

Section 2

RAPPORT

SCIENTIFIQUE

- Chapitre 1 : pôle Géomécanique et Risques Environnementaux

- + Equipe Géomatériaux, Déformation, Rupture p.2
- + Equipe Risque et Vulnérabilité p.14
- + Equipe Géomécanique et Ouvrages p.26

- Chapitre 2 : pôle Mécanique des Matériaux et de l'Environnement

- + Equipe Mécanique des Matériaux Solides et des Milieux Complexes p.38
- + Equipe Mécanique et Couplages Multiphysiques en Milieux Hétérogènes p.53

- Chapitre 3 : pôle Conception Intégrée

- + Thème Méthodologie pour la conception collaborative p.72
- + Thème Intégration produit-cycle de vie en conception p.83
- + Thème Maquettes virtuelles pour la représentation du produit p.92

Pôle Géomatériaux et Risques Environnementaux

Le Pôle « Géomécanique et Risques Environnementaux » effectue des recherches sur le comportement mécanique des géomatériaux et matériaux naturels (sols, roches, bétons, neige) ainsi que sur le comportement des structures et géoouvrages associés. Il s'attache à maintenir un équilibre entre les études théoriques (sur la localisation, les critères d'instabilité, les couplages multiphysiques,..), l'expérimentation fine en laboratoire par des mesures de champs ou la modélisation physique des ouvrages, et les méthodes numériques avancées, en particulier la méthode des éléments discrets. Ces recherches trouvent des domaines applicatifs très variés, depuis les ouvrages sous sollicitations extrêmes (séismes, impacts, mouvements gravitaires, houle et tempêtes) jusqu'aux problèmes de tunnels et de stockages de déchets en profondeur. Les dernières années ont été marquées par une réorganisation de notre plate-forme expérimentale grâce à l'implantation de la presse GIGA, outil exceptionnel permettant d'étudier le béton sous des confinements allant jusqu'à 1 Gpa, et par une ouverture vers les problèmes de géo-environnement et les applications médicales des outils conceptuels de la géomécanique.

Le Pôle est un élément moteur dans la Fédération RNVO (Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages) et dans la création du nouveau GIS « VOR » (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques). Il comprend une vingtaine de chercheurs et d'enseignants –chercheurs permanents (dont 2 CNRS) et un effectif moyen annuel d'une trentaine de doctorants. Il s'est structuré en trois équipes de recherche d'effectif à peu près équilibré : Géomatériaux, Déformation et Rupture, Géomécanique et Ouvrages, Risques et Vulnérabilité. L'activité des différentes équipes est présentée ci-après.

Le pôle est soutenu techniquement par des personnels communs notamment pour les expérimentations, l'informatique, et le secrétariat

Secrétariat : Carole DI DONATO (arrivée en 2005), Véronique DUENY, Isabelle SIBUT (partie en 2005)

Informatique : Cédric EYRAUD, Michel CAPLAIN

Expérimentation : Christophe ROUSSEAU, Pascal CHARRIER, Gabriel PICAUD, Bernard REY, Alexandre MARTIN, Roger SABBIA

1 - Géomatériaux, Déformation et Rupture

L'équipe « Géomatériaux, Déformation et Rupture » développe depuis la création du laboratoire 3S une thématique centrée sur *la modélisation des processus de déformation dans les sols et les roches*. Notre approche vise à intégrer deux niveaux intimement imbriqués : *le global et le local*. En effet, dans les géomatériaux comme dans beaucoup de matériaux, la déformation peut être diffuse, mais aussi localisée ; et de plus on peut considérer la déformation à l'échelle du continu, mais aussi à l'échelle de la micro-structure. Notre objectif est de comprendre pour les modéliser les phénomènes mis en jeu dans la déformation, l'endommagement et la rupture des géomatériaux, dans une démarche de sciences de l'ingénieur au service du génie civil et environnemental.

La **localisation de la déformation**, et la **micro mécanique**, sont ainsi les deux thèmes fédérateurs de nos travaux. Au service de ces objectifs, nous développons des travaux expérimentaux, théoriques, et numériques étroitement intégrés. Le *caractère fondamental* de nos études apparaît à travers l'originalité des projets expérimentaux réalisés au cours des quinze dernières années (machine $1\gamma 2\epsilon$, essais biaxiaux avec mesures de champs, tomographie numérisée...) et le souci de prendre en compte les aspects mathématiques liés à nos développements théoriques et numériques ; ce qui ne nous empêche pas de nous engager dans des études finalisées sur des problèmes posés par nos partenaires industriels.

Les membres de l'équipe au cours de la période 2002-2005 ont été :

Responsable : Gioacchino VIGGIANI Pr. UJF

Chercheurs permanents : Pierre BESUELLE CR CNRS, Denis CAILLERIE Pr. INPG, René CHAMBON Pr. UJF, Jacques DESRUES DR CNRS, Panagiotis KOTRONIS MCF UJF depuis septembre 2004, Cristian DASCALU Pr. UJF depuis janvier 2005, Yannick SIEFFERT depuis septembre 2005, Jack LANIER (parti en 2003).

Doctorants : Samah AL-HOLO 2001-2005, Gabriela BILBIE MESR 2003-2006, Cécile COLL MESR 2001-2005, Roméo FERNANDES EDF 2005-2008, Mehdi HOSSEINI boursier SFERE 2001-2005, Nicolas LENOIR ANDRA 2002-2005, Stefania MARELLO co-tutelle franco-italienne 2001-2004, Jean-Christophe MOULLET MESR 2000-2003, Ayman MOURAD 2001-2004

Post-doc : Eleni AGIASOFITOU (1 an), Cécile CLAQUIN (1 an), Frédéric COLLIN (1 an), Stephen A. HALL (2 ans)

Visiteurs : Claudio TAMAGNINI, 2x3 mois

Stagiaires 3 mois minimum : Marco DELL'AMICO, Fiorenza DE SANCTIS, Michela DI FEO, Francesco FROIO, Ioannis-Orestis GEORGOPOULOS, Piotr GLOWACKI, Martino LEONI, Stefania LIRER, David MASIN, Stefanos PAPANIKOLOPOULOS, Claudia VITONE, Vikas THAKUR

Dans ce rapport d'activité, l'exposé de nos principaux travaux et de nos perspectives est organisé comme suit :

