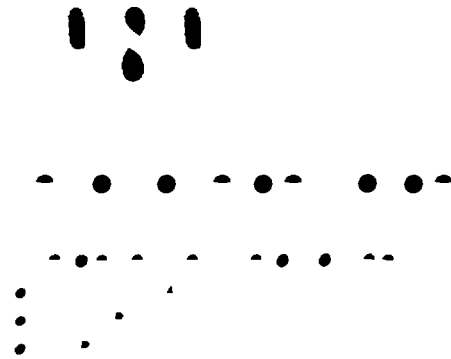


Ecole polytechnique  
Centre de recherche

# RAPPORT D'ACTIVITÉ



**E**n 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 ».

Aujourd'hui 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 notre longue tradition nous avons hérité deux principes qui guident notre action :

- viser l'excellence, sans cesse,
- cultiver la pluridisciplinarité, nécessaire aux formes multiples du savoir et du savoir-faire.

Dans un environnement aujourd'hui bien différent, notre mission demeure. Le monde a changé de si considérable façon que notre tâche est plus vaste et plus complexe. Et notre ambition doit s'étendre au-delà de l'hexagone.

**Maurice BERNARD**  
Directeur de l'Enseignement  
et de la Recherche

# MECANIQUE DES SOLIDES

Directeur: **Pierre HABIB**  
Professeur à l'ENGRF

*Groupe commun avec :*  
**ENSMP – ENPC – CNRS URA 317**  
**Secteur SPI**

Tél. (33) (1) 60 19 41 29

## SOMMAIRE

PERSONNEL DE RECHERCHE	2
EXPOSE GENERAL	5
EXPOSE ANALYTIQUE	9
I – ETUDES A CARACTERE THEORIQUE	9
II – COMPORTEMENT DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES	13
III – MECANIQUE DES ROCHES	18
IV – MECANIQUE DES SOLS	24
PUBLICATIONS	26
REVUES SCIENTIFIQUES	26
COMMUNICATIONS A DES CONGRES	27
THESES	31
COURS	31
NOTES INTERNES	31
FILMS	31
BREVETS	31

# 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 - CNRS URA 317

DIRECTEUR : Pierre HABIB, Professeur à l'ENGREF

Téléphone : (33) (1) 60 19 41 29 - FAX 69 41 33 92 - Télex 601596F

## 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 Directeur du LMS, Membre de l'Académie des Sciences.
Pierre	BEREST	Ingénieur en Chef des Mines (X70), Docteur ENSM Paris, Maître de Conférences à l'X, 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, Directeur de Recherche CNRS, Professeur extérieur à l'UTC.
Quoc Son	NGUYEN	Ingénieur Civil ENPC (X64), Docteur ès-Sciences, Maître de Conférences à l'X et à l'ENPC, Directeur de Recherche CNRS.
André	ZAOUI	Ingénieur Civil ENSM Paris, Docteur ès-Sciences, Directeur de Recherche CNRS.
Joseph	ZARKA	Docteur ès-Sciences (X62), Directeur de Recherche CNRS.
Nabil	ABOU EZZI	Ingénieur Génie Civil de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth (Liban), Docteur ENPC.
Samir	AKEL	Ingénieur Génie Civil de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth (Liban), Docteur ENPC.
Armelle	ANTHOINE	Ingénieur Civil ENPC, Docteur-Ingénieur, Chargée de recherche CNRS.
Behrooz	BAZARGAN-SABET	Docteur-Ingénieur en Energétique de l'ENSAM de Paris.
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, Maître de Conférences à l'X.
Jean-Pierre	CHARPENTIER	Ingénieur CNAM.
Micheline	CHAYE-d'ALBISSIN	Directeur de Recherche CNRS, (détachée de TOAE).
Véronique	DOQUET	Ingénieur Civil ENSM Saint-Etienne, Docteur ENSM.

<b>Joël</b>	<b>FRELAT</b>	Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS, Attaché de Travaux Expérimentaux à l'X.
<b>Gérard</b>	<b>GARY</b>	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences (X66), Ingénieur CNRS, Chef des Travaux Expérimentaux de Mécanique à l'X.
<b>Mehdi</b>	<b>GHOREYCHI</b>	Ingénieur des Mines de la Faculté d'Ingénierie de Téhéran (Iran), Docteur-Ingénieur de l'Ecole des Mines de Nancy.
<b>François</b>	<b>GILBERT</b>	Ingénieur ENSM Paris, Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS.
<b>Joseph</b>	<b>GRIL</b>	Ingénieur GREF (X78), Docteur Université Paris VI, détaché au LMS.
<b>Jean-Baptiste</b>	<b>LEBLOND</b>	Ingénieur des Mines, Ancien Elève de l'ENS (Ulm), Docteur ès-Sciences, Maître de Conférences à l'X.
<b>Minh Phong</b>	<b>LUONG</b>	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences, Directeur de Recherche CNRS.
<b>Habibou</b>	<b>MAITOURNAM</b>	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ENPC.
<b>Pirouz</b>	<b>NAVIDI-KASMAI</b>	Ingénieur ENTPE, Docteur Ingénieur.
<b>Calvin</b>	<b>NGUEDJIO FOUPEPE</b>	Ingénieur Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, Docteur UTC.
<b>Minh Duc</b>	<b>NGUYEN</b>	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences.
<b>Gilles</b>	<b>ROUSSET</b>	Ingénieur des Ponts et Chaussées (X78), Docteur ENPC, Maître de Conférences à l'ENPC.
<b>Nicolas</b>	<b>SCHMITT</b>	Agrégé Génie Civil, Docteur Université Paris VI.
<b>Larbi</b>	<b>SIAD</b>	Ingénieur ETP, Docteur ENPC.
<b>Claude</b>	<b>STOLZ</b>	Ingénieur Civil ENPC, Docteur ès-Sciences, Chargé de Recherche CNRS.
<b>Michel</b>	<b>TERRIEN</b>	Ingénieur ENSM Saint-Etienne.
<b>Amos</b>	<b>ZELIKSON</b>	M. Sc. Université de Jérusalem, Senior Lecturer Technion Haifa, Docteur ès- Sciences.

## ■ STAGIAIRES

<b>Bijan</b>	<b>BORHANI ALAMDARI</b>	Ingénieur UTC, Boursier DGRST.
<b>Djaffar</b>	<b>BOUSSAA</b>	Ingénieur Ecole Centrale de Lyon, Boursier ENSMP.
<b>Sahbi</b>	<b>BRAHAM</b>	Ingénieur TP, DEA Mécanique et Matériaux, Stagiaire Ministère de la Recherche.
<b>Michel</b>	<b>BULIK</b>	DEA Analyse Numérique, Maître ès-Sciences de l'Université de Varsovie.
<b>Denise</b>	<b>BUBLITZ</b>	DEA Mécanique, Boursière ENPC.
<b>Issam</b>	<b>CHARARA</b>	Ingénieur Civil ENPC.
<b>Xavier</b>	<b>CHATEAU</b>	Agrégé de Mécanique, Stagiaire USINOR.
<b>François</b>	<b>CORBETTA</b>	Ingénieur Science et Technologie Paris VI, DEA Mécanique Appliquée à la Construction, Boursier ENSM Paris.

<b>André</b>	<b>DEPERROIS</b>	X85, CIFRE PSA.
<b>Irène</b>	<b>DJERAN</b>	Ingénieur Civil (Salonique), Boursière de la CCE.
<b>Albert</b>	<b>GIRAUD</b>	Etudiant Paris VI, Stagiaire Armines.
<b>Jean-Michel</b>	<b>HABLOT</b>	Ingénieur INSA, CIFRE PSA.
<b>Eric</b>	<b>HETUIN,</b>	Ingénieur Science et Technologie Paris VI.
<b>Patrick</b>	<b>JUMIN</b>	Contrat CIFRE/TSI.
<b>Youssam</b>	<b>KAZAN</b>	Boursier ENSM Paris.
<b>Joël</b>	<b>KICHENIN</b>	X85, Thésard Ecole Polytechnique.
<b>Sangho</b>	<b>LEE</b>	Maîtrise d'Architecture (Séoul), Boursier du Gouv' français.
<b>Samir</b>	<b>MAGHOUS</b>	Ingénieur ENTPE, DEA Mécanique, Boursier ENPC.
<b>Hubert</b>	<b>MAIGRE</b>	X83, Boursier Ecole Polytechnique.
<b>Richard</b>	<b>NAJCHAUS</b>	DEA Génie Civil, Boursier DGRST.
<b>Jean-Marc</b>	<b>PICARD</b>	Stagiaire ENPC.
<b>Ahmad</b>	<b>POUYA</b>	Ingénieur Civil ENPC, Boursier ENPC.
<b>Rachel-Marie</b>	<b>PRADEILLES</b>	Ingénieur de l'Armement, (X85), Stagiaire DGA.
<b>Yves</b>	<b>ROUGIER</b>	Stagiaire DGA.
<b>Jean-François</b>	<b>SEMBLAT</b>	Détaché Ministère de l'Equipement.
<b>Denise</b>	<b>TANCELIN</b>	Boursière AFME.
<b>Laurence</b>	<b>VERZURA</b>	Boursière ENPC.

#### ■ VISITEURS

<b>Rafaële</b>	<b>LENAIN</b>	Ingénieur ENSG Nancy.
<b>Jacky</b>	<b>ROMAN</b>	Ingénieur ENSMIM Nancy.
<b>G.</b>	<b>SACCHI-LANDRIANI</b>	Politecnico di Milano, Professeur.
<b>Nicolas</b>	<b>TRANTAFYLLIDIS</b>	Université du Michigan, Associate Professor.

#### ■ INGENIEURS, TECHNICIENS, ADMINISTRATIFS

<b>Raymond</b>	<b>BARRE</b>	<b>Yves</b>	<b>LE BRAS</b>
<b>Laurence</b>	<b>BERTHIER</b>	<b>Patrice</b>	<b>LEMATTRE</b>
<b>Gilbert</b>	<b>BOURON</b>	<b>Gilbert</b>	<b>PERGEAUX</b>
<b>René</b>	<b>CAILLEUX</b>	<b>Liliane</b>	<b>QUERU</b>
<b>Denise</b>	<b>CHASSAING</b>	<b>Mina</b>	<b>RATNI</b>
<b>Philippe</b>	<b>CHASTANIER</b>	<b>Brigitte</b>	<b>TERRIEN</b>
<b>Marc</b>	<b>DAO</b>	<b>Daniel</b>	<b>THEVAL</b>
<b>Jean-Christophe</b>	<b>EYTARD</b>	<b>Pierre</b>	<b>VALLI</b>
<b>Vincent</b>	<b>de GREEF</b>	<b>Marie-Annick</b>	<b>WALLERAND</b>
<b>René</b>	<b>HERBEZ</b>	<b>Jean-Claude</b>	<b>ZAKARIAN</b>
<b>Barbara</b>	<b>KLOSOWICZ-BULIK</b>		

# EXPOSE GENERAL

En 1989 l'activité du Laboratoire de Mécanique des Solides a été essentiellement orientée vers l'étude des déformations et de la rupture des solides et des structures.

## Déformations

Au-delà des manifestations élastiques ce sont les écoulements plastiques qui se produisent dans des opérations comme le filage, l'emboutissage, l'usinage, le poinçonnement, les glissements de terrains, la convergence des tunnels profonds, ainsi que les phénomènes de viscosité plastique, de localisation de la déformation, etc.

## Rupture

C'est la séparation en morceaux comme il peut s'en produire pendant la déchirure, le développement des fissures, la destruction par percussion des matériaux fragiles, ou au cours du tir.

## Solides

Aussi bien l'acier, que les roches, les sols, le bois, les matériaux composites sont des corps solides, c'est-à-dire présentant un seuil de résistance ; mais leur lois de comportement peuvent être très différentes et doivent être étudiées avec toute leur spécificité et il faut les déterminer par voie expérimentale.

## Structures

Ce sont toutes les constructions du génie civil, minier, pétrolier ou mécanique, et elles peuvent être aussi diverses que des ponts, des cavités souterraines, des forages, des oléoducs, des plates-formes en mer ou des pièces mécaniques soumises à des traitements de surfaces.

Les travaux effectués au laboratoire ont fait l'objet de réalisations expérimentales et d'études à caractère théorique ou numérique en liaison avec les problèmes industriels que les ingénieurs peuvent

avoir à résoudre dans la pratique du génie civil, de la construction mécanique ou pour les problèmes de stockage souterrain.

