle sur un sol cohérent et/ou frottant renforcé par un ou plusieurs géotextiles, en s'attachant plus particulièrement à l'optimisation des schémas de renforcement. Les estimations obtenues pour la capacité portante de tels ouvrages sont en bon accord avec les valeurs expérimentales disponibles, compte tenu des hypothèses simplificatrices adoptées. Par ailleurs, la prise en compte d'un réseau périodique de géotextiles de plus en plus dense a permis d'étudier la convergence des résultats vers ceux obtenus par une méthode d'homogénéisation.

2 - Comportement des Matériaux Granulaires

M.P. Luong, assisté par R. Barre, a étudié le comportement rhéologique de différents matériaux granulaires sous sollicitations cycliques dans le cadre de la théorie de l'état caractéristique. Pour des applications au génie parasismique il a examiné les comportements d'adaptation, d'accommodation et de rochet. Il a examiné le comportement du Texsol comme dissipateur d'énergie mécanique. Il a étudié les caractéristiques non linéaires des sols en cherchant à séparer élasticité non linéaire, viscosité ou plasticité. Il a étudié des matériaux agro-alimentaires (blé, riz rond et riz long en paddy) dont le comportement en silo est extrêmement différent alors que les propriétés de densité, de frottement interne, etc., sont voisines. En chargement monotone sur plusieurs trajets de charge il a montré que la notion de seuil caractéristique, comme seuil de désenchevêtrement de la matière se révélait tout à fait adaptée pour analyser le degré de coulabilité des matériaux ensilés et les phénomènes de formation de vouute, de cavité, de cheminée ou de noyau au sein d'un silo, c'est-à-dire en définitive la difficulté voire l'impossibilité d'extraire les produits stockés. Le cas des silos à trémies vibrantes nécessite certainement une étude du comportement rhéologique sous sollicitations cycliques vibratoires afin de pouvoir suivre les processus de densification ou de désenchevêtrement qui conditionnent la coulabilité du matériau ensilé.

M.P. Luong a étudié le comportement rhéologique d'une masse de charbon broyé destiné à l'élaboration de la pâte à coke ; l'évolution des propriétés rhéologiques est liée à celle de la déformation volumique au cours du chargement et l'angle caractéristique ϕ_c caractérise la capacité d'enchevêtrement du matériau. Son existence avant le pic de résistance permet d'envisager la densification progressive par chargement cyclique. La même procédure peut être utilisée pour des poudres d'oxydes métalliques dont on cherche à augmenter la compacité pour améliorer les propriétés physico-chimiques de certains composants des piles et des accumulateurs électriques.

P. Habib et M.P. Luong ont étudié l'influence de la teneur en eau, pour des sables purs ou contenant des fines, lorsque le sol est non saturé. Les effets de la tension superficielle de l'eau donnent aux sables une cohésion apparente qui permet ou non le trafic des engins.

3 - Fondations Précontraintes

Une technique originale de fondation pour les pylônes de ligne électrique utilisant les ancrages développés les années précédentes par le LMS a été mise en oeuvre par A. Martin de la Société TSI pour EDF. Elle consiste à mettre en place par battage des ancrages protégés contre la corrosion et à les mettre en précontrainte. Ce dispositif a été comparé par M.P. Luong à une fondation sur des groupes de pieux et à une fondation sur un bloc de béton, au moyen d'essais sur la centrifugeuse du CESTA (CEA-DAM). Avec une précontrainte modeste, équivalente à 160 kN, le comportement du pylône soumis à des sollicitations cycliques a été excellent. Cette technique a été utilisée ensuite en vraie grandeur et la fondation a été testée par des essais de lâcher : un câble tendu est rompu par une manille explosive et on enregistre les vibrations de la structure. L'analyse du spectre fréquentiel de ces vibrations fait apparaître nettement les modes de résonances naturelles en flexion, en torsion et en pilonnement et permet d'apprécier la linéarité du comportement de la structure sous différentes forces de lâcher.

PUBLICATIONS

REVUES SCIENTIFIQUES

H.D. BUI, H. MAIGRE

Facteur d'intensité dynamique des contraintes tiré des grandeurs mécaniques globales.
C. R. Ac. Sc., série II, t. 306, n° 17, pp. 1213-1216, mai 1988.