- ❖ Déformation (diffuse et localisée) et rupture dans les sols et les roches
- ❖ Couplage perméabilité et endommagement en régime diffus et localisé
- ❖ Milieux avec microstructure (milieux enrichis) : localisation et post localisation, effets d'échelles
- ❖ Lois de comportement, Bifurcation dans les problèmes aux limites
- ❖ Micromécanique, homogénéisation et modélisation multi-échelle

1-1 Déformation (diffuse et localisée) et rupture dans les sols et les roches

Acteurs : *CHERCHEURS* Pierre BESUELLE, Jacques DESRUES, Gioacchino VIGGIANI, *DOCTORANTS* Mehdi HOSSEINI, Nicolas LENOIR, Stefania MARELLO, *POST-DOCTORANTS* Stephen A. HALL, *VISITEURS* Fiorenza DE SANCTIS, Ioannis-Orestis GEORGOPOULOS, Vikas THAKUR, Claudia VITONE

Publications : Revues à CL : A-BES03-911, A-DES04-338, A-DES04-843, A-HAL05-145, A-SAO05-146, A-VIG04-617, ouvrages : O2-BES04-298, O2-DES03-306, O2-DES04-594, O2-DES05-044, O2-VIG04-923, Actes à CL : B1-BES04-420, B1-DES04-501, B1-HOS05-999, B1-LEN04-432, B1-MAR04-471, Thèse T-MAR04-381, autres actes et séminaires non listés.

1-1-1 Etude expérimentale de la localisation en conditions de déformation plane

L'appareil biaxial du laboratoire 3S a été spécifiquement conçu pour étudier la naissance et le développement de la localisation (bandes de cisaillement, fissures) dans les sols pulvérulents, les argiles et les roches tendres. Dans la période 2002-2005, nous avons mené avec cette installation des études nouvelles, de deux points de vue principalement : d'une part nous avons étudié les conditions de localisation dans une large gamme de matériaux, y compris des roches volcaniques poreuses et des roches argileuses à structure fine, et d'autre part nous avons intégré au biaxial un dispositif de mesure de l'émission acoustique associée aux phénomènes d'endommagement. Cette dernière opération a été réalisée dans le cadre du stage post-doctoral de S. Hall (voir *propagation d'ondes* ci-dessous). Une campagne d'essais particulièrement complète a été effectuée sur une roche pyroclastique (*Tufo Giallo Napoletano*) qui constitue la formation de base du sous-sol de la ville de Naples en Italie. L'appareil biaxial permet de visualiser les trajectoires de propagation des fissures (une face de l'échantillon est visualisée tout au long de son chargement grâce à un hublot transparent). En particulier, on a étudié en détail la naissance et le développement sous compression de fissures à partir de deux amorces préalablement réalisées dans les échantillons. Cela nous a permis de quantifier l'influence de la géométrie des ponts de roches (espace entre les deux amorces) et leur interaction avec les défauts naturels (Fig. 1). La seconde étude expérimentale majeure a été menée sur l'argile de Boom et sur l'argile à Opalinus, dans le cadre du programme européen SELFRAC (voir *couplage perméabilité et endommagement* ci-dessous). D'autres campagnes expérimentales, d'ampleur plus réduite, ont été menées sur une autre roche volcanique tendre (*Pozzolana Nera*) ainsi que sur des argiles à structure complexe (*scaly clay* du sud de l'Italie). Une campagne particulièrement originale est actuellement en cours sur une argile norvégienne dont la stabilité structurale est très faible (*quick clays*) en collaboration avec l'université de Trondheim en Norvège.

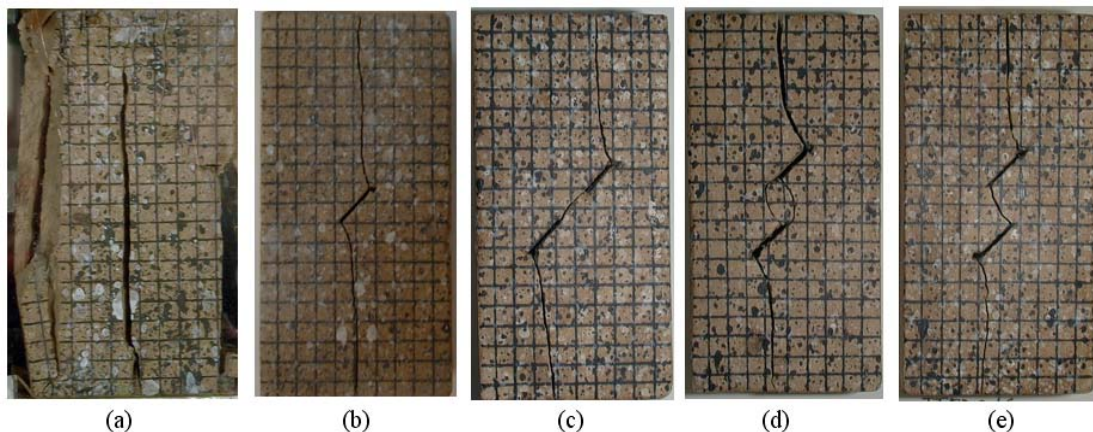


Fig. 1: Développement de fissures dans des échantillons de « Tufo Giallo Napoletano » à partir d'amorces réalisées préalablement suivant différentes géométries.

1-1-2 Développement d'un nouveau dispositif d'essai pour échantillon de roche

Dans le cadre d'une ACI jeunes chercheurs (période 2003-2006), nous sommes en cours de développement d'un nouveau dispositif expérimental pour tester des échantillons de roches (plus raides qu'avec l'appareil précédent) et qui permette de visualiser les échantillons en cours de chargement afin d'effectuer une analyse par mesure de champs, le but étant notamment d'étudier la rupture par localisation. Ce travail est mené en lien étroit avec la problématique de modélisation en régime post-localisé.

1-1-3 Micro-tomographie d'essais « in situ » sur sols et roches

Dans la continuité d'études antérieures utilisant la tomographie numérique pour caractériser le phénomène de localisation, nous avons réalisé des travaux utilisant la micro-tomographie à rayons X (mesure à très haute résolution). Nous avons effectué trois campagnes d'essai sur des matériaux naturels argileux avec chargement mécanique au synchrotron de Grenoble (ESRF). Les mesures de micro-tomographie ont été effectuées *in situ*, c'est à dire sous chargement. Pour cela, nous avons développé un nouveau dispositif de chargement, ultra léger et transparent aux RX. On a pu observer de ce fait avec une assez bonne précision (résolution de 14 μm) l'apparition de la rupture, soit sous forme de bande de déformation (visible par la variation éventuelle de porosité à l'intérieur de la bande), soit sous forme de fissure. On a pu également étudier, grâce à des reconstructions 3D des échantillons, les interactions entre l'organisation spatiale des zones de localisation et les hétérogénéités initiales du matériau. Par ailleurs, nous commençons une étude sur l'analyse 3D du champ de déformation par des méthodes de corrélation d'image (collaboration avec le LMS Palaiseau).