Au sein du CNRS la Mécanique des Solides est rattachée au Secteur des Sciences Pour l'Ingénieur. Avec 9,6% du budget de l'Etablissement ce Secteur est le plus petit du CNRS. Mais c'est aussi celui dont la croissance, sur plusieurs années consécutives, est la plus forte. Il faut rappeler qu'aux USA l'équivalent des Sciences Pour l'Ingénieur représente 20% du budget de la National Science Foundation et ceci montre bien que des développements nombreux sont à prévoir en France dans ce domaine ; on peut donc dire de la Mécanique des Solides et des Industries qui lui sont associées qu'il s'agit de sciences et de techniques en mouvement. Ainsi il existe au Laboratoire de Mécanique des Solides, à côté d'une recherche fondamentale de haut niveau, une forte coopération avec des entreprises nationales ou privées dans de nombreux domaines et le LMS est resté en contact, contractuellement, avec le tissu industriel français qui a un impact, ou une utilisation, ou un intérêt pour la Mécanique. On peut citer EDF, GDF, Framatome, CEA, ANDRA dans le domaine de l'énergie, et aussi SNCF, REGIENOV, P.S.A., SNECMA, MATRA, CNES, SAGEM, SACILOR, IRSID, IFP, LCPC, BRGM, MDPA, etc.

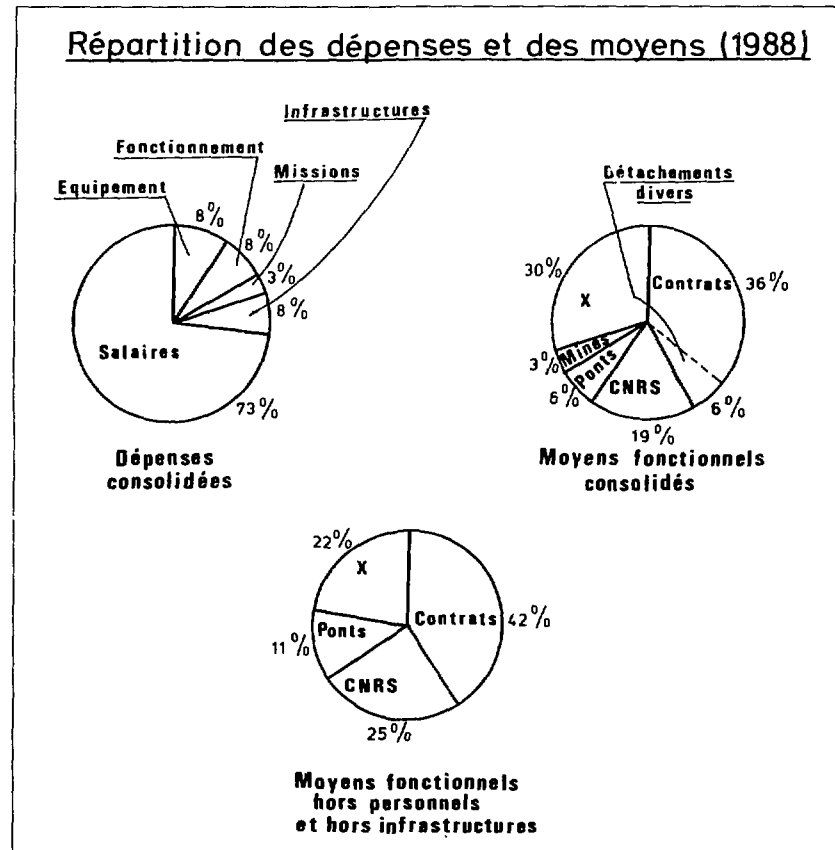
Le LMS a évidemment conservé des liens étroits avec les grands organismes d'Etat gérant la Recherche : Ministère de la Recherche et de la Technologie, Ministère de l'Équipement (DAEI), Ministère de l'Industrie, Ministère de l'Éducation Nationale. Le LMS est engagé dans les pôles FIRTECH n°20 «Mécanique Appliquée et Génie Civil - Sécurité des Constructions» pour la formation par la recherche de jeunes ingénieurs diplômés, ainsi que dans le pôle n°1 «Mécanique et Matériaux»

En 1989 les effectifs du LMS sont restés à peu près constants : 64 chercheurs ont travaillé au laboratoire en comptant les thésards qui ont quitté le LMS en septembre et ceux qui y sont entrés en octobre. Au 31 décembre l'effectif était de 53 chercheurs,

soit un total de 74 personnes dont 13 techniciens, 1 dessinateur, 5 secrétaires, 1 informaticienne et 1 électronicien. Enfin il faut signaler l'arrivée du Professeur A. ZAOUI qui se propose de développer au LMS une activité importante dans le domaine des matériaux.

Le réseau d'ordinateurs Apollo en commun avec le Centre de Mathématiques Appliquées, commencé en 1987, s'est agrandi en 1989 avec maintenant 17 appareils, un calculateur vectoriel parallèle Alliant à 4 processeurs. Le LMS dispose en propre de 9 machines. Mme B. Klosowicz est chargée d'assurer la gestion et le support technique de ces matériels. La puissance de calcul permet presque toujours de faire face aux problèmes posés par la recherche et par les applications et les logiciels développés au LMS atteignent maintenant un niveau compétitif.

Les diagrammes ci-contre indiquent les ressources principales du LMS en 1988.



## PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ANNEE 1989

Les déformations et la rupture de différents matériaux et de différentes structures donnent un vaste

éventail de travaux qu'il est difficile de résumer en quelques phrases. On peut toutefois tenter de les grouper autour de cinq grands thèmes fédérateurs où des progrès sensibles ont été obtenus cette année.



## **Bifurcation et Stabilité**

Ce thème regroupe des études générales de stabilité et de bifurcation des structures élastiques (systèmes mécaniques réversibles), des structures élastoplastiques et des ruptures par endommagement (systèmes mécaniques irréversibles). Les principaux problèmes examinés sont la caractérisation des états critiques et la détermination du comportement post-critique. Ces études ont mené à l'élaboration de nombreux programmes de calcul par exemple pour le flambage des coques élastoplastiques et pour la propagation des fissures. En particulier les problèmes de stabilité rencontrés dans les processus d'emboutissage, (structures anélastiques sous contact unilatéral avec frottement) et dans la modélisation de la rupture des composites ont été étudiés en 1989.

## **Endommagement et Fatigue**

Les recherches se sont poursuivies suivant trois axes :

- comprendre et évaluer l'amélioration de la tenue en fatigue créée par différents traitements de surface. Ces traitements permettent d'engendrer en sous couche des contraintes résiduelles «favorables». Comme celles-ci sont de nature multiaxiale, le matériau est assujéti à la fatigue multiaxiale, même lorsque les chargements extérieurs imposés sont simples. Pour interpréter et apprécier l'amélioration de la tenue en fatigue, on utilise les critères de fatigue sous sollicitations multiaxiales déjà développés au laboratoire. Les contraintes résiduelles ont été soit mesurées directement (mesures effectuées à l'ENSAM), soit calculées. Dans ce dernier cas, les méthodes s'appuient pour le grenailage et le galetage sur l'analyse simplifiée développée par J. Zarka et al, et pour le galetage et le dudgeonnage sur des calculs directs à partir d'un algorithme d'élastoplasticité stationnaire original développé au laboratoire. Des études sont également en cours pour modéliser le soudage et la trempe laser;
- évaluer des risques de rupture des tuyauteries de centrale thermique ou nucléaire en cas de séisme.

Il s'agit ici d'un problème de fatigue plastique à très faible nombre de cycles pour lequel il faut déterminer la réponse de la structure;

- enfin étudier la propagation des fissures de fatigue sous sollicitations complexes tridimensionnelles.

## **Mécanique des Sols**

Un logiciel de renforcement des sols par inclusions linéaires, basé sur les principes du calcul à la rupture développé depuis plusieurs années au LMS, a été achevé sous une forme opérationnelle. Le logiciel «STARS» (STabilité et Renforcement des Sols) a été présenté au cours de congrès internationaux et sa commercialisation a été commencée. Par son caractère conversationnel et sa rapidité de calcul c'est à la fois une aide à la conception et un instrument de recherche.

Le dispositif de fondation précontrainte étudié antérieurement au LMS a été mis en oeuvre par EDF pour des pylônes d'une ligne électrique. Des essais non destructifs sur des pylônes en vraie grandeur ont été effectués pour comparer différents types de fondations traditionnelles et ce nouveau mode de fondation. La technique dite «du lâcher» a donné des résultats très positifs.

## **Mécanique des Roches**

On a poursuivi l'étude théorique et expérimentale du comportement mécanique de divers matériaux (sel, potasse, argile, schiste, grès, etc.) dans la perspective de la sécurité d'ouvrages souterrains tels que : mine, tunnel, stockage d'hydrocarbure, enfouissement de déchets radioactifs, etc. L'année 1989 a vu notamment l'accent porté sur les phénomènes thermomécaniques affectant le voisinage de conteneurs radioactifs enfouis en formation géologique, à travers la préparation d'essais en place avec chauffage au moyen de résistances électriques dans une mine de potasse d'Alsace et à Mol en Belgique dans de l'argile. Divers logiciels d'enregistrement de données à distance et de dimensionnement d'ouvrages souterrains ont été mis au point à l'occasion de la recherche et ouvrent

la perspective d'une commercialisation.

### **Systèmes Experts par Apprentissage**

Les systèmes experts par apprentissage sont dédiés aux problèmes où il n'existe pas d'expert capable d'exprimer les règles nécessaires à leur traitement. Des algorithmes mathématiques très performants ont été mis spécialement au point pour déduire automatiquement et en clair les règles pour de tels problèmes lorsque l'on dispose d'une base d'expériences décrites pour des paramètres multivalués. Ces algorithmes ont été validés sur des problèmes classiques de la littérature en apprentissage et ont donné à chaque fois des résultats bien meilleurs que ceux proposés par les autres auteurs. Une application aux problèmes de calcul numérique des structures élastoplastiques a été effectuée avec des résultats extrêmement satisfaisants : le problème à résoudre concernait les erreurs commises dans un calcul lorsqu'une discrétisation temporelle et spatiale en éléments finis est sélectionnée. Il est possible actuellement d'indiquer ces erreurs a priori sans avoir à effectuer de calculs élastoplastiques très coûteux ; en fonction de ces résultats, l'ingénieur peut alors décider s'il doit ou non lancer ses calculs.

En 1989 une activité importante a été consacrée au transfert des connaissances ou à la valorisation de la recherche. Pour les fondations précontraintes pour les pylônes électriques des lignes d'EDF, le programme de développement se poursuit convenablement. Plusieurs logiciels ont été préparés d'une façon complète ou presque complète : STAR5 tout d'abord, pour le renforcement des talus, dont on a déjà parlé plus haut et dont la commercialisation est prévue dans le cadre des « Presses de l'ENPC » ; SELTICA pour la gestion, le contrôle à distance d'une ou de plusieurs expériences, l'exploitation et la transmission (téléphonique) des mesures, dont la commercialisation a été confiée à TRANSVALOR ; SEA (Systèmes Expert par Apprentissage) confiée aussi à TRANSVALOR ; enfin, CAVITUS pour l'équilibre des cavités souterraines

en viscoplasticité dont le développement est pratiquement achevé.

En 1989 des chercheurs du LMS ont été associés à de nombreux enseignements, à l'Ecole Polytechnique dans le Département de Mécanique, pour les cours de Mécanique et pour les Travaux Expérimentaux, à l'ENPC (Mécanique, Thermodynamique des Milieux Continus, Calcul des Structures Anélastiques), à l'ENSMP (Introduction à la Mécanique des Roches), à l'ENGREF (Mécanique des Sols et des Roches), à l'ENSTA (Propriétés Mécaniques des Matériaux), à l'E.S.E. (Systèmes Energétiques), à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (DEA de Mécanique Appliquée à la Construction, Phénomènes Thermomécaniques, Stockage et Enfouissements souterrains, Mécanique des Sols), à l'université Paris XIII (DEA Mécanique et Matériaux), à l'Université de Lille (DEA de Génie Civil), à l'Université de Technologie de Compiègne (DEA Mécanique Appliquée et Matériaux), enfin au Politecnico di Milano et à l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis. Enfin, les Séminaires du jeudi au LMS ont connu une assistance croissante et ont accueilli de nombreux conférenciers extérieurs.

Dans le domaine des relations extérieures et de la diffusion il faut signaler les manifestations suivantes : - une réunion du projet communautaire COSA le 25 avril 1989 sur le sujet du remblayage et du scellement des galeries dans le cas du sel, notamment au point de vue numérique, avec la participation de délégations de Belgique, d'Espagne, de Grande Bretagne, de Hollande et de la République Fédérale d'Allemagne - l'organisation d'un cours sur la Méthode Simplifiée d'Analyse des Structures du 12 au 16 juin 1989 par J. Zarka assisté par J. Frelat et P. Navidi Kasmai - enfin l'organisation d'une journée d'étude sur « le Calcul à la Rupture en Mécanique des Sols » par P. de Buhan, dans le cadre de la formation continue de l'ENPC, le 6 décembre 1989.

En 1989 un chercheur du LMS G. Gilbert a fait un stage de longue durée à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg. De nombreux visiteurs étrangers sont venus au LMS en 1989 et il faut signaler

plus particulièrement l'accueil en juillet des Professeurs K. Herrmann de l'Université de Paderborn (RFA) et de G. Hermann de l'Université de Stanford (USA). En septembre, le LMS a reçu le Professeur M. Tanaka, de l'Université de Nagano, Président de la Société Japonaise de Modélisation en Mécanique. A cette occasion, H.D. Bui a été invité par M. Tanaka à donner deux conférences plénières au 6ème Congrès National Japonais des Méthodes des Equations Intégrales à Tokyo, au mois de décembre 1989. Enfin, le Professeur G. Sacchi-Landriani du Politecnico di Milano a fait un stage de longue durée au LMS.