Q.S. NGUYEN, H. MAIGRE

Restriction thermodynamique et onde de choc plastique.
C. R. Ac. Sc., série II, t. 307, n° 2, pp. 111-115, juin 1988.

P. de BUHAN, A. TALIERCIO

Critère de résistance macroscopique pour les matériaux composites à fibres.
C. R. Ac. Sc., série II, t. 307, n°3, pp. 227-232, juin 1988.

X. CHATEAU, Q.S. NGUYEN

Flambage par bifurcation des systèmes élastiques avec contact unilatéral parfait.
C. R. Ac. Sc., série II, t. 307, n° à paraître.

C. STOLZ

Equations générales de la dynamique pour les structures anélastiques.
C. R. Ac. Sc., série II, t. 307, n° 20, p. 1997, décembre 1988.

H.D. BUI, K. DANG VAN

Some recently developed analytical aspects of fracture mechanics.
Nuclear Engineering and Design, 105, pp. 3-9, 1987.

H.D. BUI, K. DANG VAN, E. de LANGRE

A simplified analysis of creep crack growth using local approach.
Nuclear Engineering and Design, 105, pp. 147-153, 1987.

P. HABIB, D. AVERSENC

Gonflement d'un sol contenant des sulfates et traité à la chaux et au ciment.
Revue Française de Géotechnique, n° 42, 1er trimestre 1988.

P. HABIB

An introduction to the rheology of geomaterials.
in : Handbook of Rheology of Geomaterials, F. Darve éditeur, 1988.

M.D. NGUYEN, N. SCHMITT

Contraction du tube épais circulaire. Remarques sur l'influence d'une non linéarité élastique.
Revue Française de Géotechnique, n°42, 1er trimestre 1988.

R. ANDRE-JEHAN, M. ARNOULD, J. BILLOTTE, M. DEVEUGHELE, G. ROUSSET

Une protection naturelle contre l'infiltration des eaux météoriques : la barrière capillaire.
Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°37, 1988.

G. GARY

Informatisation d'une chaîne d'acquisition de données pour la gestion d'un banc d'essais de fluage.
Materials and Structures/Matériaux et Constructions, vol. 21, n° 124, juillet 1988.

F. GILBERT

Change of scale methods applied in mechanics of saturated soils.
Lecture Notes in Earth Sciences 14 : Rock and Soil Rheology, pp. 3-32, N. Cristescu and H.I. Ene eds., Springer-Verlag, Berlin, 1988.

M.P. LUONG

Characteristic state and infrared vibrothermography of sand.
Lecture Notes in Earth Sciences 14 : Rock and Soil Rheology, pp. 173-197, N. Cristescu and H.I. Ene eds., Springer-Verlag, Berlin, 1988.

J.B. LEBLOND, J. DEVAUX, J.C. DEVAUX

Simulation numérique de l'essai d'implant.
Soudage et Techniques Connexes, 42, 312, 1988.

Q.S. NGUYEN

Quasi-static evolution and bifurcation analysis in standard plasticity and fracture.
Chap. VI, pp. 241-266, "Topics in Non Smooth Mechanics", Moreau-Panagiotopoulos-Strang eds., Birkhauser, 1988.

Q.S. NGUYEN

Mechanical modeling of anelasticity.
Revue de Physique Appliquée, 23, pp. 325-330, 1988.

R. PARNES

A BPM solution for elliptic plates subjected to eccentric loads.
International Journal of Solids and Structures, vol. 24, n°8, pp. 761-776, 1988.

J. SALENÇON, G. SACCHI-LANDRIANI, P. de BUHAN, A. TALIERCIO

Criteri di rottura macroscopici per materiali stratificati.
Omaggio a Giulio Ceradini, Università di Roma "La Sapienza", pp. 629-640, 1988.

P. HABIB

Radoucissement sans formation de surfaces de glissement.
Revue Française de Géotechnique, n°44, pp. 5-11, 3ème trimestre, 1988.

K. DANG VAN, B. GRIVEAU, O. MESSAGE

On a new multiaxial fatigue limit criterion : theory and applications.
"Biaxial and Multiaxial Fatigue", EGF 3, édité par M.W. Brown et K.J. Miller, Mechanical Engineering Publications, Londres, 1988.