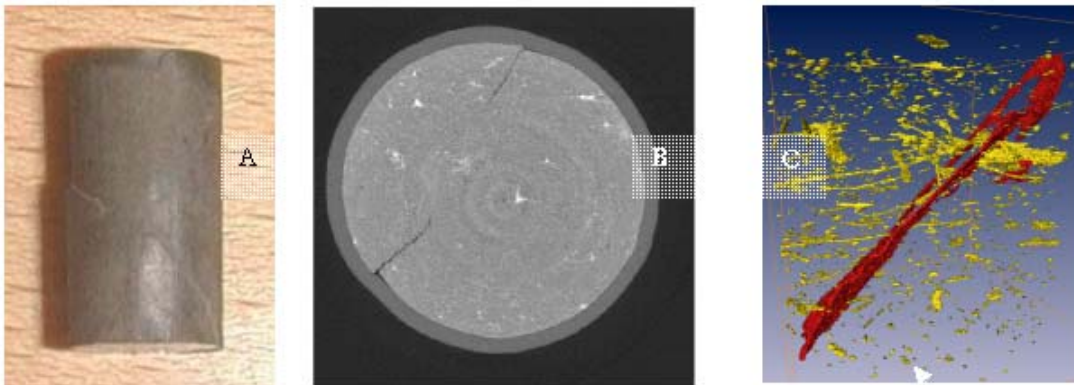


Fig. 2 : Echantillon d'argilite testé sous un confinement de 10 MPa. (A) trace du plan de rupture visible sur la surface de l'échantillon après essai ; (B) section de l'échantillon montrant la trace du plan de rupture ; et (C) reconstruction 3D de l'échantillon, avec en rouge la fissure ouverte et en jaune les inclusions préexistantes.

1-1-4 Propagation d'ondes dans les milieux déformés (Bourse européenne Marie Curie)

Nous avons également développé une action sur les mesures d'émissions acoustiques (EA) lors d'essais mécaniques sur des roches tendres, en association avec des mesures de champs. L'analyse d'EA permet de caractériser l'endommagement du matériau par micro-fissuration. Nous avons effectué des analyses avancées (énergie, spectre de fréquence), de manière à déterminer la nature de la micro-fissuration (mode en ouverture ou en cisaillement). Par ailleurs, nous commençons une activité de tomographie ultra-sonore, en lien avec la tomographie RX, en effectuant des mesures de champs de vitesse de propagation d'onde. Une collaboration sur ce thème a été entamée avec l'Université Heriot-Watt au Royaume-Uni.

1-1-5 Essais de stabilité au triaxial axisymétrique sur sable en contrôle mixte

Pour étudier l'existence, annoncée par certains auteurs, d'un mode de déformation à la rupture essentiellement diffus c.a.d. non-localisé dans les essais dits « instables » qu'on peut réaliser sur des sables lâches soumis à un contrôle simultané de la déformation volumique et de la charge axiale (contrôle en force), un dispositif original de contrôle mixte déplacement-force a été imaginé. Celui-ci permet de réaliser des

incréments de déformation dynamiques mais petits, de manière ensuite à observer le mode de déformation produit lors de ces incréments. Ce dispositif a été réalisé et mis au point avec succès, les premiers essais ont montré des modes de déformation sans localisation apparente. Toutefois, seuls des essais (à venir) avec mesure de champ de déformation interne (tomographie 3D ou déformation plane) permettront de trancher le débat.

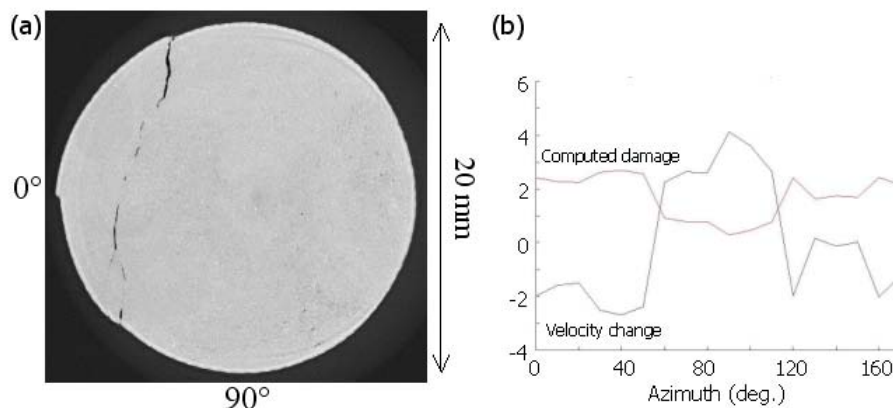


Fig. 3 : (a) coupe tomographique rayons X d'un échantillon de marne, (b) profils de vitesse de propagation d'ondes selon divers chemins (diamètres) et d'endommagement déduit.

1-1-6 Fluage stimulé : le challenge des grandes échelles de temps pour les stockages souterrains

Le comportement aux grandes échelles de temps est un défi pour l'expérimentation. Il y a des cas où on ne peut pas envisager des essais aux durées représentatives de celles des ouvrages à étudier (exemple des stockages de déchets nucléaires). Dans ces conditions, il est intéressant d'explorer les idées visant à réaliser une homothétie sur le temps. C'est dans cet esprit que nous avons engagé une étude de faisabilité de ce que nous avons appelé le « Fluage Stimulé » (Cyclic creep). Il s'agit de tenter d'accélérer le phénomène, sans en changer la nature, par une modulation plus ou moins forte de la charge de fluage appliquée aux échantillons. Nous avons étudié et réalisé une modification du dispositif de chargement sur trois bâtis de fluage requalifiés, qui sont actuellement opérationnels. La régulation en température est un aspect important. Une campagne d'essais dans le cadre du programme Géomécanique du GDR Forpro est en cours.