Enfin, il faut signaler que le prix Jean Mandel 1989 a été attribué à Jean-Baptiste LEBLOND.

## EXPOSE ANALYTIQUE

### I - ETUDE A CARACTERE THEORIQUE

#### 1 - Stabilité et Bifurcation

L'analyse de stabilité et de bifurcation des systèmes élastiques ou anélastiques a été poursuivie par S. Akel, Nguyen S.Q., C. Stolz, R. Pradeilles.

Dans le cadre de la modélisation de l'emboutissage des tôles minces (contrat Cifre de X. Chateau en liaison avec Sollac), le flambage des structures minces en présence du contact unilatéral a fait l'objet de plusieurs études. Les résultats obtenus antérieurement en 1988 par X. Chateau et Nguyen Q.S., concernant les possibilités de flambage par bifurcation et l'utilisation de la méthode des développements asymptotiques, ont été complétés en 1989 dans deux directions de travail distinctes : une analyse directe de stabilité des systèmes conservatifs sous contraintes unilatérales par la méthode de Lejeune-Dirichlet a permis à Nguyen Q.S. d'énoncer le critère de seconde variation du Lagrangien. Ce critère de stabilité dynamique est identique au critère obtenu antérieurement à partir des pondérations du problème statique incrémental. La stabilité au sens de Hill est dans ce cas aussi, équivalente à la stabilité dynamique. Le frottement est d'autre part pris en compte. Les conséquences d'un frottement de Coulomb sur la formulation du problème en vitesses et sur les énoncés des critères de stabilité et de non-bifurcation ont été examinées.

D'une manière plus générale, Nguyen Q.S. a donné, pour des systèmes dissipatifs standards comme le frottement de Coulomb dont le comportement est décrit par deux potentiels : un potentiel thermodynamique et un pseudo-potentiel de dissipation dépendant de l'état actuel, une description mathématique du problème de l'évolution quasi-statique, du problème en vitesses et des critères de stabilité et de non-bifurcation. Cette description ne fait intervenir que les deux potentiels, elle est donc applicable à

tous les phénomènes tels que frottement, plasticité, fissuration ou endommagement fragiles...

P. Berest a discuté la condition de minimum (seconde variation) pour une intégrale d'action, lorsque le lagrangien ne dépend pas explicitement du temps. On peut trouver la solution générale de l'équation de Jacobi sous forme explicite, et discuter l'existence de points conjugués.

Les problèmes de stabilité de la propagation des fissures ou des fronts d'endommagement sont étudiés par R.M. Pradeilles, C. Stolz et Nguyen Q.S. Une loi de propagation régularisante a été développée, suite à des idées anciennes de H.D. Bui et de K. Dang Van. Cette loi s'obtient dans le cadre habituel des systèmes standards, à partir d'un potentiel thermodynamique augmenté d'un terme supplémentaire d'énergie de ligne ou de surface. Elle régularise les lois usuelles par la présence des termes de courbure du front de rupture. Des exemples dans les études de délaminage des composites ont été discutés.

## 2 - Dynamique et Ondes

La propagation des ondes élastoplastiques a été examinée par Y. Rougier et Nguyen Q.S. en vue des applications en impact des structures minces. Cette action rejoint une étude due à J. Frelat et P. Ballard sur le traitement de surface des métaux par des tirs de laser.

C. Stolz a continué l'analyse des équations de la dynamique des milieux continus anélastiques, formulation du lagrangien, de l'hamiltonien, et des équations canoniques du choc, en utilisant les principes généraux et le principe de l'état local de la thermodynamique des milieux continus. Cette analyse étend les résultats de Biot obtenus pour des systèmes viscoélastiques fermés et isolés. Les principes variationnels associés justifient la construction d'algorithmes spécifiques, employant des schémas numériques classiques (Newmark, Humberbold). Une réflexion approfondie sur l'extension de tels algorithmes en fissuration dynamique est en cours. Les équations canoniques des ondes de

choc permettent l'étude de la structure des chocs et de la stabilité de telles structures en considérant que les mécanismes dissipatifs dans le choc sont différents de ceux pris en dehors du choc. Une attention particulière a été portée à l'étude des discontinuités mobiles dans les milieux plastiques écrouissables avec durcissement et radoucissement.

M. Bonnet a résolu, dans son principe, le problème de la régularisation des opérateurs singuliers qui définissent les potentiels retardés. Dans le cadre du GRECO «Calcul des Structures» il a présenté un «état de l'art» concernant la formulation et l'utilisation de méthodes de potentiels retardés en élastodynamique et il a proposé deux approches «non-standard» pour la discrétisation temporelle des champs (développement sur des bases de fonctions orthogonales et d'ondelettes respectivement).

## 3 - Problèmes Inverses

Les problèmes inverses sont généralement des problèmes mal posés : non-unicité de la solution, non-stabilité par rapport aux données, elles-mêmes entachées d'erreurs expérimentales... Ceux-ci nécessitent donc des stratégies de résolution spécifiques, qui font intervenir des techniques «de régularisation» ou «d'inversion stochastique». Une étude a été commencée par M. Bonnet sur le thème de l'identification des caractéristiques de structures vibrantes à partir de mesures de pression rayonnée.

Il est a priori possible d'identifier des inhomogénéités de matériau à l'intérieur d'un solide par inversion de mesures thermiques en surface ; deux méthodes possibles d'inversion ont été proposées par M. Bonnet, H.D. Bui et J. Planchard. La première donne la dérivée directionnelle du champ de température en surface suivant une perturbation du champ de conductivité, tandis que la seconde repose sur une formulation variationnelle du problème thermique et la minimisation d'un lagrangien. Actuellement le travail porte sur les premiers tests numériques concernant ce problème inverse, qui

demandent à être affinés.

#### 4 - Milieux Poreux

F. Gilbert a poursuivi l'étude des caractères généraux du coefficient de perméabilité en régime dynamique pour un milieu poreux saturé. L'utilisation des méthodes de changement d'échelle et une analyse fine des conditions locales d'écoulement en régime harmonique permettent de préciser le comportement macroscopique en fonction de la fréquence d'excitation. La dépendance n'est pas quelconque mais doit être compatible avec les développements asymptotiques à hautes et basses fréquences, tout en respectant un certain nombre de conditions d'origine physique (relations intégrales de Kramers-Kroenig, par exemple). F. Gilbert a montré ainsi que tous les milieux poreux ont des lois de filtration similaires ne faisant intervenir qu'un nombre réduit de paramètres, dont la détermination suffit à les caractériser.

L'étape suivante a été l'obtention d'une représentation approchée dans le domaine fréquentiel, compatible avec l'ensemble des résultats précédents et sous une forme analytique la plus simple possible, facilement utilisable dans les calculs et valable à toute fréquence. F. Gilbert a obtenu les formules d'inversion dans le domaine temporel (loi de Darcy généralisée) avec leur interprétation physique. Au total, par rapport au régime statique, on n'a besoin en pratique que de trois paramètres supplémentaires, dont deux sont classiques : un coefficient de tortuosité à fréquence nulle et le facteur de formation du milieu. Il a entamé une réflexion sur les estimations théoriques de ces paramètres.

L'ensemble des résultats précédents a été vérifié dans le cas simple des faisceaux de tubes. Le développement de la vitesse locale selon les fonctions propres du laplacien fournit une solution analytique permettant de déterminer les valeurs des paramètres. On obtient des encadrements dépendant de la géométrie, éventuellement liés à des résultats connus par ailleurs (inégalité de Faber-Krahn). Une comparaison avec d'autres modèles

moins complets a été effectuée sur le problème de la propagation des ondes à travers les milieux poreux saturés.

F. Gilbert a en outre continué l'étude des liens entre poroélasticité et méthodes de changement d'échelle, partiellement dans le cadre du groupement scientifique Géomécanique des Roches Profondes, aux travaux duquel il a participé.

#### 5 - Equations Intégrales

Certains problèmes (optimisation de structures, problèmes inverses,...) ont pour inconnue tout ou partie du domaine géométrique du solide considéré et peuvent souvent se ramener à la recherche d'une surface. D'où l'idée d'examiner et de proposer des formulations qui combinent les équations intégrales de surface et le concept de dérivation par rapport à un domaine variable, cette voie étant encore fort peu explorée à l'heure actuelle.

M. Bonnet a obtenu les équations intégrales qui relient la variation des champs de déplacement et de traction en surface externe à une variation de forme du domaine (problème en vitesse), permettant ainsi de réduire la modélisation de ce type de problème à l'essentiel. Dans le même ordre d'idées, M. Bonnet et H.D. Bui ont examiné le problème inverse de l'équation de Laplace en vue de déterminer la présence d'une cavité dans un solide. Ils ont d'abord établi, en prolongeant le résultat obtenu par M. Bonnet en élasticité, l'équation intégrale de surface pour résoudre le problème en «vitesse» nécessaire pour résoudre les problèmes d'optimisation rencontrés. Ensuite ils ont établi, en vue de résoudre le problème de Cauchy de l'équation de Laplace, l'opérateur différentiel de transfert des données surabondantes d'une surface à une autre. Ce résultat peut servir à résoudre très simplement le problème inverse linéarisé pour déterminer la forme légèrement perturbée d'une cavité intérieure. Cette méthode peut s'appliquer à la détection d'anomalie par usure des tubes dans les centrales thermiques ou nucléaires.

## **6 - Méthodes de Calcul : Equations Intégrales**

M. Bonnet a poursuivi les développements et tests numériques associés aux aspects théoriques évoqués concernant les méthodes d'équations intégrales ; l'essentiel de ce travail constitue le code ASTRID. Celui-ci, qui permet la résolution par éléments finis de surface de problèmes tridimensionnels d'élastodynamique stationnaire, d'acoustique linéaire ou d'élastostatique est actuellement implanté au LMS. Ce code est également implanté au Département Mécanique et Modèles Numériques (EDF/DER) sous le nom TRIDYN. Sa documentation a été récemment mise à jour, en collaboration entre M. Bonnet et Ph. d'Anfray (EDF), et éditée sous la forme de deux notes internes EDF.

## **7 - Méthodes de Calcul : Problèmes Stationnaires**

H. Maitournam et K. Dang Van ont continué à développer les applications des méthodes de calcul liées aux problèmes stationnaires de thermoplasticité couplée. C'est ainsi qu'en vue d'une application pour la SNCF, un modèle de prévision de l'évolution des défauts par tache ovale en fonction du tonnage supporté par la voie et des températures saisonnières a été mis au point. Ce modèle dont le principe a été déjà exposé, s'appuie largement sur l'évaluation des contraintes résiduelles de roulement par calcul stationnaire.

Le problème de la modélisation des traitements thermomécaniques avec changement de phase a été également abordé par cette technique en collaboration avec A. Deperrois et S. Akel. L'objectif était de modéliser certains traitements de surface étudiés actuellement (trempe laser par exemple) de façon à les optimiser ; ces études sont en relation avec la tenue en fatigue.

S. Akel a poursuivi la mise en place des programmes de calcul spécifiques du LMS. En particulier, le programme de calcul «Plasticité stationnaire» a été étendu à des calculs de structures axi-symétriques

sous chargement quelconque utilisant la décomposition de Fourier. Cette version a été introduite pour des calculs de dudgeonnage de tubes en liaison avec EDF et des calculs de soudage de cylindres avec GDF.

## **8 - Méthodes de Calcul : Méthode Incrémentale**

S. Akel et Nguyen Q.S. ont étudié les méthodes d'intégration numérique de la réponse quasi-statique des structures élastoplastiques, à savoir la méthode incrémentale classique et la méthode globale proposée récemment par Ladevèze. En particulier, en plasticité cyclique, une étude de comparaison a été menée afin de tester leur performance par rapport à la méthode simplifiée de J. Zarka.

## **9 - Méthodes de Calcul : Analyses Simplifiées des Structures Inélastiques**

B. Borhani, S.H. Lee, P. Navidi-Kasmai et J. Zarka ont poursuivi le développement d'outils spécifiques pour les analyses simplifiées de structures dans lesquelles un très faible nombre de simples calculs élastiques permettent d'obtenir directement l'évaluation des états atteints lors de chargements quasi-statiques et dynamiques. Ainsi, alors que classiquement, la charge de ruine en chargement quasi-statique monotone d'une structure se fait en utilisant la voie de la programmation linéaire ou convexe (très lourde et très difficile à mettre en oeuvre), un nouvel outil fondé sur le calcul élastique a été mis au point. Non seulement la charge de ruine peut être obtenue mais les déformations associées peuvent être aussi immédiatement calculées. De même, lors de chargements dynamiques, une nouvelle analyse fondée sur la solution analytique d'un système élémentaire à un degré de liberté, permet l'évaluation directe de l'état maximal et de l'état limite de la structure. De nombreuses règles conduisant à des résultats de plus en plus précis ont pu être données.