K. DANG VAN, G. CAILLETAUD, J.F. FLAVENOT, A. LE DOUARON, H.P. LIEURADE

Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading.
"Biaxial and Multiaxial Fatigue", EGF 3, édité par M.W. Brown et K.J. Miller, Mechanical Engineering Publications, Londres, 1988.

F. GILBERT

Change of scale in multiphase media : the case of saturated soils.
in : Handbook of Rheology of Geomaterials, F. Darve éditeur, 1988.

J. ZARKA

Chapitre 1 de "Plasticity and Modern Metal Forming Technology",
édité par le Professeur T.Z. Blazynski, Elsevier Applied Science Publishers, 1988.

M.P. LUONG

Signature géotechnique par test du lâcher.
La Revue des Laboratoires d'Essais, n°17, Très Basses Fréquences (TBF) dans l'Environnement -
Application aux Transports, décembre 1988.

J.B. LEBLOND, J. DEVAUX, J.C. DEVAUX

Mathematical modelling of transformation plasticity in steels - I : case of ideal-plastic phases.
A paraître dans International Journal of Plasticity.

J.B. LEBLOND

Mathematical modelling of transformation plasticity in steels - II : coupling with strain-hardening
phenomena.
A paraître dans International Journal of Plasticity.

Q.S. NGUYEN, N. TRIANTAFFYLIDIS

Plastic bifurcation and post bifurcation analysis.
A paraître dans Journal of Mechanics and Physics of Solids.

R. PARNES

Bending of simply supported elliptic plates : BPM solutions with second-order derivative boundary
conditions.
A paraître dans Journal of Applied Mechanics.

R. PARNES

Vibrations of moderately elliptic clamped plates : a perturbation scheme for eigenvalues.
A paraître dans Journal of Applied Mechanics.

COMMUNICATIONS A DES CONGRES PUBLIEES

M.P. LUONG, A. MARTIN, R. de PARNY

Fondations précontraintes pour supports aériens.
Journées d'Etudes SEE, Supports Aériens : Choix - Optimisation - Essais, ESE Gif-sur-Yvette,
16-17 mars 1988, actes pp. 59-66.

H.D. BUI, E. de LANGRE

Separation of energies in dynamic fracture.
International Conference on Computational Engineering Science (ICCES), Atlanta (USA), avril 1988,
vol. 1, p. 911, Springer-Verlag.

J. ZARKA

New concepts in design.
International Conference on Computational Engineering Science, (ICCES), Atlanta (USA), avril 1988,
Springer-Verlag.

P. HABIB

Similitude et essais sur modèles réduits : validité de la modélisation.
International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, "CENTRIFUGE 88", Paris,
25-27 avril 1988.

M.P. LUONG, R. BONAZ, A. PECKER, B. BOURDIN

Pieux et groupes de pieux soumis à des sollicitations forcées horizontales en centrifugeuse.
International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, "CENTRIFUGE 88", Paris,
25-27 avril 1988.

A. ZELIKSON

The use of large centrifuges for modelling geological instabilities caused by gravity anomalies.
International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, "CENTRIFUGE 88", Paris,
25-27 avril 1988.

M.P. LUONG

Collapsing peak-up of a large highway steel pipe-arch.
Second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Saint-Louis,
Missouri (USA), 1-5 juin 1988.

J. GRIL

Viscoelastic behaviour of wood cell wall : hygrostrain and local anisotropy.
Colloque Scientifique Européen sur le Comportement Mécanique du Bois organisé par le Groupement
Scientifique Rhéologie du Bois, Bordeaux, 8-9 juin 1988.

M. NORIMOTO, J. GRIL, T. SASAKI, R.M. ROWELL

Improvement of acoustical properties of wood through chemical modifications.
Colloque Scientifique Européen sur le Comportement Mécanique du Bois organisé par le Groupement
Scientifique Rhéologie du Bois, Bordeaux, 8-9 juin 1988.