1-2 Couplage perméabilité et endommagement en régime diffus et localisé

Acteurs : *CHERCHEURS* Pierre BESUELLE, Jacques DESRUES, Gioacchino VIGGIANI, *DOCTORANTS* Cécile COLL, Mehdi HOSSEINI, Nicolas LENOIR

Publications : ACL : B1-COL03-388, B1-COL03-390, B1-HOS05-999, autres actes et séminaires non listés, Thèses T-HOS05-367, T-COL05-362, rapports de contrat : E-COL03-373, E-COL05-374

1-2-1 Mesures d'évolution de la perméabilité des argilites sous chargement mécanique, en relation avec les stockages

Deux roches argileuses ont été étudiées en détail du point de vue de l'endommagement induit par un chargement mécanique jusqu'à la rupture, et de l'évolution de perméabilité en rapport. Ces matériaux provenaient des sites des laboratoires souterrains respectivement Belge (Boom Clay, site de Mol) et Suisse (Opalinus Clay, site de Mont Terri). Le contexte de l'étude était celui d'un important contrat européen du programme Euratom du 5ième PCRD (SELFRAC). Nous avons mené ces études en utilisant notre cellule triaxiale haute pression pour les roches. Cette cellule permet d'appliquer des confinements élevés (60 MPa), tout en offrant la possibilité de faire s'écouler un fluide sous pression dans l'échantillon, de la tête vers le pied ou inversement, en vue de réaliser des mesures de perméabilité (percolation, pulse tests). Une attention

particulière a été portée à la détection de la naissance de la localisation, avec des capteurs de déplacement locaux internes à la cellule. La grande difficulté dans ces essais a été la très faible perméabilité du matériau, qui impose des durées de consolidation et d'équilibrage des pressions de pore extrêmement longues (certains essais ont duré trois mois). En dépit de ces difficultés, un ensemble cohérent de données expérimentales a été obtenu, qui a servi de base aux travaux de modélisation entrepris dans le cadre du même contrat par notre équipe et d'autres, et qui, de l'avis des experts réunis pour la thèse de Cécile Coll, est appelé à faire référence sur ces matériaux particulièrement étudiés.

1-2-2 Micro essais hydromécaniques - le challenge des petites échelles d'espace

Nous sommes en train de mettre au point un dispositif de mesure de la perméabilité dans les roches argileuses sur petits échantillons, en cours de chargement, dans le but de quantifier les variations de perméabilité induites par l'endommagement diffus ou localisé. L'intérêt attendu au fait de travailler sur une taille réduite d'échantillon (quelques millimètres au lieu de quelques centimètres en taille standard) est de diminuer les temps de mesure très significativement, tout en respectant des principes de qualité sur les essais mécaniques (rapport hauteur/diamètre, taille du volume élémentaire raisonnable compte tenu de la microstructure du matériau). Le temps pour effectuer des mesures de perméabilité est en effet une limite expérimentale, il peut atteindre plusieurs semaines voire mois sur les tailles standard d'échantillon. Les premiers essais devraient débiter à l'automne de cette année.

1-2-3 Effet du couplage hydromécanique sur les instabilités de paroi d'excavation (venue de sable)

Les phénomènes d'instabilité des parois de forage sont source de nombreuses difficultés dans l'exploration et la production pétrolière. Aux contraintes dues à l'excavation elle-même viennent s'ajouter, lorsqu'un fluide est drainé vers le forage, les forces de volume dues à la percolation du fluide dans le milieu poreux. Ces forces peuvent aggraver le risque de rupture en paroi, ou provoquer des venues de sable préjudiciables à l'exploitation. Pour étudier ces phénomènes expérimentalement, nous avons développé un dispositif d'essai sur cylindre creux, permettant d'appliquer indépendamment une pression totale et une pression de pore sur la face externe du cylindre, et une pression totale sur la face interne. Le volume de fluide percolant à travers le cylindre est mesuré. Cette étude, menée sur un matériau modèle assimilable à un grès très poreux, a permis de mettre en évidence des structures de rupture contractantes remarquables, susceptibles de favoriser l'érosion interne du massif.

1-3 Milieux avec microstructure (milieux enrichis) : localisation et post localisation, effets d'échelles

Acteurs : *CHERCHEURS* : Pierre BESUELLE, Denis CAILLERIE, René CHAMBON, Jacques DESRUES, Panagiotis KOTRONIS, Gioacchino VIGGIANI, *collaboration internationale* : Claudio TAMAGNINI (Université de Perugia en Italie), Frédéric COLLIN (Université de Liège), Stefanos Aldo PANICOLOPOULOS (NTU Athens), *DOCTORANTS* : Jean-Christophe MOULLET, Sama AL HOLO, Roméo FERNANDES

Publications : Revues à CL : A-CHA01-783, A-CHA01-904, A-TAM01-900, A-MAT02-901, A-CHA04-474, A-CHA04-601, A-COL05-195, A-BES05-024 Actes à CL B1-CHA01-652, O2-MAT01-011, B1-MOU02-105, B1-CHA04-605, B1-KOT05-992 I-BES05-020, B1-LAM05-178 autres actes et séminaires non listés.

Il est désormais bien connu (en se basant aussi bien sur des observations expérimentales que sur l'analyse de la dépendance du maillage des calculs classiques) qu'une modélisation de la post localisation, c'est à dire dans la plupart des cas du comportement post rupture d'une structure implique l'introduction dans la modélisation d'une longueur interne.

Afin de surmonter ces difficultés, nous avons développé une théorie de milieux de second gradient «locaux» appliquée dans un premier temps dans le cadre élastoplastique. Cette théorie repose sur la théorie plus générale des milieux avec microstructure de Germain. Elle s'élabore dans un premier temps comme une théorie de milieu continu enrichi sans référence particulière à une loi de comportement. Dans ce cadre nous avons développé une formulation variationnelle à deux champs dans lesquels la relation entre gradient et

second gradient est écrite de façon faible à l'aide de multiplicateurs dont l'interprétation peut être faite dans le cadre d'un matériau avec microstructure.

Au cours des années passées, cet axe de recherche s'est enrichi dans plusieurs directions que nous allons examiner plus en détail.

1-3-1 Le Benchmark MOMAS

Ce Benchmark auquel nous avons participé activement en coopération avec l'Université de Liège a été une nouvelle occasion de mettre en évidence les défauts patents des modélisations usuelles en cas de localisation. Cet exercice proposé par le GDR MOMAS du CNRS a consisté en un exercice de modélisation couplée (hydromécanique, ce qui en faisait l'originalité) d'un problème modèle de creusement et de tenue en service d'une alvéole de stockage de déchets radioactifs. La loi proposée modélisait la dégradation des propriétés mécaniques au travers d'une loi de comportement élastoplastique radoucissante. Malgré le couplage hydromécanique, on a pu constater (comme nous nous y attendions) une dépendance importante au maillage, et à diverses conditions du calcul. L'utilisation d'un milieu enrichi s'avère incontournable. Notre équipe (commune avec Liège) a obtenu le premier prix de ce benchmark.