## 10 - Systèmes Experts par Apprentissage

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

L'intelligence artificielle est souvent dans un goulot d'étranglement lors de l'acquisition des connaissances. On sait, en effet, que l'expérience d'un expert se transmet difficilement et plus difficilement encore lorsqu'il doit le faire avec une machine. L'expert peut, de plus, dans de très nombreux cas, ne pas savoir du tout lui-même les règles à retenir. Il se fie à son « bon sens », son « intuition » pour traiter un nouveau problème par analogie avec des cas antérieurs rencontrés. L'apprentissage se fixe pour but l'acquisition automatique d'expériences à partir d'exemples. M. Sebag et M. Schoenauer ont mis au point les algorithmes mathématiques pour traiter les expériences déterminées à partir de données numériques ou multivalués. M. Terrien et M. Schoenauer se sont intéressés au cas où les données sont uniquement numériques. Des applications des algorithmes réalisées sur des problèmes connus de la littérature d'apprentissage ont montré une efficacité bien supérieure à celle des algorithmes d'apprentissage existants.

Des applications précises ont été effectuées dans le domaine de la mécanique. Pour le calcul des structures élastoplastiques, il n'existe pas de règle permettant de trouver une discrétisation spatiale et temporelle optimale pour atteindre la solution avec une erreur donnée a priori. Il est possible de bâtir un système expert par apprentissage pour proposer une telle discrétisation. La base d'apprentissage a été construite à partir de solutions exactes qui ont été obtenues pour une méthode inverse et qui ont demandé près de 2 ans pour leur réalisation. Afin que les exemples puissent être traités par le système expert, ils doivent être représentés sous une forme exploitable : il faut décrire à l'aide d'un codage la géométrie, le matériau, le chargement, la discrétisation

spatiale et temporelle utilisée. La conclusion associée est l'erreur obtenue par cette discrétisation par rapport à la solution exacte. Les règles apprises sur cette base d'apprentissage sont évaluées au vu de leur efficacité de prédiction, estimée sur une base de tests contenant des exemples témoins. Après un tel apprentissage où les paramètres fondamentaux ont pu être soulignés, une analyse par corrélation linéaire conduit à l'évaluation de l'erreur dans tous les cas de maillage.

Des applications en caractérisation de localisation et de longueur de fissures ont été aussi effectuées avec succès.

## II- COMPORTEMENT DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES

### 1 - Mécanique de la Rupture

H. Maigre et Nguyen Q.S. ont poursuivi les études du comportement asymptotique des fissures élastoplastiques, en particulier sur le rôle des discontinuités de vitesse en fond de fissure dans l'analyse énergétique comme dans l'expression des déplacements d'ouverture. Des études numériques fines pour mieux localiser les surfaces de discontinuité ont été menées en collaboration avec Debruyne (EDF-MMN). La validité d'un critère de propagation de type CTOA est actuellement considérée à partir des simulations numériques de propagation.

R. Pradeilles, C. Stolz et Nguyen Q.S. ont étudié les phénomènes de rupture des composites usuels. La décohésion locale fibre-matrice a été analysée. La propagation des fissures d'interface par délaminage est discutée sous plusieurs aspects : formulation d'un critère de propagation, calcul des taux de restitution de l'énergie par la méthode eulérienne ou lagrangienne, discussion générale sur le problème en vitesses de propagation.

H.D. Bui, M.P. Luong et Nguyen Q.S. ont étudié la propagation des fissures dans un polymère de type propergol en liaison avec la SNPE. Des mesures

propergol en liaison avec la SNPE. Des mesures expérimentales par thermographie infrarouge ont été effectuées afin d'explorer les propriétés non réversibles du matériau au voisinage des charges de rupture. Des calculs en grande déformation sont actuellement envisagés pour modéliser la loi de rupture en liaison avec les résultats expérimentaux. La caractérisation de la résistance à la rupture dynamique, sous un choc, est généralement faite par l'essai de résilience Charpy. L'analyse rigoureuse de l'essai de Charpy est cependant rare. Cet essai consiste en un bilan énergétique qui fait apparaître l'énergie dissipée au cours de l'expérience. A la suite de leur travaux sur l'identification des grandeurs caractéristiques en rupture dynamique, H.D. Bui et H. Maigre ont montré, sur un modèle simple, que la part de l'énergie qui sert à la rupture dans l'essai Charpy s'obtient à l'aide seulement des grandeurs mécaniques aux extrémités de l'éprouvette et sur le mouton. La dépendance entre ces grandeurs et l'énergie de rupture est trouvée par l'intermédiaire d'une équation de convolution temporelle non linéaire.

D'après les travaux de H.D. Bui et H. Maigre, une technique d'essai a été développée pour déterminer par une méthode nouvelle le K1c dynamique d'un matériau. Cette méthode nécessite des mesures rapides (1 MHz) de déplacements très petits (quelques microns) ; une technique optique originale a été développée avec la collaboration de V. de Greef.

## 2 - Etude des Problèmes d'Interfaces

Les problèmes d'interfaces se posent dans les études des composites, des soudures, des jonctions et discontinuités diverses. L'interface de deux matériaux qui ne diffèrent que par leurs propriétés élastiques est largement étudiée dans la littérature. Lorsqu'il y a une différence dans leur propriété thermique ou plastique, notamment dans le cas des soudures, il existe une singularité des contraintes de nature différente près d'une surface libre : la

contrainte parallèle à la surface libre est discontinue et son gradient est infini. Une relation de discontinuité entre cette contrainte et la discontinuité de la déformation thermique et plastique a été établie par H.D. Bui et S. Taheri. Le niveau de la contrainte locale associée à la singularité appelée «Epine» est très élevé, ce qui explique les fissurations observées à la surface des métaux.

## 3 - Fatigue

A. Deperrois a cherché à expliquer et à évaluer les effets bénéfiques des traitements de surface sur la tenue en fatigue de pièces métalliques. Utilisant les critères de fatigue développés au laboratoire par K. Dang Van et I. Papadopoulos, et des mesures de contraintes résiduelles par diffraction X, il a développé un modèle de prévision de limite d'endurance d'aciers sous sollicitations multiaxiales. Ce travail a été réalisé en partie au Laboratoire de Microstructure et Mécanique des Matériaux de l'ENSAM Paris, en collaboration avec le Professeur L. Castex.

Le problème de la tenue des tuyauteries en charge, soumises à des séismes a été étudié par D. Bous-saa dans le but d'interpréter des essais de ruine de tuyauteries sous pression, soumises à de très fortes sollicitations sismiques, essais réalisés par ANCO Engineers aux Etats-unis pour le compte de l'EPRI. Ces essais montrent que la rupture des coudes se produit pour un faible nombre de cycles avec des amplitudes de déformation plastique importantes. Afin de simuler et d'interpréter ces essais, D. Bous-saa a étudié numériquement les déformations plastiques se produisant dans ces tubes avec l'aide de différents modèles de coques plastiques avec prise en compte du gonflement, et il a simulé la réponse de ces structures à un séisme. Un premier calcul élastique a permis de retrouver une allure du spectre des vibrations comparable à celle des essais. Un programme expérimental de fatigue de coudes sous forte sollicitation statique (durée de vie inférieure à 100 cycles) a été défini en liaison avec E.D.F. et avec le C.E.A. (Saclay) qui réalisera ces essais.



#### 4 - Contraintes Résiduelles

Les modélisations de traitement mécanique des surfaces ont été approfondies en particulier pour le galetage et pour le choc laser. L'intérêt de la connaissance des contraintes résiduelles n'est plus à démontrer ; leur évolution sous les charges de service et celles des déformations résiduelles constituent un phénomène essentiel pour l'étude de la durée de vie des structures. Le LMS dispose pour cela du cadre puissant de l'analyse simplifiée des structures inélastiques ainsi que des modèles performants développés à partir du critère de K. Dang Van. J. Frelat et S. Braham ont ainsi défini les conditions optimales du galetage et le niveau de contraintes initiales nécessaires pour assurer l'endurance d'un vilbrequin. Pour cela ils ont admis que les forces de contact du galet suivent la répartition hertzienne (que l'on obtient par un calcul numérique élastoplastique) et que par conséquent, dans le cas d'un contact ellipsoïdal, les contraintes élastiques sont connues analytiquement dans les plans de symétrie du contact. L'analyse simplifiée permet alors d'avoir le champ de déformation et les contraintes résiduelles pour un chargement cyclique. Une validation expérimentale est en cours pour un massif semi-infini. La comparaison avec les contraintes résiduelles en surface est très acceptable puisque l'écart entre le calcul et l'expérience ne dépasse pas 20%.

P. Ballard et J. Frelat ont approfondi l'étude du choc laser utilisé comme traitement mécanique de surface. La validation du modèle simplifié uniaxial prenant en compte les effets visqueux a été faite à l'aide d'un calcul numérique élastoplastique dynamique. Ce calcul était nécessaire, car les hypothèses du modèle uniaxial étaient très fortes et il fallait contrôler l'influence de la dispersion spatiale des ondes élastoplastiques dans une modélisation axisymétrique plus proche des conditions expérimentales. Ce calcul, délicat à cause des durées d'application et des niveaux de pression engendrée par le pulse laser, a permis de confirmer que la plus grande partie du volume situé sous la zone d'appli-

cation de la pression était bien représentée par le cas uniaxial. L'utilisation, très économique, du modèle simplifié a permis de chercher encore une fois les meilleures conditions laser pour un profil de contraintes résiduelles donné. P. Ballard, avec l'équipe du LULI, a également optimisé les conditions du tir laser pour obtenir les conditions définies précédemment.



MODULEF : akel  
 18/10/89  
 ../mesh/disc\_stat.nopo.majl  
 ../mesh/disc\_stat.nopo.coord  
 s22.b

1281 POINTS  
 1281 NOEUDS  
 1200 ELEMENTS  
 1200 QUADRANGLES

INCONNUE : 1 MEMO : VN

1012.
822.5
675.5
528.4
381.3
234.2
87.18
-59.90
-207.6
-364.0
-501.1
-648.2
-796.3
-942.3
-1068.

100 ISOVALEURS  
 FINIR : 0  
 CONTINUER : 1  
 VUE SUIVANTE : 2  
 VUE PRECEDENTE : 3  
 REFRATCHIR : 4  
 ZOOM + : 5  
 ZOOM - : 6  
 VALEUR : 7 S F X A Z  
 CDEY:SOFT-HARD: 8 9

Isovaleurs des Contraintes Residuelles dues au Dudgeonnage par le Calcul Elastoplastique Stationnaire

## **5 - Comportement des Matériaux Composites**

P. de Buhan et S. Maghous ont poursuivi la mise au point et le développement d'une méthode numérique permettant d'approcher le convexe de rupture macroscopique d'un milieu hétérogène à structure périodique à partir de la résolution d'un problème de calcul à la rupture défini sur la cellule de base représentative de ce milieu. Le principe de cette méthode repose sur la mise en oeuvre de l'approche cinématique par l'extérieur du calcul à la rupture en se restreignant à des sous-espaces vectoriels de l'espace des champs de vitesse cinématiquement admissibles. Dans le cas où ces sous-espaces sont de dimension finie il a été montré que cette méthode conduit à la détermination du minimum sans contrainte d'une fonction convexe d'un nombre fini de paramètres, dont on ne peut calculer le gradient. La recherche de ce minimum se fait à l'aide d'un algorithme performant avec des temps de calcul raisonnables, même dans le cas d'un nombre important de variables (jusqu'à quelques centaines). Deux voies ont été successivement explorées pour construire de tels sous-espaces vectoriels : - La décomposition en séries de type «Fourier» de champs de vitesse cinématiquement admissibles, suggérée par la propriété de périodicité de ces champs sur la cellule de base. Cette approche, qui paraissait séduisante au départ, s'est en fin de compte révélée d'une efficacité limitée au-delà des premiers ordres de développement des séries. - La discrétisation en «éléments finis», qui revient à explorer des champs de vitesses affines «par morceaux» mais continus ou même constants «par blocs» avec discontinuités. Cette seconde approche paraît beaucoup plus prometteuse. Elle a d'ores et déjà permis de retrouver un certain nombre de résultats obtenus par voie analytique dans le cas d'une cellule trouée, chargée symétriquement en contrainte plane. La visualisation des champs cinématiques sur la cellule montre bien, par exemple dans le cas d'une solution impliquant une ligne de discontinuité, comment le processus de minimisa-

tion conduit automatiquement à une «localisation» du champ de déformation autour de cette ligne. L'application de cette méthode à des cellules de géométries variées et à des chargements hors axes, ainsi que son extension à des problèmes «en déformation plane», sont en cours.

A la demande de la SEP - Division «Propulsion à Poudre et Composites», une série d'essais de vibrations a été effectué par M.P. Luong sur des barreaux C-SiC. Cette étude avait pour but de déterminer le module et l'amortissement équivalents de la courbe contrainte-déformation à différents niveaux de traction moyenne en fonction de l'amplitude de déformation à la température ambiante. Le montage utilisé peut être employé pour une étude en température (-50°C à 200°C) pour simuler les conditions d'environnement sévères.