M.P. LUONG

Infrared thermovision of damage and failure processes in wood.
Colloque Scientifique Européen sur le Comportement Mécanique du Bois organisé par le Groupement
Scientifique Rhéologie du Bois, Bordeaux, 8-9 juin 1988, Actes pp. 339-352.

I. CHARARA

Closure of a gallery in a frozen elastic or elastoplastic soil.
"Key Questions in Rock Mechanics", 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of
Minnesota, Minneapolis (USA), 13-15 juin 1988, Balkema, Rotterdam.

F. GILBERT

Permeability properties of particular self-similar porous media under harmonic conditions and
comparison with Biot's theory.
"Key Questions in Rock Mechanics", 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of
Minnesota, Minneapolis (USA), 13-15 juin 1988, pp. 487-494, Balkema, Rotterdam.

M.P. LUONG

Direct tensile and direct shear strengths of Fontainebleau sandstone.
"Key Questions in Rock Mechanics", 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of
Minnesota, Minneapolis (USA), 13-15 juin 1988, pp. 237-246, Balkema, Rotterdam.

P. HABIB, Y. MEZIERE

Etude complémentaire des désordres des fondations du barrage de Zeuzier.
16e Congrès International des Grands Barrages, San Francisco (USA), juin 1988.

M.P. LUONG

Infrared thermovision of damage process in concrete and rock.
International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock, New Developments and Trends and a Special Seminar on Large Concrete Dam Structures, Vienne (Autriche), 4-6 juillet 1988.

M.P. LUONG

Tensile and shear strengths of concrete and rock materials.
International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock, New Developments and Trends and a Special Seminar on Large Concrete Dam Structures, Vienne (Autriche), 4-6 juillet 1988.

P. HABIB

A propos de la vitesse terminale du glissement du Vaïont.
Ve Symposium International sur les Glissements de Terrains, tome III, Lausanne (Suisse), juillet 1988.

M.P. LUONG

Infrared thermographic scanning of a concrete structure subjected to a seismic type loading.
9WCEE Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto (Japon), 2-9 août 1988.

M.P. LUONG

Direct tensile and direct shear tests on concrete.
13th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, 25-26 août 1988.

M.P. LUONG

Infrared scanning of damage processes in plain concrete.
Post-Conference Our World in Concrete and Structures, Kuala Lumpur (Malaisie), 29 août 1988.

M.P. LUONG

Tensile and shear characteristics of rock materials.
Third International Conference on Underground Space and Earthsheltered Building, Shanghai (Chine), 1-6 septembre 1988.

C. STOLZ

On some aspect on stability and bifurcation in failure and damage mechanics.
Workshop "Localisation of Deformation in Damage Mechanics", E.N.S., Cachan, 6-9 septembre 1988.

J. FRELAT, P. BALLARD

Mechanical effects of a laser shock pulse.
DYMAT, Ajaccio, septembre 1988.

M.P. LUONG, A. GERARD

Thermographie infrarouge d'une liaison composite sous charge.
11e Journées Nationales sur les Matériaux Composites JNC6 organisées par l'AMAC, Paris, 11-13 octobre 1988.

P. BALLARD, J. FRELAT, J. FOURNIER, R. FABBRO, L. CASTEX

Study of residual stresses induced by a pulsed laser in metals.
2nd International Conference on Residual Stresses, Nancy, novembre 1988.

A. CARMET, S. DEBIEZ, J. DEVAUX, D. PONT, J.B. LEBLOND
 Experimental and numerical study of residual stresses and strains in an electron-beam-welded joint.
 2nd International Conference on Residual Stresses, Nancy, novembre 1988.

J.B. LEBLOND, J. DEVAUX
 Interactions between transformation plasticity and strain hardening phenomena in steels.
 2nd International Conference on Residual Stresses, Nancy, novembre 1988.

G. ROUSSET
 Les sollicitations à long terme des revêtements des tunnels.
 Journées de Formation Continue de l'E.N.P.C., Paris, 15-17 novembre 1988.

COMMUNICATIONS A DES CONGRES NON PUBLIEES

F. GILBERT
 Perméabilité en régime harmonique à travers un milieu fractal.
 Laboratoire de Géophysique Interne, Ecole et Observatoire de Physique du Globe, Strasbourg,
 18 février 1988.