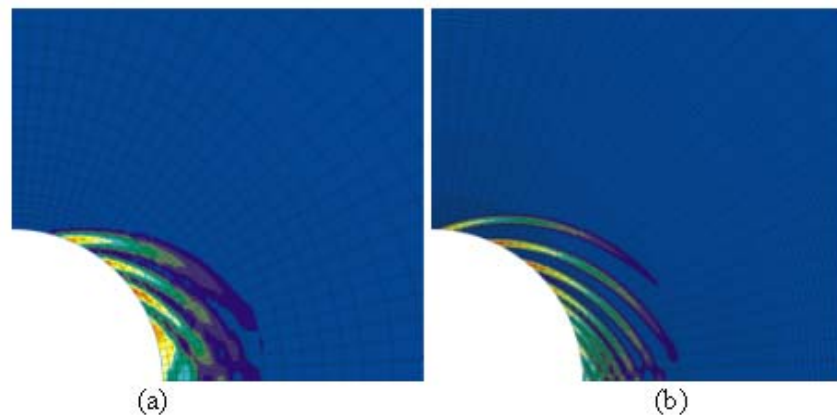


Fig. 4 : Calcul hydromécanique (d'un quart) d'une excavation dans un milieu radoucissant (benchmark MoMas) en vue de modéliser le creusement et la durée de vie d'une structure de stockage de déchet radioactif. Les isovalues des déformations déviatoriques plastiques sont reportées. Les calculs ne diffèrent qu'en ce qui concerne la taille du maillage : a) maillage grossier b) pour un maillage fin. La localisation apparaît nettement dépendre du maillage.

1-3-2 Introduction du modèle de second gradient dans divers codes

Les années qui viennent de s'écouler ont vu l'implémentation de l'élément second gradient dans le logiciel LAGAMINE (que nous co-développons avec nos partenaires de Liège), et son environnement convivial CONVILAG. Ce travail a été réalisé par P. Bésuelle lors de son séjour à Liège. Dans le cadre d'une coopération avec EDF, cet élément est en cours d'implémentation dans le code ASTER.

1-3-3 Introduction des stratégies de calcul automatiques dans LAGAMINE

Afin de modéliser le comportement post-pic et l'évolution de la zone localisée il est nécessaire de pouvoir reproduire des comportements de type « snap-back » ou « snap-through ». Plusieurs types de stratégies automatiques ont été implémentées dans LAGAMINE (longueur d'arc, updated normal plane...) La performance de chaque méthode a été testée avec des exemples 'test' de la littérature et l'application aux problèmes de second gradient est en cours.

1-3-4 Développement de lois de comportement pour milieux avec microstructure

L'un des avantages de la théorie que nous développons est sa grande adaptabilité à diverses classes de lois de comportement classiques (hypoplasticité, endommagement, etc). Les premiers tests effectués avec notre modèle de second gradient le furent avec un modèle hypoélastoplastique (déviatoire) avec radoucissement

brusque. Depuis nous avons développé une théorie d'hyperélastoplasticité second gradient qui n'est pas encore implémentée. Enfin, partant du modèle d'endommagement de Mazars, modèle de référence du comportement des bétons, nous développons actuellement un modèle d'endommagement second gradient dont les premiers résultats sont prometteurs.

1-3-5 Milieux enrichis dans le cadre des phénomènes couplés

Comme nous l'avons vu précédemment le couplage (notamment hydromécanique) ne permet pas de surmonter le problème d'une description objective de la phase post localisée, même s'il semble que le couplage induise une échelle caractéristique. Afin d'une part de pouvoir utiliser des milieux enrichis dans le cadre des problèmes couplés et d'autre part d'étudier au travers d'expériences numériques l'interaction des deux échelles (couplage et second gradient), nous avons développé un élément second gradient couplé (en totalement saturé) en coopération avec le FNRS (Belgique) et l'université de Liège dans le cadre de la poromécanique. Cet élément est un élément à quatre champs (gradient, second gradient, multiplicateur de Lagrange, pression de fluide). Ce travail qui va paraître est désormais validé et va être étendu à des couplages moins restreints (non saturation, thermique, THM, etc).

1-3-6 Généralisation de l'algorithme de recherche de bifurcation

Les problèmes que nous traitons sont hautement non linéaires, et même d'un certain point de vue non linéarisables. Une analyse de bifurcation par étude spectrale d'une matrice (laquelle ?) est en fait exclue (n'oublions pas que la plupart de nos matériaux sont non standard). Par ailleurs nous avons montré depuis plusieurs années que l'enrichissement ne restaurait pas l'unicité de la solution des problèmes aux limites. Il est donc crucial d'étudier dans tous les cas la perte d'unicité (la bifurcation). Nous avons donc étendu aux problèmes couplés (classiques et avec second gradient) l'algorithme de recherche de bifurcation mis au point précédemment pour un problème classique purement mécanique. En ce qui concerne les problèmes purement mécaniques avec second gradient, nous avons montré que même en présence d'un défaut, l'unicité n'était pas restaurée. Ce résultat se vérifie aussi pour des problèmes moins académiques comme le biaxial. C'est ainsi que nous avons pu mettre en évidence la multiplicité des solutions (pour des calculs avec et/ou sans défaut initial) pour un problème de creusement de puits, multiplicité qui rappelle l'ensemble des structures de localisation mises en évidence par les expériences.