## **6 - Comportement du Polyéthylène**

L'étude du comportement du polyéthylène a été abordée par J. Kichenin. Il s'agit de caractériser ce matériau utilisé en France pour réaliser le réseau de distribution de gaz à basse et moyenne pression. Les essais entrepris en partie à la DETN de GDF ont permis de mettre en évidence un comportement de type élastoviscoplastique. Une première modélisation en vue du calcul des structures a été proposée.

## **7 - Analyse en Similitude des Collisions**

G. Gary a collaboré à l'analyse des essais de choc réalisés à l'échelle 1/8e par la Marine Nationale en vue de qualifier le futur porte-avions nucléaire vis-à-vis des risques de collision. Une telle similitude ne pose pas de problème en son principe mais il est nécessaire d'interpréter les résultats en tenant compte des imperfections connues des modèles. Avec l'aide d'un stagiaire de DEA, P. Achon, et de V. de Greef, l'étude systématique du comportement des aciers utilisés a été réalisée, en dynamique et en statique. Dans ce dernier cas un extensomètre spécial original à double base de mesure a été conçu et réalisé, qui permet d'observer la striction

de l'éprouvette et de mesurer la déformation résiduelle après rupture dans la zone non affectée par la striction. Une étape importante de cette étude consiste à identifier les grandeurs physiques (énergie à rupture, limite d'élasticité) permettant la meilleure extrapolation de l'essai à l'hypothétique choc réel.

## **8 - Comportement Dynamique des Matériaux et des Structures**

Pour compléter le banc d'essais dynamiques du laboratoire, un logiciel spécifique au traitement du système Hopkinson-Kolsky a été développé par G. Gary, en collaboration avec le Professeur J. Klepaczko de l'Université de Metz.

L'étude approfondie du système Hopkinson a été prolongée avec la collaboration d'un thésard (Zhao Han) pour développer des méthodes d'identification des paramètres caractéristiques de lois de comportement de plus en plus complexes (modèle élastique, puis viscoélastique, puis élastoplastique, puis élastoviscoplastique, etc.) permettant une exploitation optimale de l'essai. Ces méthodes font nécessairement appel au calcul numérique mais seront optimisées pour être utilisables sur micro-ordinateurs afin d'être immédiatement et simplement opérationnelles au niveau de l'expérimentation.

Sur le banc d'essais dynamiques du laboratoire, des essais de flambage actuellement en cours ont montré la forte dépendance entre le mode de flambage des poutres et la vitesse de chargement. Un modèle original qui rend compte correctement de ce résultat a été développé par G. Gary.

## **9 - Thermographie Infrarouge**

M.P. Luong a utilisé les phénomènes d'échauffement engendrés par différents mécanismes de dissipation qui peuvent se produire avant la rupture et que l'on peut déceler aisément en thermovision infrarouge. Il a examiné plus particulièrement les matériaux composites et l'endommagement de la liaison fibre matrice, le bois soumis à une sollicita-

tion de cisaillement et les concentrations de contraintes dans les assemblages et dans les connecteurs, le béton chargé au-delà du pic de résistance et entrant dans le domaine du radoucissement, les propergols soumis à des efforts de traction. Il a étudié avec l'ISMCM les effets thermomécaniques liés aux phénomènes de frottement : patin sur disque métallique et sur disque de verre présentant des défauts de surface ; chocs simples et chocs avec glissement sur disque métallique, disque de verre et disque en alumine ; visualisation des effets thermiques dus au frottement d'une mâchoire métallique sur deux types de disques (sans revêtement ou revêtu d'une peinture caoutchoutée sur la surface de contact) ; frottement d'un pion en laiton sur un disque métallique à l'air libre, en légère immersion dans l'eau et dans l'azote liquide.

## **III - MECANIQUE DES ROCHES**

### **1 - Structures Souterraines de Stockage des Matériaux Radioactifs en Formation Géologique**

#### **A) LE SEL**

Quatre essais in situ ont été gérés par le LMS sous la responsabilité de M. Ghoreychi.

#### **- Interaction thermomécanique du sel gemme et du sel broyé**

Cet essai, commencé il y a trois ans dans la mine Amélie, aux M.D.P.A., s'est achevé en 1989. Les mesures de la température, du déplacement et de la pression dans le sel massif et dans six sondages diversement remblayés par du sel broyé ont été interprétées. Des modèles numériques aux éléments finis ont permis de mettre en évidence les traits principaux du comportement du sel broyé et du sel massif, et de comparer les prévisions du calcul établies à partir des essais en laboratoire aux mesures provenant du site réel.

J. Roman, B. Bazargan-Sabet et A. Pouya ont participé à cette étude respectivement pour le domaine thermique, pour les mesures et pour la rhéologie du sel gemme.

#### **- Thermomécanique du champ proche d'un puits de stockage**

Des travaux préliminaires pour la conception et le dimensionnement d'un essai thermomécanique, ainsi que l'étude de la convergence d'une galerie spécialement creusée pour cet essai, ont été effectués en 1989. L'expérience elle-même doit commencer en 1990. Elle consiste à mesurer la température et la pression sur des sondes simulant les conteneurs des déchets radio-actifs pour trois modes de stockage (conteneur en contact thermique quasi immédiat avec le massif, vide annulaire entre le conteneur et la paroi du puits, annulaire rempli de sel broyé). J. Roman pour la mise en oeuvre de l'essai in situ, B. Bazargan-Sabet pour l'acquisition et la réalisation des mesures et Y. Kazan ont participé à cette étude.

Des calculs numériques ont été effectués par N. Schmitt pour l'étude de la température résultant d'un entreposage de coulis de déchets dans un puits de stockage, rempli ou non de sel broyé avec ou sans contact immédiat avec le massif, et N. Abou-Ezzi a mis en oeuvre des calculs aux éléments finis pour la modélisation en thermoviscoplasticité du sel massif et du sel broyé dans l'hypothèse des petits ou des grands déplacements.

#### **- Caractérisation des remblais constitués de sel broyé**

Des essais de remplissage à l'échelle industrielle pour combler les vides dans la phase finale d'un stockage de déchets nucléaires ont été faits avec du sel broyé comme remblai par l'ANDRA en 1989 dans les Mines de Potasse d'Alsace avec plusieurs techniques (rouleau compresseur, bande projectrice, pneumatique) et différentes granulométries. La conception de la caractérisation des résultats de ces essais et leur interprétation ont été confiées au

LMS qui, avec le concours des Laboratoires des Ponts et Chaussées (Strasbourg et CETE de Rouen et de Trappes), a mis en oeuvre des essais de mécanique des sols (pressiométrie, pénétrométrie, diagraphie ( $\gamma$  et Neutron)).

#### **- Participation à l'essai «HAW»**

Cette expérience a pour but d'examiner les effets de l'échauffement et de l'irradiation par les sources radioactives. Elle est en cours dans la Mine d'Asse en R.F.A. L'intervention du LMS dans cet essai consiste à mesurer des variations de verticalité en utilisant des inclinomètres à haute précision conçus par l'Institut Physique du Globe. J. Roman a participé à cette étude.

A. Pouya a continué d'étudier la rhéologie du sel gemme. Le modèle voisin du corps de Burgers proposé précédemment après l'analyse des essais de fluage monopalier a été confronté aux résultats d'une série d'essais de fluage multipalier, c'est-à-dire d'essais avec un trajet de chargement plus complexe. Cela a permis de vérifier certaines hypothèses sous-jacentes au modèle et les résultats de cette confrontation vont dans le sens de la confirmation du modèle adopté.

L'étude préliminaire de la dispersion des résultats du fluage du sel d'Etrez, effectuée en collaboration avec les géologues du Muséum National d'Histoire Naturelle, a été poursuivie au LMS. Les premières observations avaient révélé une certaine corrélation entre les propriétés mécaniques et pétrographiques de ce sel, mais les essais avaient été effectués dans des conditions de contrainte et de température différentes et il a fallu la confirmer par des essais effectués dans des conditions identiques. Pour cela 9 essais totalisant plus d'un an de fluage ont été réalisés par J.P. Charpentier, assisté de P. Valli, sur des échantillons représentant différents faciès pétrographiques. Les résultats de ces essais ont confirmé et précisé ceux de l'étude préliminaire, à savoir que le sel d'Etrez présente deux faciès ayant une genèse et des propriétés pétrographiques différentes : le faciès phénoblastique et le faciès

laiteux. Le premier est moins fluant que le second. Leur différence de comportement est plus faible dans la phase stationnaire du fluage par rapport à la phase primaire. La prise en compte de ces résultats permettra de mieux dimensionner les galeries ou cavités creusées dans le gisement de sel d'Étrez. J.P. Charpentier a étudié le comportement différé du sel au cours de décharges successives et l'influence de la contrainte moyenne (essais triaxiaux en compression). Parallèlement, des essais de fluage multiple (avec paliers de charge ou de température) ont été effectués sur le sel gemme très pur de la mine de Asse en R.F.A.

E. Hetuin, P.A. Blum et P. Berest ont achevé l'interprétation des essais de mesure du module élastique à grande échelle réalisés sur le site d'Étrez (Gaz de France). Dans un de ces essais, une cavité profonde (1300 mètres) est décomprimée rapidement ; on mesure les effets de cette décompression en surface par un inclinomètre à haute résolution de l'IPG afin d'en déduire un module élastique équivalent. Les résultats se sont avérés prometteurs, bien que l'exemple choisi constitue sans doute la limite de sensibilité de la méthode. On doit noter que parallèlement, l'IPG a mesuré les effets de la décompression sur le champ électromagnétique avec des résultats très encourageants.

Enfin, on a utilisé les inclinomètres disposés à la surface pour mesurer les effets du déplacement d'une charge ponctuelle, en vue de mesurer un module élastique de surface «équivalent» pour quelques dizaines de mètres carrés de surface du sol. Les résultats apparaissent prometteurs.

A. Zelikson a fait une étude paramétrique de la stabilité des dômes de sel pour examiner les conditions de déclenchement, les évolutions lentes puis «explosives», la formation de «jets», la propagation des instabilités en largeur et en profondeur. Il a aussi examiné la stabilité d'un empilement vertical de conteneurs de déchets au sein d'une couche de grande épaisseur. Ces deux études ont été faites par une modélisation physique sur la centrifugeuse du CESTA (CEA-DAM) près de Bordeaux.

M. Chayé a effectué en collaboration avec J. Bergues une étude du sel de Manosque. Une analyse minéralogique globale et une analyse à la sonde des minéraux accessoires ont été réalisées en collaboration avec Ph. Blanc (URA 319 du CNRS, UPMC Paris). Une analyse comparée des structures des échantillons naturels et des échantillons déformés au laboratoire a été faite sur lames minces au microscope polarisant. Elle a permis d'observer les différentes familles d'inclusions, de mettre en évidence l'existence de plusieurs phases de cristallisation successives et a montré que le gisement a été soumis à des pressions d'origine tectonique dont les traces se distinguent de celles de la déformation d'origine expérimentale.

M. Chayé a poursuivi, en collaboration avec J.L. Zimmermann, une étude comparée des doses de fluides, en particulier du méthane, occlus dans différents échantillons de sel d'Étrez de pureté et de profondeur différentes. Les températures de libération maximale de ces fluides ont été déterminées.

## **B) MECANIQUE ET HERMOMECHANIQUE DES ARGILES PROFONDES**

### **1 - Essais de laboratoire**

A la demande de l'ANDRA un forage de 1000 m entièrement carotté a été réalisé sur le site de Montcornet dans les argiles de Champagne. Cette opération de grande envergure a pour but de mener une étude expérimentale complète de deux niveaux argileux profonds. Les études sur le site sont faites par le BRGM et des essais en laboratoire sont faits au LMS. Le programme expérimental a débuté en juillet 89 et se poursuivra jusqu'à la fin de 1990.

Il est composé de plusieurs parties, dont : - Détermination du comportement mécanique à court terme (B. Bazargan-Sabet assisté de D. Théval) et à long terme (P. Valli). - Essais sur tube épais (B. Bazargan-Sabet assisté de D. Théval). - Comportement thermique (J. Bergues assisté de G. Bouron).

La plupart des matériels et des techniques utilisées ont été mis au point au LMS depuis quelques

années (cellule «tube épais», 14 bâtis de fluage dont 4 en température, dilatomètre de haute précision, etc.). L'originalité de cette étude vient d'une part de la diversité et de la qualité des essais et d'autre part du traitement statistique des résultats.

## 2 - Essais in situ

D. Bublitz a poursuivi la collaboration engagée depuis 4 ans avec le CEN Belge. Le suivi de l'essai de soutènement à convergence contrôlée et l'interprétation de cet essai grâce à un modèle de comportement viscoplastique montrent que la comparaison entre les prédictions et la réalité est excellente. Les effets différés, fondamentaux dans le cas de l'argile de Boom, ont été mesurés et interprétés avec une précision remarquable. Cet essai constitue un exemple optimal d'application de la méthode convergence-confinement à une roche à comportement complexe : celui de l'argile profonde.