P. BEREST
 A la recherche des bifurcations.
 Journée "Théorie de la Bifurcation et Applications à la Mécanique des Matériaux Rocheux"
 organisée par CFMR, AFTP, SPE, Paris, 31 mars 1988.

A. ANTHOINE
 Mixed modelling of reinforced soils within the framework of the yield design theory.
 Colloque Euromech 232, "Mechanical Aspects of Soil Reinforcement", Chamrousse, 18-22 avril
 1988, à paraître dans "Computers and Geotechnics".

P. de BUHAN, L. SIAD
 Influence of a soil-strip interface failure condition on the strength of reinforced earth.
 Colloque Euromech 232, "Mechanical Aspects of Soil Reinforcement", Chamrousse, 18-22 avril
 1988, à paraître dans "Computers and Geotechnics".

F. GILBERT
 Simulation numérique de la perméabilité en régime harmonique de certains empilements
 auto-similaires et relations avec la théorie de Biot.
 Laboratoire Energétique et Phénomènes de Transfert, LEPT-ENSAM de Bordeaux, Talence,
 29 avril 1988.

Q.S. NGUYEN
 On the quasi-static evolution of standard systems.
 CMEST, Departamento de Engenharia Civil, Lisbonne (Portugal), avril 1988.

M. BONNET
 Problème inverse en microgravimétrie.
 Séminaire EDF/DER, Département MMN et Acoustique, 18 mai 1988.

H.D. BUI, H. MAIGRE
 Détermination du facteur d'intensité des contraintes dynamiques à l'aide des grandeurs observables.
 Séminaire de l'E.N.S., Cachan, juin 1988.

J. ZARKA, M. PECKER

Mise au point d'une méthode d'analyse simplifiée dans le génie civil.
Colloque Génie Civil, M.R.T., Paris, juin 1988.

P. de BUHAN, A. TALIERCIO

A macroscopic strength criterion for fiber composite materials.
XVIIth I.C.T.A.M., Grenoble, 21-27 août 1988.

Q.S. NGUYEN, C. STOLZ

Second variation of energy : bifurcation and stability in brittle fracture.
XVIIth I.C.T.A.M., Grenoble, 21-27 août 1988.

Q.S. NGUYEN

Thermodynamic aspects in fracture mechanics.
Shell Laboratorium, Den Hagg, août 1988.

A. ANTHOINE

Optimization of reinforced soil structures design.
Second Young Geotechnical Engineers' Conference, Oxford (G.B.) septembre 1988.

M.P. LUONG

Fondations précontraintes pour structures élancées.
TEC 88 "Technologies et Compétitivité", Carrefour Européen des Technologies et de la Compétitivité,
Grenoble, 12-15 octobre 1988.

J. ZARKA, F. ARNAUDEAU

Problems of dynamical metal forming.
FEMCAD, Paris, octobre 1988.

J. ZARKA, J. FRELAT, G. INGLEBERT, P. NAVIDI

New Concepts for the analysis of elastoviscoplastic structures.
Conférence générale, FEMCAD, Paris, octobre 1988.

P. BEREST

Problèmes soulevés par l'abandon des cavités de dissolution profondes dans le sel gemme.
Journées d'Etude sur la Géotechnique Appliquée aux Mines et Carrières, Commission des Recherches
Scientifiques sur la Sécurité dans les Mines et Carrières, Paris, 17-18 novembre 1988.

M. BONNET

Méthodes des équations intégrales en élastodynamique tridimensionnelle.
Séminaire FRAMATOME

THESES

L. CHARO

Risques de formation de dômes après stockage de déchets dans une couche de sel.
Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.P.C., Paris, 25 mars 1986.

K. ABOURA

Formulation d'un problème de régime permanent en grande transformation.
Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.P.C., Paris, 11 mars 1988.

S. KRUCH

Comportement global des matériaux composites viscoélastiques.
Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 31 mars 1988.

N. BEAUDE

Etude théorique et expérimentale du comportement élastoplastique et de la localisation de la déformation dans les monocristaux.
Thèse de Doctorat, Paris, 5 mai 1988.

J. GRIL

Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure.
Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 13 juin 1988.