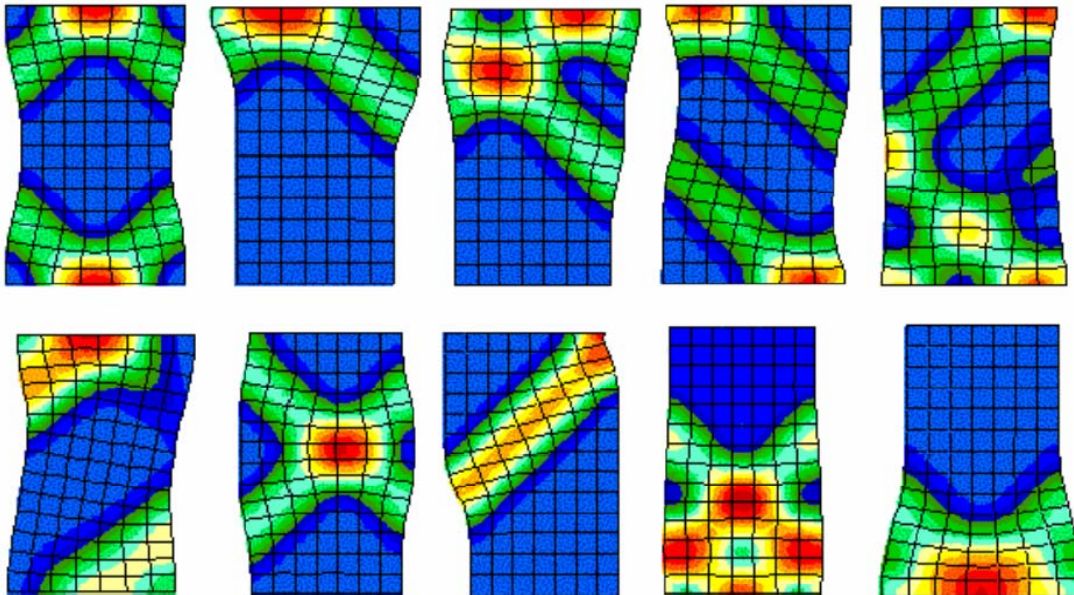


Fig. 5 : Exemples de solutions non homogènes obtenues par un algorithme de recherche directionnel après le que le seuil de bifurcation soit satisfait (à partir de la solution homogène). Les solutions montrées (après 10 % de raccourcissement total pour la plupart) comportent 1, 2 ou 3 bandes, certaines bandes pouvant s'être désactivées lors du chargement.

1-3-7 Problèmes de surface et modèles de second gradient

Dans le cadre d'une coopération avec la NT Université d'Athènes (I. Vardoulakis), et également en coopération avec l'université de Liège, nous avons développé l'implémentation de conditions aux limites non naturelles pour les milieux de second gradient. Ce travail en cours de finalisation a pour objet de traduire des comportements de surface notamment dans le cadre de problèmes de micro indentation.

1-4 Lois de comportement, Bifurcation dans les problèmes aux limites

Acteurs : *CHERCHEURS* : Pierre BESUELLE, Denis CAILLERIE, René CHAMBON, Cristian DASCALU, Jacques DESRUES, Jack LANIER, Gioacchino VIGGIANI, *collaboration internationale* : Claudio TAMAGNINI (Université de Perugia en Italie), Frédéric COLLIN (Université de Liège), David MASIN (Charles University, Prague)

Publications : Revues à CL : A-CHA01-650, A-DES02-653, A-DES02-920, A-HOM02-648, A-CHA03-248, A-CAI04-604, A-CHA04-603, A-CHA04-492, A-LAN04-742, A-CHA04-492, A-CHA05-877, A-DAS02-932, A-DAS04-940, A-DAS04-937 Actes à CL O2-TAM01-628, O2-CHA01-651, O2-CHA02-247, B1-CHA03-493, B1-MAS05-377, B-DAS02-955 autres actes et séminaires non listés.

Ce thème se divise en deux sous thèmes distincts bien qu'en étroite dialogue, d'une part les développements autour de notre modèle CLoE et d'autre part des études théoriques portant sur le problème mathématique de l'existence et de l'unicité des solutions d'un problème aux limites en vitesse.

1-4-1 Développements autour du modèle hypoplastique CLoE

Depuis les publications historiques de J. Rice et de I Vardoulakis, on sait que l'émergence de la localisation nous donne en fait une information subtile sur le comportement des matériaux en question. Cette idée a été à la base du développement dans les années 80 de notre modèle CLoE. Ce modèle permet en effet de prédire l'occurrence de la localisation et de relier ce résultat à des « modules » de cisaillement. Ce point de vue induit une interprétation de l'apparition du « pic » dans les expériences courantes de laboratoire non comme un comportement de dégradation homogène mais comme l'apparition d'un comportement localisé (éventuellement liée à une dégradation locale). Au cours de la période écoulée, CLoE et les concepts précités ont été appliqués avec succès au comportement d'une argilite. Le modèle a par ailleurs été amélioré à des matériaux surconsolidés. Des études théoriques ont été conduites sur des versions simplifiées de CLoE afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces modèles. La grande influence de l'anisotropie (induite) sur la propension à localiser a ainsi été mise en évidence. Enfin nous avons mis un point final à un débat qui durait depuis longtemps avec l'école de Karlsruhe en démontrant à nouveau l'objectivité de notre méthode en ayant recours aux développements sur les fonctions tensorielles de tenseurs.

1-4-2 Etudes de bifurcation pour des matériaux incrémentalement non linéaires

Comme nous l'avons déjà remarqué, compte tenu de la non linéarité intrinsèque du comportement des géomatériaux, il est impossible d'effectuer une analyse de bifurcation par étude spectrale d'une matrice. Il n'y a donc pas de méthodologie générale pour effectuer des études théoriques de bifurcation pour un problème non linéaire. Au cours de la période écoulée nous avons obtenu quelques résultats théoriques généraux (indépendant jusqu'à un certain point de la loi de comportement utilisée).

C'est ainsi que nous avons mis en évidence sur un exemple simple la disjonction des notions de bifurcation et de stabilité du moins lorsque ces dernières sont correctement définies.

Par ailleurs par utilisation systématique des propriétés de monotonie aussi bien au niveau local (comportement) que global (structure) nous avons mis en évidence le lien entre cette propriété et l'unicité, ce qui amène un traitement unifié des problèmes avec modèles hypoplastiques et de ceux avec modèles élastoplastiques à un seul mécanisme.

Enfin nous avons généralisé à un modèle de comportement quelconque le résultat de Nova sur l'équivalence entre contrôlabilité et perte de positivité du travail du second ordre, que celui-ci avait établi pour un modèle élastoplastique à un mécanisme. De ce dernier résultat, on peut conjecturer qu'au moins en petite déformation, la positivité du travail du second ordre est la condition optimale générale d'unicité (c'est à dire indépendante des détails du problème tels que conditions aux limites etc). Cela montre aussi que pour les géomatériaux, matériaux non standard au sens large, comme le travail du second ordre perd sa positivité bien avant la « surface limite », les risques de perte d'unicité sont quasi certains pour des sollicitations modérées.