En 1989 une nouvelle phase de l'étude in situ du comportement thermomécanique des argiles a commencé avec la préparation de l'essai CACTUS qui sera mis en oeuvre en janvier 1990 sur le site de Mol. Le principe de l'essai consiste à placer des sondes chauffantes cylindriques simulant un empilement de conteneurs radioactifs dans un massif argileux et de mesurer le changement de l'état thermique, mécanique et hydraulique de l'argile aussi bien à proximité de la sonde qu'à longue distance.

Les calculs de dimensionnement effectués par A. Giraud montrent que la température de 120°C atteinte à la paroi de la sonde modifie de façon importante le champ de pression interstitielle dans une zone cylindrique de rayon égal à 5 fois celui de la sonde.

La conception de la sonde (G. Rousset, B. Bazargan-Sabet) est originale notamment pour la mesure de la poussée du massif sur la sonde : c'est la sonde elle-même qui est l'instrument de mesure puisqu'on enregistre les déformations à l'intrados et à l'extrados de façon à remonter aux efforts exercés, c'est-à-dire à la poussée du massif.

Un capteur de «teneur en eau» fonctionnant sur le principe de pile électrique a été mis au point par B. Bazargan-Sabet. Un prototype avec son électronique associée a été réalisé et testé au laboratoire. Six de ces capteurs seront installés à Mol à l'occasion de l'essai in situ CACTUS piloté par le LMS. L'instabilité de la puissance de chauffe, constatée dans le cadre des essais thermomécaniques in situ, a été examinée par B. Bazargan-Sabet. Cette étude a conduit à la réalisation d'une chaîne électronique de régulation mise au point par P. Chastanier. Un prototype a été testé au laboratoire dans des conditions très sévères. Trois chaînes de puissance moyenne seront installées à Mol dans le cadre de l'essai CACTUS et trois autres de forte puissance prendront place aux MDPA pour l'essai thermomécanique dans le sel.

## 3 - Modèle réduit

Pour étudier les couplages thermo-hydro-mécaniques dans un massif argileux saturé un modèle réduit a été réalisé. Il était composé d'une sphère d'argile sous contrainte totale avec une pression interstitielle connue et une source de chaleur placée en son centre. Cette géométrie est très simple et les conditions aux limites modélisent la réalité avec fidélité. Les résultats suivants ont été obtenus. La température le long d'un rayon décroît plus rapidement qu'en  $1/r$  près de la source chauffante, puis plus lentement lorsqu'on approche de la surface. Cela suggère une conductibilité thermique fonction de la température. Le régime permanent est atteint en moins de cinq heures de fonctionnement. Pour la teneur en eau il n'y a aucune dessiccation autour de la résistance chauffante, qui fonctionne à environ 100°C, et localement il n'y a pas de variation (0,5 point au maximum) de la teneur en eau de l'argile. Enfin, il existe un mouvement de l'eau de l'intérieur de la sphère vers l'extérieur, même s'il s'agit d'un phénomène de faible amplitude.

Cet essai thermo-hydro-mécanique a été interprété au moyen de la théorie du milieu poreux, linéaire, élastique de Biot ; des solutions analytiques origina-

les ont été mises au point. Si l'on suppose une conductivité thermique constante, on obtient  $K = 1,85 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , soit presque le double des valeurs rencontrées dans la littérature pour l'argile. Pour mieux rendre compte des mesures de température près de la source, une décroissance exponentielle de la conductivité a été retenue. La modélisation de la pression hydraulique a permis de calculer un débit d'eau conforme aux mesures.

#### **4) Minéralogie**

M. Chayé a participé à l'étude des forages argileux de l'Aisne et a effectué un parallèle entre les différentes données. Elle a poursuivi, en collaboration avec G. Rousset, l'étude comparée des caractéristiques mécaniques, géotechniques, sédimentologiques, minéralogiques, granulométriques, physico-chimiques de sept argiles. Cette étude a montré que le comportement mécanique de ces argiles est plus proche de celui d'une roche que de celui d'un sol compressible. On a constaté que la composition minéralogique, la granulométrie et le potentiel zeta ont une répercussion sur la tenue des argiles.

M. Chayé a effectué, en collaboration avec Ph. Blanc (URA 319 du CNRS UPMC Paris) et A. Giraud, une analyse minéralogique de l'argile de Gournay sur Aronde et recherché son incidence sur ses propriétés mécaniques.

## **2 - Equilibre des Cavités Souterraines**

### **A) EFFET DE L'AVANCEMENT DU FRONT DE TAILLE DANS LES TUNNELS CIRCULAIRES**

F. Corbetta étudie l'influence d'une avancée à vitesse constante du front de taille, en axisymétrie, en mettant au point un programme d'éléments finis utilisant le concept du régime stationnaire de Nguyen Quoc Son. Pour le moment le comportement élastoplastique, (matériau de Mises, Drucker-Prager, avec écrouissage isotrope éventuel), a été implanté ; parallèlement, il a conçu le logiciel unidimensionnel par éléments finis RADIA afin de tester le

programme.

Le problème du soutènement est en cours d'étude ; un autre problème, spécifique à l'algorithme du régime permanent, concerne la prise en compte des conditions aux limites en arrière du tunnel.

A l'occasion d'un séjour «Erasmus» à l'Imperial College à Londres, F. Corbetta a fait une revue des solutions analytiques existantes en élastoplasticité pour les tunnels circulaires, ainsi qu'une étude paramétrique.

### **B) CAVITÉS ISOLÉES DANS LES MASSIFS VISCOPLASTIQUES**

L'étude des cavités isolées dans les massifs en matériaux viscoplastiques sans seuil a été l'occasion pour Nguyen Minh Duc de mettre en valeur et d'exploiter le phénomène du régime de contraintes asymptotiques pour de telles structures soumises à des charges constantes (fluage), déjà évoqué antérieurement par J. Mandel pour certaines classes de matériaux viscoplastiques, qu'il qualifiait de MAXWELL généralisés.

Nguyen Minh Duc a étudié le risque d'apparition de traction dans les cavités de stockage de gaz naturel à la suite d'une remontée de pression. Le phénomène de «risque de fracturation hydraulique», mentionné par P. Berest dans sa thèse, est tempéré ici par un état de contrainte quasi-stationnaire dû à un chargement très lent des cavités. Nguyen Minh Duc a réalisé des abaques pour une galerie profonde creusée dans un matériau viscoplastique, dans le cas du creusement instantané. Les lois envisagées couvrent la plupart des lois utilisées pour le sel gemme : loi de Norton-Hoff, de Lemaître-Menzel-Schreiner, avec une extension tridimensionnelle par le critère de Mises ou de Tresca. Les calculs sont réalisés par micro-ordinateur à partir de solutions semi-explicites ; l'utilisation de paramètres adimensionnels, et le prolongement des solutions dans la phase asymptotique, permettent d'obtenir les abaques valables pour des temps aussi grands que l'on veut, pourvu que l'hypothèse des petites transformations reste valable.



Pour le matériau de Norton, A. Pouya a effectué un développement limité de ces solutions, permettant d'obtenir une approximation explicite du déviateur et des contraintes en fonction du temps et du rayon ; cette solution permet d'illustrer sur un cas particulier le théorème de J. Mandel relatif au comportement asymptotique d'une structure élastoviscoplastique sous charge constante.

L'ensemble de ce travail permet de comparer les différentes lois de comportement, de proposer des calculs approchés, notamment pour tenir compte du fluage primaire, d'étendre les résultats à la géométrie sphérique.

Enfin Nguyen Minh Duc, avec la participation de A. Pouya et G. Gary, a réalisé le logiciel CAVITUS, pour le calcul de la convergence libre des excavations souterraines en massif viscoplastique.

### **C) ETUDE DU COMPORTEMENT DES ANNULAIRES CIMENTÉS DANS LES PUIITS DE FORAGE PÉTROLIERS**

Il s'agit dans cette recherche d'évaluer le risque de perte d'étanchéité du ciment dans un puits de forage pétrolier, par dégradation, sous l'action de sollicitations d'origine mécanique ou thermique. Nguyen Minh Duc, avec la participation de I. Charara, a étudié la montée en pression du fluide de forage, puis le retour de la pression à sa valeur initiale, dans le cas de la symétrie circulaire ; la viscoélasticité du ciment entraîne des risques d'apparition de tractions dans le ciment qui ont été discutés en fonction des divers paramètres (état initial du ciment, niveau et durée du chargement) ; le massif est élastique ou viscoélastique linéaire.

### **D) STOCKAGE DES HYDROCARBURES**

P. Berest a rassemblé, pour une conférence invitée au Symposium «Storage of Gases in Rock Cavern», un ensemble de cas d'accidents sur des stockages d'hydrocarbures, qui a conduit à suggérer des dispositions en matière de prévention de certains de ces accidents et à proposer une définition des fuites maximales admissibles sur ce type

d'ouvrage.

P. Berest est intervenu comme conseiller de la DQSI (Ministère de l'Industrie) dans diverses affaires intéressant la sécurité des stockages d'hydrocarbures.

## **3 - Comportement de Diverses Roches**

### **A) ROCHES FRAGILES**

#### **(grès de Fontainebleau, calcaire, granite)**

Dans le cadre du GRECO «Géomatériaux», J. Bergues, assisté de M. Dao et de G. Pergeaux, a poursuivi l'étude expérimentale au comportement mécanique du grès de Fontainebleau. Les essais triaxiaux jusqu'à 25 MPa de pression latérale ont permis de préciser les propriétés fragiles de la roche, et ont pu mettre en évidence le caractère instable de la relaxation au voisinage de la rupture dans le cas des roches de classe II. Cette étude a été complétée par des mesures d'émission acoustique en compression uniaxiale réalisées avec la collaboration de M.C. Reymond du L.C.P.C., qui ont pu montrer que la fissuration s'initiait dès la mise en charge et qu'elle s'intensifiait fortement à l'approche de la rupture. Les résultats de ces essais sont actuellement interprétés pour la modélisation des roches fragiles. Les courbes expérimentales sont ajustées à l'aide d'un modèle, déjà utilisé par Nguyen Minh Duc et N. Schmitt, faisant intervenir deux paramètres d'endommagement, ce qui permet de tenir compte des principales caractéristiques des roches fragiles de classe II et en particulier de l'anisotropie induite au cours du chargement par le développement de la fissuration dans une direction privilégiée, de la dilatance et de la décharge élastique après la rupture. Ce modèle a également donné des résultats intéressants pour d'autres roches fragiles de classe II à anisotropie induite par fissuration, ayant fait l'objet d'études expérimentales détaillées comme le calcaire du plateau d'Albion et le granite d'Auriat.

## **B) CARACTÉRISATION THERMOMÉCANIQUE DE TROIS ROCHES À ANISOTROPIE TRANSVERSE**

Dans le cadre du stockage des déchets radioactifs, J. Bergues et M. Chayé, assistés de G. Pergeaux et G. Bouron, ont réalisé une étude de l'influence de l'anisotropie naturelle sur les propriétés mécaniques, dilatométriques et de conductivité thermique de trois roches à anisotropie transverse (le schiste des Cévennes, l'ardoise de Fumay et le gneiss de Bonneval). Pour ces trois roches, de structures très différentes, les caractéristiques à la rupture sont surtout affectées dans la direction inclinée à 45° par rapport à la schistosité. La dilatométrie est très peu affectée par l'anisotropie à la température ambiante ; par contre, on note pour les trois roches une légère augmentation de la dilatation transversale (direction perpendiculaire à la schistosité) au-delà de 150°C. Au contraire, la conductivité thermique est plus ou moins marquée par l'anisotropie suivant la structure de la roche et la comparaison des résultats expérimentaux et ceux donnés par un modèle multicouche a permis d'apporter des conclusions intéressantes. Le gneiss de Bonneval est la roche la moins marquée par l'anisotropie, ce résultat est dû à sa texture granoblastique orientée, pour laquelle les minéraux engrenés font que les strates sont imbriquées entre elles, ce qui atténue l'effet de l'anisotropie. Par contre, pour l'ardoise de Fumay, les résultats sont très marqués par l'anisotropie en raison de sa texture lépidoblastique à feuillets très orientés. Le schiste des Cévennes, roche à texture lépidoblastique plus grossière que l'ardoise de Fumay, donne des résultats intermédiaires.

M. Chayé a poursuivi, en collaboration avec P. Siriey (U.R.A. 69 Grenoble) l'étude de la déformabilité thermique des roches qui a été déterminée à l'aide de cycles thermiques. Les résultats obtenus ont permis l'étude de la dilatabilité ( $\alpha = d^e/dT$ ) (ses variations avec la température et son anisotropie) qui a pu être reliée à la structure et au passé tectonique des roches testées. Des conséquences géomécaniques ont été déduites de ces résultats.