G. ROUSSET

Comportement mécanique des argiles profondes - Application au stockage de déchets radioactifs.
Thèse de Doctorat, E.N.P.C., Paris, 4 juillet 1988.

LIVRES

P. BEREST, Ph. WEBER (coordinateurs)

La Thermomécanique des Roches.
Editions BRGM, collection Manuels et Méthodes n°16, 1988.

P. HABIB (ed.)

Ground Anchors : design, calculation, construction and monitoring.
Bureau SECURITAS, Balkema (Rotterdam), 1988.

J. SALENÇON

Mécanique des Milieux Continus
Tome I : Concepts généraux
Tome II : Elasticité - Milieux curvilignes.
Ellipses, Paris, 1988, 586 pages.

BREVETS

M.P. LUONG, G. MARGIS, A. MARTIN

Procédé de fabrication d'un flotteur déformable et flotteur obtenu par ledit procédé destiné à l'allégement d'un corps pesant immergé.
Brevet TSI en copropriété EDF, BF n° 88O5568, déposé le 22 avril 1988.

LABORATOIRES DE RECHERCHE

DIRECTION DES LABORATOIRES

BIOLOGIE

Biochimie (BIOC)

CHIMIE

Chimie Fine (DCFI)

Phosphore & Métaux Transition (DCPH)

Calculs Scientifiques (DCCS)

Synthèse Organique (DCSO)

Mécanismes Réactionnels (DCMR)

MECANIQUE

Mécanique des Solides (LMS)

Météorologie Dynamique (LMD)

PHYSIQUE

Solides Irradiés (SESI)

Optique Appliquée (LOA)

Optique Quantique (OPTQ)

Interfaces et Couches Minces (PICM)

Matière Condensée (PMC)

Biophysique (BIOP)

Milieux Ionisés (PMI)

Physique Théorique (CPHT)

Physique Nucléaire Hautes Energies (PNHE)

Utilisation des Lasers Intenses (LULI)

MATHEMATIQUES

Mathématiques (MAT)

Mathématiques Appliquées (MAP)

SCIENCES HUMAINES

Econométrie (CECO)

Epistémologie (CREA)

Recherche en Gestion (CRG)

INFORMATIQUE

Informatique (LIX)

Créé en 1961 à l'initiative du Professeur J. MANDEL, le Laboratoire de Mécanique des Solides a consacré l'essentiel de son activité à l'étude de la déformation et de la rupture des corps solides et des structures. Des efforts théoriques et expérimentaux importants y ont été faits pour l'approfondissement des connaissances en Mécanique des Solides et pour utiliser et appliquer la théorie de la Plasticité à des structures aussi diverses que des cavités souterraines à grande profondeur, des coques susceptibles de flamber ou encore des pièces métalliques sollicitées cycliquement. D'une façon générale, les travaux du L.M.S., Laboratoire situé dans une Grande Ecole d'Ingénieurs, ont été très naturellement orientés vers les applications de la Mécanique dans ses aspects fondamentaux et vers les réalités industrielles. Les indications suivantes précisent l'histoire du L.M.S. :

Création du Laboratoire	Août 1961
Groupe commun X - ENSM Paris	Octobre 1973
Equipe de recherche associée au CNRS	Janvier 1974
Groupe commun X - ENSM Paris - ENPC	Février 1979
Laboratoire associé au CNRS (UA 317)	Janvier 1980

Les effectifs du LMS ont évolué de la façon suivante :

. à la création du laboratoire	4 personnes dont 2 chercheurs
. un an après	16 personnes dont 10 chercheurs
. en Janvier 1974	42 personnes dont 25 chercheurs
. en Octobre 1981	60 personnes dont 39 chercheurs
. en Octobre 1988	86 personnes dont 66 chercheurs

90 chercheurs ont quitté le laboratoire après une présence d'au moins un an, (dont approximativement 20 avaient été détachés au LMS par un grand organisme industriel pour une formation par la Recherche), soit un flux moyen de 3 sorties par an.

. Nombre de thèses	83
. Brevets	19
. Publications	environ 1200

LMS - 91128 Palaiseau Cedex
Tél. (33)(1) 60 19 41 29 - Télécopieur 601.596 F - Télécopieur 69.41.33.92