1-4-3 Instabilités de frottement sur des failles tectoniques : application à l'initiation des séismes

Nous avons modélisé l'apparition des comportements dynamiques instables associés au déclenchement d'un séisme, en considérant des lois de frottement dépendantes du glissement sur les plaques tectoniques. Le comportement catastrophique sismique est modélisé par l'apparition du comportement dynamique instable engendré par les conditions de frottement. L'affaiblissement de la résistance de la force de frottement est responsable du glissement rapide au cours d'un tremblement de terre. Nous avons étudié la stabilité du problème dynamique par une analyse spectrale, dans le cas d'une faille finie isolée ou d'une distribution périodique de failles. Les résultats ont été vérifiés par comparaison avec des simulations numériques en différences finies. Nous avons montré l'existence d'une constante (qui dépend seulement de la géométrie du problème) qui sépare le comportement stable de celui à évolution catastrophique.

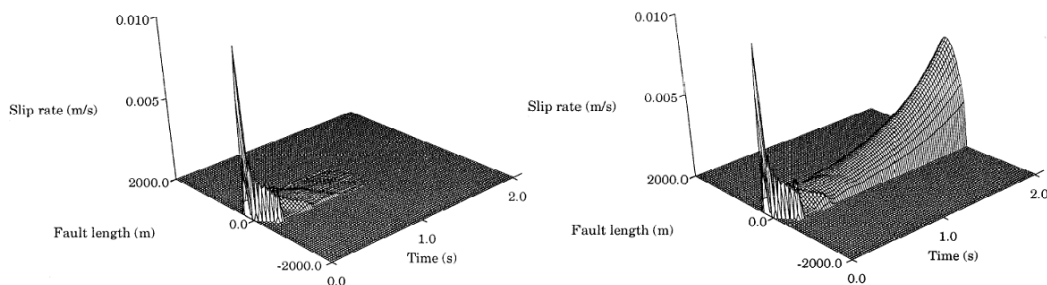


Fig. 6 : Initiation des instabilités dynamiques sur une faille sismique. On montre l'existence d'une longueur critique de glissement qui est le seuil de stabilité : a) pour des valeurs inférieures la solution est stable, b) pour des valeurs supérieures des solutions à croissance exponentielle en temps sont initiées.

1-5 Micromécanique, homogénéisation et modélisation multi-échelle

Acteurs : *CHERCHEURS* : Denis CAILLERIE, René CHAMBON, Cristian DASCALU, Jack LANIER, Gioacchino VIGGIANI, *collaborations internationales* : Claudio TAMAGNINI (Université de Perugia en Italie), Francesco CALVETTI (Politecnico de Milan), David M. WOOD (Université de Bristol, UK), *DOCTORANTS* Gabriela BILBIE, *POST-DOCTORANT* : Eleni AGIASOFITOU, *VISITEURS* : Michela DI FEO, Francesco FROIHO, Piotr GLOWACKI, Stefania LIRER.

Publications : Revues à CL : A-DAS02-929, A-DAS03-933, A-URS05-378, A-DAS02-959, A-DAS04-961, A-TAM05-142, A-CAL03-380 Actes à CL B1-DAS05-127, B-CAL03-920, B-VIG04-615, B-TAM04-611 autres actes et séminaires non listés.

1-5-1 Micromécanique expérimentale des milieux granulaires

Dans la période 2002-2005, cette activité a essentiellement comporté des expériences réalisées en utilisant notre machine de cisaillement $1\gamma 2\varepsilon$, qui permet d'appliquer à un échantillon bidimensionnel (matériau de Schnebeli) des déformations planes générales, c'est à dire deux composantes de déformation normale et une de cisaillement. Nous avons mené avec cette installation des études suivant deux directions nouvelles : d'une part, nous avons étudié l'influence de la forme des « grains » sur le comportement mécanique des milieux granulaires (dilatance, résistance, localisation de la déformation), en réalisant des essais sur des rouleaux à section circulaire et hexagonale (stage de S. Lirer). Actuellement une étude complémentaire est menée avec des mélanges de rouleaux à section circulaire et rectangulaire. D'autre part, des avancées très importantes

ont été réalisées dans les techniques de mesure de la cinématique locale (à l'échelle du grain) au moyen de méthodes d'analyse d'images numériques. Notamment, nous sommes actuellement munis d'outils quasi-automatiques permettant de suivre, tout au long d'un essai, à la fois le déplacement et la rotation des centaines de grains centimétriques (environ 1200) composant un échantillon. Ces développements originaux ont été réalisés par F. Froiio en collaboration avec L. Sibille, de l'équipe « Risques et Vulnérabilité » du laboratoire 3S.

D'autre part une collaboration est en cours avec l'Université de Bristol (D.M. Wood) pour caractériser, avec la machine $1\gamma 2\varepsilon$, les structures de localisation du point de vue des déformations volumiques.

Ces études expérimentales sur les milieux granulaires ont été complétées par des travaux numériques (stage de P. Glowacki) afin de tester l'aptitude de la méthode « Contact Dynamique » (M. Jean, J.-J. Moreau) à prévoir la résistance maximale d'échantillons granulaires soumis à différents chemins de chargement.

1-5-2 Réponse incrémentale d'un sol granulaire idéalisé à des chemins de sollicitation rayonnants

En collaboration avec F. Calvetti (Politecnico de Milan) et C. Tamagnini (Université de Perugia en Italie) nous avons étudié, en utilisant le code aux éléments discrets PFC-3D, la réponse incrémentale d'un sol granulaire idéalisé à des chemins de sollicitation rayonnants (stress probes) à partir de divers états et à la suite de diverses histoires de charge (états soit vierges, soit préchargés). Les stress probes ont été effectués aussi bien dans le plan bissecteur que dans le plan déviatoire. Les résultats obtenus permettent de préciser divers aspects de la non linéarité incrémentale d'un milieu granulaire. En particulier, nos résultats indiquent que la théorie de la plasticité à un seul mécanisme n'est capable de reproduire la réponse incrémentale observée que dans le cas très particulier d'un état initial vierge et de chemins rayonnants contenu dans le plan bissecteur. Une description plus satisfaisante des réponses obtenues dans le cas soit d'histoires de charge plus complexes, soit de stress probing plus généraux, ne pourrait pas être obtenue, à notre avis, qu'en utilisant soit des formulations modifiées de la théorie de la plasticité (e.g., la « plasticité tangentielle » proposée par Hashiguchi en 1993), soit des modèles hypoplastiques.