## **IV - MECANIQUE DES SOLS**

### **1 - Analyse de la Stabilité des Ouvrages en Sols Renforcés**

A. Anthoine a mis au point le logiciel STARS pour le dimensionnement d'ouvrages en sols renforcés. Ce logiciel interactif est la concrétisation opérationnelle au niveau du projet des analyses théoriques menées depuis plusieurs années au laboratoire par J. Salençon et ses collaborateurs sur le principe et les applications du calcul à la rupture. La cohérence mécanique de la méthode d'analyse de stabilité utilisée a permis de mener une réflexion poussée sur la manière d'introduire les coefficients de sécurité partiels sur les actions extérieures et sur les caractéristiques de résistance des matériaux (rejoignant par certains aspects les règles de calcul aux états limites pour le béton armé). La commodité d'utilisation du logiciel, sa rapidité de calcul due à la méthode d'analyse qui permet d'examiner quelques milliers de «lignes de rupture potentielles», font que STARS peut être évidemment utilisé pour le dimensionnement ou la vérification d'un ouvrage, mais aussi comme aide à la conception et comme instrument de recherche (études paramétriques). J. Salençon et L. Verzura, en s'appuyant sur des résultats antérieurement établis au laboratoire (P. de Buhan, L. Siad) concernant le critère homogénéisé d'un sol frottant renforcé par armatures, ont engagé une recherche sur le Texsol.

### **2 - Amélioration des Outils de Creusement pour les Boucliers Pressurisés**

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet national tunnel 85-90 et concerne l'amélioration et l'optimisation des outils d'abattage des tunneliers à pleine section, à pression de boue. Les terrains envisagés sont des marnes et des argiles plastiques qui posent le plus de problème pour ces machines. A cet effet un banc rotatif, à vitesse de rotation contrôlée, a été construit pour l'étude d'un outil de coupe

élémentaire, défini par ses paramètres classiques (rapport d'échelle géométrique de 1/10 environ, vitesses de déplacement conservées).

Les galettes pour les essais (argile des Flandres (Yprésien) de type plastique à siltstones), ont été prélevées par M. Dao et Y. Le Bras sur le site de Roubaix, dans un puits de reconnaissance sur la future ligne de métro, au moyen de viroles foncées au vérin. Une deuxième campagne de prélèvement sera faite dans un puits à Tourcoing, dans une argile des Flandres silteuse plus raide et fracturée.

La profondeur de coupe est maintenue constante sur un tour ; l'outil est muni d'un capteur de force tridimensionnel. L'acquisition numérique des données et leur traitement sont obtenus au moyen de logiciels développés au laboratoire par G. Gary, B. Bazargan-Sabet et V. de Greef (logiciels SIMON, AGNES, ROXANE et EDGAR). Une caméra vidéo permet de visualiser la formation et l'écoulement des copeaux. M. Dao et S. Kebdani ont participé à la conception et à la réalisation des essais. L'interprétation est en cours.

### 3 - Matériaux Pulvérulents

Poursuivant l'analyse du comportement des matériaux pulvérulents, M.P. Luong a examiné différentes classes de matériaux granulaires associés à différents problèmes industriels, par exemple pour la densification maximale d'une poudre, pour améliorer des propriétés physico-chimiques, ou pour l'élaboration des pâtes à coke, ou pour l'étude des propriétés d'amortissement du Texsol (sable renforcé par des fibres textiles continues).

Un cas particulièrement intéressant est fourni par les graines alimentaires (blé, riz, haricot, petit pois, colza). On sait que dans les silos des situations extrêmement différentes peuvent exister (écoulement en masse, en cheminée ou même blocage) qui ne sont pas explicables au moyen des seules caractéristiques classiques de la mécanique des sols, angle de frottement interne et éventuellement cohésion. M.P. Luong a étendu les notions de seuil

caractéristique et de seuil de désenchevêtrement en définissant des indices de coulabilité et de désenchevêtrement à partir de rapports énergétiques définis d'après les courbes de comportement des différents matériaux. Ces indices permettent de distinguer des matériaux pulvérulents qui par ailleurs ont des angles de frottement interne très voisins.

Sous chargement cyclique dynamique les matériaux pulvérulents ont des caractéristiques non linéaires (modèle dit «linéaire équivalent»). M.P. Luong a cherché à déterminer plus précisément l'origine de ces non linéarités pour pouvoir utiliser l'analyse modale expérimentale des systèmes sol-structures d'une façon moins hasardeuse pour la recherche de dispositifs de protection antisismique. P. Habib et M.P. Luong ont étudié expérimentalement la cohésion des sables de Fontainebleau en fonction de la teneur en eau. La cohésion capillaire ainsi mesurée est d'autant plus importante que le pourcentage d'éléments fins du sable est grand. On peut expliquer ainsi que le trafic soit plus facile sur certains sables plutôt que sur d'autres et aussi qu'il soit possible sur du sable humide et impossible sur du sable sec avec les pressions de gonflage usuelles des pneus de camions. Au-delà de ces simples constatations le chargement répété montre deux configurations : une dégradation de la portance ou une amélioration de la portance. Le premier mécanisme conduit à la formation d'ornièrre, la deuxième au compactage. Le calcul statique est insuffisant pour décrire le phénomène et une approche a été faite en utilisant l'algorithme stationnaire de Nguyen Q.S.

### 4 - Essais in situ

Des pylônes réels de diverses lignes électriques d'Electricité de France ont été construits avec des fondations précontraintes sur les principes définis par P. Habib et M.P. Luong. Des essais avec le test du lacher ont donné des résultats très satisfaisants. Le développement de la méthode se poursuit normalement.

## PUBLICATIONS

### ■ REVUES SCIENTIFIQUES

C. STOLZ

*Sur la propagation d'une ligne de discontinuité et la fonction génératrice de choc pour un solide anélastique.* C.R.A.S., série II, t. 308, n°1, janvier 1989, pp. 1-3.

X. CHATEAU, Q.S. NGUYEN

*Flambage par bifurcation des systèmes élastiques avec contact unilatéral parfait.* C.R.A.S., série II, t. 308, n°7, février 1989, pp. 573-578.

Q.S. NGUYEN, R.M. PRADEILLES, C. STOLZ

*Sur une loi de propagation régularisante en rupture et endommagement fragile.* C.R.A.S., série II, t. 309, n° 16, novembre 1989, pp. 1515-1520.

H.D. BUI, S. TAHERI

*La singularité Epine dans les bimatériaux en thermo-élastoplasticité.* C.R.A.S., série II, t. 309, n°16, novembre 1989, pp. 1527-1533

H.D. BUI, G. INGLEBERT

*Thermoplasticité et Mécanique de la Rupture.* Journal du GAMI. Mécanique et Matériaux, n° 431, 1989, pp. 8-14.

M. BONNET

*Equations intégrales de surface et approches connexes en dynamique transitoire.* GRECO «Calcul des Structures», Gien mai 1989, dans «Calcul des Structures et Intelligence Artificielle», ed. Pluralis, 1989.

X. CHATEAU, Q.S. NGUYEN

*Stabilité et bifurcation des systèmes conservatifs sous contraintes unilatérales.* GRECO «Calcul des Structures», Gien mai 1989, dans «Calcul des Structures et Intelligence Artificielle», volume 3, ed. Pluralis, 1989.

J. FRELAT, C. CEKAJSKI

Groupe de travail «*Réponse transitoire des structures, Systèmes Couplés, Chocs*» du GRECO «Calcul des Structures», Gien mai 1989, dans «Calcul des Structures et Intelligence Artificielle», volume 3, ed. Pluralis, 1989.

C. STOLZ

*Dynamique des milieux continus anélastiques et discontinuités mobiles.* GRECO «Calcul des Structures», Gien mai 1989, dans «Calcul des Structures et Intelligence Artificielle», vol. 3, ed. Pluralis, 1989.

P. de BUHAN, R. MANGIAVACCHI, R. NOVA, G. PELLEGRINI, J. SALENÇON

*Yield design of reinforced earth walls by a homogenization method.* Géotechnique, 39, n°2, 1989, pp. 189-201.

M.P. LUONG

*Rhéologie des grains agro-alimentaires ensilés.* Construction Métallique, n°2, 1989, pp. 81-89.

K. DANG VAN

*Modélisation élastoplastique des défauts de surface : application à l'écaillage.* «Fatigue et Contacts Mécaniques», éditions de la Revue Française de Métallurgie, Journées de Printemps, Paris, mai 1989.

H.P. LIEURADE, H. MAITOURNAM, N. JI, R.Y. DEROCHÉ, R. CONTI, C. JIMENEZ

*Rôle des paramètres mécaniques et métallurgiques sur la résistance à l'écaillage des aciers.* «Fatigue et Contacts Mécaniques», éditions de la Revue Française de Métallurgie, Journées de Printemps, Paris, mai 1989.

Q.S. NGUYEN, N. TRIANTAFFYLIDIS

*Plastic bifurcation and post-bifurcation analysis for generalized standard continua.* J. Mech. Phys. Solids, vol. 37, n°5, 1989, pp. 545-566.

A. ANTHOINE

*Mixed modelling of reinforced soils within the framework of the yield design theory.* Computers and Geotechnics, 7, 1989, pp. 67-82.

P. de BUHAN, L. SIAD

*Influence of a soil-strip interface failure condition on the yield strength of reinforced earth.* Computers and Geotechnics, 7, 1989, pp. 3-18.

M. BONNET

*Regularized boundary integral equations for three-dimensional bounded or unbounded elastic bodies containing curved cracks of arbitrary shape under dynamic loading.* In «Boundary element techniques : applications in engineering» (ed. C.A. Brebbia & N.G.Zamani), Computational Mechanics Publications (Southampton), 18 pages, 1989.

P. HABIB

*Les surfaces de glissement en Mécanique des Sols et en Mécanique des Roches.* Victor de Mello Volume, 14 août 1989.

P. HABIB, M.P. LUONG

*Thermographie infrarouge d'un géotextile non tissé soumis à la traction.* Materials and Structures/Matériaux et Constructions, n°22, 1989, pp. 53-59.

M.P. LUONG

*Infrared thermography of fracture of concrete and rock.* «Fracture of Concrete and Rock», S.P. Shah & S.E. Swartz ed. Springer Verlag, 1989, pp. 343-353.

G. ROUSSET

*Comportement mécanique des argiles profondes.* Tunnels et Ouvrages Souterrains, n° 95, septembre-octobre 1989.

F. GILBERT

*Change of Scale in multiphase media : the case of saturated soils.* Chapitre 15 de «Geomaterials :

Constitutive Equations and Modelling», F. Darve éd., Elsevier 1989.

M.P. LUONG

*Experimental simulation of geotechnical structures.* « Geomaterials : Constitutive Equations and Modelling», F. Darve éd. , Elsevier 1989.

Q.S. NGUYEN, C. STOLZ, G. DEBRUYNE

*Energy methods in fracture mechanics : stability, bifurcation and second variations.* European Journal of Mechanics, à paraître.

## ■ COMMUNICATIONS À DES CONGRÈS PUBLIÉES

M.P. LUONG

*Direct tensile and direct shear strengths of cement and building materials.* Second NCB International Seminar on Cement and Building Materials, New-Delhi (India), 30 janvier - 3 février 1989.

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

*Comportement non linéaire d'un pieu et d'un groupe de pieux sous chargement cyclique.* 3ème Colloque Génie Civil et Recherche, Paris, juin 1987, édition février 1989.

M.P. LUONG

*Damaging building movements caused by gypsum dissolution in the subsoil.* International Conference on Case Histories in Structural Failures, Singapore, 20-22 mars 1989.

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

*Experimental and numerical study of the propagation and the effects of a plastic wave induced in materials by a high-power pulsed laser.* ISATA, Florence (Italie), mai 1989.

- D. DE BRUYN, O. AUBRY, G. ROUSSET  
*Comparison of rheological models in view of predicting the behaviour of a deep clay host rock during the construction of a radwaste repository.* NUMOG III «Numerical Models in Geomechanics», Niagara Falls (Canada), 8-11 mai 1989.
- S.H. LEE  
*Simplified seismic analysis.* Conférence Internationale sur le Calcul et l'Optimisation des Structures (STRUCOPT), IITT, Paris, 23-24 mai 1989.
- M. GHOREYCHI, P. BEREST, B. BAZARGAN-SABET, J. ROMAN  
*Thermomechanical study of the interaction between rocksalt and crushed salt.* Symposium «Backfilling and Sealing», CCE Braunschweig (RFA), 23-26 mai 1989.
- B. BAZARGAN-SABET, SELTICA  
*A remote control system for in situ tests.* Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics, W.V. Morgantown (USA), 19-22 juin 1989.
- G. ROUSSET, B. BAZARGAN-SABET, R. LENAIN  
*Time-dependent behavior of rocks : laboratory tests on hollow cylinder.* Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics, W.V. Morgantown (USA), 19-22 juin 1989.
- J. ZARKA, J.M. HABLLOT  
*Learning expert systems for elastoplastic structures.* Pressure Vessel and Piping Conference, Hawaii (USA), 23-27 juillet 1989, A. Soler ed., ASME ed.
- P. BALLARD, J. FRELAT, J. FOURNIER, R. FABRO, L. CASTEX  
*Residual stresses induced by laser shocks.* APS Topical Conference in Condensed Matter, Albuquerque (USA), août 1989 (à paraître dans Journal of Applied Physics).
- J. ZARKA  
*Residual stresses evaluation during rolling.* AST Residual Stresses, Los Angeles (USA), 7-10 août 1989.
- A. ANTHOINE, J. SALENÇON  
*Une optimisation du dimensionnement d'ouvrages en sols renforcés* 12ème Congrès Int. de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Rio de Janeiro (Brésil), 13-18 août 1989, pp. 1219-1220.
- P. de BUHAN, L. SIAD  
*Dimensionnement des murs de soutènement en terre armée.* 12ème Congrès Int. de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Rio de Janeiro (Brésil), 13-18 août 1989, pp. 1231-1232.
- P. HABIB, M.P. LUONG  
*Fondations ancrées précontraintes pour pylônes électriques.* 12ème Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Rio de Janeiro (Brésil), 13-18 août 1989, Discussion Session n°16, vol. IV.
- P. HABIB, M.P. LUONG, A. MARTIN  
*Ancrages marins en sols coralliens indurés.* 12ème Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Rio de Janeiro (Brésil), 13-18 août 1989, pp. 1017-1018.
- M.P. LUONG  
*Pieux centrifugés sous chargements latéraux dynamiques.* 12ème Congrès Int. de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Rio de Janeiro (Brésil), 13-18 août 1989, pp. 945-946.
- M. GHOREYCHI, P. BEREST  
*Thermomechanical modelling of radioactive waste disposal in salt formations.* 10th SMIRT, Anaheim, CA (USA), 14-18 août 1989, édité par A.H. Hadjian.
- J.M. HABLLOT, J. ZARKA  
*Exact analytical solutions in Elastoplasticity.* 10th SMIRT, Division B conférence invitée, Anaheim,

CA (USA), 14-18 août 1989, édité par A.H. Hadjian.

S.H. LEE, J. ZARKA

*A simplified inelastic dynamic analysis of the maximum and limit states of structures.* 10th SMIRT, LO3/1 conférence invitée, Anaheim, CA (USA), 14-18 août 1989, édité par A.H. Hadjian.

S.H. LEE, J. ZARKA,

*A simplified inelastic seismic analysis of the maximum and limit states of structures.* 10th SMIRT, K16/1, Anaheim, CA (USA), 14-18 août 1989.

M. CHAYE d'ALBISSIN, P. SIRIEYS

*Déformabilité thermique des roches : relations avec leur structure.* Symposium International «Rock at Great Depth» -Mécanique des Roches et Physique des Roches en condition de Grande Profondeur-Pau, 28-31 août 1989.

M. GHOREYCHI, P. BEREST, B. BAZARGAN-SABET, J. ROMAN

*Comportement thermomécanique du sel broyé utilisé comme remblai dans un massif salifère.* Symposium Int. «Rock at Great Depth» -Mécanique des Roches et Physique des Roches en condition de Grande Profondeur-, Pau, 28-31 août 1989.

M.P. LUONG

*Modes fondamentaux de résistance à la rupture du grès de Fontainebleau.* Symposium International «Rock at Great Depth» -Mécanique des Roches et Physique des Roches en condition de Grande Profondeur-, Pau, 28-31 août 1989.

M.P. LUONG

*Observation infrarouge des processus de rupture du sel gemme.* Symposium International «Rock at Great Depth» -Mécanique des Roches et Physique des Roches en condition de Grande Profondeur-, Pau, 28-31 août 1989.

G. ROUSSET, D. BUBLITZ

*Dimensionnement des soutènements dans les roches viscoplastiques : méthode générale et expérience in situ.* Symposium International «Rock at Great Depth» -Mécanique des Roches et Physique des Roches en condition de Grande Profondeur-, Pau, 28-31 août 1989.

M.P. LUONG

*Coulabilité des grains agro-alimentaires ensilés.* Colloque Int. de Micromécanique des Milieux Granulaires, Clermont-Ferrand, 4-8 septembre 1989.

G. ROUSSET, D. BUBLITZ

*Soutènement par cintres coulissants dans une argile profonde.* Congrès International «Progress and Innovation in Tunnelling», University of Western Ontario, Ontario (Canada), 9-14 septembre 1989.

S. AKEL, Q.S. NGUYEN

*Determination of the limit response in cyclic plasticity.* 2nd International Conference on Computational Plasticity, Barcelone (Espagne), 18-22 septembre 1989, D.R.J. Owen, E. Hinton, E. Onate ed., Pineridge Press, Swansea (UK).

J.M. HABLLOT, J. ZARKA

*On the use of an inverse method to build exact solutions in elastoplasticity.* 2nd International Conference on Computational Plasticity, Barcelone (Espagne), 18-22 sept. 1989, D.R.J. Owen, E. Hinton, E. Onate ed., Pineridge Press, Swansea (UK).

M.P. LUONG

*Fracture behaviour of concrete and rock under mode II and mode III shear loading.* International Conference on Recent Developments in the Fracture of Concrete and Rock, Cardiff (UK), 20-22 septembre 1989.

P. BEREST

*Accidents of underground oil and gas storages - Case histories and prevention.* Int. Symposium

«Storage of Gases in Rock Caverns», Trondheim, 1989, Nilsen & Olsen ed., Balkema, Rotterdam, pp. 289-301.

P. BEREST, M. BREWITZ

*Review of selected radionuclide release scenarios and their consequences for the planning of HLW repositories in salt formation.* Int. Symposium on Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, Paris, octobre 1989, à paraître.

J. ZARKA, J.M. HABLLOT

*Learning expert systems in numerical analysis of structures.* International Course «Expert Systems in Structural Safety Assessment», Stuttgart (RFA), 2-4 octobre 1989, Springer-Verlag.

C. STOLZ

*Sur quelques modèles d'endommagement et problèmes d'évolution associés.* MECAMAT, Cetim, Senlis, 5-6 octobre 1989.

Q.S. NGUYEN

*Energetic aspects of elastic-plastic fracture.* ECF Symposium on «Elastic-Plastic Fracture Mechanics : Elements of Defect Assessment», Fribourg (RFA), octobre 1989.

M.P. LUONG

*Fracture strength testing of non metallic materials.* 2nd World Congress on Non Metallic Minerals, Beijing (Chine), 17-21 octobre 1989.

J. ZARKA, J.M. HABLLOT

*A learning expert systems for automatic mesh generation and time increment.* Conférence «FEMCAD 89», Paris, 25-27 octobre 1989, H. Liebowitz & G. Davies ed., Editions IITT International.

M.P. LUONG

*Rhéologie des matériaux en vrac ensilés.* 24ème Colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, «Rhéologie et Industries Alimentaires, Cosmétiques et Pharmaceutiques» Paris, 22-23 nov. 1989.

M. BONNET, H.D. BUI

*On some inverse problems for determining volumic defects by electric current using B.I.E. approaches : an overview.* 6th National Japanese Conference on Boundary Elements Methods, Tokyo (Japon), décembre 1989.

H.D. BUI

*Boundary integral equations approaches to fracture mechanics in 3D and related problems.* 6th National Japanese Conference on Boundary Elements Methods, Tokyo (Japon), décembre 1989.

## ■ COMMUNICATIONS À DES CONGRÈS NON PUBLIÉES

F. GILBERT

*Perméabilité et propagation des ondes en milieu poreux.* Exposé au Laboratoire de Sismologie et de Physique de la Terre, EOPGS Strasbourg, CNRS UA 1358, 21 mars 1989.

A. ANTHOINE

*Une méthode d'analyse de la stabilité des ouvrages en sols renforcés.* Journées Franco-Tunisiennes de Mécanique des Sols, Paris, 18-19 mai 1989.

P. de BUHAN

*Application of the yield design theory to the mechanics of reinforced soils.* Course on «Recent Developments in the Rheology of Geomaterials with Applications to Geotechnical Engineering», Politecnico di Milano, 22-26 mai 1989.

J. SALENÇON

*An introduction to the yield design theory and its applications to soil mechanics.* Course on «Recent Developments in the Rheology of Geomaterials with Applications to Geotechnical Engineering», Politecnico di Milano, 22-26 mai 1989..



- J. SALENÇON, P. de BUHAN, A. TALIERCIO  
*Ultimate strength of Composite Materials*. COMETT, Civil Engineering European Cursus ; Séminaire sur les «Matériaux Nouveaux en Mécanique des Structures», Milan, 22-26 mai 1989.
- J. SALENÇON  
*Yield design of reinforced soil slopes*. XII C.I.M.S.T.F., Rio de Janeiro, 13-18 août 1989.
- Q.S. NGUYEN, X. CHATEAU  
*Bifurcation and stability of conservative systems under unilateral constraints*. Euromech 252 «Bifurcation Phenomena in Solids», Glasgow, 28 août - 2 septembre 1989 et 9ème Congrès Français de Mécanique, Metz, 5-8 septembre 1989 .
- Q.S. NGUYEN, C. STOLZ  
*Stability, bifurcation and second variations of energy in plasticity and in fracture*. Euromech 252 «Bifurcation Phenomena in Solids», Glasgow, 28 août - 2 septembre 1989.
- C. STOLZ  
*Bifurcation and stability analysis in damage mechanics*. Euromech 252 «Bifurcation Phenomena in Solids», Glasgow, 28 août - 2 septembre 1989.
- M. BONNET  
*Equations intégrales régulières et dérivation par rapport à un domaine variable : application à une classe de problèmes inverses en élasticité linéaire*. 9ème Congrès Français de Mécanique, Metz, 5-8 septembre 1989.
- P. de BUHAN, S. MAGHOUS  
*Critère de rupture macroscopique pour un milieu poreux à structure périodique*. 9ème Congrès Français de Mécanique, Metz, 5-8 septembre 1989.
- H. MAIGRE  
*Facteurs d'intensité dynamique des contraintes tirés des grandeurs mécaniques globales*. 9ème Congrès Français de Mécanique, Metz, 5-8 septembre 1989.
- C. STOLZ  
*Sur la dynamique des milieux continus anélastiques et la fonction génératrice du choc*. 9ème Congrès Français de Mécanique, Metz, 5-8 septembre 1989.
- M.P. LUONG  
*Endommagement des sols sableux*. Exposé au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines, SNEC-MA, Corbeil, 10 octobre 1989.
- H.D. BUI, S. TAHERI  
*Stress singularities and discontinuities at the free surface of a bimaterial in thermoelastoplasticity*. Euromech Colloquium on «Thermal Effects on Fracture of Multiphase Materials», Paderborn, novembre 1989.
- M.P. LUONG  
*Fondations précontraintes*. FORUM SPORE, Université de Toulouse, 10 novembre 1989.
- M.P. LUONG  
*Contrôle non destructif et sans contact des défauts par thermovision infrarouge*. FORUM SPORE, Université de Toulon, 10 novembre 1989.
- A. ANTHOINE  
*Application du calcul à la rupture en Mécanique des Sols*. «Séminaire de Mécanique des Sols Appliquée», Université de Costa Rica, 27 novembre - 1er décembre 1989.
- J. SALENÇON  
*Introduction à la théorie du calcul à la rupture et application à la mécanique des sols*. Journée d'étude «Le Calcul à la Rupture en Mécanique des Sols : Développements Récents et Applications», E.N.P.C., 6 décembre 1989.

## ■ THÈSES

P. BEREST

*Problèmes de mécanique associés au stockage souterrain.* Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines, Spécialité Technique et Economie de l'Entreprise Minière, Paris, 10 février 1989.

N. ABOU EZZI

*Modélisation du comportement non linéaire du béton par la mécanique de l'endommagement.* Thèse de Doctorat de l'Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, 13 mars 1989.

C. NGUEDJIO FOUPEPE

*Amorçage des fissures de fatigue et probabilité.* Thèse de Doctorat de l'Université Technologique de Compiègne, septembre 1989.

H. MAITOURNAM

*Formulation et résolution numérique des problèmes thermoviscoplastiques en régime permanent et en HPP.* Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 27 novembre 1989.

R. NAJCHAUS

*Effets de bords dans les plaques composites multicouches.* Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 22 décembre 1989.

## ■ COURS

J. SALENÇON

*Mécanique des Milieux Continus.* Cours à l'Ecole polytechnique, édition 1989, 671 pages.

## ■ NOTES INTERNES

M. BONNET

*Un aperçu des approches existantes pour la description mathématique et la résolution des problè-*

*mes inverses.* Note interne LMS n° 14, 1989, 48 pages.

## ■ FILMS

M. GHOREYCHI, P. BEREST, B. BAZARGAN SABET, J. ROMAN

*Un essai thermomécanique dans une mine de sel.* Film réalisé à la suite de l'essai in situ aux Mines de Potasse d'Alsace.

M.P. LUONG

*Fondations précontraintes pour structures élancées.* IMAGICIEL 1989, Ecole polytechnique, version française et version anglaise (Prestressed foundations for slender structures).

## ■ BREVETS

A. MARTIN, P. HABIB, M.P. LUONG

*Piste de roulement d'urgence et son procédé de mise en œuvre.* Brevet BF 89.09746 déposé le 13 juillet 1989.

# LABORATOIRES DE RECHERCHE

## BIOLOGIE

Biochimie (BIOC)

## CHIMIE

Chimie Fine (DCFI)

Phosphore & Métaux Transition (DCPH)

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)

Milieus 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)