1-5-3 Modélisation multi-échelle de la rupture et de la localisation des déformations dans les solides

La micro-fissuration est un mécanisme dominant pour la formation des bandes de cisaillement dans les matériaux solides quasi-fragiles. Pour une meilleure compréhension des phénomènes de localisation de la déformation, nous avons considéré un modèle de matériau à deux échelles, chaque cellule élémentaire contenant des micro-fissures. Le comportement macroscopique est complètement régi par des échanges de localisation/homogénéisation avec la microstructure. La méthode d'homogénéisation est numérique, basée sur des calculs en éléments finis. On a montré l'apparition des comportements macroscopiques instables, conséquence de la présence et de l'évolution des microfissures. Nous avons également utilisé le formalisme de l'homogénéisation asymptotique, pour des milieux périodiques microfissurés, pour modéliser l'apparition des déformations localisées et le passage à la rupture.

1-5-4 Inhomogénéités et changements structuraux dans les matériaux solides

La mécanique des forces de configuration constitue un cadre général de modélisation des changements de structure (rupture, transformations de phase...) dans les matériaux. Dans cet esprit, on a développé un nouveau formalisme pour la modélisation thermo-mécanique des changements structuraux, avec des applications à la rupture et aux changements de phase.

Nous avons également étudié les influences thermiques et électriques sur le comportement des structures fissurés ou composites. La connaissance du comportement singulier en présence des inhomogénéités est essentielle pour la fiabilité des structures.

1-5-5 Homogénéisation discrète à la modélisation continue des structures carbonées

L'homogénéisation des milieux périodiques a d'abord été développée pour des milieux continus régis par des équations aux dérivées partielles. Il y a une dizaine d'années, la méthode a été généralisée aux milieux discrets, les premières applications visées étant les grands assemblages de barres, les grandes structures spatiales ou encore les structures du génie civil du type charpente métallique. Le but recherché est de pouvoir modéliser ces structures comprenant un nombre très important de barres élémentaires comme des milieux continus. Comme dans le cas des milieux continus périodiques, la loi de comportement homogénéisée est obtenue par la résolution d'un problème sur une cellule élémentaire qui, dans le cas des milieux discrets, est une structure discrète. La résolution du problème ne nécessite pas la mise en œuvre d'une méthode de discrétisation comme les éléments finis. La sollicitation du problème sur la cellule élémentaire est un tenseur de déformations macroscopiques, la résolution du problème fournit les tensions dans les barres, une formule de passage des tensions à un tenseur des contraintes permet ensuite de déduire le tenseur des contraintes macroscopiques.

Récemment, l'homogénéisation discrète a été mise en œuvre pour déterminer une loi de comportement grandes déformations du myocarde à partir du comportement des cardiomyocytes. Dans ce travail, les myocytes sont modélisés par des bâtonnets élastiques interagissant entre eux par des couples de rappel. Il se trouve que la modélisation considérée pour le myocarde - liaisons élastiques entre nœuds d'un réseau et interactions par couples entre les liaisons - est celle qui est adoptée pour décrire les interactions entre carbones d'un plan de graphite. L'homogénéisation discrète peut donc s'appliquer aussi au modèle de graphène. Dans le cadre des grandes transformations, la loi de comportement macroscopique ne peut être obtenue que numériquement car le problème à résoudre sur une cellule de répétitivité est non linéaire. Dans le cas linéaire des petites transformations, nous avons résolu le problème analytiquement. Le modèle continu équivalent obtenu est celui d'un milieu élastique linéaire et isotrope bidimensionnel.

1-6 Quelques indicateurs d'activité

1-6-1 Publications

Les publications sont regroupées pour le laboratoire dans une autre section de ce rapport.

En ce qui concerne le projet GDR, le tableau ci-dessous donne les statistiques de publications extraites de l'intranet du laboratoire :

TYPE	2002	2003	2004	2005*	total
Articles	11	6	14	14	45
Chapitres	1	1	3	1	6
Conférences invitées	2	4	2	5	13
Actes avec review	5	8	11	8	32
Actes sans review			2	1	3
Thèses		1	2	3	6
Communications sans actes	3	8	8	15	34
Rapports		3	2	5	10
Séminaires	4	13	10	3	30

* forcément incomplet, seules les publications parues ou acceptées étant considérées.

Les publications A sont publiées dans les revues à comité de lecture suivantes :

Pure & applied Geophys. (2), Italian Geotechnical Journal (2), Math. Model. Num. Anal., Rev. Franç. de Génie Civil (6), Rev. Europ. de Génie Civil, Asymptotic Analysis (2), Riv. Italiana di Geotecnica, Int. J. for Num. & Anal. Methods in Geomechanics (6), Comp. Methods in Appl. Mechan. & Engng. (2), J. of Engng. Mathematics, Int. J. for Num. Methods in Engng. (2), Computers & Geotechnics, Mathem. Models & Methods in Appl. Sci., Int. J. Solids & Structures, Phys. of the Earth and Planet. Interiors, Geol. Soc.,

Geophys. Prospect. (2), J. of the Mech. Behav. of Materials, Engng. Struct., J. Mech. Phys. Solids, J. Engng. Mathematics, C.R. Mécanique - Académie des Sciences.

1-6-2 Thèses et HdR soutenues

[T-COL05-362] Coll C. (2005) Endommagement des Roches Argileuses et Perméabilité Induite au Voisinage d'Ouvrages Souterrains, Thèse UJF

[T-HOS05-367] Hosseini M. (2005) Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique d'une roche poreuse en relation avec les problèmes d'excavation, Thèse UJF

[T-ALH05-]Al Holo S. (2005) Etude numérique de la localisation à l'aide de modèles de second gradient : Perte d'unicité et évolution de la taille de la zone localisée, Thèse UJF

[T-MAR04-381] Marelllo S. (2004) Etude du comportement mécanique des argiles raides et des marnes, Thèse UJF

[T-MOU03-369] Mourad A. (2003) Description topologique de l'architecture fibreuse et modélisation mécanique du myocarde, Thèse INPG

Moulet J.-C. (2003) Etude numérique de la bifurcation et de la localisation à l'aide de modèles de second gradient, Thèse UJF

Viggiani G., (2003) Localisation de la déformation et non linéarité incrémentale des géomatériaux, Habilitation à Diriger des Recherches UJF.

1-6-3 Financements Finalisés

Contrats privés	120 k€
Contrat européen	270 k€
GDR (FORPRO)	70 k€
BQR et Quadriennal	15 k€
ACI JC.....	51 kF